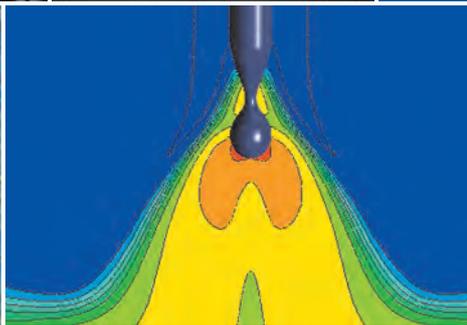
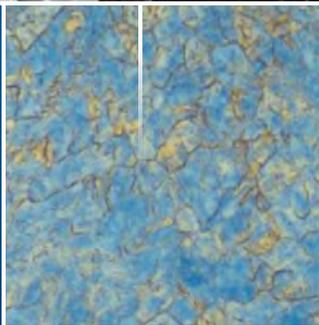
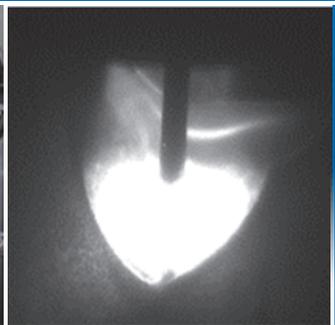


I M B L I C K P U N K T

ISSN 1614-8185



DEUTSCHLANDS elite-INSTITUTE

ISF

RWTHAACHEN UNIVERSITY

HERAUSGEGEBEN VOM INSTITUT FÜR WISSENSCHAFTLICHE VERÖFFENTLICHUNGEN UND DER ALPHA INFORMATIONSGESELLSCHAFT MBH



KANN STAHL ZUSAMMEN- SCHWEISSEN?

HIER PASSIERT'S!

Mehr Infos unter:
szag.com/karriere
#karrierevorwärts



SALZGITTERAG
Mensch, Stahl und Technologie

**STREBE IN ALLEM WAS DU TUST
NACH PERFEKTION.**

HENRY ROYCE
(27. MÄRZ 1863 - 22. APRIL 1933)

Vorwort

Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Reisgen



Abbildung 1:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Reisgen,
Institutleiter

Seit mehr als 65 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 65 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 Diltthey 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 17 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 220 Wissenschaftlerinnen und Wissen-

schaftlern 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 Absol-

ventinnen und 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 Reisinger



Aktiv- und Vakuumlote als Draht, Folie, Pulver oder Paste

Bei der LOT-TEK GmbH profitieren Sie von

fachkundiger Beratung

zügiger Auftragsverarbeitung und

zuverlässiger Lieferung bis zu Ihnen



Tel.: +49 (0) 9131 932 3116

info@lot-tek.de | lot-tek.de

Henkestraße 52 | 91054 Erlangen

Inhaltsverzeichnis

DAS FÜHRUNGSTEAM DES ISF

Das Führungsteam des Instituts für Schweißtechnik und Fügetechnik	7
--	----------

DAS INSTITUT FÜR SCHWEISSTECHNIK UND FÜGETECHNIK (ISF)

Klebtechnik am ISF: Aktuelle Forschung und Ausblick in die Zukunft	8
---	----------

Christoph Beier, Vinzenz Ginster, Maximilian Heym, Robert Seewald, Josef Weiland, Alexander Schiebahn

Schweißrauchemissionen beim Metallschutzgasschweißen	16
---	-----------

Benjamin Ebert, Mirco Olesch, Rahul Sharma

Erweiterung der Anwendungsgebiete beim Laserstrahl-Unterpulver Hybridschweißen	22
---	-----------

Michael Clemens

Elektromobilität – Ohne die Fügetechnik nicht möglich	28
--	-----------

Eric Helfers, Florian Müller, Alexander Schiebahn, Christian Frey, Thomas Krichel

Einfluss der Randbedingungen auf die Schlackenbildung beim MSG-Schweißen von AHSS-Stählen für Automobilanwendungen	32
---	-----------

Alexandros Pipinikas, Rahul Sharma, Matthias Angerhausen

Nachweis der temporären Kapillarstabilität bei EB-Strahlsprungtechnik mittels Röntgeneigenleuchten	38
---	-----------

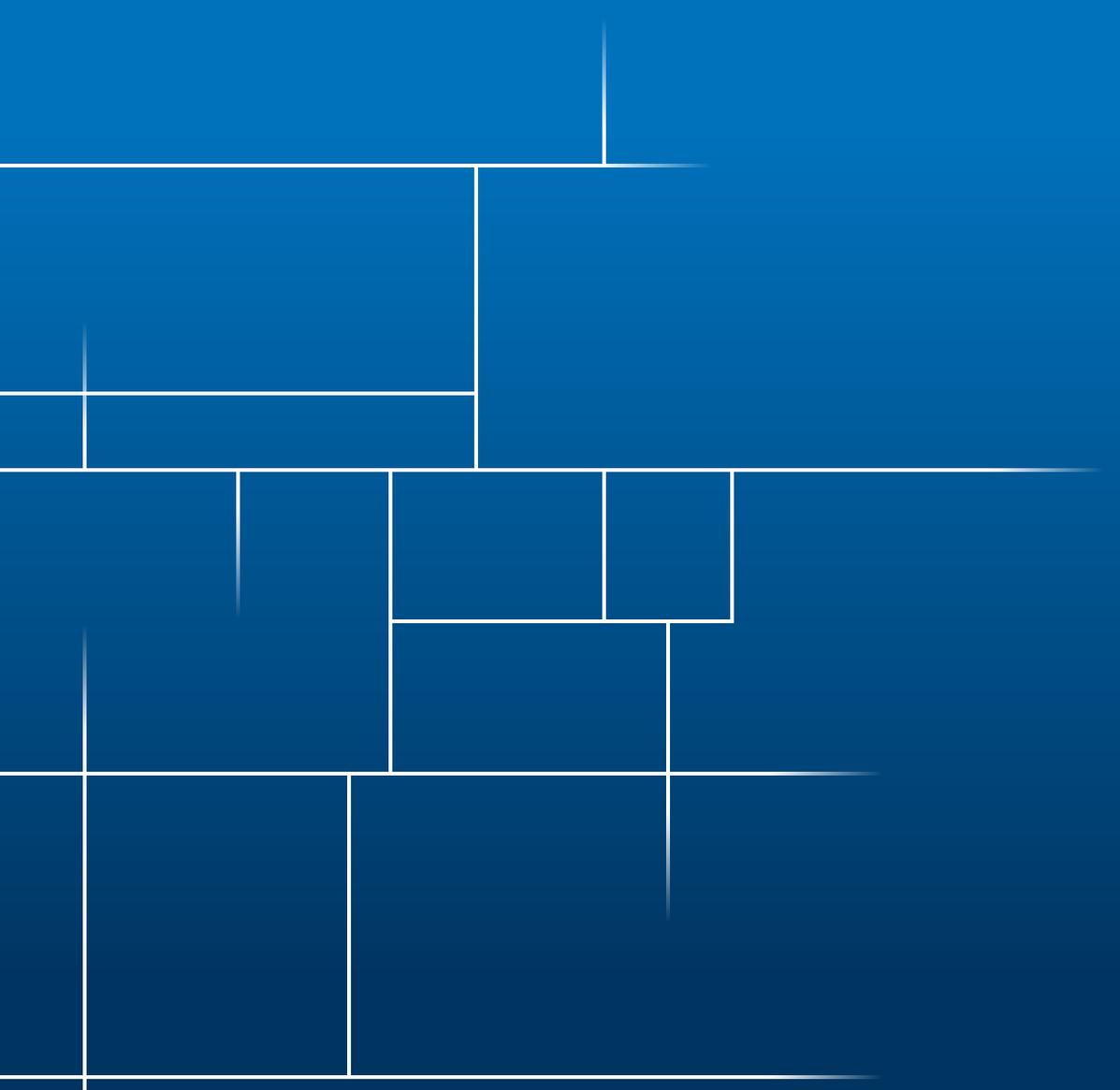
Stefan Gach, Fatma Akyel, Matthias Pfaffenrot

Rührreißschweißen – höchste Schweißnahtqualität und Prozessstabilität für Nichteisenmetalle und Mischverbindungen	44
--	-----------

Pascal Rabe, Alexander Schiebahn

Inhaltsverzeichnis

Numerische Simulation von Lichtbogenschweißprozessen	48
Oleg Mokrov, Sergej Warkentin	
Verzugsreduzierung mittels Legierungsdesign für das Laser- und Elektronenstrahlschweißen	54
Maximilian Gamerding, Fatma Akyel	
Die Widerstandsschweißtechnologie ist ausgeforscht – Oder doch nicht?	60
Maik Epperlein, Alexander Schiebahn	
Additive Fertigung durch Lichtbogenschweißen	64
Max Mierzwa, Rahul Sharma	
Metall-Ultraschallschweißen	68
Florian Müller, Eric Helfers, Alexander Schiebahn	
Automatisiertes Metallschutzgasschweißen – Anwendung optischer Sensorik zur adaptiven Prozessführung	71
Alexander Biber, Rahul Sharma	
Laserstrahlschweißprozess im Vakuum: Potential und Risiken	74
T. Krichel, T. Twiehaus, C. Frey	
Qualitätsüberwachung beim Schweißen durch den Einsatz von Künstlicher Intelligenz	82
Matthias Angerhausen, Guido Buchholz, Marion Purrio	



ISF

**RWTHAACHEN
UNIVERSITY**

Das Führungsteam des Instituts für Schweißtechnik und Fügetechnik

Uwe Reisgen



Abbildung 1:

Die leitenden Mitarbeiter des ISF, von links: Simon Olschok, Leonhard Bergstein, Uwe Reisgen, Alexander Schiebahn, 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.

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 Dr.-Ing. Rahul Sharma betreut als Oberingenieur die Abteilung Lichtbogenverfahren und die Modellierung und Simulation von Fügeprozessen (Abteilung A „Arc“), ferner ist er verantwortlich für Metallografie und Werkstoffprüfung und die E-Werkstatt.

Dr. Simon Olschok ist Oberingenieur für den Bereich Strahlverfahren (Abteilung B „Beam“). Zusätzlich ist er verantwortlich 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, Rührreibschweißen und Klebtechnik eingeordnet. Darüber hinaus ist ihm die IT zugeordnet.

Der ehemalige Bereich „Industrial Services and Solutions“ wurde aufgrund der weiteren Professionalisierung der bilateralen, industriellen Auftragsforschung inzwischen vollständig in die institutsnahe Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH überführt, die seit 2019 von Matthias Angerhausen und Christoph Geffers geleitet wird.

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

Prof. Uwe Reisgen ist seit August 2007 der Institutsleiter des ISF.

KONTAKT

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen
Tel.: +49 (0)241 80-93870
office@isf.rwth-aachen.de
www.wir-fuegen-alles.de

Klebtechnik am ISF: Aktuelle Forschung und Ausblick in die Zukunft

Christoph Beier, Vinzenz Ginster, Maximilian Heym, Robert Seewald, Josef Weiland, Dr.-Ing. Alexander Schiebahn

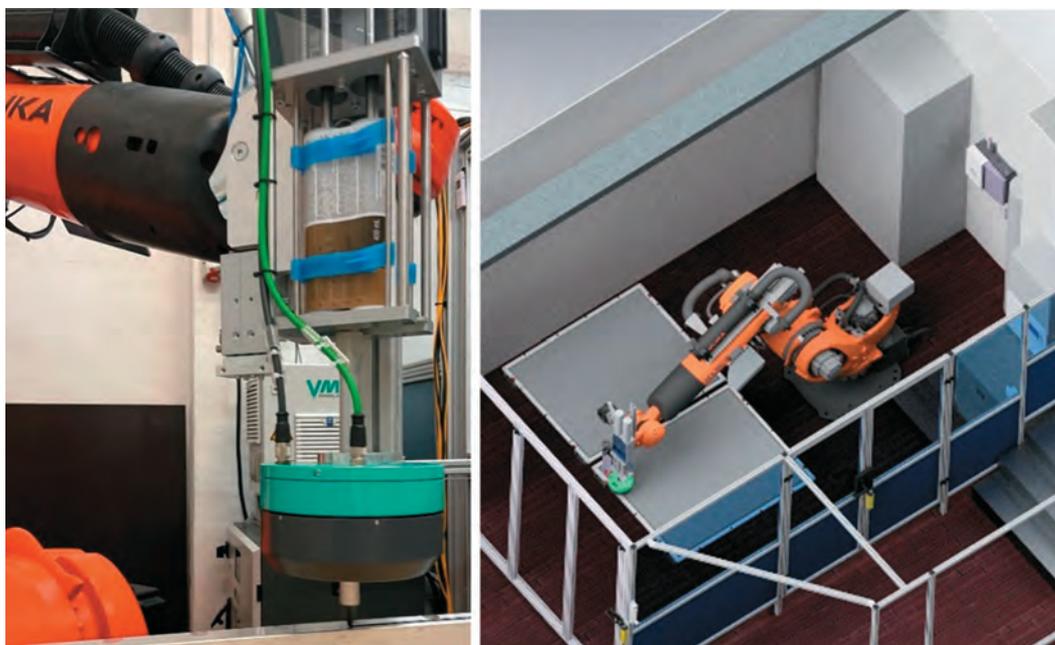


Abbildung 1:
Roboterbasierte Universalanlage zum
Vorbehandeln und Fügen großformatiger
und komplexer Geometrien

Die Abteilung Klebtechnik am ISF beschäftigt sich mit innovativen klebtechnischen und artverwandten Fügeverfahren. Den Schwerpunkt bildet 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 Entfüge- und Reparaturkonzepte für geklebte Verbindungen und Strukturen und des Structural Health Monitorings ebendieser. Weiterhin wird der Einsatz von Klebungen in neuen Technologien, wie bspw. bei der Wasserstoffherzeugung, sowie die produktionstechnische Umsetzung der klebtechnischen Prozesse in Fertigungslinien erforscht.

Kleben ist aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken. Selbsthaftende Notizzettel im Büro, 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 etabliert.

Bekanntere Beispiele hierfür sind das Einkleben von Frontscheiben im Kraftfahrzeugbau, Klebungen in Batteriemodulen, 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 beispielsweise in der Raumfahrt in Satelliten oder in jeder Elektronik.

Aus der kurzen Einleitung wird deutlich, dass die Fügetechnik Kleben

durch ihre universelle Einsetzbarkeit ein extremes Potential aufweist und viele aktuelle Trends erst ermöglicht – in Fachkreisen heißt es sogar, dass die Klebtechnik die Fügetechnik des 21. Jahrhunderts ist.

Die Arbeiten am ISF spiegeln die universellen Einsatzmöglichkeiten der Klebtechnik umfassend wider. Leitthemen sind aktuell die Prozessentwicklung und -optimierung, Vorbehandlungsprozesse zur Adhäsionsverbesserung, die Verbundcharakterisierung, das Structural Health Monitoring (kurz

KONTAKT

Dr.-Ing. Alexander Schiebahn
Tel.: +49 (0)241 80-97233
schiebahn@isf.rwth-aachen.de
www.wir-fuegen-alles.de

SHM) sowie die Entwicklung kreislaufwirtschaftlicher Reparaturstrategien. Für die Bearbeitung der aktuellen Forschungsschwerpunkte wurde am ISF 2022 eine Roboterzelle für großformatige Kleb- und Vorbehandlungsprozesse (bspw. an Batteriekästen für BEV) in Betrieb genommen. Außerdem steht seit 2023 auch ein ultrakurzgepulster Forschungslaser zur klebtechnischen Vorbehandlung zur Verfügung. Für die Analyse von Werkstoffen, Oberflächen und Klebstoffen ist am ISF eine breitgefächerte analytische Ausstattung vorhanden. Dazu zählt neuerdings auch ein Thermogravimetrisches Analysesystem mit Kopplung zu einem FT-IR Spektrometer, um stoffliche Veränderungen, thermische Einflüsse, sowie (Aushärtungs) Reaktionen zu untersuchen. Zur Erweiterung der Testmöglichkeiten wurden außerdem Prüfstände zur Verbundprüfung unter kryogenen Temperaturen, sowie in aggressiven Medien und unter erhöhter Temperatur entwickelt. Nachfolgend wird ein Überblick über die aktuellen Forschungsarbeiten gegeben, sowie ein Ausblick auf zukünftige Forschungsthemen.

Fügekonzeppte zur Reduktion der Herstellungskosten von Elektrolyseuren (H2Giga Verbundprojekt „Stack Revolution“)

Grüner Wasserstoff, welcher mit Energie aus regenerativen Quellen erzeugt wird, ist einer der wichtigsten Träger der Energiewende. Die Herstellung von grünem Wasserstoff aus Wasser und elektrischer Energie erfolgt mittels Elektrolyse. Es sind bereits Elektrolyseure auf dem Markt, welche effizient und zuverlässig arbeiten, allerdings ist die Produktion solcher Anlagen aufgrund in der Vergangenheit geringer Nachfrage und der teuren verwendeten Materialien mit hohen Kosten verbunden. Mit den aktuellen Produktionskapazitäten und Systemkosten kann der für die Energiewende notwendige Bedarf nicht gedeckt werden.

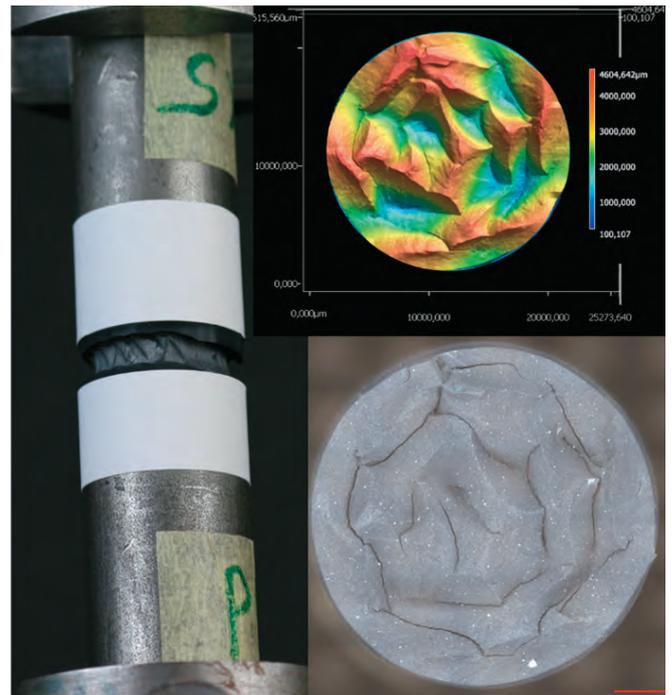
Im Rahmen des Projektes „Stack Revolution“ werden am ISF neue Fügekonzeppte für die nächste Ge-

neration von Elektrolyseuren entwickelt. Ziel ist eine deutliche Reduktion der Produktionskosten. Durch den Einsatz stoffschlüssiger Fügetechniken werden innovative Bauweisen und automatisierte Produktionsprozesse ermöglicht. Um einen dauerhaft sicheren Betrieb der Elektrolyse-Stacks zu gewährleisten, werden die am ISF entwickelten Fügeverbindungen den Betriebsbedingungen des Elektrolyse-Stacks ausgesetzt und der Einfluss auf die Fügeverbindung untersucht.

Für den Scale-Up zur Serienfertigung der Elektrolyseure werden außerdem alle fügetechnischen Produktionsprozesse betrachtet, sowie die automatisierte Umsetzung konzipiert. Dies umfasst sowohl den eigentlichen Fügeprozess als auch die vor- und nachgelagerten Materialbereitstellungs- und Handlingprozesse. In einem Zwischenschritt werden am ISF Elektrolyseurzellen in einer Demonstrationsanlage teilautomatisiert gefertigt. Die Demonstrationslage wurde im Rahmen des Projektes aufgebaut und übernimmt die qualitätskritischen Schritte der Fügeprozesse (s. Abb. 1).

Das Scale-Up der Produktionsprozesse wird durch das ISF aktiv begleitet und eine skalierbare Modellanlage zusammen mit den Projektpartnern errichtet. Für den Fügeprozess werden darüber hinaus Qualitätssicherungskonzepte konzipiert und validiert. Dazu zu werden Prozessparameter inline erfasst und überwacht. Darüber hinaus wird die zerstörungsfreie Prüfung der Fügeverbindung und untersucht und Konzepte zur weiteren Inlineprüfung erarbeitet.

Das Projekt „Stack Revolution“ wird durch das BMBF im Rahmen der Wasserstoff-Leitprojekte im Projektverbund „H2Giga“ unter der Projektnummer 03HY102E gefördert. Dem Deutschen Bundestag, dem BMBF und dem Projektträger Jülich gilt unser Dank. Außerdem bedanken sich die Autoren bei allen beteiligten Projektpartnern.



Auslegung von Glas-Metall Klebverbindungen im Bauwesen (Projekt „Glaskleben II“)

Abbildung 2: Bruchbildanalyse einer elastisch geklebten Kopfgugprobe

Lastabtragende geklebte Verbindungen benötigen in Lastabtragende Klebverbindungen gewinnen – vor allem im Bauwesen – immer mehr an Bedeutung. Für eine konsistente Auslegungsmethodik fehlt es im konstruktiven Glasbau allerdings an geeigneten Bemessungsmodellen, die das hyperelastische Materialverhalten von Silikonklebungen vollständig erfassen.

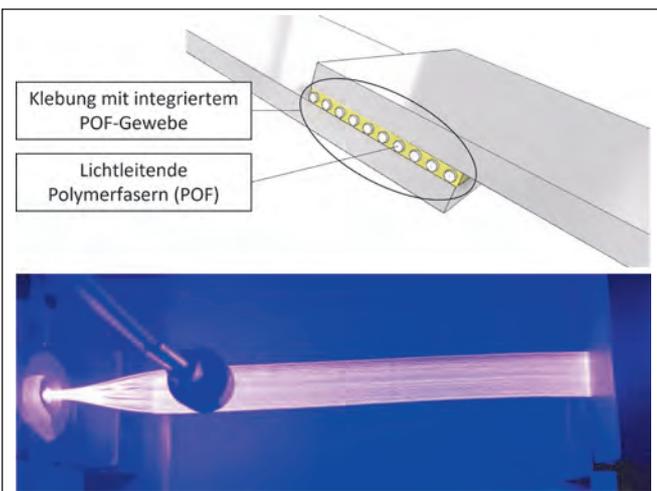
Das übergeordnete Forschungsziel ist es, eine Methodik und Lösungsansätze zur adäquaten Berechnung bis in den Grenzzustand der Tragfähigkeit (Ultimate Limit State, ULS) von Silikonklebungen im Bauwesen aufzustellen. Um die Prognostizierbarkeit des ULS zu ermöglichen, ist zunächst die genaue Definition des Versagenszustands notwendig. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse können dann zur Weiterentwicklung eines im bereits erfolgreich abgeschlossenen Projekt Glaskleben (IGF-Nr: 19158N) von den Forschungsstellen entwickelten Materialmodells verwendet werden, um den zugrundeliegenden Grenzzustand beschreiben zu können. Die dazu bislang fehlenden Festig-

keits- und Tragfähigkeitsberechnungen sind Gegenstand des Forschungsprojektes. Der Forschungsschwerpunkt am ISF liegt in der experimentellen Kennwertermittlung zur Charakterisierung des hyperelastischen Materialverhaltens von Silikonklebstoffen. Insbesondere liegt der Fokus auf die Untersuchung des Materialversagens, bei dem neben der makroskopischen Rissbildung auch das Phänomen der Materialschädigung durch Bildung von Kavitäten beobachtet wird (s. Abb. 2).

Die Forschungsergebnisse werden in einen technischen Leitfaden überführt, um ein praxistaugliches Anwendungskonzept für den industriellen Anwender zu erstellen. Dies ermöglicht Projektpartnern und kmU eine direkte Umsetzung der Forschungsergebnisse, ohne zum Teil kostenintensive Investitionen tätigen zu müssen.

Das IGF-Projekt 21.348 N 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 Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Dem Deutschen Bundestag, dem BMWK und den Arbeitsgruppen der DECHEMA gilt unser Dank. Außerdem bedanken sich die Autoren bei allen beteiligten Projektpartnern.

Abbildung 3:
oben: Skizze einer Überlappklebung mit integriertem optischem Gewebe;
unten: spektrometrische Vermessung eines Seitenlichtgewebes.



Einsatz von UV-Licht und faseroptischen Textilien zur Aushärtung von Klebstoffen (Projekt „OpTexBond“)

Lange Aushärtungszeiten von Klebstoffen, oftmals einige Stunden bis hin zu mehreren Tagen, sind ein wesentliches Defizit der Klebtechnik. UV-härtende Klebstoffe ermöglichen eine vollständige Aushärtung innerhalb von Sekunden, benötigen aber mindestens einen lichtdurchlässigen Fügepartner. Nach aktuellem Stand der Technik ist daher der Einsatz von UV-härtenden Klebstoffen für intransparente Fügepartner wie Metalle oder zahlreiche Kunststoffe nicht möglich.

Das Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens OpTexBond ist die Entwicklung einer Methodik, mit der UV-härtende Klebstoffe, und damit deren schnelle und effiziente Aushärtung, für strahlungsintransparente Fügepartner eingesetzt werden können. Dafür werden geeignete faseroptische Textilien, eine industrietaugliche Lichteinkopplung und der dazugehörige neuartige Fügeprozess entwickelt, mit dem Ziel, die erforderliche Lichtleistung schnell und homogen über die gesamte Klebfläche in den Klebstoff zu induzieren (s. Abb. 3).

Für die Textilentwicklung werden dünne polymeroptische Fasern (POF) ($\varnothing 12 \mu\text{m} - 250 \mu\text{m}$) eingesetzt, um entsprechend anwendungsnahe Klebschichtdicken im Bereich von $200 \mu\text{m} - 400 \mu\text{m}$ adressieren zu können. Für die Einkopplung der UV-Strahlung in das Textil wird eine geeignete UV-Lichtquelle (z. B. ein Diodenlaser) identifiziert und ein effizientes, reproduzierbares und betriebssicheres Kopplungselement entworfen. Die polymeren Lichtwellenleiter werden durch verschiedene Verfahren derart modifiziert, so dass eine homogene und für die Klebstoffaushärtung hinreichend intensive, radiale Lichtemission erreicht wird. Eine Oberflächenvorbehandlung des Textils wird in Kombination mit einer geeigneten Materialauswahl der Fasersysteme für die Optimierung der Adhäsionseigenschaften zwischen Klebstoff und Textil eingesetzt. In diesem Rahmen werden die Anwen-

dungsgrenzen der OpTexBond-Technologie identifiziert und mögliche Prozessfenster erarbeitet. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens sollen als übergreifendes Ziel Akzeptanzbeschränkungen gegenüber der Klebtechnik aufgrund der langen Aushärteweiten ausräumen und so neue Anwendungsfelder erschließen.

Im abgeschlossenen Projekt FiberKleb (IGF-Nr. 20.382) haben die Forschungseinrichtungen ISF und ITA bereits an den genannten Defiziten geforscht und Polymerfasern als Lichtleiter in radikalisch härtende Klebungen integriert. Kommerziell erhältliche Seitenlichtfasern sowie erste Methoden einer für die Klebanwendung zielgerichteten Seitenlichtaktivierung, wie bspw. ein manuelles Einbringen von Mikroschnitten, wurden erprobt und ein Versuchsaufbau zur Bewertung der radialen Lichtauskopplung im Klebstoffversuch konzipiert. Im Nachfolgerprojekt OpTexBond werden die bisherigen Erkenntnisse aufgegriffen und zielgerichtet auf den Einsatz von faseroptischen Bandgeweben übertragen, um damit den innovativen Fügeprozess weiterzuentwickeln.

Das IGF-Vorhaben Nr.: 22.727 N 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 Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Dem Deutschen Bundestag, dem BMWK und den Arbeitsgruppen der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. gilt unser Dank. Außerdem bedanken sich die Autoren bei allen beteiligten Projektpartnern.

Zustandsüberwachung von Klebungen durch Integration optischer Polymerfasern (Projekt „KlebPOF“)

Nach DIN EN ISO 9001 und DIN 2304 ist das Kleben ein spezieller Prozess,

der einer gesonderten Normung bedarf. Diese Einstufung beruht unter anderem darauf, dass Klebverbindungen nicht völlig zerstörungsfrei geprüft werden können. Daraus ergibt sich die Motivation, Klebungen kontinuierlich zu überwachen, um ihren strukturellen Zustand zu erfassen und – damit verbunden – eine sichere Kraftübertragung zu gewährleisten.

Das in diesem Projekt untersuchte Sensorkonzept der Zustandsüberwachung von Klebungen basiert auf der Integration einer Polymer-Optischen Faser (kurz: POF) in die Klebung. Das Prinzip ist in **Abbildung 4** anhand einer Rohr-Muffe-Klebung skizziert. Die ähnlichen mechanischen Eigenschaften zwischen POF und Klebstoff (beides Kunststoffe) führen dazu, dass Beanspruchungen des Klebstoffs auf die POF übertragen werden. Diese erzeugen geometrischen Änderungen, Dehnungen sowie Spannungen im lichtleitenden Material und der Kern-Mantel-Grenzfläche. Die Auswirkungen werden hinsichtlich der transmittierten und reflektierten Lichtleistung sowie deren Verteilung im Nah- und Fernfeld untersucht und für die Zustandsüberwachung interpretiert.

Eine wesentliche Aufgabe der Untersuchungen ist es, die belastungsspezifischen Phänomene für die Änderung der optischen Eigenschaften der POF zu untersuchen und diese für die Zustandsüberwachung zu nutzen. Im unteren Teil von **Abbildung 4** ist ein Zeit-Kraft- und Zeit-Transmissionsverlauf einer Klebung dargestellt. Es zeigt sich ein nahezu lineares Verhalten zwischen den Verläufen. Die SHM-Ampel wechselt ihren Zustand von grün = i.O. nach gelb = Klebung beobachten, anhand eines Transmissionsgrenzwertes. Ebenso erfolgt der Wechsel in den roten Bereich = n.i.O. anhand eines Transmissionsgrenzwertes. Im roten Bereich muss die Klebung überprüft bzw. die aufgebrachte Kraft reduziert werden. Die SHM-Ampel stellt eine einfache Methode zur Zustandsüberwachung von Klebungen anhand von Transmissionsgrenzwerten dar.

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes dienen zur strukturellen Überwachung von Klebungen und können ein Versagen der Klebung rechtzeitig detektieren. Zudem können damit Langzeitdaten von Klebungen aus dem Feld erfasst werden, was zur Schließung der Wissenslücke – Ermüdungsverhalten von Klebstoffen – beitragen wird. Hierdurch können für KMU neue Anwendungsfelder branchenübergreifend erschlossen werden, z. B. in der Bau-, Windenergieanlagen-, Luft- und Raumfahrt-, Schienen- und Nutzfahrzeugindustrie sowie im klassischen Maschinen- und Anlagenbau. Durch die erwarteten Projektergebnisse profitieren insbesondere KMU, welche Entwickler, Installateur, Ingenieurdienstleister oder Endanwender des KlebPOF-Sensorkonzepts sind.

Das Projekt KlebPOF wurde in sehr guter Zusammenarbeit mit dem Polymer Optical Fiber Application Center der Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm erfolgreich bearbeitet. Weitere gemeinsame Forschungsaktivitäten sind in Planung.

Das IGF-Vorhaben Nr.: 21.314 N 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 Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Dem Deutschen Bundestag, dem BMWK und den Arbeitsgruppen der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. gilt unser Dank. Außerdem bedanken sich die Autoren bei allen beteiligten Projektpartnern.

Ausblick in die Zukunft

Zustandsüberwachung struktureller Klebungen unter mechanischer und klimatischer Kurz- und Langzeitbeanspruchung (Projektantrag: „KlebSHM“)

Neben dem Einsatz faseroptischer Sensorik (Projekt KlebPOF) verfolgt

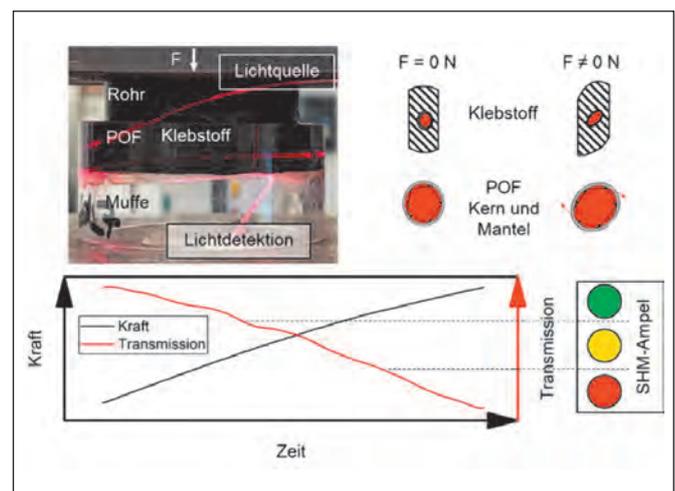
das ISF weitere methodische Ansätze zur Zustandsüberwachung von Klebverbindungen.

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Strukturmechanik und Leichtbau der RWTH Aachen wird ein strukturell-mechanischer Ansatz verfolgt, der auf sehr empfindlichen Zustandsindikatoren an der Fügeoberfläche basiert. Dieser Ansatz ermöglicht mit geringem messtechnischem Aufwand (Einsatz von Dehnungsmessstreifen) eine effiziente Detektion von Schädigungen in der Klebung. In dem abgeschlossenen IGF-Projekt SmartSHM (IGF-Nr. 19.909) wurde die Machbarkeit der Methode bereits erfolgreich nachgewiesen. In dem derzeit beantragten Projekt KlebSHM wird die Methode hinsichtlich ihres Langzeitverhaltens sowie unter verschiedenen Umgebungsbedingungen, insbesondere Umgebungstemperaturen, untersucht und validiert.

Experimentelle Untersuchung von Klebungen in tiefkalter Umgebung

Auch in der Raumfahrt wird die Klebtechnik als vielseitiges Fügeverfahren vermehrt eingesetzt, um anspruchsvolle Hochleistungsmaterialien und Multimaterialstrukturen sicher und leichtbaugerecht zu fügen. Die Grundtemperatur des Universums liegt mit 2,73K nur wenige Kelvin über dem absoluten Temperaturnullpunkt. Während einige wissenschaftliche Instrumente wie Infrarotteleskope oder Magnetspektrometer

Abbildung 4: POF-integrierte Rohr-Muffe-Klebung, Sensorkonzept, SHM-Ampel



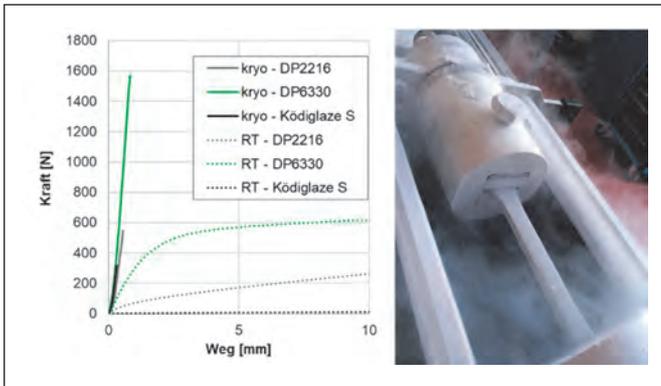
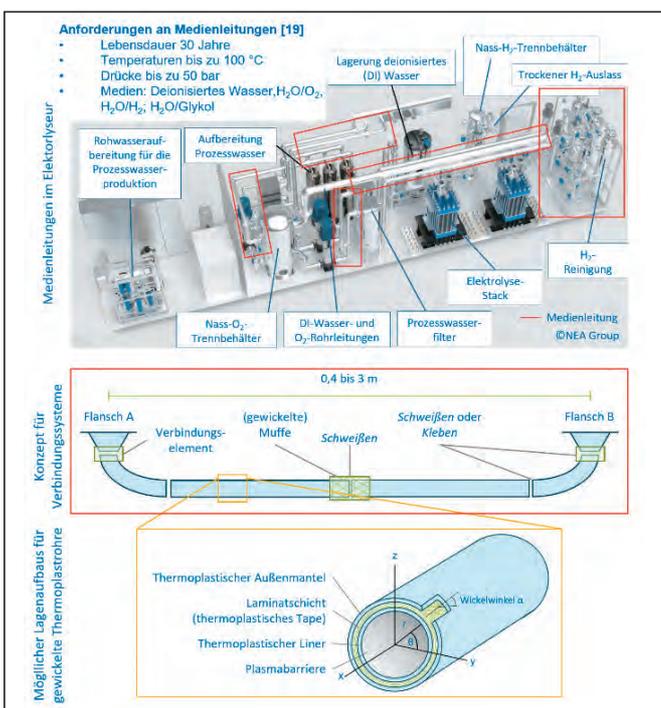


Abbildung 5:
Klebtechnische Zugprüfungen am Tieftemperaturprüfstand des ISF

bei diesen extremen Temperaturen betrieben werden, erfahren Raumfahrzeuge abhängig von der Lage des Erdschattens Temperaturschwankungen von bis zu 340 K.

Das Materialverhalten von Polymeren ist stark temperaturabhängig. Während oberhalb der Glasübergangstemperatur die Polymerstruktur in einen annähernd elastisch-verformbaren Zustand übergeht, neigen Polymerwerkstoffe in kryogener Umgebung zu einer Versprödung, wodurch die elastischen Eigenschaften der Polymere drastisch verringert werden. Zudem führen unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten von polymeren und metallischen Werkstoffen zu mechanischen Spannungen im Fügeverbund.

Abbildung 6:
Modell einer Elektrolyseanlage inklusive Peripherie sowie schematische Darstellung der Fügeaufgaben



Da das mechanische Klebstoffverhalten in kryogener Umgebung bislang wenig erforscht ist, wurde am ISF ein Prüfstand entwickelt, der die experimentelle Untersuchung von geklebten Proben in flüssigen Stickstoff ermöglicht (s. Abb. 5).

Die Erkenntnisse, die aus den Versuchen des Tieftemperaturprüfstands resultieren, sind nicht ausschließlich auf den Raumfahrtsektor beschränkt. Weitere innovative Anwendungsfelder ergeben sich durch die zunehmende Verwendung von flüssigen Kryogenen, wie beispielsweise Wasserstoff in Bezug auf nachhaltige Mobilitätskonzepte sowie dem Themengebiet der Hochtemperatur- und Niedertemperatursupraleiter, welche ihre einzigartigen Materialeigenschaften bei Einsatztemperaturen von ca. -135°C [138 K] bis -264°C [9,2 K] erreichen. Somit können wertvolle Erkenntnisse für die Klebtechnik gewonnen und neue Anwendungsfelder erschlossen werden.

Entwicklung großserienfähiger Kunststoff-Verbindungssysteme zur Führung von Medien in Elektrolyseur- und Brennstoffzellensystemen

Neben Fügeprozessen für die Wasserstoffherstellung beschäftigt sich das ISF ebenfalls mit den Fügeprozessen für die Peripherie von Brennstoffzellen und Elektrolyseanlagen. In diesen Systemen entfallen bis zu 50% der Anlagenkosten auf die Anlagenperipherie, wie die Leitungen zum Führen der Medien. Diese werden nach aktuellem Stand aus Edelstahl gefertigt und leisten hinsichtlich der Produktions-, Transport- und Rohstoffkosten einen maßgeblichen Beitrag zu den hohen Anlagenkosten.

Aus diesen Gründen sollen die metallischen Komponenten der Anlagenperipherie durch thermoplastische faserverstärkte Kunststoffrohre (FVK) ersetzt werden, was laut aktuellen Studien zu einer Kostensenkung von etwa 60% führen kann. Da die Peripherie bei größeren Anlagen vor Ort individuell verlegt werden muss,

ist ein Fügen von einzelnen Abschnitten unerlässlich. Allerdings existieren noch keine Kenntnisse über die erzielbaren Verbundfestigkeiten und Dichtigkeiten solcher Verbindungen unter den Betriebsbedingungen in der Brennstoffzelle, bzw. im Elektrolyseur.

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) der RWTH Aachen und der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) soll diese Wissenslücke mit diesem Projekt geschlossen werden (s. Abb. 6).

Neben der Herstellung und Erprobung der Rohre, welche neben den metallischen Flanschen als Fügepartner dienen, muss eine geeignete Vorbehandlung für diese beiden Fügepartner gefunden werden, um ausreichende Festigkeiten, sowie eine Langzeitbeständigkeit zu gewährleisten. Zudem werden Untersuchungen hinsichtlich der Beständigkeit des verwendeten Klebstoffs unter den gegebenen Bedingungen durchgeführt. Nach den grundlegenden Untersuchungen auf Prüfkörperebene findet der Transfer auf die Rohrgeometrie inklusive weiterer Bauteilprüfungen statt. Abschließend wird eine teilmechanisierte Vorrichtung entwickelt, mit welcher der Fügeprozess vor Ort reproduzierbar und qualitätssicher durchgeführt werden kann. Abschließend wird eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt.

Damit liefert dieses Projekt ein Komplettpaket zur Substitution teurer Anlagenperipherie, um die Wasserstoffelektrolyse günstiger zu gestalten und somit einen signifikanten Beitrag zur wirtschaftlichen Produktion und Verwendung von grünem Wasserstoff zu leisten.

Prozesssichere Oberflächenbehandlung und Schnelltrocknung von Polyamiden für das Kleben (Projektantrag „HydroAmid“)

Polyamide werden in allen Industrien, insbesondere in der Elektronik- und Automobilindustrie eingesetzt und in der Regel klebend verbunden. Für eine sichere Klebung muss Polyamid

allerdings vorbehandelt werden. Gleichzeitig besitzen Polyamide eine sehr hohe Aufnahmefähigkeit für Wasser. Der Wassergehalt im Polyamid kann einen starken Einfluss auf die Effektivität eines Vorbehandlungsprozesses haben. Weiterhin kann Wasser im Bauteil mit Klebstoffkomponenten reagieren und die Klebschicht dadurch schwächen. Gegebenenfalls werden Komponenten energie- und zeitintensiv rückgetrocknet, um den Einfluss von Wasser und resultierende Beeinflussung der Klebung zu vermeiden.

Das übergeordnete Ziel des Projekts ist, Vorbehandlungsprozesse zu entwickeln, die unabhängig vom Ausgangszustand eine Oberfläche mit optimalen Eigenschaften für eine sichere Klebung herstellen. Dadurch können Polyamide auch für produzierende Unternehmen ohne Ressourcen und Knowhow in der Klebtechnik klebend gefügt werden (s. Abb. 7).

Möglich gemacht wird ein solcher universaler Prozess durch die Trocknungswirkung von Vorbehandlungsprozessen. Polyamidkomponenten können auf der gleichen Anlage getrocknet und vorbehandelt werden, für feste und langzeitstabile Klebungen. Daher soll in diesem Projekt genau diese Trocknungswirkung tiefgreifend untersucht werden. Dabei wird durch die Verbindung von mechanischen und analytischen Untersuchungen ein Verständnis der ablaufenden Effekte auf Bindungsebene, sowie die Auswirkungen auf Adhäsions- und Klebeigenschaften geschaffen. Hierfür werden verschiedenste Einflussfaktoren (Material, Klebstoff, Alterung etc.) betrachtet und die Trocknungswirkung gezielt auf relevante Größen (Wirktiefe, Wirkdauer etc.) und Prozessgrenzen (Energieeintrag etc.) untersucht. Durch das geschaffene Wissen über die Vorgänge wird ein Leitfaden erstellt, der Anwendern die Auslegung von Vorbehandlungsprozessen für Polyamide vereinfacht.

Durch die Projektergebnisse und den zu entwickelnden Leitfaden wird die Auslegung von Vorbehandlungsprozessen

für Polyamide zukünftig mit weniger Aufwand verbunden sein und damit kostengünstiger. Der Einstellungs- und Testaufwand wird deutlich verringert. Zudem können Rücktrocknungsprozesse in Öfen substituiert und somit Energiekosten und Durchlaufzeiten erheblich verringert werden. Auch die Prozessfähigkeit und Qualitätssicherheit der Vorbehandlungsprozesse wird gesteigert. Produktausfälle aufgrund von Abweichungen des Anlieferungszustands werden damit ein Thema von gestern.

Entwicklung eines geregelten Entfügeprozesses von geklebten Kunststoff- und Mischverbindungen mittels Laser zur qualitätssicheren Neuklebung wiederverwendbarer Bauteile für Reparatur und Reuse im Sinne der Kreislaufwirtschaft (Projektantrag „CircleBond“)

Auf Grund der hohen Belastbarkeiten der angewendeten Klebstoffsysteme können diese im Reparaturfall oder für das Recycling nur schwer gelöst werden, ohne die gefügten Bauteile zu zerstören. Im Reparaturfall müssen dann ganze Baugruppen ersetzt werden, obwohl einzelne Komponenten eigentlich wiederverwendet werden könnten, wenn eine Beschädigung beim Trennen vermieden wird. Ein bekanntes Beispiel dafür ist das Smartphone. Häufig wird das Display oder die Rückseite beim Öffnen zum Tausch von Komponenten beschädigt und muss ersetzt werden.

Um eine Klebung zu lösen, muss eine hohe Kraft aufgebracht werden, um die starken Bindungen zwischen dem Klebstoff und den Fügepartnern zu überwinden. Die hohe Kraft ist bei Klebungen mit Kunststoffpartnern problematisch, da diese eine ähnliche Festigkeiten wie der Klebstoff selbst besitzen. Im Projekt CircleBond soll ein Prozess zum laserbasierten Entfügen von geklebten Kunststoff- und Mischverbindungen entwickelt werden. Dabei wird die Eigenschaft vieler Kunststoffe und Gläser für eine teilweise Durchlässigkeit der Laserstrahlung genutzt. Der Klebstoff wird

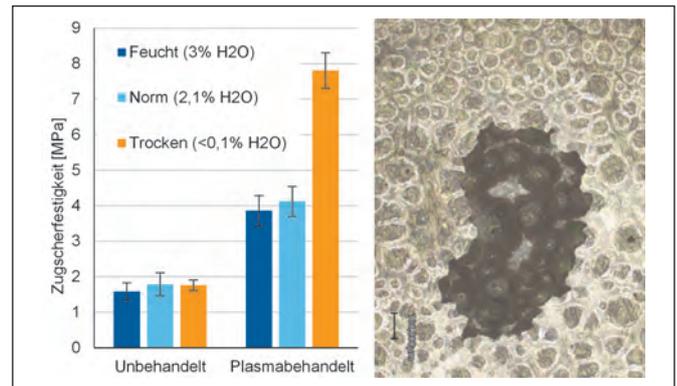


Abbildung 7: Vorbehandlungswirkung in Abhängigkeit des Wassergehalts (links) und Defekte (Blasen) in Klebschicht durch Reaktion mit Wasser (rechts)

mit dem Laserstrahl kurzzeitig stark erhitzt, ohne dabei den Fügepartner selbst thermisch zu schädigen. Mit einer Pyrometerüberwachung sollen die erreichten Temperaturen im Klebstoff überwacht und der Laserprozess geregelt werden, um eine Überhitzung und Beschädigung der Fügepartner zu vermeiden. Durch die Schwächung des Klebstoffes können die Fügepartner mit geringeren Kräften getrennt werden. Im Anschluss sollen die nach dem Laserprozess entfügten Kunststoffpartner wiederverklebt und die erneute Klebung evaluiert werden (s. Abb. 8).

Mit Abschluss des Projektes wird die industrielle Prozessfähigkeit des laserbasierten Entfügeprozesses bewiesen sein. Bauteile, die beim Auftreten eines Defektes heutzutage der Entsorgung zugeführt werden, können damit zukünftig ressourceneffizient repariert und wiederverwendet und der Lebenszyklus der Produkte erheblich verlängert werden.

Erweiterung der Auslegungsmethodik von Glas-Metall Klebverbindungen um Zeit- und Temperaturabhängigkeit (Projektantrag „Glaskleben III“)

Während in den Projekten Glaskleben I und II der Schwerpunkt auf der Beschreibung des Last-Verformungs-

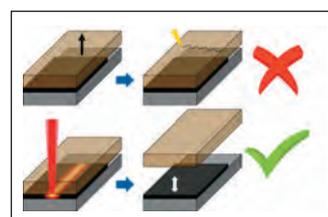


Abbildung 8: Prinzipskizze laserbasierter Entfügeprozess

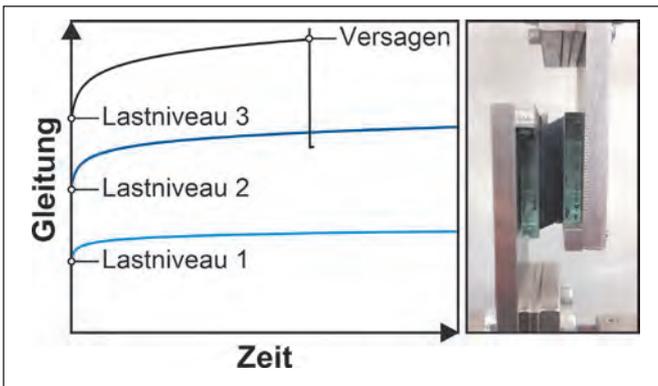


Abbildung 9:
Kriechverhalten eines Silikonklebstoffes für unterschiedliche Lastniveaus

verhaltens mit Berücksichtigung der Hyperelastizität sowie der systematischen Erfassung und Modellierung der Versagensmechanismen gelegt wurde, wird im Rahmen von Glaskleben III das zeit- und temperaturabhängige Materialverhalten adressiert.

Die experimentelle Ermittlung bemessungsrelevanter Größen, wie Festigkeit oder Steifigkeit, erfolgt in der Regel an quasistatischen Versuchen. Aufgrund ihres molekularen Aufbaus weisen Polymerwerkstoffe jedoch ein ausgeprägtes zeitabhängi-

ges Werkstoffverhalten auf, welches einen direkten Einfluss auf die Bemessungsgrößen nimmt. Erste Untersuchungen zeigen bereits eine starke Abhängigkeit der Festigkeit des Klebstoffes von der der Prüfung zugrunde gelegten Geschwindigkeit sowie ein komplexes Kriechverhalten. Da die Zeitabhängigkeit bekannt, jedoch nicht näher quantifiziert ist, wird diese implizit durch die hohen Methodenfaktoren der ETAG 002 berücksichtigt. Insbesondere die Langzeitfestigkeit von unter Dauerlast stehenden Klebfugen ist bisher nicht systematisch untersucht, weshalb ungestützte Systeme in Deutschland nur unter Auflagen und mit hohem methodischen Sicherheitsfaktor (Faktor 40 – 60) genehmigt sind. Für eine realitätsnahe und wirtschaftliche Bemessung sind zeitabhängige Effekte bei der Auslegung jedoch unbedingt zu berücksichtigen (s. Abb. 9).

Das Ziel des vorliegenden Forschungsprojekts ist die Weiterentwicklung des Materialmodells zur Simulation hyperelastischer Klebun-

gen, welches bereits in den vorangegangenen AiF-Projekten in Zusammenarbeit mit den Instituten für Stahlbau (STB) und für Angewandte Mechanik (IFAM) der RWTH Aachen entwickelt worden ist. Dabei soll gezielt das zeit- und temperaturabhängige Verhalten des Klebstoffs experimentell erfasst und in geeigneter Weise in das vorhandene kontinuumsmechanische Modell integriert werden.



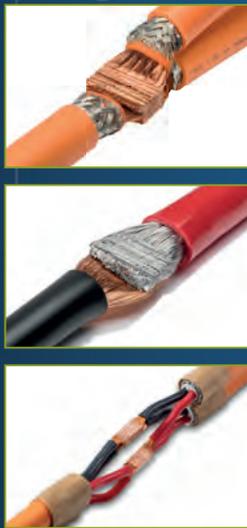


ultra fast. ultra strong. **ultrasonic.**
#teamsono

Sonosystems®

ULTRASONIC WELDING BY SCHUNK SONOSYSTEMS

SPLICE WELDING



TERMINAL WELDING



IGBT WELDING



BATTERY WELDING



Follow us on

LinkedIn

@Schunk Sonosystems

www.schunk-sonosystems.com

Schweißrauchemissionen beim Metallschutzgasschweißen

Benjamin Ebert, Mirco Olesch, Rahul Sharma

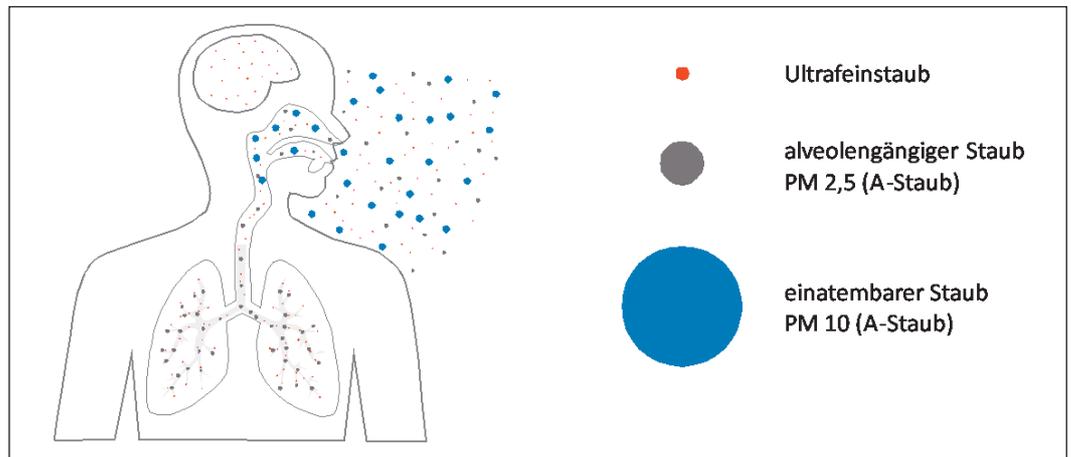


Abbildung 1:
Größenordnung der gesundheitsschädlichen Schweißrauchpartikel [3]

Schweißrauche können je nach Menge und Zusammensetzung zu einer unzulässigen Exposition und Gefährdung der Gesundheit des schweißtechnischen Personals führen. Aus diesem Grund werden am ISF zum einen Emissionentstehung beim MSG-Schweißen und zum anderen die Effektivität von Absaugmaßnahmen untersucht.

Einleitung

Beim MSG-Schweißen treten Schweißrauche als gas- und partikelförmige Gefahrstoffe auf, die das schweißtechnische Personal und beistehende Personen gefährden können. Die partikelförmigen Stoffe des Schweißrauches sind eine disperse Verteilung kleinster fester Teilchen in der Luft (Aerosole), die beim Einatmen je nach ihrer Größe bis zu den Lungenbläschen (Alveolen) vordringen und dort die Gesundheit der betroffenen Person gefährden können (**Abbildung 1**). Die chemische Zusammensetzung des Schweißrauches ist hauptsächlich abhängig von den eingesetzten Werkstoffen und beeinflusst zusammen mit der Konzentration des Schweißrauches sowie der Expositionszeit maßgeblich das Schädigungspotential. [1, 2]

Für Schweißrauche wird im Rahmen der Technischen Regeln für Gefahr-

stoffe (TRGS) 528 [1] das STOP-Prinzip als Richtlinie für Präventionsmaßnahmen beschrieben. Dabei sind die Maßnahmen hierarchisch zu sehen und unterteilen sich in die Substitution von Verfahren und Schweißprozessen, technische Maßnahmen wie Absaugtechnologien bis hin zu organisatorischen und persönlichen Schutzmaßnahmen.

An erster Stelle steht nach Festlegung des Schweißverfahrens die Auswahl einer geeigneten Prozessvariante, wie zum Beispiel das Impulsschweißen. Die Wahl der Schweißparameter beeinflusst dabei maßgeblich die Menge der Schweißrauchemission. Trotz prozessseitiger Emissionsvermeidungsstrategien ist in der Regel der Einsatz einer Schweißrauchabsaugung erforderlich, um unzulässige Schweißrauchexpositionen zu vermeiden. Das ISF Aachen adressiert mit Forschungen zu dem Einfluss von Schweißparametern auf die Emis-

sionsentstehung und der Effektivität von Absaugtechnologien unter verschiedenen Randbedingungen die ersten beiden Stufen des Hierarchiekonzeptes zur Gefährdungsminimierung. Darüber hinaus werden mit der Bestimmung von Partikelkonzentrationen in der Raumluft auch Messungen der Exposition durchgeführt, um beispielsweise die Ausbreitung von Schweißrauch innerhalb einer Arbeitsumgebung oder die Wirkung von Schutzmaßnahmen abschätzen zu können. In diesem Beitrag werden die parameterspezifischen Einflussfaktoren auf die Emissionentstehung und die Effektivität einer brennerintegrierten Absaugung beim MSG-Schweißen beleuchtet. Die durchgeführten Versuche wurden mit einer 1,2mm Drahtelektrode EN ISO 14341-A: G 3Si1 und dem Schutzgas DIN EN ISO 14175: M21-Arc-18 auf unlegierten Baustahl S235JRC mit einer EWM Titan XQ400 puls Stromquelle durchgeführt.

KONTAKT

Dr.-Ing. Rahul Sharma
Tel.: +49 (0)241 80-96267
sharma@isf.rwth-aachen.de
www.isf.rwth-aachen.de

Schweißrauchemissionsraten beim MSG-Schweißen

Beim Lichtbogenschweißen treten zwangsläufig partikelförmige Schweißrauchemissionen auf, die mit Hilfe einer Rauchkammer eingefangen und auf einem Filter gesammelt werden können. Wird die Schweißrauchemission auf die Schweißzeit bezogen, so ermöglicht die Schweißrauchemissionsrate (engl. FER: fume emission rate) einen Vergleich von Verfahren oder Schweißprozessen.

Beim MSG-Schweißen ist diese Schweißrauchemissionsrate maßgeblich abhängig von der Abschmelzleistung. Je mehr Material pro Zeit abgeschmolzen wird desto höher ist die benötigte Prozessenergie und desto höher ist auch die Schweißrauchemissionsrate. Dem Überlagern sich jedoch unterschiedliche Bedingungen des Lichtbogenbrennverhaltens und des Werkstoffüberganges, die bei gleicher Abschmelzleistung zu großen Unterschieden in der Schweißrauchemission führen können.

Abbildung 2 zeigt die Abhängigkeit der Schweißrauchemissionsrate (FER) von der Abschmelz- bzw. Prozessleistung. Dabei wurde die Drahtvorschubgeschwindigkeit und damit der Schweißstrom über einen großen Einstellbereich mit dem Ziel variiert, einen Eindruck über den Verlauf der Schweißrauchemission über einer

Kennlinie zu zeigen. Aus diesem Grund wurden die beiden Einstellparameter zur Synergiekennlinienkorrektur „Lichtbogendynamik“ und „Lichtbogenlänge“ ebenfalls in einem Bereich von -6 bis 6 (Lichtbogendynamik) bzw. -3,4 V bis 3,4 V (Lichtbogenlänge) variiert. In dem Diagramm sind die Lichtbogenarten Kurzlichtbogen und Sprühlichtbogen durch runde bzw. dreieckige Markierungen dargestellt, die sich je nach Prozessleistung einstellen. Jeder Messpunkt repräsentiert dabei eine Emissionsmessung die, für eine Kombination der Einstellparameter Drahtvorschubgeschwindigkeit, Lichtbogendynamik und Lichtbogenlänge ausgeführt wurde.

In dem Bereich des Kurzlichtbogens ist die Schweißrauchemissionsrate maßgeblich abhängig von der Prozessleistung. Mit steigender Leistung nimmt die Schweißrauchemissionsrate nahezu linear zu. In dem Bereich des Übergangslichtbogens (rote Markierung) entsteht aufgrund des unregelmäßigen Werkstoffüberganges, der auch mit Prozessinstabilitäten einhergeht, ein lokales Maximum der Emission. Mit steigender Abschmelz- bzw. Prozessleistung bildet sich ein Sprühlichtbogen aus (hier ab ca. 7000 W), der aufgrund des regelmäßigen Werkstoffüberganges im Vergleich zum Übergangslichtbogen vorteilhaft sein kann.

Bei den Sprühlichtbogenprozessen steigt die Schweißrauchemission linear für die einzelnen Drahtvorschubgeschwindigkeiten mit der Prozessleistung an. Bei diesen Schweißprozessen ist die Lichtbogenlänge maßgeblich für die starke Steigung der eingezeichneten Regressionsgraden verantwortlich, da vergleichsweise geringe Änderungen in der Schweißspannung bei quasi identischem Schweißstrom großen Einfluss auf die Lichtbogencharakteristik haben.

In **Abbildung 3** ist für einen konventionellen Sprühlichtbogenprozess bei 13 m/min Drahtvorschubgeschwindigkeit der Einfluss der mittleren Spannung, die mit der Lichtbogenlänge korreliert, auf die Schweißrauchemissionsrate dargestellt. Aus den vier gewählten Schweißprozessen ist ersichtlich, dass die Schweißrauchemissionsrate mit sinkender Schweißspannung abnimmt. Grund dafür ist die generell niedrigere Prozessleistung, aber vor allem die geringere Lichtbogenlänge, die unter anderem durch vorteilhafte Einbrand- und Kondensationsbedingungen einen aus emissionstechnischer Sicht günstigeren Werkstoffübergang ermöglicht. Der Lichtbogen brennt bei Schweißprozess 1 und 2 vollständig innerhalb des Grundwerkstoffes, wie Messungen der Lichtbogenlänge im Durchlichtverfahren ergeben. Mit sinkender Lichtbogenlänge steigt die

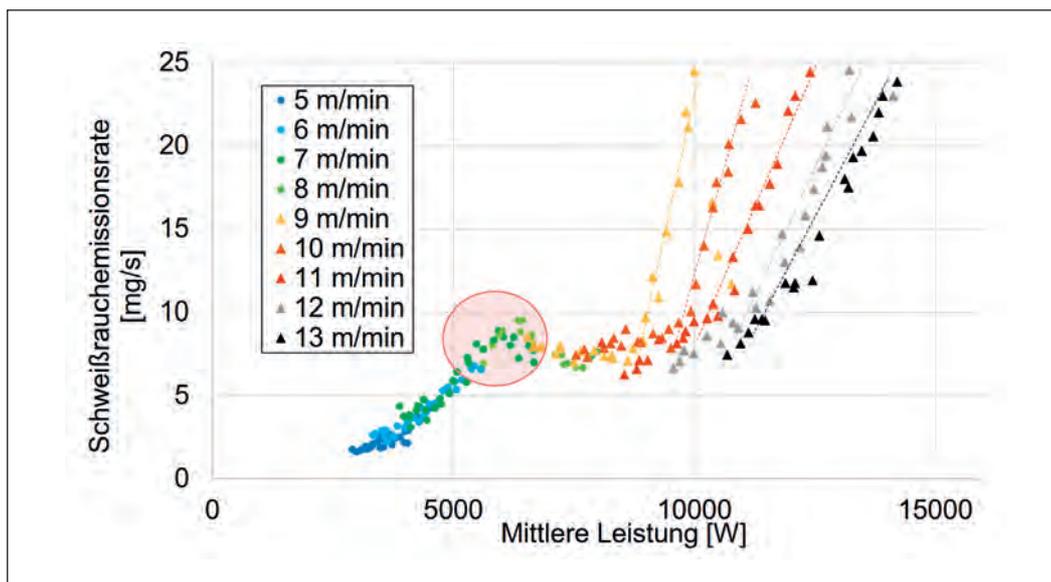


Abbildung 2: Schweißrauchemissionsrate in Abhängigkeit der Prozessleistung über eine Synergiekennlinie.

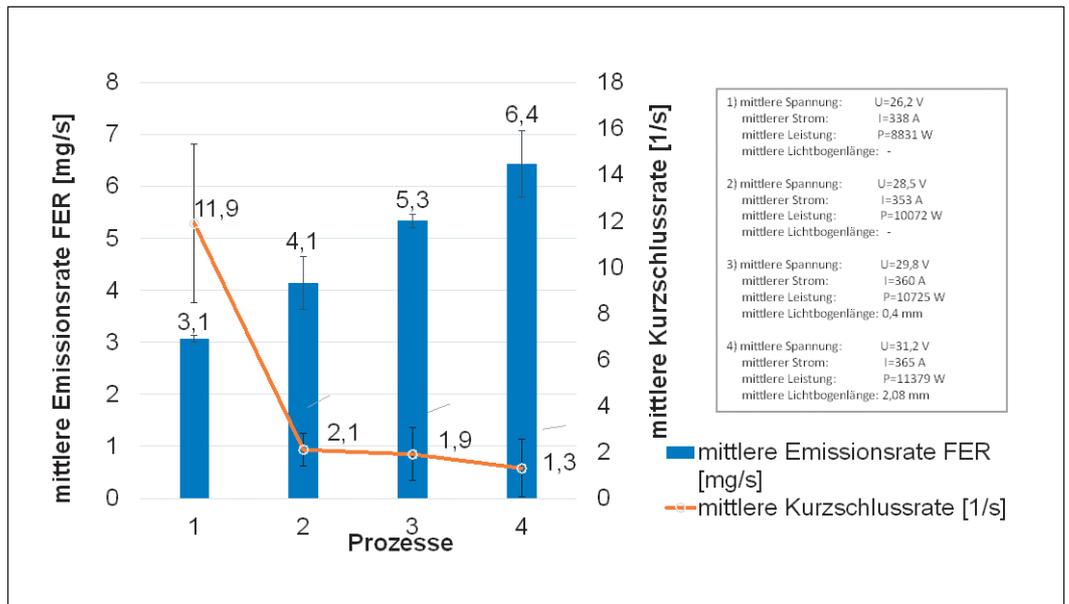


Abbildung 3: Abhängigkeit der Emissionsrate von der mittleren Spannung beim konventionellen Sprühlichtbogenprozess

Anzahl der Kurzschluserscheinungen (hier mittlere Kurzschlussrate) an. Bei diesen Kurzschluserscheinungen entsteht ein zeitlich sehr stark begrenzter Kontakt zwischen den ablösenden Tropfen und dem Schmelzbad, wobei der Lichtbogen anders als beim Kurzlichtbogen jedoch nicht erlischt. Dennoch werden dadurch Störungen im Schweißprozess induziert, die sich ab einem gewissen Grad wiederum negativ auf die Schweißrauchemission auswirken.

gen hinsichtlich der Emissionentstehung beiträgt. Eine optimale Einstellung, um Schweißrauch zu minimieren ist demnach ein sehr kurzer Lichtbogen, der tief im Werkstück brennt, jedoch keine übermäßige Anzahl an Kurzschluserscheinungen aufweist.

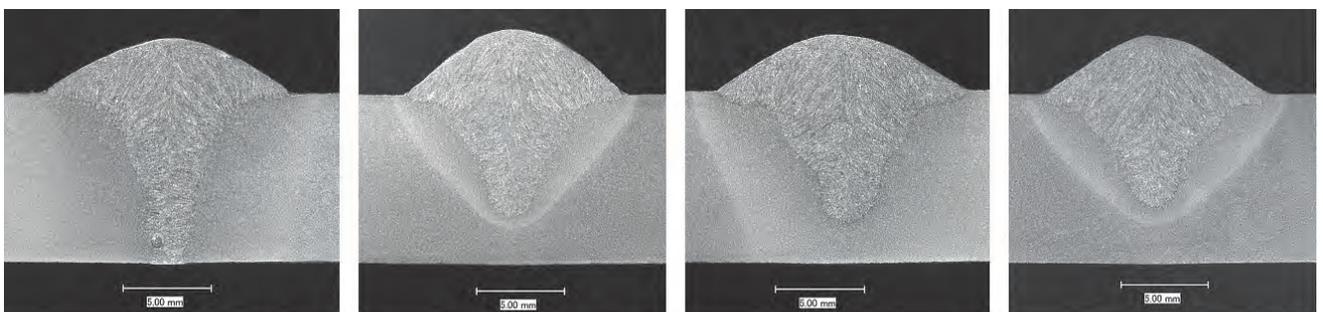
Untersuchung von brennerintegrierten Absaugungen

Trotz optimal eingestellter MSG-Schweißprozesse können Schweißrauche nach dem derzeitigen Forschungsstand nicht vermieden werden, sodass in der Regel weitere Schutzmaßnahmen zu treffen sind. Oftmals werden Hoch- und Niederdruckabsaugungen sowie brennerintegrierte Absaugungen verwendet, um eine Gefährdung der Beschäftigten zu vermeiden. Dabei ist die

Erfassung der Schweißrauche direkt an der Entstehungsstelle am effektivsten, sodass Absaugbrenner mit ihren prozessnah integrierten Absaugdüsen prinzipiell einen sehr vielversprechenden Ansatz darstellen. Allerdings ist die Abhängigkeit zwischen den Schweißparametern, den Einstellungen der Absauganlage und der Schweißnahtqualität nicht ausreichend erforscht, sodass bei ungünstiger Parameterwahl ein zu geringer Erfassungsgrad des Schweißrauches oder eine negative Beeinflussung der Schweißnahtqualität resultiert. Insbesondere besteht Forschungsbedarf zu dem Einfluss der Prozesscharakteristik auf die notwendige Absaugleistung der Absaugbrenner. Aus diesem Grund werden dazu am ISF Untersuchungen durchgeführt, die im Folgenden näher beleuchtet werden.

Auffällig ist, dass sich bei den Prozessen mit geringerer Lichtbogenlänge trotz des etwas niedrigeren Schweißstromes ein deutlich tieferer Einbrand in den Grundwerkstoff ergibt (Abbildung 4). Dies ist auf die zuvor beschriebene Charakteristik des tief brennenden Lichtbogens zurückzuführen, die auch zu günstigen Bedingun-

Abbildung 4: Querschliffe zur Bestimmung des Einbrandverhaltens



1) mittlere Spannung:	26,2 V	2) mittlere Spannung:	28,5 V	3) mittlere Spannung:	29,8 V	4) mittlere Spannung:	31,2 V
mittlere Emissionsrate:	3,1 mg/s	mittlere Emissionsrate:	4,1 mg/s	mittlere Emissionsrate:	5,3 mg/s	mittlere Emissionsrate:	6,4 mg/s
mittlere Lichtbogenlänge:	-	mittlere Lichtbogenlänge:	-	mittlere Lichtbogenlänge:	0,4 mm	mittlere Lichtbogenlänge:	2,08 mm
Einbrandtiefe :	10 mm	Einbrandtiefe :	6,9 mm	Einbrandtiefe :	7,4 mm	Einbrandtiefe :	6,42 mm

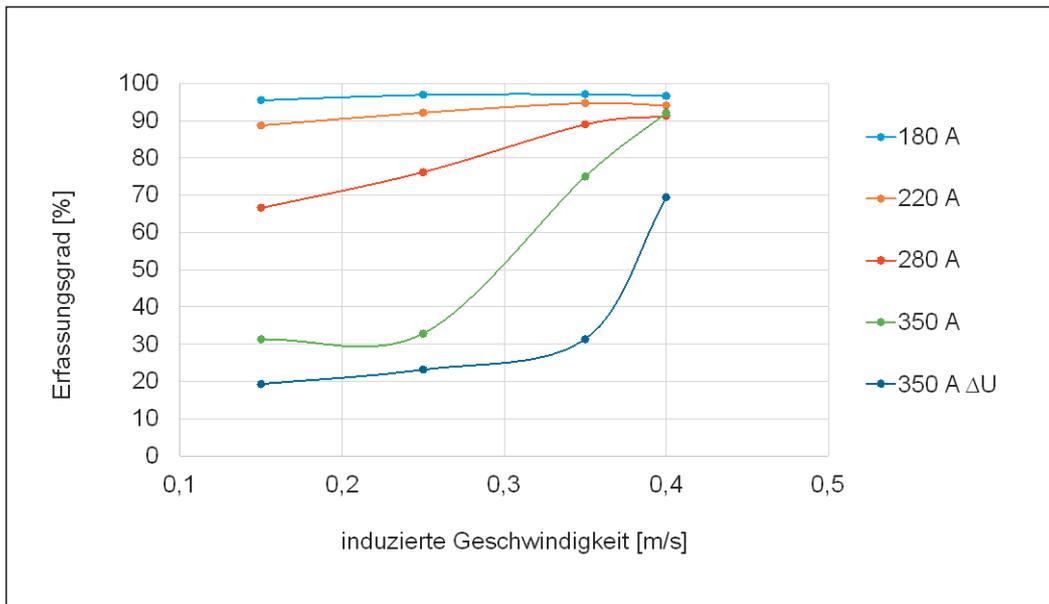


Abbildung 5: Erfassungsgrad in Abhängigkeit von induzierter Geschwindigkeit und Schweißstrom

Um die am Markt existente große Vielfalt an geometrischen Abmessungen der Absaugbrenner zu berücksichtigen, ist in der DIN EN ISO 21904 eine induzierte Geschwindigkeit definiert, die abhängig von dem Absaugvolumenstrom und dem Abstand der Absaugöffnung zum Emissionspunkt (L-Maß) ein Maß für das Absaugpotential darstellt. Ist diese induzierte Geschwindigkeit zu hoch, kann die Schutzgasabdeckung gefährdet sein und in der Folge können Schweißnahtporen entstehen. Ist diese Geschwindigkeit zu niedrig resultiert ein zu geringer Erfassungsgrad und es besteht das Risiko einer unzulässigen Exposition für die Beschäftigten. In dieser Norm ist eine minimale induzierte Geschwindigkeit für Schweißprozesse unter 250 A von 0,25 m/s und über 250 A von 0,35 m/s vorgeschrieben, wobei ab 0,4 m/s eine Beeinflussung der Schutzgasatmosphäre und damit Poren auftreten können.

In **Abbildung 5** sind beispielhaft für Auftragsschweißungen eines Absaugbrenners mit einem L-Maß von 47 mm die Erfassungsgrade des Schweißrauches bei Variation des Absaugvolumenstroms bzw. der induzierten Geschwindigkeit sowie der Prozessleistung dargestellt. Die Ergebnisse zeigen eine starke Abhängigkeit des Erfassungsgrades von dem Schweißprozess und von der in-

duzierten Geschwindigkeit. Grundsätzlich sinkt der Erfassungsgrad mit steigender Prozessleistung. So zeigen die beiden Kurzlichtbogenprozesse generell die höchsten Erfassungsgrade, die auch bei einer sehr niedrigen induzierten Geschwindigkeit von 0,15 m/s bei fast 90 % oder höher liegen. Im Sprühlichtbogenbereich sind gerade bei hohen Leistungen von 350 A höhere induzierte Geschwindigkeiten notwendig, um hohe Erfassungsgrade zu erreichen. Dies wird insbesondere bei dem mit „ΔU“ bezeichneten Prozess deutlich, bei dem durch einen langen Lichtbogen ein besonders emissionsreicher Schweißprozess gewählt wurde.

Ursache für die starke Abhängigkeit des Erfassungsgrades von der Prozessleistung sind vermutlich mehrere Faktoren. Zum einen steigt mit der Prozessleistung prinzipiell die Schweißrauchemissionsrate an. Zum anderen erzeugt eine höhere Prozessleistung eine breitere thermische Säule mit

höheren Aufstiegsgeschwindigkeiten, die einer Erfassung durch das Saugfeld entgegenwirken. Bei Kehlnähten werden prinzipiell höhere Erfassungsgrade als bei Auftragsnähten erreicht, weil zum einen aufgrund von günstigeren Lichtbogenbrennverhalten und Kondensationsbedingungen die Schweißrauchemissionsrate in der Regel etwas niedriger ist. Zum anderen bilden sich vorteilhafte Strömungsbedingungen aus, die für zwei verschiedene Absaugbrenner mit stark unterschiedlichen L-Maß bei einer induzierten Geschwindigkeit von 0,4 m/s mit Hilfe einer Schliere-optik in **Abbildung 6** visualisiert sind.

Insgesamt konnte durch die Untersuchungen bezüglich der Effektivität und Grenzen der Absaugbrenner gezeigt werden, dass eine gut parametrisierte brennerintegrierte Absaugung hohe Erfassungsgrade erzielen kann, ohne die Schweißnahtqualität zu beeinflussen.

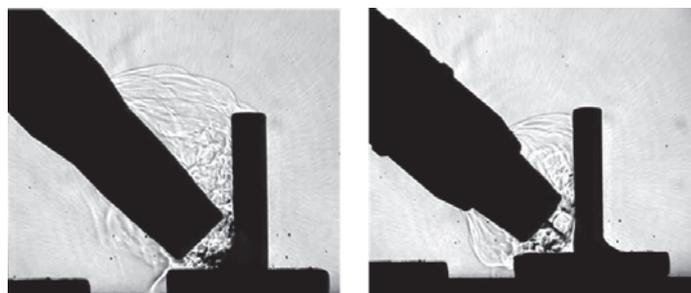


Abbildung 6: Schliereaufnahmen zweier Absaugbrenner bei einer induzierten Geschwindigkeit von 0,4 m/s

Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen haben eine Synergiekennlinie emissionstechnisch erfasst. Im Kurzlichtbogenbereich steigt die Schweißrauchemission nahezu linear mit der Prozessleistung an. Im Sprühlichtbogenbereich geschieht dies ebenfalls, allerdings sind weitere Einflussfaktoren gewichtend überlagert. Insbesondere die Lichtbogenlänge hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Ausprägung des Lichtbogens und den Werkstoffübergang, sodass auch die Schweißrauchemission signifikant beeinflusst wird. Ein kurzer Lichtbogen, der tief im Werkstück brennt, hat vermutlich aufgrund günstigerer Kondensationsbedingungen positiven Einfluss auf die Schweißrauchemissionsrate. Im

Übergangsbogen konnte wahrscheinlich aufgrund einer instabilen und veränderlichen Prozesscharakteristik ein lokales Emissionsmaximum festgestellt werden. Eine brennerintegrierte Absaugung kann richtig parametrisiert hohe Erfassungsgrade erreichen. Dabei zeigt sich eine starke Abhängigkeit der benötigten induzierten Geschwindigkeit respektive des Absaugvolumenstromes von dem Schweißprozess. Energie- und emissionsreiche Sprühlichtbogenprozesse brauchen signifikant höhere Absaugvolumenströme als Schweißprozesse geringerer Leistung. Aktuell und in naher Zukunft werden am ISF schwerpunktmäßig das Reduktionspotential von digital geregelten Prozessvarianten und alternativer Schutzgas – Drahtelektroden Kombinationen untersucht.

Literaturangaben

- [1] A. f. G. (AGS), Technische Regeln für Gefahrstoffe – TRGS 528 – Arbeitsplatzgrenzwerte, AGS Geschäftsführung – BAuA, 2020
- [2] „Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV)“, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), 2010, letzte Änderung März 2017
- [3] Quelle: Kemper <https://www.kemper.eu/de/wissenswertes/schweisrauch-im-allgemeinen/wie-gross-sind-die-einzelnen-partikel-im-schweisrauch>

THE ULTIMATE LINE-UP



RUSTLER ROGUE RENEGADE RENEGADE VOLT
CUTMASTER REBEL SENTINEL SAVAGE

ESAB ist ein weltweit führender Hersteller von Schweiß- und Schneidgeräten und Schweißzusätzen. Unsere innovativen, weltweit anerkannten Ausrüstungen und Prozesslösungen werden in Zusammenarbeit mit unseren Kunden entwickelt und basieren auf dem Know-how und der Erfahrung eines weltweit führenden Herstellers. Unsere gemeinsame Vision ist es, die Entwicklung der Industrie voranzutreiben und die Bedürfnisse unserer Kunden durch unser vielfältiges Produktportfolio zu erfüllen.



Erweiterung der Anwendungsgebiete beim Laserstrahl-Unterpulver Hybridschweißen

Michael Clemens, M.Sc.

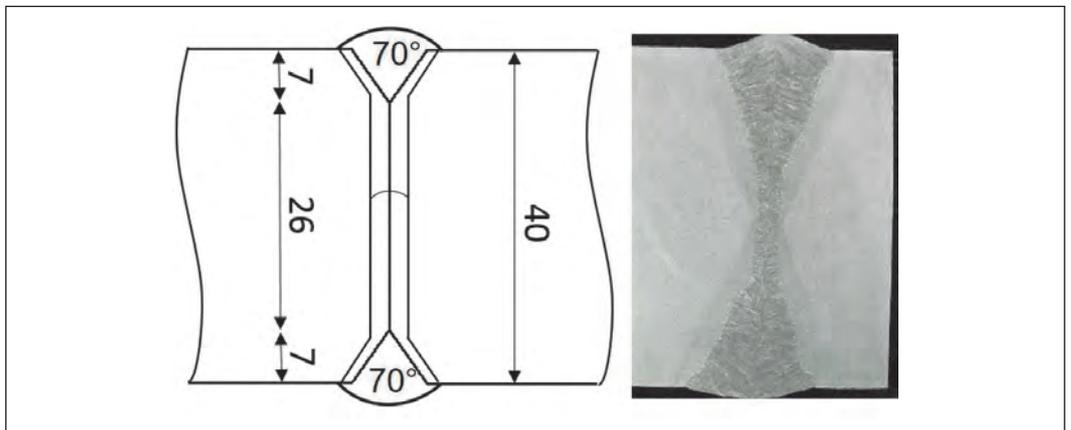


Abbildung 1:
Kantenvorbereitung und makroskopischer Querschiff LUPuS; Blechdicke: 40 mm

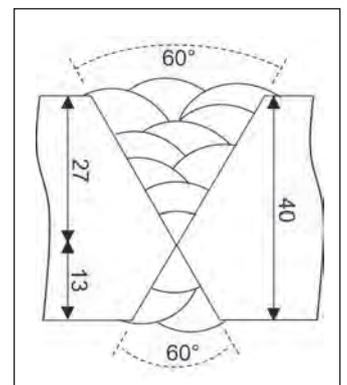
Das wirtschaftliche Fügen von Großrohren mit großen Wanddicken nimmt im Windenergieanlagenbau nicht zuletzt wegen den von der Bundesregierung Deutschland festgelegten und verabschiedeten Windenergieausbauzielen einen zunehmend höheren Stellenwert ein. Derzeit kommen für die fügetechnische Herstellung der genannten Großrohre ausschließlich konventionelle Lichtbogenerfahren wie das MSG- oder UP-Verfahren zum Einsatz. Verfahrensbedingt werden bei großen Wanddicken eine Vielzahl an Schweißlagen notwendig. Als Resultat ergeben sich signifikante Kosten, die sich u.a. aus dem Energiebedarf, dem Schweißzusatz und der Fertigungszeit zusammensetzen. Durch die Kombination des Laserstrahlverfahrens mit dem herkömmlichen Unterpulverschweißverfahren in einer gemeinsamen Prozesszone konnte am ISF ein Hochleistungsschweißprozess entwickelt werden, der das effizientere Fügen im Dickblechbereich ermöglicht. Mit dem Laserstrahl-Unterpulver Hybridschweißverfahren (LUPuS) konnten bereits Blechdicken von bis zu 50 mm im Stumpfstoß mittels Lage-Gegenlagetechnik gefügt werden. In dieser Arbeit wird zunächst das einlagige und einseitige Fügen von Blechdicken von bis zu 26 mm vorgestellt. Im Anschluss wird die Weiterentwicklung des LUPuS Hybridverfahrens (Einzeldrahtprozess) zum LUPuS Tandemhybridprozess präsentiert, mit dessen Hilfe die Robustheit des Prozesses gegenüber Bauteiltoleranzen (z. B. Fügespalte) begünstigt wird.

Abbildung 2:
Kantenvorbereitung und Schweißlagenaufbau einer UP-Schweißung; Blechdicke: 40 mm

Motivation

Bei den erneuerbaren Energien nimmt die Windkraft, nicht zuletzt wegen des zum 01. Februar 2023 in Kraft getretenen „Wind-an-Land-Gesetz“, eine bedeutende Position zur Erreichung der Klimaziele ein. Demnach sollen bis zum Jahr 2032 2% der Landflächen für den Ausbau von Windenergie ausgewiesen werden [1].

Für die fügetechnische Herstellung von Großrohren kommen bislang ausschließlich herkömmliche Lichtbogenverfahren wie MSG- oder UP-Mehrdrahtprozesse zum Einsatz. Diese Verfahren sind dadurch gekennzeichnet, dass nahezu die gesamte Blechdicke durch die großvolumige Nahtvorbereitung mit Schweißzusatzwerkstoff in vielen Schweißlagen aufgefüllt werden muss, was signifikante Kosten (Schweißzusatz, Fertigungszeit, Energiebedarf) mit sich bringt, **Abbildung 2.**



KONTAKT

Dr.-Ing. Simon Olschok
Tel.: +49 (0)241 8096253
olschok@isf.rwth-aachen.de
www.isf.rwth-aachen.de

Die hohe Schweißlagenanzahl bringt nicht nur einen hohen Zeitaufwand für das Schweißen mit sich, sondern darüber hinaus entsteht ein thermisch bedingter Bauteilverzug, der kostenintensive Richtarbeiten notwendig macht. Durch die hohe Schweißlagenanzahl besteht weiterhin die Gefahr von Zwischenlagenfehlern (Schlackeeinschlüsse) [2, 3].

Um den Windenergieausbauzielen gerecht zu werden, werden Füge-technologien benötigt, die höhere Produktivität (bspw. durch geringere Nahtvolumina und Schweißlagenanzahl) ermöglichen [4]. Zeitgleich müssen die modernen Füge-technologien ebenso robust gegenüber im Industrielltag auftretenden Bauteiltoleranzen (z. B. Fügespalte, Versätze) sein wie die bisher konventionell eingesetzten Schweißverfahren.

Moderne Strahlschweißverfahren wie das Laser- oder Elektronenstrahlschweißverfahren erreichen aufgrund ihrer hohen Energiedichte entsprechend große Einschweiß-tiefen. Als Nachteile dieser Verfahren ist die im Vergleich zu den lichtbogenbasierten Prozessen geringere Spaltüberbrückbarkeit sowie die Neigung zum Aufhärten des Schweißgutes aufgrund der hohen Abkühlraten zu nennen [5, 6]. Den genannten Nachteilen kann durch die Kombination des Laserstrahlschweißverfahrens mit dem MSG-Verfahren zu einem Hybridschweißprozess (LB-MSG Hybrid) entgegengewirkt werden. Hierbei erstarrt die Schmelze jedoch aufgrund der hohen Einschweiß-tiefe gepaart mit den hohen Abkühlraten in einem derart kurzen Zeitintervall, dass niedrigschmelzende Phasen nicht über die Schweißnahtoberfläche entweichen können. Als Resultat ergeben sich Risse entlang der Mittelrippe (Mittelrippendefekt) [7].

Durch die Substitution des MSG-Verfahrens durch den UP-Prozess wird aufgrund des höheren Energieeintrages das Erstarrungsintervall verlängert, wodurch niedrigschmelzende Phasen besser über die Werkstückoberfläche entweichen können und die Gefahr von Mittelrippendefekten reduziert wird [8].

Das Laserstrahl-Unterpulver Hybrid-schweißen (LUPuS Hybrid) verbindet die beiden genannten Einzelverfahren in einer gemeinsamen Prozesszone und ermöglicht somit die Nutzung von Synergieeffekten, die sich aus den beiden Einzelverfahren ergeben (bspw. gute Spaltüberbrückbarkeit durch UP-Verfahren; hohe Einschweiß-tiefe durch Laserstrahlverfahren). Das LUPuS Hybridverfahren wurde bereits in verschiedenen Forschungsvorhaben entwickelt und erprobt [9, 10]. Hierbei konnten, vorwiegend im technischen Nullspalt und in Lage-/Gegenlagetechnik, Blechdicken von bis zu 50 mm der Güte S355 mit einer hohen Schweißnahtqualität reproduzierbar ausgeführt werden, **Abbildung 1**.

Das LUPuS Hybridverfahren konnte weiterhin für den Chrom-Nickel Stahl 1.4301 qualifiziert werden [9].

Das einseitige Fügen mit dem LUPuS Hybridverfahren wurde bisher nicht erprobt. Weiterhin ergeben sich beim Vorhandensein fügenaltpflichter Werkstücke geometrisch ungleichmäßig ausgeformte Schweißnähte mit einer geringen Reproduzierbarkeit. In diesem Artikel werden daher zunächst einseitige LUPuS Hybrid-schweißungen mit wurzelseitiger Schweißbadsicherung vorgestellt. Im Anschluss wird die Weiterentwicklung des LUPuS Hybridprozesses zum LUPuS Tandemhybridprozess aufgezeigt, mit dessen Hilfe die Robustheit des Prozesses gegenüber Bauteiltoleranzen begünstigt wird.

Anlagenaufbau

Eine Prinzipskizze des Versuchsaufbaus für das LUPuS (Tandem) Hybridschweißverfahren ist im Folgenden dargestellt, **Abbildung 3**.

Der Hybridprozess setzt sich grundlegend aus dem UP-Brenner 1 (4), der Pulverschütte (5) und dem Laserstrahl (7) zusammen. Zwischen dem Laserstrahl (7) und dem UP-Brenner 1 (4) ist ein Trennblech (6) positioniert. Das Trennblech (6) dient dazu das für den UP-Schweißprozess notwendige

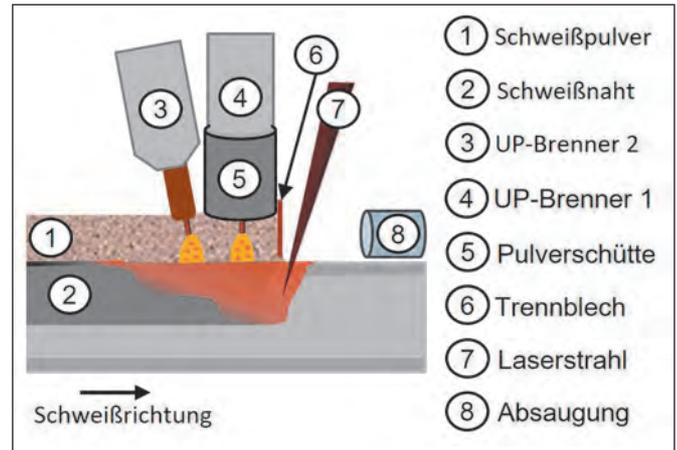


Abbildung 3: LUPuS (Tandem) Hybrid; schematisch

Schweißpulver aus dem Wirkungsbereich des Laserstrahls fernzuhalten. In dieser Konfiguration wird der Hybridprozess mit einem UP-Brenner (Eindrahtprozess) als LUPuS bezeichnet. Durch Hinzuschalten des UP-Brenners 2 (3) wird das Schweißen mit zwei UP-Brennern ermöglicht (LUPuS Tandem).

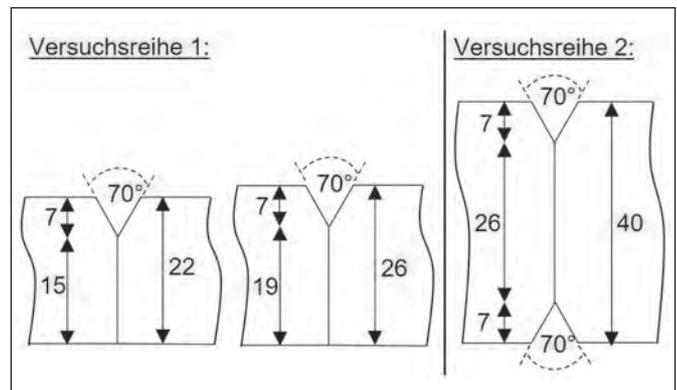


Abbildung 4: Kantenvorbereitung Blechdicke 22 mm und 26 mm (links) und Blechdicke 40 mm (rechts)

Erste Ergebnisse mit diesem neu entwickelten LUPuS Tandemhybridprozess werden im späteren Verlauf dieser Arbeit vorgestellt.

Für die folgenden Schweißversuche wurde jeweils Baustahl der Güte S355 verwendet, **Tabelle 1**.

Als Schweißzusatzwerkstoff wurde eine verkupferte Drahtelektrode (S2Si) mit einem Durchmesser von 4 mm verwendet (EN ISO 14171-A: S2Si). Als Schweißpulver wurde ein aluminatbasisches Pulver eingesetzt (EN ISO 14174 : S A AB 1 57 AC H5).

Tabelle 1: Metallurgische Zusammensetzung des Grundwerkstoffs; S355

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

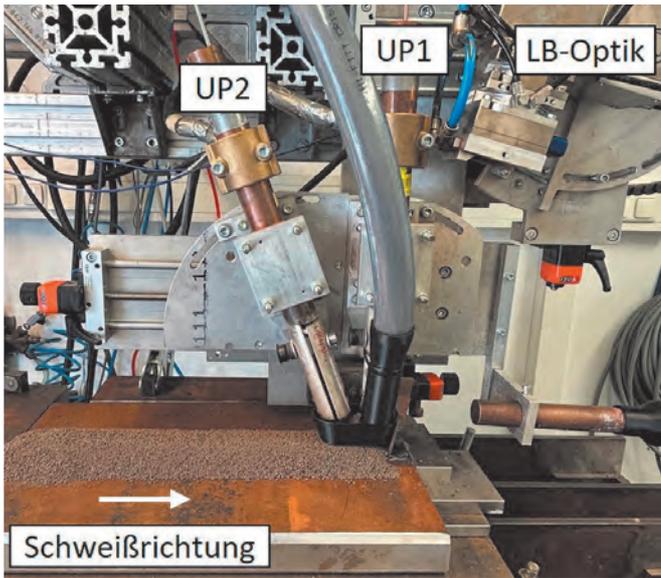
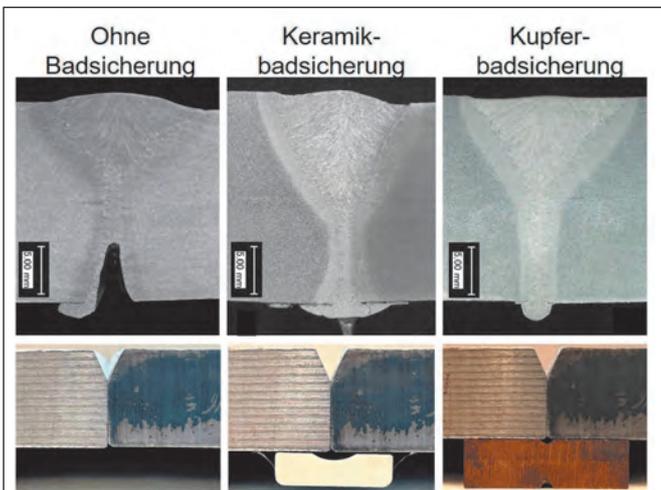


Abbildung 5:
Anlagenaufbau LUPuS Tandem Hybrid

Die Schweißnahtvorbereitung wird, je nach Fügeaufgabe, als Y bzw. DY-Vorbereitung ausgeführt. Die Blechdicken betragen 22 mm, 26 mm (einseitig und einlagig) sowie 40 mm (Lage-/Gegenlage), **Abbildung 4**.

Vor dem Schweißen werden die Fügepartner mit dem Laserstrahl geheftet. Der Durchmesser des Lichtleitkabels beträgt 200 µm, die Kollimationsbrennweite liegt bei 200 mm und die Fokussierbrennweite bei 400 mm. Daraus ergibt sich ein mathematisch bestimmter Fokussdurchmesser von 0,4 mm. Der Aufbau der gesamten Schweißanlage ist in **Abbildung 5** zu sehen.

Abbildung 6:
Verschiedene Schweißbadsicherungen;
Ohne Badsicherung (links),
Keramikbadsicherung (Mitte),
Kupferbadsicherung (rechts),
Blechdicke 22 mm



In dieser Arbeit werden zunächst einseitige und einlagige Schweißnähte mit wurzelseitiger Schweißbadsiche-

rung mit dem LUPuS Hybridprozess diskutiert. Im Anschluss werden erste Schweißversuche mit dem neu entwickelten LUPuS Tandemhybridprozess durchgeführt. Die Schweißnahtgüte der erzeugten Schweißergebnisse wird durch anschließend angefertigte makroskopische Querschliffe sowie chemische Analysen evaluiert.

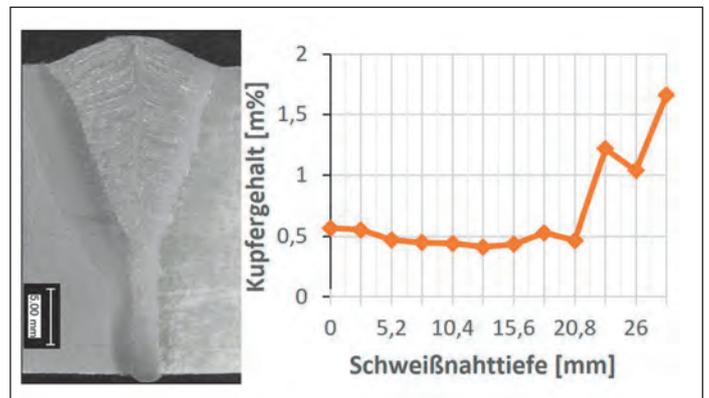
**Einseitiges LUPuS
Hybridschweißen**

In einer ersten Versuchsreihe wurden einseitige und einlagige Schweißversuche an Blechdicken von 22 mm durchgeführt. Die Laserleistung wurde in den Versuchen auf 13 kW bzw. 14 kW festgelegt. Die Schweißvorschubgeschwindigkeit lag bei 0,6 m/min und die Drahtvorschubgeschwindigkeit bei 2,1 m/min. Da aufgrund der einseitigen, vollständigen Durchschweißung der Fügepartner mit einem wurzelseitigen Durchfallen des schmelzflüssigen Materials zu erwarten war, wurden zunächst verschiedenartige, im Stand der Technik häufig angewendete Schweißbadsicherungskonzepte erprobt, **Abbildung 6**.

Im Vergleich zur Schweißnaht ohne Schweißbadsicherung (**Abb. 6, links**), bei der das schmelzflüssige Material im Wurzelbereich der Fügeverbindung nicht abgestützt werden kann, wird bei Schweißung mit einer keramischen Schweißbadsicherung (**Abb. 6, Mitte**) eine bessere, wurzelseitige Stützwirkung für das schmelzflüssige Material erzielt. Hierbei wird jedoch ersichtlich, dass die geometrische Ausformung der Wurzel aufgrund der Nutgeometrie der beim konventionel-

len UP-Schweißen eingesetzten keramischen Schweißbadsicherung vor allem in ihrer Breite zu groß bemessen ist. Als Resultat stellt sich ein signifikanter, wurzelseitiger Schweißgutüberlauf ohne Anbindung an die beiden Fügepartner ein. Weiterhin wird im Schweißnahtverlauf in unregelmäßigen Abständen das thermische Zerstören der keramischen Schweißbadsicherung beobachtet. Durch Substitution der keramischen Schweißbadsicherung mit einer Kupferbadsicherung konnte eine gleichmäßigere Wurzelausformung generiert werden (**Abb. 6, rechts**). Hierzu wurde eine halbkreisförmige Nut in die Kupferbadsicherung eingefräst. Ein wurzelseitiger Schweißgutüberlauf ist wie bei der keramischen Schweißbadsicherung zu erkennen. Dies ist auf die im Verhältnis zur Breite des laserdominierten Schweißnahtbereichs zu groß gewählte Nutgeometrie (Breite und Tiefe) zurückzuführen. In der nächsten Versuchsreihe wurden die geometrischen Abmaße der eingefrästen Nut angepasst. Hierbei wurde sowohl die Breite der Nut entsprechend der zu erwartenden Schweißnahtbreite im laserdominierten Schweißnahtbereich (≈ 2,5 mm) als auch die Tiefe der Nut (≈ 0,6 mm) entsprechend der in DIN EN ISO 12932:2013-10 (Bewertungsgruppe B) definierten, maximalen Wurzelüberhöhung ausgelegt. Die Blechdicke wurde auf 26 mm erhöht. Bei einer Laserstrahlleistung von 16 kW, einer Schweiß-

Abbildung 7:
Makroskopischer Querschliff LUPuS Hybridnaht mit Kupferbadstütze (links); dazugehörige chemische Analyse Kupfergehalt (rechts), Blechdicke 26 mm



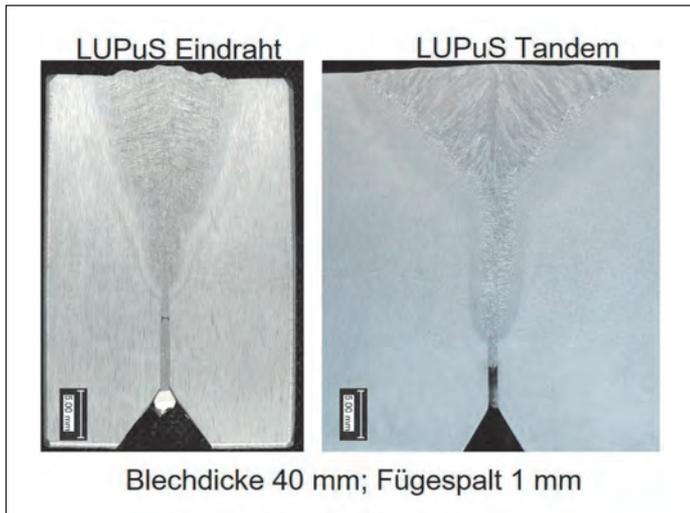


Abbildung 8:
Makroskopische Querschliffe LUPuS Eindraht (links) und LUPuS Tandem (rechts) bei offenem Fügspalt 1 mm

vorschubgeschwindigkeit von 0,6 m/min und einer Drahtvorschubgeschwindigkeit von 2,3 m/min wird eine geometrisch homogen ausgeformte Schweißnaht erzeugt, **Abbildung 7**.

Die Schweißnaht ist bei Betrachtung des makroskopischen Querschliffes defektfrei. Durch die Modifizierung der eingefrästen Nut in der Kupferbadsicherung wurde eine gleichmäßige Wurzelauformung generiert. Ein wurzelseitiger Schweißgutüberlauf ist nicht zu identifizieren. Bei Analyse der chemischen Zusammensetzung des Schweißgutes über die Schweißnahttiefe wird jedoch deutlich, dass im Wurzelbereich der Schweißnaht ein leichter Anstieg des Kupfergehaltes von etwa 0,5 % auf 1,6 % zu beobachten ist.

LUPuS Tandemhybridschweißen

Durch die Weiterentwicklung des LUPuS Hybridprozesses (Eindrahtprozess) zum LUPuS Tandemhybridprozess konnte die Robustheit des Prozesses gegenüber Bauteiltoleranzen (z.B. Fügspalte) gesteigert werden. Beim Vorhandensein eines konstant eingestellten, offenen Fügspalts von 1 mm ergeben sich bei beiden LUPuS Hybridprozessen jeweils homogen ausgeformte Schweißnähte, **Abbildung 8**.

Die grundlegenden Schweißparameter Laserleistung ($P_L = 16 \text{ kW}$) und Schweißvorschubgeschwindigkeit ($v_S = 0,6 \text{ m/min}$) wurden bei beiden in **Abb. 8** ersichtlichen Schweißversuchen konstant festgelegt. Beim LUPuS Tandemprozess wird durch die Bestromungswahl (1. Brenner DC+, 2. Brenner AC) im Vergleich zum LUPuS Eindrahtprozess (DC+) eine deutlich breitere und homogener ausgeformte Schweißnahtoberfläche erzeugt. In weiteren Versuchen wurde eine weitere Steigerung des eingestellten, geschlossenen Fügspalts auf bis zu 1,5 mm durchgeführt. Eine im Vergleich zum LUPuS Eindrahtprozess signifikant verbesserte Ausbildung der Schweißnaht wurde erzielt, **Abbildung 9**.

Durch den mit AC-betriebenen UP-Brenner 2 wurde nicht nur ein Verbreitern der Schweißnahtoberfläche, sondern ebenfalls ein homogener Übergang von UP-dominiertem zu laserdominiertem Schweißnahtbereich erreicht. Die genannten Effekte sorgen für ein optimiertes Schweißnahtbreite- zu tiefeverhältnis, wodurch die Robustheit des neu entwickelten LUPuS Tandemhybridprozesses gegenüber fügspaltbehafteten Bauteilen begünstigt wird.

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde zunächst das einseitige und einlagige LUPuS Hybridschweißen vorgestellt. Hierbei wurde gezeigt, dass das beim LUPuS

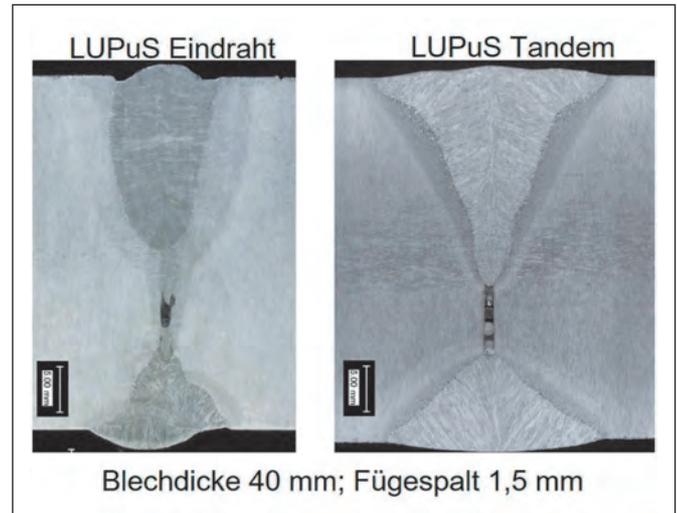


Abbildung 9:
Vergleich makroskopische Querschliffe LUPuS Eindraht (links) und LUPuS Tandem (rechts) bei geschlossenem Fügspalt 1,5 mm

Hybridschweißen entstehende, großvolumige Schmelzbad reproduzierbar mit einer Schweißbadsicherung aus Kupfer mit eingefräster Nut abgestützt werden kann. Als nachteilig konnte der leicht erhöhte, durch die Kupferbadstütze in die Schweißnahtwurzel eingetragene Kupfergehalt dokumentiert werden.

Im zweiten Abschnitt dieser Arbeit wurde die Weiterentwicklung des LUPuS Hybridprozesses zum LUPuS Tandemhybridprozess präsentiert. Durch den nachlaufenden und mit AC-betriebenen 2. UP-Brenner wird ein optimiertes Schweißnahtbreite- zu tiefeverhältnis generiert und somit die Robustheit des Gesamtprozesses signifikant begünstigt.

In weiterführenden Arbeiten wird das Augenmerk auf der weiteren Erprobung der beiden LUPuS Prozessvarianten für das einseitige Fügen gelegt. Hierbei wird sowohl eine detaillierte Qualifizierung der Kupferbadstütze als auch unterschiedliche Heftmethodiken zum Abstützen des LUPuS Schmelzbades in Betracht gezogen. Das Fügen von Versätzen und kombinierten Bauteiltoleranzen (Fügspalt und Versatz) mit dem LUPuS Tandemhybridprozess steht ebenfalls im Blickpunkt der nächsten Forschungstätigkeiten.

Förderhinweis

Das IGF-Projekt „Bewertung von Hochleistungsschweißprozessen

unter den Bedingungen der Neuartigkeit von Windenergieanlagen“, IGF-Projekt Nr. 21.304 B, der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren, Aachener Straße 172, 40223 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 Bundesregierung gefördert.



Literaturangaben

- [1] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, 2023. Wind-an-Land-Gesetz [online]. Mehr Windenergie für Deutschland [Zugriff am 14.03.2023]. Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/wind-an-land-gesetz-2052764>
- [2] Houldcroft, P.T. (1989) Submerged-Arc Welding, Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, Woodhead Publishing, 9 -26.
- [3] Reisgen, U., Stein, L. (2016) Fundamentals of joining technologies – Welding, brazing and adhesive bonding, DVS-Media, 119 -132
- [4] DVS-Studie „Situation der Fügetechnik im Windenergieanlagenbau“ Bd. 330, 2016.
- [5] Vollertsen, F., Rethmeier, M., Gumenyuk, A., Grünwald, S., Reisgen, U., Olschok, S. (2010) Welding thick steel plates with fibre lasers and GMAW, Welding in the World 54, 62 – 70.
- [6] 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.
- [7] Schäfer, Marcel (2018) Energetische Beeinflussung von Schmelzfluss und Heißrisbildung beim Laserstrahlschweißen von Vergütungsstahl [Dissertation]. Universität Stuttgart. München: Herbert Utz Verlag, ISBN 978-3-8316-4742-2
- [8] Kah, P. (2012) Overview of the Exploration Status of Laser-Arc Hybrid Welding Processes, Rev. Adv. Mater. Sci. 30, 120 -121.
- [9] Erprobung des Laserstrahl-Unterpulver Hybridschweißverfahrens für die industrielle Anwendung im Bereich großer Blechdicken, AiF 19.039 N
- [10] U. Reisgen, S. Olschok und O. Engels (2017), Innovative hybrid welding process for structural steelwork engineering - Laser submerged arc hybrid welding, Bd. 29, Journal of Laser Applications

VERBINDET WELTWEIT

Schweißtechnik aus Deutschland



WE ARE WELDING



Wir sind bestätigter Hidden Champion und zudem weltweit einer der führenden Hersteller von Premium-Lichtbogenschweißtechnik. Unser vollständiges Systemangebot umfasst Schweißgeräte und -brenner, Schweißzusatzwerkstoffe, schweißtechnisches Zubehör, Dienstleistungen und Lösungen für das automatisierte Schweißen.



EWM AG | 56271 Mündersbach | Tel.: +49 2680 181-0
info@ewm-group.com | www.ewm-group.com



scansonic

**OPTICS FOR
INTELLIGENT
LASER PROCESSING**

**WORLDWIDE SALES &
SERVICE NETWORK
BY SCANSONIC**

WWW.SCANSONIC.DE



**WELDING | TACTILE | REMOTE | BRAZING | CUTTING | CLADDING
HARDENING | QUALITY ASSURANCE | SENSORS | E-MOBILITY APPLICATIONS**

Elektromobilität – Ohne die Fügetechnik nicht möglich

Eric Helfers, Florian Müller, Alexander Schiebahn, Christian Frey, Thomas Krichel

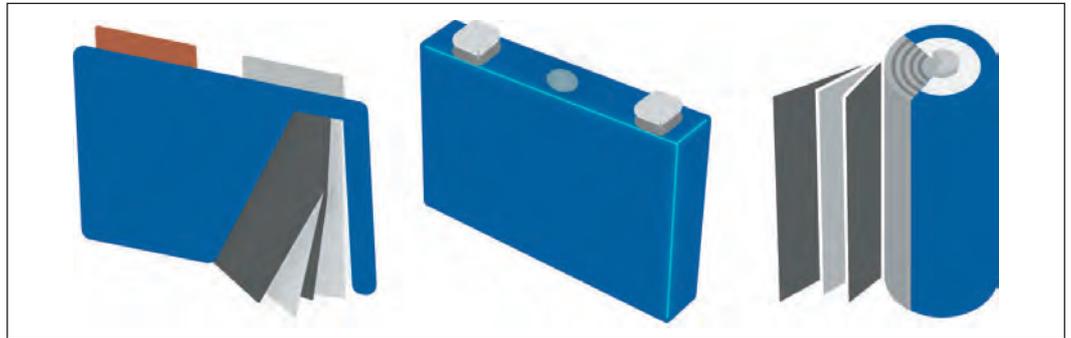


Abbildung 1:
Bauformen der Lithium-Ionen-Batterie
(Von links nach rechts: Pouch-Zelle, prisma-
tische Zelle und Rundzelle)

Als zentraler Bestandteil der Energiewende ist der Schritt von konventionellen zu elektrifizierten Antrieben von größter politischer, gesellschaftlicher sowie wirtschaftlicher Relevanz. Damit einhergehend werden steigende Anforderungen an beteiligte Fügeprozesse für elektrische Verbindungen in Kraftfahrzeugen gestellt. Davon betroffen sind sowohl die Energiespeicherung in der Batterie, die Energieübertragung im Bordnetz als auch die Energiewandlung in Leistungselektronik und Elektromotor. In diesen Anwendungen werden stoffschlüssige Verbindungen von Aluminium- und Kupferwerkstoffen mit hoher Leitfähigkeit, weichmagnetische Elektrobleche sowie vermehrt auch die Verbindung von keramischen Halbleitern benötigt. Neben wärmearmen Fügeverfahren, wie dem Rührreißschweißen oder dem Ultraschallschweißen erhält auch das Laserstrahlschweißen Einzug in diesen Bereich. Das ISF befasst sich in zahlreichen Forschungsprojekten mit der Untersuchung und Weiterentwicklung dieser modernen Schweiß- und Fügetechnologien für elektrotechnische Anwendungen.

Elektrische Verbindungen werden im Kraftfahrzeugbereich sowohl in hoch integrierten Baugruppen als auch für Werkstoffkombinationen eingesetzt, die nur geringen thermischen Belastungen ausgesetzt werden dürfen. Umgebende Bauteile können durch Überschreitung von Temperaturgrenzen zerstört und die mechanischen Eigenschaften der beteiligten Werkstoffe bzw. Werkstoffgefüge negativ beeinflusst werden. Bei den wärmearmen Fügeverfahren (z. B. Rührreißschweißen, Widerstandsschweißen und Ultraschallschweißen) wird die Schmelztemperatur der Werkstoffe nicht bzw. nur lokal erreicht und der Energieeintrag ist gegenüber den Schmelzschweißverfahren vergleichsweise gering. Die Bildung spröder in-

termetallischer Phasen bei Mischverbindungen ist erheblich reduziert. Das Schweißen komplexer Halbleitermaterialien wird durch das Fügen in fester Phase gar erst möglich. In einigen dieser Anwendungen wird der Einsatz des Laserstrahlschweißens mit besonders energiearmer Prozessführung und neuartigen Strahlquellen evaluiert, da die Verfahrensvorteile der nahezu vollständigen Verschleißfreiheit und der Flexibilität nicht von der Hand zu weisen sind. Die Elektromobilität bietet somit zahlreiche Anwendungsbereiche moderner Fügetechnologien für elektrische Verbindungen. Dazu zählen im Wesentlichen die Forschungsfelder Energiespeicher (Batterie), Energieübertragung (Bordnetz)

und Energiewandlung (Leistungselektronik und Elektromotor).

Forschungsfeld „Energiespeicher“

Die Speicherung und Bereitstellung von Energie für den mobilen Einsatz im Kraftfahrzeug stellt die Fügetechnik vor diverse Herausforderungen. Als derzeit wichtigste Speichertechnologie hat sich die Lithium-Ionen-Batterie durchgesetzt. Weitere Technologien wie die Natrium-Ionen-Zellchemie oder die Festkörperbatterien setzen eine ständige Weiterentwicklung und Bewertung beteiligter Fügeprozesse voraus. Neben dem Ziel der effizienten Energiespeicherung (hohe volumetrische und gravimetri-

KONTAKT

Dr.-Ing. Alexander Schiebahn
Tel.: +49 (0)241 8097233
schiebahn@isf.rwth-aachen.de
www.isf.rwth-aachen.de

sche Energiedichte) der Zellen sind vordergründig eine hohe Leistungsdichte, geringe Produktionskosten sowie eine hohe Lebensdauer von Interesse. Diese Ziele werden nicht bloß auf Zellebene, sondern auch auf Modul- bzw. Packebene angestrebt. Die Fügetechnik ist somit auf allen Ebenen der Batterieproduktion von höchster Relevanz. In **Abbildung 1** sind die üblichen Bauformen der Lithium-Batteriezellen dargestellt. Jede Bauform hat charakteristische Vor- und Nachteile. Obwohl mit der Pouch-Zelle die höchsten Energie- und Leistungsdichten erreicht werden, ist in der Praxis ein klarer Trend zu prismatischen Zellen und Rundzellen zu verzeichnen, da Anforderungen hinsichtlich Lebensdauer, Sicherheit und Handling überwiegen.

Das ISF arbeitet im Rahmen verschiedenster Forschungsvorhaben an der Weiterentwicklung von Fügetechnologien für die Batteriezellfertigung. Neben den genannten funktionalen Eigenschaften rücken auch Aspekte des Recyclings in den Fokus. Der Trend zur Skalierung in Richtung großformatiger Zellen setzt etablierte Verfahren und Anlagentechnik zurück auf den Prüfstand.

Einen innovativen Beitrag dazu liefert das öffentlich geförderte Projekt „InTreS“ (Projektnr.: EFRE-0800612), das die Performancesteigerung von stationären Batteriespeichern auf Basis der Lithium-Ionen-Technologie durch innovative Trägermaterialien zum Ziel hat. In dem Vorhaben werden eingesetzte Elektroden (beschichtete Al- und Cu-Folien) der Batteriezelle durch dreidimensionale Trägermaterialien (Streckmetalle, Metallschäume oder Metallgewebe) substituiert (**Abbildung 2**). Eine verbesserte Anbindung zwischen Substrat und Aktivmaterial soll die Lebensdauer der Batterie verbessern. Durch die Vergrößerung des Oberflächen-Volumen-Verhältnisses der Elektrodenmaterialien kann eine Steigerung der Energiedichte erzielt werden. Für diese Anwendung wird aufgrund der charakteristischen Anforderungen üblicherweise das Ultraschallschweißen eingesetzt. Das

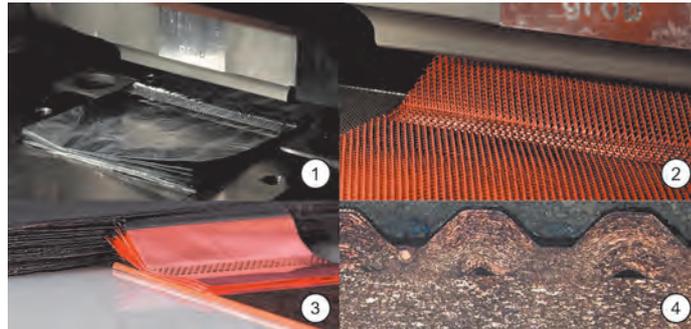


Abbildung 2: Ultraschallschweißen von Elektrodenfolien & -streckgittern (1 & 2), Fügen von Elektrodenfolien an Zelleiter (3), Schlibbild Cu-Folie an Ableiterblech (4)

Laserstrahlschweißen drängt hier vermehrt ins Blickfeld, obwohl bekannte Probleme wie Porenbildung, erhöhter Wärmeeintrag oder Ablösung einzelner Elektrodenfolien bisher nicht gelöst werden konnten.

An anderen filigranen Bauteilen von Batterie, Leistungselektronik und Sensorik wird das Laserstrahlschweißen bereits erfolgreich eingesetzt. **Abbildung 3** zeigt beispielhaft einen Querschliff einer Deckelschweißung für Batteriegehäuse, sowie eine Einschweißung eines Messrohrs in einem Durchflussmengensensor. Durch die Flexibilität moderner Laserstrahlerzeuger und Laseroptiken in Bezug auf Strahldurchmesser, Brennweite und Strahlpendelung lassen sich selbst Strukturen in der Größenordnung ≤ 1 mm unter Einhaltung höchster Qualitätsanforderungen fügen.

Forschungsfeld „Energieübertragung“

Die Verteilung der elektrischen Energie im Bordnetz ist für ein Elektrofahrzeug von zentraler Bedeutung. Die Anzahl elektrisch betriebener Komponenten erfährt nicht bloß durch die Elektromobilität einen stetigen Anstieg. Neben dem Antrieb erfordern auch Sicherheits- und Komfortfunktionen, wie beispielsweise

Sensorik, Steuergeräte und Aktorik für den Abstandstempomaten (ACC), den Spurhalteassistenten oder die Sitzheizung eine elektrische Kontaktierung. Für all diese Komponenten sind Fügeverbindungen notwendig. Zuverlässige Verbindungen sorgen dafür, dass über die gesamte Fahrzeuglebensdauer auch unter widrigsten Bedingungen (z. B. Erschütterungen, Vibrationen oder Feuchtigkeit) alles reibungslos funktioniert. Von größter Wichtigkeit ist dazu die dauerhafte Sicherstellung einer elektrisch und mechanisch sicheren Verbindung. Herkömmliche kraft- und formschlüssige Verbindungen wie Schraub-, Steck- oder Crimpverbindungen stoßen hinsichtlich ihrer Stromtragfähigkeit und Dauerbeständigkeit häufig an ihre Grenzen. Der Ausfall oder die unkontrollierte Alterung einer Fügestelle stellt insbesondere bei Fahr- und Assistenzfunktionen ein Sicherheitsrisiko dar. Stoffschlüssige, wärmearme Fügeverfahren können hingegen robuste, niederohmige Kontakte herstellen, die problemlos einen Fahrzeuglebenszyklus überstehen.

Neben den konventionellen litzenbasierten Bordnetzen werden für den Hochleistungsbereich vermehrt Busbars eingesetzt. Eingesetzte Fügeverfahren sind das Ultraschallschwei-

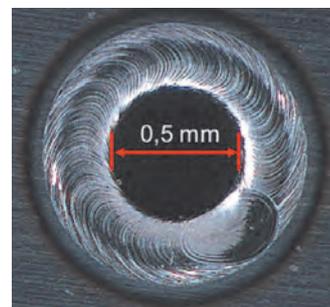
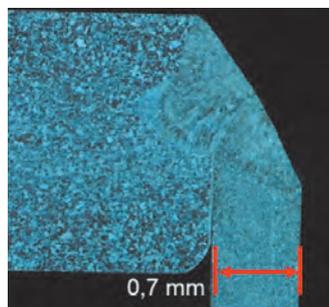


Abbildung 3: Laserstrahlschweißen von Batteriegehäusen (links) und Messrohren für Durchflusssensoren (rechts).



Abbildung 4:
RSV-Technologie, Ultraschallschweißen einer Litze-Terminal-Verbindung und einer Cu-Busbar (von links nach rechts)

ßen, das Reibschweißen, das Widerstandsbuckelschweißen und das Laserstrahlschweißen. Üblicherweise werden Reinkupfer- und Reinaluminiumwerkstoffe mit hoher elektrischer Leitfähigkeit und deren Mischverbindungen eingesetzt. Das wesentliche Gütekriterium eines elektrischen Kontakts ist ein niedriger Übergangswiderstand. Die aktuell eingesetzten wärmearmen Fügeverfahren und Strahlverfahren vereinen die Eigenschaft, dass aufgrund der hohen Grundqualität eine Widerstandsmessung kaum Informationen über die tatsächliche Verbindungsgüte liefert. Die niedrigen Widerstände sind nicht gegenüber üblichen Schweißfehlern sensitiv, sodass die Qualitätsbestimmung weiterhin mechanisch mittels zerstörender Prüfung erfolgt. Mit dem Forschungsprojekt „EleQuant“ (AiF-Nr.: 21.956 N) wird der Bedarf der Entwicklung eines geeigneten elektrischen Prüfverfahrens gedeckt, das aussagekräftige Qualitätskennwerte liefert, ohne die Fügestellen zu zerstören. Durch einen kurzzeitigen, hohen Stromfluss und Auswertung der transienten Antwort (z.B. Widerstand und lokale Erwärmung) kann die Fügestelle bewertet werden.

Abbildung 5 zeigt zwei REM-Aufnahmen (a) und (b) einer Elektronenstrahl- bzw. Laserstrahlschweißung im Vakuum (EB / LB) einer Al/Cu-Mischverbindung. Die Aufnahmen zeigen die Grenzfläche zwischen Aluminium (Al) und Kupfer (Cu) mit einer Schichtstruktur, die durch die Schweißung entstanden ist. Die Schichtstruktur ist in (a) und (b) durch Pfeile markiert. Die Schichtstruktur ist in (a) und (b) durch Pfeile markiert.

Mit der Reibschweißverbinder-Technologie (RSV), einem neuartigen Verfahren, das vom ISF für die Kontaktierung von Aluminiumlitzen $\geq 10 \text{ mm}^2$ bis zur Marktreife entwickelt wurde, kann ein Beitrag zu sicheren Fügeverbindungen geleistet werden. Im laufenden Forschungsprojekt „HFconnect“ (Projektnr.: EFRE-0400365) wird die Technologie zur Anwendung im Bereich der Hochfrequenzlitzen weiterentwickelt. Beispielhaft sind in **Abbildung 4** eine Litze-Kabelschuh-Verbindung einer Aluminium-litze mit der RSV-Technologie, ein Ultraschallschweißprozess einer Litze-Terminal-Verbindung und eine Cu-Busbarschweißung dargestellt.

Neben technischen Anforderungen sind bei Schweißprozessen insbesondere Aspekte der Arbeitssicherheit von Relevanz. Bei wärmearmen Fügeprozessen war dieser Punkt bisher von geringerer Bedeutung, da gegenüber Lichtbogen- und Strahlschweißverfahren mit deutlich geringeren gesundheitsrelevanten Emissionen zu rechnen ist. Im Rahmen des IGF-Projekts „EmUs“ (AiF-Nr.: 21.568 N) verdeutlicht das ISF hingegen, dass bei Litze-Terminal-Anwendungen großen Querschnitts ($\geq 35 \text{ mm}^2$) diese Emissionen keineswegs vernachlässigbar sind, diese aber durch geeignete Arbeitsschutzmaßnahmen auch in großindustrieller Anwendung sicher durchgeführt werden können.

Beim Laser- bzw. Elektronenstrahlschweißen unter Vakuum können präzise Schweißnähte bei Al/Cu-Mischverbindungen für Busbars erzielt werden (DFG-Nr.: 342185193). Eine geringe Ausprägung spröder intermetallischer Phasen wird erzielt. Darüber hinaus konnte die Energieeinbringung in die Werkstoffe reduziert werden. Dies stellt eine erhebliche Verbesserung gegenüber einem konventionellen Laserstrahlschweißprozess dar, da bei adäquater Parametrierung reproduzierbare Al-Cu-Mischverbindungen möglich werden. In **Abbildung 5** sind eine Elektro-

nenstrahl- bzw. Laserstrahlschweißung einer Aluminium-Kupfer-Mischverbindung dargestellt. Neben den Grundwerkstoffen Kupfer (Cu) und Aluminium (Al) bildet sich ein Mischkristall (M), ein Eutektikum (E) und eine schmale intermetallische Phase (I).

Forschungsfeld „Energiewandlung“

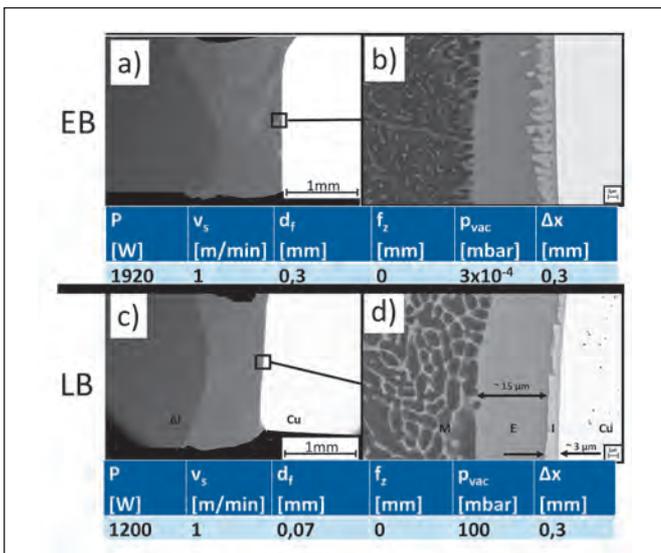
Das Forschungsfeld Energiewandlung beinhaltet im Wesentlichen die Bereitstellung der Wechsellspannung für den Antriebsmotor über die Leistungselektronik sowie den Motor selbst. Für hochintegrierte Leistungselektronik kamen in der Vergangenheit neben dem Drahtbonds vor allem Lötprozesse zum Einsatz. Hinsichtlich der Prozessüberwachung und Lebensdauer der Bauteile kann insbesondere bei Hochspannungs- bzw. Hochstromanwendungen ein deutlicher Anstieg der Produktqualität durch Einsatz des Ultraschallschweißprozesses erzielt werden (**Abbildung 6**). Der Materialmix aus Halbleiterkeramik und Kupferbeschichtung (engl. Direct Bonded Copper – DBC) setzt einen wärmearmen Prozess zum Fügen voraus.

Mit den Projekten „SIMUSS“ (AiF-Nr.: 20.161 N) und „DEGU“ (DFG-Nr.: 470052705) leistet das ISF einen innovativen Beitrag zur industrietauglichen Umsetzung einer Prozessüberwachung von Ultraschallschweißprozessen für technisch anspruchsvolle Produkte. Da das Ultraschallschweißen beispielsweise bei IGBT-Anwendungen am Ende der Prozesskette hoher Wertschöpfung eingesetzt wird, bedeutet eine fehlerhafte Fügestelle hier einen besonders hohen wirtschaftlichen Schaden, der vermieden werden sollte.

Weiterhin befasst sich das ISF mit der elektrischen Verbindung von Komponenten für Elektromotoren. Dazu zählen unter anderem Kupfer-Hairpins für Statorwicklungen oder die Paketierung von weichmagnetischen Elektroblechen (**Abbildung 6**).

Eisenkerne von modernen Elektromotoren werden aus einzelnen, elektrisch voneinander isolierten Elektro-

Abbildung 5:
REM-Aufnahme einer Elektronenstrahl- bzw. Laserstrahlschweißung im Vakuum (EB / LB) einer Al/Cu-Mischverbindung



blechlamellen aufgebaut, wodurch die Verlustleistung im Vergleich zu einem massiven Eisenkern deutlich reduziert wird. Die Herausforderung bei der Paketierung der einzelnen Lamellen besteht in der Herstellung einer kraftschlüssigen Verbindung, durch die nur minimale Kurzschlüsse zwischen den Lamellen auftreten. Beim heute gängigen Stanzpaketieren werden nicht nur lange Kurzschlusspfade, sondern auch Änderungen der Lamellengeometrie hervorgerufen, was die Verlustleistung erhöht. Das Kleben erzeugt die besten Ergebnisse in Bezug auf die magnetischen Eigenschaften eines Eisenkerns, ist aber aufgrund der hohen Kosten oft nicht wirtschaftlich. Stattdessen findet das Laserstrahlschweißen wegen seiner kurzen Prozesszeiten und sehr guter Automatisierbarkeit (Remote-Schweißen) immer häufiger Anwendung.

Im Projekt (DFG-Nr.: 432930813) „Elektromagnetische Bewertung und Quantifizierung von Schweißprozessen zur Paketierung von Elektrolechen“ wird die Eignung eines „minimal invasiven“ Laserstrahlschweißprozesses als Alternative zum Kleben und Stanzpaketieren von Elektrolechen untersucht. Ziel des Projekts ist Effizienzsteigerung von segmentierten Elektromotoren durch den neuartigen Fügeprozess.

Die Paketierung mit einem Laserstrahlprozess erfolgt klassischerweise mit Linearnähten (**Abbildung 6, rechts oben**), die lange und zusammenhängende Kurzschlusspfade erzeugen. Das Laserstrahlschweißen ermöglicht außerdem die Herstellung einzelner Punktschweißungen (**Abbildung 6, rechts unten**). Mit jedem Schweißpunkt werden nur 2-3 Lamellen verbunden, sodass im Gegensatz zu Linearnähten nur sehr kleine Kurzschlusspfade entstehen und die Verlustleistung deutlich reduziert wird.

Für das Fügen von Kupfer-Hairpins für Statorwicklungen von Elektromotoren kommt ebenfalls vermehrt das Laserstrahlschweißen zum Einsatz. Zum einen besteht die Herausforderung im fehlenden technischen

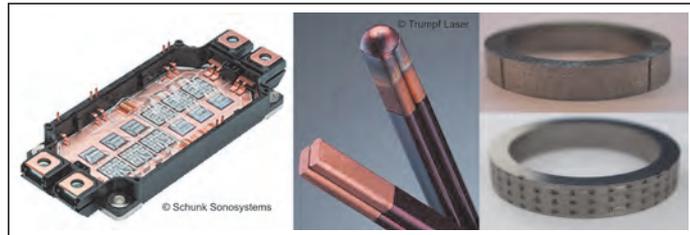


Abbildung 6: Ultraschallschweißen von Leistungselektronik - IGBT-Anwendung (links), Laserstrahlschweißen von Cu-Hairpins und Elektrolechen für Elektromotoren (Mitte/rechts)

Nullspalt, der durch die zum Schweißen notwendige lokale Entfernung der Isolationsbeschichtung entsteht. Das fehlende Material kann mit Laserstrahlprozessen kaum ohne den Einsatz von Zusatzwerkstoff kompensiert werden. Zum anderen ist die Reflexion von technisch relevanten Laserstrahlwellenlängen an Kupferwerkstoffen sehr hoch, sodass eine starke Rückstreuung der Laserstrahlung auftritt. Dies ist nicht nur in Bezug auf die Lasersicherheit, sondern auch für die Wirtschaftlichkeit des Prozesses relevant, da eine hohe Überschussleistung bereitgestellt werden muss.

Das Laserstrahlschweißen bietet durch Einsatz moderner Optiken die Möglichkeit eine hochfrequente Strahlableitung zu realisieren. Dadurch können zwei benachbarte Hairpins selektiv aufgeschmolzen werden. Durch eine geeignete Prozessführung verbinden sich die beiden einzelnen Schmelzbäder und erstarren zu einem zusammenhängenden Schweißpunkt (**Abbildung 6, Mitte**). Beim Laserstrahlschweißen entstehen durch kleine Fokussdurchmesser sehr hohe Leistungsdichten, die bereits bei kurzen Schweißzeiten im Bereich von Zehntel-Millisekunden eine Schweißverbindung zwischen den Hairpins herstellen können. Dadurch ist der Energieeintrag in die Bauteile und deren thermische Beanspruchung sehr gering. Das Resultat sind kleine Wärmeeinflusszonen und hohe Prozessstabilität ohne das Risiko einer Beschädigung der darunter liegenden Isolationsbeschichtung.

Zusammenfassung

Die Herausforderungen für die Fügetechnik in der Elektromobilität sind vielfältig. Neben neuartigen Werkstoffkombinationen stehen die The-

men Digitalisierung und Prozessüberwachung im Vordergrund. Das ISF beschäftigt sich im Rahmen diverser öffentlich geförderter Projekte und Industrieprojekte mit den beteiligten Fügeprozessen. Die Vernetzung mit anderen Hochschulinstituten, unter anderem im Rahmen des eLAB (Elektromobilitätslabor) sind die Basis einer erfolgreichen Begegnung sämtlicher Herausforderungen fügetechnischer Fragestellungen.

Danksagung

Die IGF-Vorhaben 20.161 N, 21.568 N und 21.956 N der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. DVS, Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf werden über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Nicht zuletzt sei auch für die Förderung der Vorhaben EFRE-0400365 und EFRE-0800612 aus den Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) gedankt.

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – 342185193, 432930813, 470052705



Einfluss der Randbedingungen auf die Schlackenbildung beim MSG-Schweißen von AHSS-Stählen für Automobilanwendungen

Alexandros Pipinikas, Rahul Sharma, Matthias Angerhausen

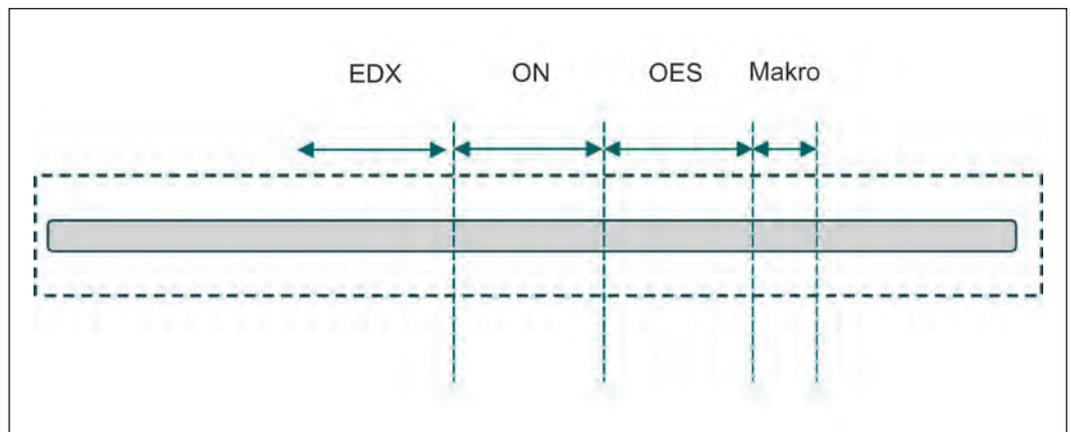


Abbildung 1:
Position der Probenentnahme

Hochfeste Stähle (Advanced High Strength Steels, AHSS) werden zunehmend in modernen Automobilanwendungen eingesetzt. Beim Schweißen dieser Stähle wird häufig oxidhaltige Schlacke auf der Oberfläche der Schweißraupen gefunden. Während die Schlackenreduzierung selbst durch Änderung der chemischen Zusammensetzung von Grundwerkstoff, Schweißzusatz und Schutzgas unterstützt werden kann, konzentrierten sich frühere Untersuchungen zum Schweißverhalten von AHSS nicht auf die Schlackenbildung. [1]

Einleitung

Der Begriff „Schlacke“ wird in verschiedenen Wissenschaftszweigen wie der Mineralogie, der Metallurgie und der Schweißtechnik weitläufig verwendet. In der Mineralogie ist Schlacke der verbleibende wertlose Teil im Prozess der Abtrennung von Metallen aus dem Substrat, da er keine finanziell bedeutsamen Metalle enthält. In der Metallurgie bezeichnet der Begriff Schlacke eine Mischung/Verbindung von Oxiden, meist Silikaten, die einen gewissen Anteil an Phosphaten, Halogeniden, Sulfiden oder Sulfaten, Boraten usw. enthalten kann. Im flüssigen Zustand haben Schlacken in der Regel eine Dichte von 3 bis 4 g/cm³, während ihre Viskosität im Bereich von 150-1500 mPa·s liegt. [2] Im Vergleich dazu liegen die entsprechenden

Werte für Metalle (Eisen, Nickel und Kupfer) zwischen 8-11 g/cm³ für die Dichte und 1-3 mPa·s für die Viskosität.

Ihre Bildung stellt einen erheblichen Nachteil für manche Verfahren, wie z. B. das Metall-Schutzgasschweißen, dar. In diesem Fall ist Silikatschlacke ein unerwünschtes Nebenprodukt des Schweißprozesses.

Selbst wenn Schlacken für den Schweißprozess von Vorteil sind (z. B. beim Unterpulverschweißen), bringen sie oft Nachteile mit sich, wenn sie festhaftend die Oberfläche bedecken. Der Hauptnachteil besteht darin, dass die Schlackenreste von der Nahtoberfläche entfernt werden müssen, bevor weitere Bearbeitungsschritte erfolgen können oder beim Mehrlagenschweißen weitere Lagen ge-

schweißt werden können. Insbesondere in der Automobilindustrie können nicht entfernte Schlackenreste nach dem Aufbringen der kathodischen Tauchlackierung aufplatzen oder abfallen, wodurch die äußere Farbgebung der Außenhaut beschädigt und die Schweißnaht der Korrosion ausgesetzt wird. Zudem kann der Lackierprozess durch die lokale Beeinflussung der elektrischen Leitfähigkeit behindert werden.

Die notwendige Schlackenentfernung ist ein zusätzlicher Produktionsschritt, der Zeit und Ressourcen verbraucht und damit die Produktionskosten erhöht. Auch wenn es mechanische Verfahren gibt, die es ermöglichen, alle Schlackenreste von der Schweißnahtoberfläche zu entfernen, entstehen zusätzliche Kosten [3]. Die Menge und der Anhaftungsgrad der

KONTAKT

Dr.-Ing. Rahul Sharma
Tel.: +49 (0)241 80-96267
sharma@isf.rwth-aachen.de
www.isf.rwth-aachen.de

HCT780XD (DIN EN 10346:2015-10)									
chemische Zusammensetzung [%] (bestimmt durch optische Emissionsspektrometrie)									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb	Ti	Al
0,16	0,26	1,9	0,016	0,002	0,38	-	0,015	0,005	0,04
Mechanische Eigenschaften									
Streckgrenze $R_e (R_{eL} - R_{eH})$						450 – 560 MPa			
Zugfestigkeit R_m						780 – 900 MPa			
Bruchdehnung A_{80}						≥ 14 %			

Tabelle 1:
Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften von HCT780XD

Schlacken auf der Schweißnahtoberfläche spielen eine wesentliche Rolle für den Gesamtaufwand zu deren Entfernung.

Aufgrund des Sauerstoffpotenzials innerhalb der MSG-Schweißlichtbogenzone mit kohlendioxidhaltigem Schutzgas ist die Bildung von Mangansilikatschlacken ein häufiges Problem beim Schweißen von niedrig legierten Stählen. Zusätzlich wird die Ablösbarkeit manchmal erschwert, wenn sich die Schlackeninseln an der Schmelzlinie auf der Oberfläche der Schweißraupe befinden [4]. Daher beeinflusst der Mangan- und Siliziumgehalt des Schweißguts die Gesamtfläche der Schweißraupe, die von Schlacke bedeckt ist. Mikrolegierungselemente, die üblicherweise in AHSS enthalten sind, könnten daher die Schlackenvermeidung verbessern, sofern der Gesamtgehalt an Silizium und Mangan gleichzeitig reduziert wird. Dies könnte auch die mechanischen Eigenschaften der Schweißnähte aufgrund der verbesserten Mikrostruktur verbessern. [5] Die Verringerung des Sauerstoffpotenzials ist ein weiterer Ansatz zur Verringerung der Schlackenbildung, der durch geringere Zusätze von Kohlendioxid im Schutzgas erreicht

werden kann. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde HCT780XD für die Untersuchungen in diesem Papier verwendet und ein Vergleich mit einem typischen Baustahl DX56D, der in der Automobilproduktion verwendet wird, durchgeführt.

Experimentelle Vorgehensweise

Als Grundwerkstoffe wurden der Dualphasenstahl HCT780XD+Z und der Baustahl DX56D+Z mit einer Blechdicke von 1,2 mm verwendet. Beide Werkstoffe sind beidseitig feuerverzinkt mit einer Zinkauflage von 127 g/m² (HCT780XD) und 120 g/m² (DX56D).

Der Dualphasenstahl HCT780XD+D zeichnet sich durch ein weiches Ferritgefüge mit einer Matrix aus, die Inseln von Martensit enthält. Diese Inseln führen zu einer erhöhten Zugfestigkeit. **Tabelle 1** veranschaulicht die chemische Zusammensetzung und die relevanten mechanischen Eigenschaften. Es lässt sich eine sehr hohe Zugfestigkeit in Verbindung mit einem niedrigen Verhältnis von Streckgrenze zu Zugfestigkeit feststellen. Relevante Anwendungsgebiete finden sich im Automobilbau, insbesondere im Karosseriebau.

DX56D+Z ist ein tiefgezogener, feuerverzinkter Stahl, der in der Automobilindustrie häufig sowohl für Innen- als auch für Außenteile verwendet wird. Seine chemische Zusammensetzung und mechanischen Eigenschaften sind aus **Tabelle 2** ersichtlich.

Für die Versuchsreihe wurden beide Materialien in den Abmessungen von 200 mm x 100 mm geschnitten.

Um gleichbleibende Einbrandbedingungen zu gewährleisten und Bauteil- und Brennerpositionierungstoleranzen zu eliminieren, wurden die Fügepartner übereinandergelegt, anstatt einen gewöhnlichen Überlappstoß zu verwenden, **Abb. 2**.

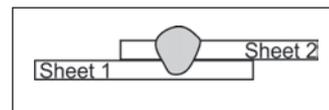


Abbildung 2:
Modifizierter Überlappstoß

Die verwendeten Schweißdrähte waren G 3Si1 und G 2Ti nach DIN EN ISO 14341:2011-04 mit einem Durchmesser von 1,0 mm. Die chemischen Nennzusammensetzungen sind in **Tabelle 3** und **Tabelle 4** dargestellt. Der Ti-legierte Zusatzwerkstoff verspricht eine reduzierte Schlacken-

DX56D (DIN EN 10346:2015-10)									
chemische Zusammensetzung [%] (bestimmt durch optische Emissionsspektrometrie)									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb	Ti	Al
< 0,01	0,08	0,1	0,015	0,012	0,03	-	0,015	0,05	0,04
Mechanische Eigenschaften									
Streckgrenze $R_e (R_{eL} - R_{eH})$						120 – 180 MPa			
Zugfestigkeit R_m						260 – 350 MPa			
Bruchdehnung A_{80}						≥ 37 %			

Tabelle 2:
Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften von DX56D

G 3Si1				
chemische Zusammensetzung [%] (bestimmt durch optische Emissionsspektrometrie)				
C	Mn	Si	P	S
0,08	1,5	0,8	0,011	0,012
Mechanische Eigenschaften				
Streckgrenze $R_{p0.2}$		≥ 420 MPa		
Zugfestigkeit R_m		500-640 MPa		
Bruchdehnung A_5		20 %		

Tabelle 3:
Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften von G3Si1

G 2Ti					
Nominale chemische Zusammensetzung [%]					
C	Mn	Si	Al	Ti	Zr
0,08	1,05	0,6	0,08	0,06	-
Mechanische Eigenschaften					
Streckgrenze $R_{p0.2}$			≥ 420 MPa		
Zugfestigkeit R_m			500-640 MPa		
Bruchdehnung A_5			≥ 20 %		

Tabelle 4:
Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften von G2T

bildung. Außerdem ist die Schlacke von Ti-modifizierten Drähten elektrisch leitfähig, so dass sie beim Prozess der kathodischen Tauchlackierung (KTL) kein Hindernis für die Entstehung der Schutzschicht stellt. Trotzdem können auch hier Schlackeinseln nach dem KTL-Prozess abplatzen und so den Grundwerkstoff in diesem Bereich ungeschützt lassen.

Als Schweißstromquelle diente eine Fronius TransPulse Synergic 4000. Es wurde ein konventioneller Kurzlichtbogenprozess verwendet, bei dem der Draht kontinuierlich in die Schweißzone zugeführt wird. Als Schutzgase wurden M12 (97,5% Ar und 2,5% CO₂) und M21 (82% Ar und

18% CO₂) mit einer Durchflussrate von 12 l/min verwendet. Der Abstand der Schutzgasdüse betrug 12 mm und die Schweißgeschwindigkeit lag bei 0,4 m/min. Die Schweißposition war PA mit einer neutralen Brennerposition.

Für jede der sich ergebenden acht Kombinationen von Grundwerkstoff, Zusatzdraht und Schutzgas wurde mindestens eine Probe geschweißt, damit die Schlackenbildung bewertet werden konnte.

Die Oberfläche des Blechs wurde vor dem Schweißen mit Aceton gereinigt. Zur Beurteilung der Schweißraupengeometrie wurden von allen Proben Makroschliffe angefertigt. Aus den

Makroschliffen wurden die Schweißraupenbreite, die Gesamthöhe der Schweißnaht und der Aufmischungsgrad bestimmt.

Zur Berechnung der Streckenergie wurden für jeden Versuch der Schweißstrom und die Schweißspannung mit einem Transientenrekorder gemessen. Dabei wurde die Strategie verfolgt, für jede Kombination vergleichbare Streckenergiewerte und damit vergleichbare Schweißraupengeometrien zu realisieren. Damit sollte sichergestellt werden, dass die Schlackenbildung bei unterschiedlichen Schweißgutkombinationen (Grundwerkstoff, Zusatzwerkstoff, Schutzgas) nicht durch unterschiedliche Einbrandbedingungen beeinflusst wurde.

Eine chemische Analyse der Zusammensetzung des Schweißguts wurde von der Oberseite der Proben mittels optischer Funkenemissionsspektrometrie durchgeführt. Für den Sauerstoff- und Stickstoffgehalt wurde das Schweißgut mittels Trägergas-Heißextraktionsverfahren analysiert. Die spezifische Zusammensetzung der Schlacke wurde von der Oberseite der Schweißraupe aus mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) mit energiedispersivem Röntgendetektor untersucht. **Abbildung 1** zeigt die Position und Länge der Proben, die für jede Untersuchungsmethode aus jeder Probe entnommen wurden.

Zur Beurteilung der Schweißraupengeometrie wurden von allen Proben Makroschliffe entnommen. Aus den Makroschliffen wurden die Schweißraupenbreite, die Gesamt-

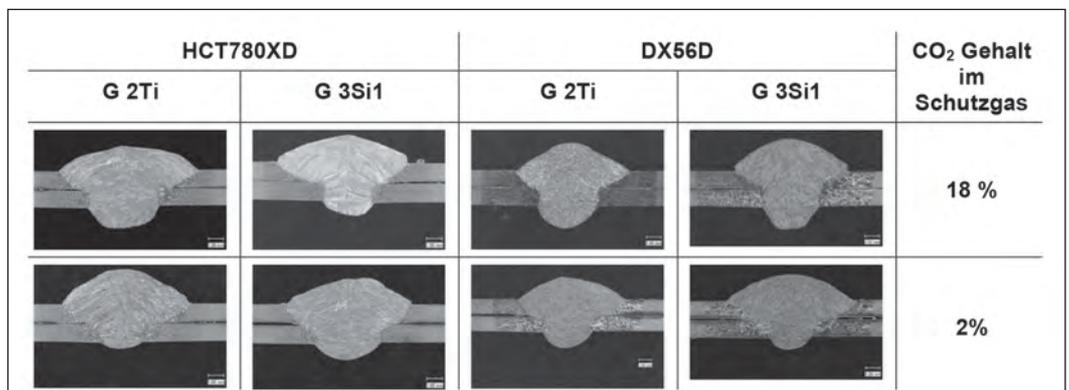


Abbildung 3:
Makroschliffe der geschweißten Proben

HCT780XD		DX56D		CO ₂ Gehalt im Schutzgas
G 2Ti	G 3Si1	G 2Ti	G 3Si1	
				18 %
				2 %

Abbildung 4: Schweißnahtoberfläche

Mit Schlacke bedeckte Fläche				O ₂ Gehalt im Schutzgas
HCT780XD		DX56D		
G 2Ti	G 3Si1	G 2Ti	G 3Si1	
6 %	8 %	2 %	5 %	18 %
0 %	0 %	1 %	3 %	2 %

Tabelle 5: schlackenbedeckte Fläche der Schweißrauten

höhe der Schweißnaht und die Aufmischrate bestimmt. Eine chemische Analyse der Zusammensetzung des Schweißguts wurde von der Oberseite der Proben mittels optischer Funkenemissionsspektrometrie durchgeführt. Der Sauerstoff- und Stickstoffgehalt des Schweißguts wurde mit der Trägergas-Heißextraktionsmethode analysiert. Die spezifische Zusammensetzung der Schlacke wurde von der Oberseite der Schweißrauten mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) mit energiedispersivem Röntgendetektor analysiert.

Ergebnisse

Einer der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Bildung von Schlackeninseln auf der Schweißrautenoberfläche ist die Wärmeeinbringung in die Schweißzone. Neben der instationären Messung der elektrischen Schweißparameter wurde die Wärmeeinwirkung in der Schweißzone auch durch Makroschliffe an allen Schweißnähten dokumentiert (Abbildung 3). Aufmischrate und Querschnitt der Schweißnähte unterschieden sich innerhalb des untersuchten Parameterfensters nur geringfügig (60±4%), ebenso wie die Schweißnahtbreite (9,1±0,6 mm) und die Gesamthöhe der Schweißnaht (5,8±0,4 mm).

Die Oberfläche der Schweißrauten aller untersuchten Parameter ist in **Abbildung 4** dargestellt. Auf der Oberfläche von Schweißrauten, die mit ArC18-Schutzgas hergestellt wurden, ist eine höhere Anzahl sichtbarer Schlackeninseln zu erkennen. Beim Schweißdraht G 2Ti sind in der Mitte der Schweißraupe schwarze, grobe Punkte zu finden, während beim Schweißdraht G 3Si1 glasige, kupferfarbene Schlackeninseln auftreten. In dieser Hinsicht besteht kein grundlegender Unterschied zwischen dem Dualphasenstahl und dem weichen Tiefziehstahl.

Die Zahlenwerte für die Schlackenbedeckung der Schweißrauten-

oberfläche sind in **Tabelle 5** angegeben.

Für die chemische Zusammensetzung des Schweißgutes lässt sich ein Zusammenhang zwischen dem verwendeten Schutzgas und dem Sauerstoffgehalt erkennen. Eine höhere Kohlendioxidzugabe führt zu einem höheren Sauerstoffgehalt im Schweißgut. Bei höheren Mangangehalten wird der Sauerstoffgehalt im Schweißgut auf 330 ppm begrenzt (.). Es ist keine andere schutzgasabhängige Änderung der chemischen Zusammensetzung zu erkennen. Der Einfluss von verdünnten Legierungselementen des Grundwerkstoffs und des Schweißzusatzdrahts ist viel bedeu-

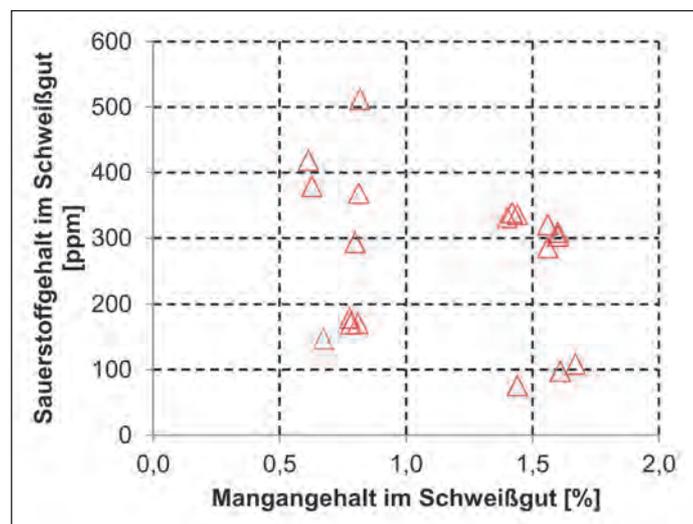


Abbildung 5: Verhältnis zwischen Sauerstoff- und Mangangehalt des Schweißguts

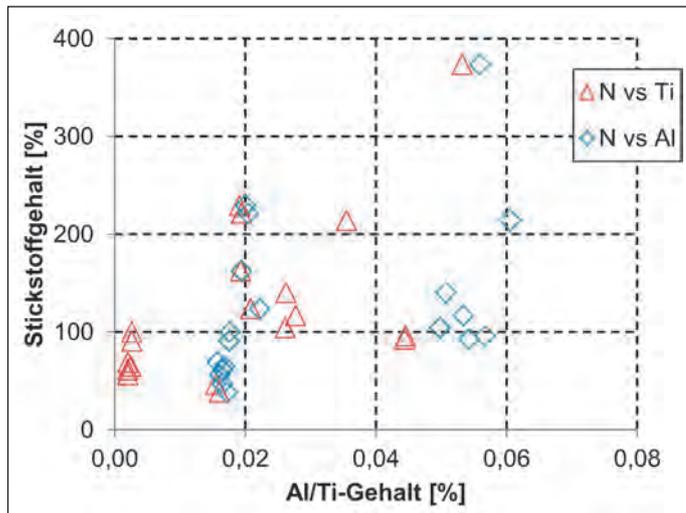


Abbildung 6: Verhältnis zwischen Stickstoff und Aluminium/Titan-Gehalt des Schweißguts

tender. Aufgrund des Gehalts an Mikrolegierungselementen wie Aluminium und Titan in Schweißdraht und Grundwerkstoff wird Stickstoff im Schweißbad gebunden ().

Mittels EDX-Analyse in einem Rasterelektronenmikroskop wurde die chemische Zusammensetzung der oberflächlichen Schlackeschichten untersucht. Es konnten drei verschiedene Arten von Schlackeschichten bestimmt werden. Die schwarzen Schichten auf den mit G 2Ti-Schweißdraht hergestellten Schweißraupen wiesen hohe Gehalte an Mangan, Sauerstoff, Zink, Titan, Aluminium und Eisen auf (Abbildung 7 a). Die rissigen Schichten, die auf den mit Arc2-Schutzgas hergestellten G 3Si1-Schweißnähten gefunden wurden, bestehen zum größten Teil aus Eisenoxid mit geringen Mengen (etwa 1 %) an Zink und Mangan (Abbildung 7 b). Glasige Inseln auf der Oberfläche von G 3Si1-Schweißgütern, die mit Arc18-Schutzgas hergestellt wurden, weisen hohe Gehalte an Mangan, Sauerstoff, Silizium und Eisen auf.

Fazit

Die Verwendung von Schutzgasen auf Argonbasis mit Zusätzen von Kohlendioxid ist für Dünnschichtanwendungen in der Schweißindustrie weit verbreitet. Geringe Zusätze von Kohlendioxid erhöhen das Risiko von Schmelzfehlern. Allerdings hängt die Menge der Schlackeninseln direkt vom Sauerstoffpotenzial des Schutzgases ab. Durch die Zersetzung von Kohlendioxidmolekülen im Schweißlichtbogen kann Sauerstoff mit metallischen Schweißbadbestandteilen reagieren und abbrennen. Da die Menge der Schlacke mit dem Gesamtgehalt an Legierungselementen im Schweißgut zunimmt, muss beim Schweißen von höher legierten Dualphasenstählen und der anschließenden KTL-Beschichtung mehr beachtet werden. Eine mögliche Lösung könnte die Zugabe von reaktiven Legierungselementen sein. Aufgrund der mikrolegierenden Wirkung von Aluminium und Titan führt die Reduzierung des Mangan- und Siliziumgehalts zu einer geringeren Mangansilikatbildung. In Verbindung

mit mikrolegierten Stählen kann der Aluminium- und Titananteil jedoch Schlackenrückstände bilden, die auch bei nachfolgenden Beschichtungsverfahren stören können. Daher bietet eine Kombination aus geeigneten Schutzgasen mit niedrigem Sauerstoffpotenzial, niedrig legierten Schweißdrähten und der Vermeidung von Schlackenbildung durch modifizierte Schweißparameter eine sichere Umgebung für Beschichtungsprozesse.

Literaturangaben

- [1] Kapustka, N., Conrardy, C., Babu, S., Albright, C., Effect of GMAW Process and Material Conditions on DP 780 and TRIP 780 Welds, *Welding Journal*, Vol. 87, June 2008, pp. 135s – 148s
- [2] Krüger, J.: Metalle-Speisen-Steine-Schlacken, Heft 83 Schriftenreihe der GDMB, Schlacken in der Metallurgie, S.9-10
- [3] Denninger, C., Schweißnahtreinigung in der Roboterzelle, *Journal für Oberflächentechnik*, No. 9, 2010, pp. 62-63
- [4] Ahsan, M., R. U., Cheepu, M., Park, Y., The effect of alloying elements of gas metal arc welding (GMAW) wire on weld pool flow and slag formation location in cold metal transfer (CMT), *Proceedings of Conference "Trends in Welding Research"*, Tokyo, Japan, 2016, pp. 775-778
- [5] Seo, J. S., Kim, H.J., Lee, C., Effect of Ti addition on weld microstructure and inclusion characteristics of bainitic GMA welds, *ISIJ International*, Vol. 53 (2013), No. 5, pp. 880–886w

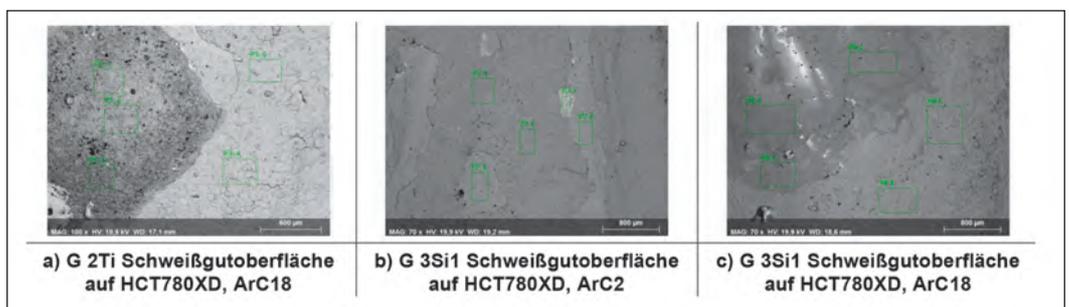


Abbildung 7: REM-Bilder (BSE-Detektor) der Schweißgutoberfläche

Auswahl und Qualifizierung von Fügeprozessen

Optimierung Ihrer Fügeprozesse vor Ort

Technologietransfer in die Praxis

Werkstoffprüfung und Analytik

Analyse und Diskussion Ihrer fügetechnischen Fertigung

Individualisierte Workshops

Automatisierung und Digitalisierung

Vom Prototypenbau bis zur Serienfertigung



FEF
Besser fügen.

www.fef-aachen.de

info@fef-aachen.de

IM FOKUS



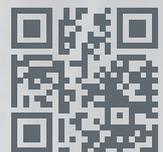
Gießereitechnik

AKADEMISCHE INTERESSENSGEMEINSCHAFT GIESSEREITECHNIK

Ingenieurwissenschaften

Anfragen zur kostenfreien Übersendung von Belegexemplaren oder zwecks redaktioneller Mitarbeit richten Sie bitte an

Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen (IWV)
Finkenstraße 10 · 68623 Lampertheim · Telefon 06206 939-0
info@alphapublic.de · www.institut-wv.de



Nachweis der temporären Kapillarstabilität bei EB-Strahlsprungtechnik mittels Röntgen-eigenleuchten

Stefan Gach, Fatma Akyel, Matthias Pfaffenrot

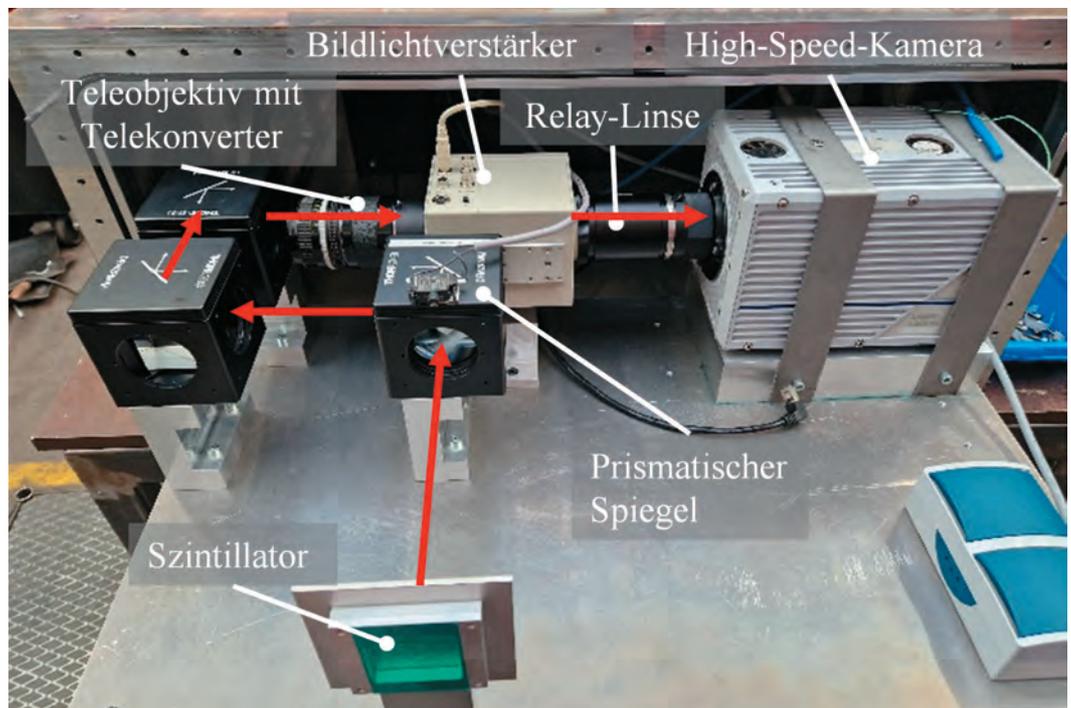


Abbildung 1:
Optische Bank bestehend aus: Szintillator, drei prismaförmigen Spiegeln in entsprechenden „Cage Cubes“, Teleobjektiv und Telekonverter, Bildlichtverstärker, Relay-Linse und High-Speed Kamera

Ein tiefgehendes Verständnis des zeitlichen Verhaltens von Kapillaren ermöglicht die Verbesserung moderner Strahlschweißprozesse, bspw. zur Anwendung der Mehrbad- oder Mehrprozess-technik im Elektronenstrahlschweißen. Mittels Röntgeneigenleuchten kann das zeitliche Kapillarverhalten bei einem EB-Mehrbadschweißprozess bei unterschiedlichen Frequenzen analysiert werden. Visualisiert wird dieses mittels Abbildung von Röntgenquanten, welche bei Strahl-Werkstoffinteraktion in der Kapillare entstehen und auf einem Szintillatorschirm über eine Pinhole-Kamera sichtbar gemacht werden kann. Die Analyse der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen erlaubt Rückschlüsse auf die Trägheit einer temporär unbeheizten EB-Kapillare.

Potentiale der EB-Mehrbad- bzw. -Mehrprozess-technik

Ein großer Vorteil des Elektronenstrahls, im Vergleich zum konkurrierenden Laserstrahlprozess, ist die freie Gestaltung der Wärmequelle sowie die quasi gleichzeitige Applikation an mehreren örtlich getrennten Wirkflecken (Mehrbadtechnik) oder gar in unterschiedlichen Anwendun-

gen (Mehrprozess-technik). Möglich wird dies durch dynamische Wechselfelder in den Ablenkspulen, welche auf die Ladungsträger im Strahl einwirken und ihn hochfrequent auf verschiedene Wirkflecke richten. Eine Dampfkapillare wird somit nur „temporär“ beheizt und bleibt in der übrigen Zeit durch ihre Trägheit geöffnet. Trotz der Entwicklung leistungsstarker Verstärker und schneller Ablenk-

spulen, die eine rapide Strahlableitung ermöglichen, existieren im industriellen Umfeld nur vereinzelt Anwendungen der Mehrbad- oder Mehrprozess-technik. Um das Potential des Elektronenstrahls als Werkzeug vollumfänglich auszuschöpfen, mangelt es nach aktuellem Stand der Forschung an Kenntnissen über das dynamische Kapillarverhalten. Insbesondere die relevanten Zeitkon-

KONTAKT

Stefan Gach, M. Eng.
Tel.: +49 (0)241 80-96322
gach@isf.rwth-aachen.de
www.isf.rwth-aachen.de

stanten, beispielsweise wie lange eine unbeheizte Kapillare durch ihre Trägheit geöffnet bleibt, bevor sie durch den statischen und dynamischen Druck sowie die Oberflächenspannungen der Schmelze kollabiert, sind weitestgehend unerforscht. Um diese Wissenslücke zu schließen, kann ein system-immanenter Vorteil des Elektronenstrahls genutzt werden: Die bei der Strahl-Werkstoff-Interaktion emittierte Röntgen-Strahlung. Dabei sind die Röntgenquanten die Informationsträger des Strahlprozesses und liefern Daten über die Geometrie der Dampfkapillare zum Zeitpunkt ihrer Emittierung.

Messaufbau und Versuchsdurchführung

Für die geometrische Abbildung der Schweißkapillare wird eine bleigeschirmte Lochbildkamera, eine „Camera Obscura“, verwendet. Diese erlaubt die bildgebende Darstellung der Strahl-Werkstoffinteraktion auf einem Röntgen-sensitiven Szintillatorschirm. Eine Hochgeschwindigkeitskamera filmt diesen ab. Die Elektronenstrahlschweißanlage besitzt eine höhenverstellbare Atmosphärenkammer zur Aufnahme von variablen, wärmeempfindlichen und konvektiv gekühlten Messgeräten, **Abbildung 2**. Die Camera Obscura wird in der Ebene des Elektronenstrahls auf Höhe des Werkstücks angeflanscht und ist somit fest zur Ebene des Elektronenstrahls positioniert.

Die optische Aufnahme des Szintillators erfolgt über mehrere Umlenkspiegel mittels eines Teleobjektivs auf einen Restlichtverstärker (Hamamatsu, C16031-311-A3). Dieser wird mit einer Relay-Linse direkt vor der Hochgeschwindigkeitskamera angebracht. Diese ersetzt das Objektiv der Hochgeschwindigkeitskamera und bildet den Phosphorschirm des Restlichtverstärkers 1:1 auf den CCD-Chip der Hochgeschwindigkeitskamera ab. Als Objekt der optischen Bank dient ein Szintillator (Hamamatsu JS6677, Wellenlängenbereich 540-560 nm), welcher eine optische Darstellung der Schweißkapillaren über die Ab-

bildung in der Pinhole-Kamera erlaubt, **Abbildung 1**. Die Abklingzeit des Szintillators beträgt 1 μ s. Daraus ergibt sich eine maximal mögliche Bildrate des Szintillators von 1×10^6 fps. Die eingesetzte Hochgeschwindigkeitskamera ist ein Photon SA4 mit einer maximalen Bildrate von 500×10^3 fps. Der Restlichtverstärker wird hierbei verwendet, um die Lichtausbeute des Schweißprozesses zu erhöhen. Insbesondere bei hohen Aufnahmezeiten, bei denen die Belichtungszeiten sehr kurz sind, ist dies zwingend erforderlich.

Um die Trägheit der Dampfkapillare zu erfassen, wird der Strahl wechselseitig zwischen einer Schweißprobe und einem Strahlfänger abgelenkt. Durch den Versuchsaufbau (**Abbildung 3 oben**) wird sichergestellt, dass lediglich Röntgenstrahlen, die aus der Probe emittiert werden, vom Szintillator erfasst werden, da der Strahlfänger leicht erhöht zur Probe befindet. Die Zwei-Punkt-Ablenkfigur verteilt die Strahlleistung gleichmäßig auf zwei Intensitätspunkte, die im gleichen Zeitintervall abwechselnd bestrahlt werden, **Abbildung 3 unten**. Die Amplitude der Strahlablenkung beträgt 20 mm. In der Auswertung erfolgt ein Vergleich der Kapillartiefen anhand der Röntgensignale zum Zeitpunkt des Verlassens und erneuter Rückkehr des Strahls in die Kapillare. Ein \varnothing 1 mm Wolframdraht auf der dem Pinhole zugewandten Seite der Schweißprobe ermöglicht die Bestimmung eines Maßstabs [pxl/mm] des Röntgenbildes aufgrund der Abschattung der Röntgenstrahlung durch die höhere Dichte des Wolframs.

Die Schweißprobe besteht aus rostfreiem, hochlegiertem Stahl 1.4307 (304L) mit den Abmessungen 200 x 50 x 8 mm³. Sie wird senkrecht in einen Schraubstock eingespannt und in Längsrichtung geschweißt. Der Strahlfänger (Ablenkdummy) aus Baustahl S355JR (A572) dient dazu, die Wärme des abgelenkten Flecks zu absorbieren und zu verhindern, dass die Röntgenstrahlen bei der Reflexion auf den Szintillator treffen, **Abbildung 3 oben**.



Abbildung 2: Höhenverstellbare Atmosphärenkammer zur Aufnahme der Messgeräte in der Vakuumkammer einer Elektronenstrahlschweißanlage

Im Rahmen dieser Untersuchung wird das Verhalten der Schweißkapillare bei zwei verschiedenen Ablenkfrequenzen untersucht (**Tabelle 1**). Die Aufnahmezeiten der Hochgeschwindigkeitskamera werden ebenfalls entsprechend der Ablenkfrequenz angepasst.

In den vorliegenden Versuchen beträgt die Erfassungsrate mindestens das Zehnfache der Ablenkfrequenz. Dadurch wird sichergestellt, dass die Ausbildung der Kapillare über einen Zeitraum von mindestens fünf Bildern detailliert analysiert werden kann, wie in **Abbildung 5** schematisch dargestellt.

Abbildung 3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus; Oben: Gesamtaufbau Orthogonal zum Strahl sowie Probenvorschub; Unten: Draufsicht der Strahlablenkung zwischen Probe und Strahlfänger

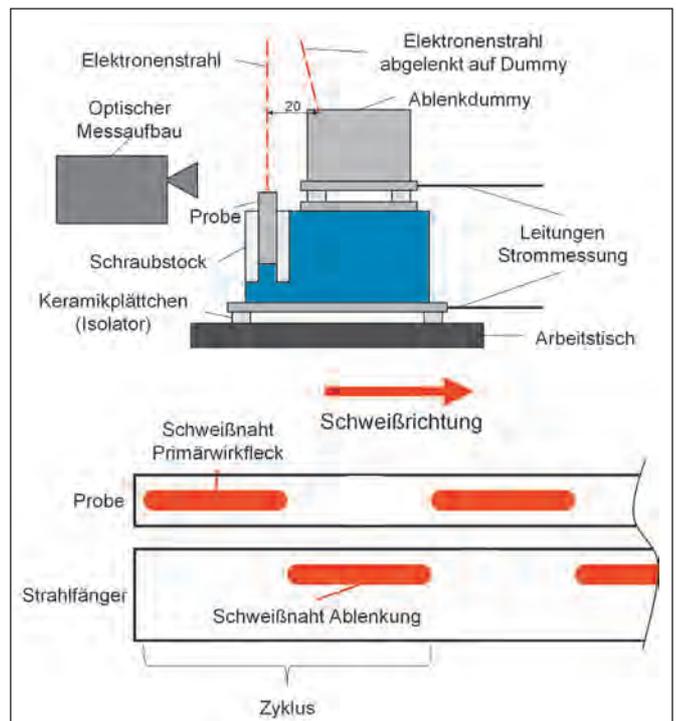


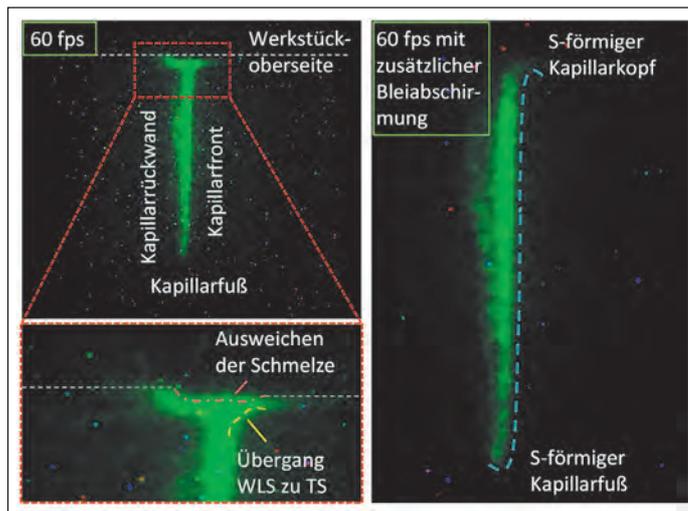
Tabelle 1:
Ablenkfrequenzen und Messparameter der betrachteten Versuche

Versuchsbezeichnung	T100	T1000
Ablenkfrequenz [Hz]	100	1000
Aufnahmerate [fps]	1000	10000
Ø Lochblende [mm]	1000	1000
Verstärkungsfaktor [-]	825	999

Tabelle 2:
Schweißparameter

Parameter	Beschl.-Spannung [kV]	Strahlstrom [mA]	Fokusposition	Schweißgeschw. [mm/s]
Wert	150	100	Oberflächenfokus	33,3

Abbildung 4:
Exemplarisches Röntgeneigenleuchten (Rohdaten, gespiegelt) – Schweißparameter entsprechend Tabelle 2, Lochblendendurchmesser: 500 µm; Aufnahmerate: 60 fps; Bildlichtverstärkungsfaktor: 700; Oben links: Gesamtbild; Unten links: Detailsicht des Kapillarkopfs; Rechts: Röntgeneigenleuchten bei zusätzlicher Bleiabschirmung zur Rauschunterdrückung



Die Schweißparameter bleiben über alle Versuche hinweg konstant, **Tabelle 2**. Der Strahl wird sowohl beim Einlauf, als auch beim Auslauf der Naht ohne Leistungslope einbeziehungsweise ausgeblendet.

Ergebnisse

Die Röntgenstrahlen visualisieren die Strahl-Material-Interaktionen. Alle im Material entschleunigten Elektronen emittieren Röntgenstrahlung, die sich

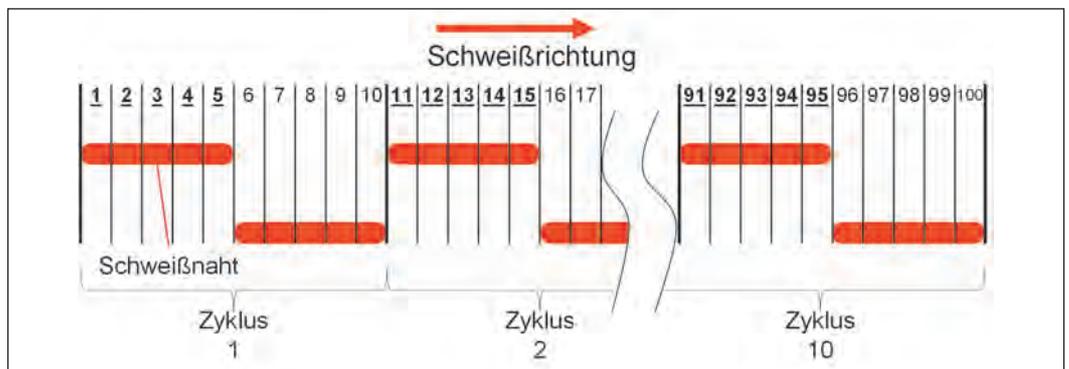
kugelförmig um den Strahlwirkelek ausbreiten. Durch die auf den Szintillator auftreffenden Röntgenquanten wird ein Bild der Kapillare erzeugt, aus dem dessen Form und Dimensionen in einer bisher unerreichten Genauigkeit abgeleitet werden können, **Abbildung 4**. Ein kleiner Lochblendendurchmesser (Ø500 µm) und eine geringere Bildlichtverstärkung ermöglichen eine exakte lokale Visualisierung der Dampfkapillare bei einer Bildfrequenz von 60 fps. Die

aufgehellten Rohdaten zeigen die beleuchtete Kapillarfront, den Kapillarfuß und das Ausweichen der Schmelze unter dem Dampfdruck auf der Oberseite des Werkstücks. Eine zusätzliche Bleiabschirmung minimiert das Hintergrundrauschen weiter.

Die Nahtoberseite, die durch die Randstrahlung des EB beleuchtet wird, ist ebenfalls zu sehen, **Abbildung 4 unten links**. Deutlich zu erkennen ist der Übergang vom Wärmeleitungs-schweißen (WLS) zum Tiefschweißen (TS), der beim Vorschub des Strahls durch die in Schweißrichtung vorlaufende Randstrahlung des Gaußschen Strahlprofils entsteht. Die vom Elektronenstrahldurchmesser abhängige Verteilung der Strahlintensität beeinflusst die Form der Kapillarfront, wie in früheren Arbeiten der Autoren [1] diskutiert. Im Kapillarfuß ist der Kernbereich der höchsten Strahlintensität bereits überschritten und die Strahlintensität nimmt ab. Infolgedessen bildet sich in diesem Bereich ein S-förmiger Verlauf der Kapillarstrahlung aus, **Abbildung 4 rechts**.

An der Kapillarrückwand ist eine Oszillation der Beleuchtung zu erkennen. Dies könnte entweder auf die rückwärtige Randstrahlung des Strahls oder auf rückgestreute Elektronen zurückzuführen sein. Letztere werden von der Kapillarfront zur Kapillarrückwand gestreut, wenn sie mit den Materialatomen der Schmelzfront wechselwirken. Bei der Wechselwirkung mit der Dampf-Schmelze-Grenzfläche an der Kapillarrückwand wandeln diese ihre verbleibende kinetische Energie in Wärme um und erzeugen wiederum

Abbildung 5:
Schematische Darstellung der Bildsequenzen in Bezug auf die Strahlablenkung eines Schweißversuches zur Erläuterung der Auswertungsmethodik. Der Strahl ist für die Bilder 1–5, Bilder 11–15, usw. auf der Probe und damit auf dem Szintillator sichtbar (Nummern fett und unterstrichen).



Röntgenquanten. Auch die Röntgenfluoreszenz könnte eine mögliche Ursache sein. Diese tritt auf, wenn die sich von der Kapillarfront ausbreitende Röntgenstrahlung auf die Rückwand trifft und dort mit der Schmelze wechselwirkt. Ihr Anteil dürfte jedoch aufgrund der begrenzten Effizienz gering sein. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig, um diese Effekte eindeutig zu identifizieren.

Auswertung

Da die Aufnahmezeit dem Zehnfachen der Ablenkfrequenz entspricht, werden pro Zyklus 10 Bilder aufgenommen, **Abbildung 5**. Das bedeutet, dass in einem Zyklus fünf Aufnahmen auf der Probe (Kapillare ist beleuchtet) und fünf auf dem Strahlenfänger (keine Beleuchtung) gemacht werden.

Die beleuchtete Kapillare ist in der ersten Hälfte jedes Bildzyklus (Bilder 1-5, Bilder 11-15, usw.) auf dem Szintillator sichtbar und in der zweiten Hälfte (Bilder 6-10, Bilder 16-20, usw.) unsichtbar. Die auf dem Szintillator sichtbare Streustrahlung ist in ihrer Position und Intensität auf jedem Bild zufällig verteilt. Betrachtet man die ersten Bilder eines jeden Zyklus (hier beispielhaft Bild 1 dargestellt), so wird deutlich, dass das von der Röntgenstrahlung der Kapillare verursachte Messsignal in Bezug auf Tiefe und Intensität annähernd konstant ist, **Abbildung 6**.

Um den Einfluss des Rauschsignals bzw. der Streustrahlung zu minimieren werden „Durchschnittsbilder“ \bar{B}_i errechnet. Hierfür wird der Durchschnitt aus den jeweils ersten, zwei-

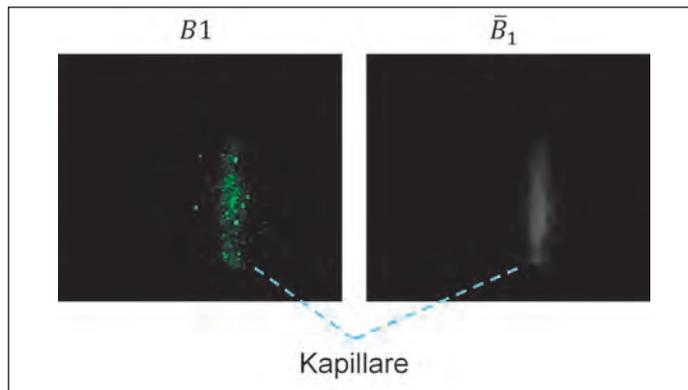


Abbildung 6: Erstes Bild des ersten Zyklus (Bild 1, Rohdaten) sowie das Durchschnittsbild \bar{B}_1 (in Graustufen), berechnet aus zehn Bildern (jeweils erstes Bild der betrachteten zehn Zyklen)

ten, dritten, vierten und fünften Bildern der zehn betrachteten Ablenkzyklen gebildet. Die Durchschnittsbilder eliminieren den Einfluss der Streustrahlung fast vollständig, während gleichzeitig die Form der Kapillare homogenisiert und dadurch deutlich sichtbar wird. Des Weiteren wird die Sichtbarkeit der Kapillare durch Invertierung und Normalisierung der Grauwerte zusätzlich gesteigert. Eine Spiegelung hebt die Bilddrehung durch die Lochkamera auf, **Abbildung 7**.

Diskussion

Die optische Auswertung für den Parameter T100 mit einer Strahlablenkfrequenz von 100 Hz zeigt eine durchschnittliche Zunahme der Kapillartiefe. Sie beginnt bei 5,8 mm im ersten Bild, in dem der Strahl zum ersten Mal auf die Probe trifft, und nimmt bis zu 11 mm Kapillartiefe zu, bevor der Strahl die Kapillare wieder verlässt, **Abbildung 8**. Sobald der Strahl wieder auf die Probe trifft, scheint die Kapillare kollabiert zu sein. Das bedeutet, dass diese in der nicht erhitzten Phase auf fast 53 % ihrer Eindringtiefe zusammenzubrechen scheint. Unterhalb des Bereichs

der häufigsten Dampf-Material-Wechselwirkung, der in den Durchschnittsbildern durch eine gesättigten Grauwert dargestellt ist, befindet sich ein viel schmalerer Bereich mit geringerer Sättigung. Dieser Bereich zeigt bereits in Bild 1 die endgültige Kapillartiefe, die der Bereich der starken Sättigung erst in Bild 5 erreicht. Sie ist in allen Durchschnittsbildern zu sehen, überlagert aber mit zunehmender Tiefe die primäre Absorptionszone des EB.

Möglicherweise kollabiert die Kapillare bei diesem Parameter nicht vollständig, sondern verkleinert ihren Durchmesser erheblich. Solange die Kapillare nicht beheizt wird, sinkt die Verdampfungsrate der Schmelzeman-tels. Dies ist jedoch der entscheidende Parameter, der den Dampfdruck in der Kapillare aufrechterhält, während Oberflächenspannung und hydrostatischer Druck der Schmelze die Kapillare zusammendrücken [2]. Eine alternative Erklärung ist, dass die hohe Intensität im Kern der Gaußschen Strahlintensitätsverteilung durch die Schmelze hindurchdringen kann und den Bereich mit niedriger Intensität beleuchtet. Die Intensität des Strahls nimmt mit dem Radius um das Strahlzentrum ab. Die Elektronen in den äußeren Bereichen interagieren mit höher gelegenen Bereichen des Schmelzmantels und erweitern einen größeren Kapillardurchmesser dadurch in die Tiefe, ähnlich wie bei einer Verdampfungswelle. Eine endgültige Antwort kann in diesem Stadium der Untersuchung noch nicht gegeben werden und erfordert weitere Untersuchungen.

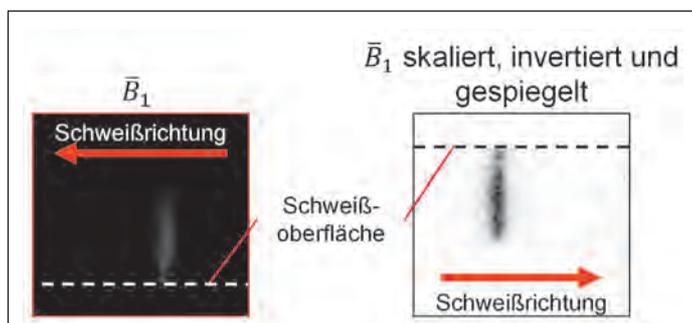


Abbildung 7: Vergleich des Durchschnittsbildes \bar{B}_1 und \bar{B}_1 skaliert, invertiert und gespiegelt

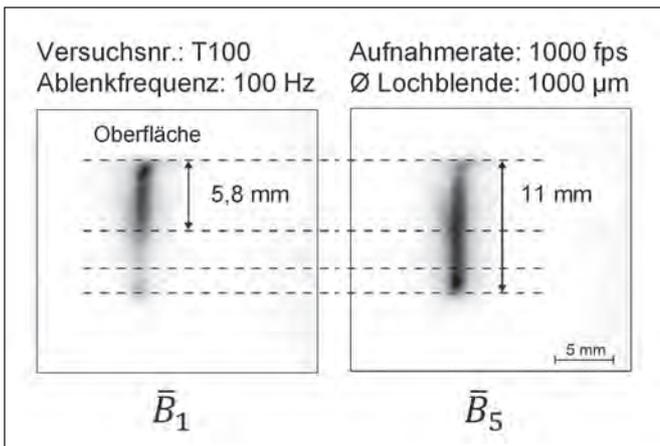


Abbildung 8:
Optische Analyse der Nahttiefe über
Durchschnittsbilder des Versuchs T100

Für eine Strahlablenkfrequenz von 100 Hz liegt somit keine stabile Kapillare vor. Im Gegensatz dazu zeigt der Parameter T1000 ein deutlich stabileres Verhalten der Kapillare, **Abbildung 9**. Der Restlichtverstärker erlaubt selbst bei der hohen Aufnahmezeit von 10000 Hz eine klar erkennbare Kapillare.

Für eine Ablenkfrequenz von 1000 Hz zeigt sich keine signifikante Tiefenreduktion der Kapillare (Vergleich \bar{B}_1 und \bar{B}_5). Die Kapillare scheint von der Ablenkung nahezu unbeeinflusst zu sein. Ihre Trägheit scheint dominanter zu sein als der Einfluss der Abschattungszeit von 0,5 ms. Dies gilt für die vorgegebene Material-Parameter-Kombination bei den gegebenen Wärmeableitungsbedingungen.

Zusammenfassung und Ausblick

Die im Rahmen dieser Untersuchungen erzielten Ergebnisse ermöglichen ein tieferes Verständnis des Kapillarverhaltens beim Elektronenstrahl-

schweißen und bergen damit enormes Potenzial hinsichtlich der Prozess- bzw. Taktzeitoptimierung beim Elektronenstrahlschweißen.

Der Bildverstärker bietet einen analytischen Vorteil insbesondere bei der Analyse der Strahlablenkung. Die Aufnahme von zuverlässigen Bildern ist bis zu einer Ablenkfrequenz von 1000 Hz möglich, wobei das erhöhte Hintergrundrauschen zu berücksichtigen ist. Im Gegensatz zu den Messungen aus den 1970er Jahren [3–5] sind deutlich höhere Aufnahmezeiten möglich. Verglichen mit einem stationären Prozess werden durch den Einsatz der digitalen Aufnahmetechnik erstmals Prozessaufnahmen mit Strahlfiguren möglich.

Bei langsamen Ablenkfrequenzen (100 Hz) kollabieren die Kapillaren auf die Hälfte ihrer Schweißtiefe. Mit zunehmender Ablenkfrequenz wird der Kapillarkollaps weniger dominant und ist bei 1000 Hz Ablenkfrequenz nicht mehr nachweisbar.

Weitere Untersuchungen könnten umfassen:

Eine Verbesserung des optischen Aufbaus ermöglicht eine Verbesserung der Hochfrequenzanalyse, insbesondere im Hinblick auf eine Erhöhung der Lichtempfindlichkeit. Es hat sich gezeigt, dass bei kleinerem Blendendurchmesser das Bild schärfer wird, die Lichtausbeute aber abnimmt. Wird der Aufbau mit Komponenten höherer Lichtempfindlichkeit verwendet (z. B. mit einem optimierten Teleobjektiv anstelle eines Telekonverters), kann der Blendendurchmesser verringert werden, wodurch die Geometrie der Dampfkapillare deutlicher abgebildet werden kann. Dazu können, durch die verbesserten Lichtausbeute, noch höhere Ablenkfrequenzen bzw. Aufnahmezeiten verwendet werden. Dadurch lässt sich unter anderem auch die Rückwand der Kapillare abbilden, was eine Interpretation der physikalischen Phänomene von Reflexionen innerhalb der Dampfkapillare ermöglicht.

Die Abhängigkeit des Kapillarverhaltens von den Schweißparametern (z. B. Schweißgeschwindigkeit, Schweißleistung etc.) muss noch untersucht werden. Der verwendete Werkstoff könnte die Grenzfrequenz beeinflussen, bei der kein Kapillarkollaps nachweisbar ist.

Ein quantitativer Zusammenhang zwischen der Ablenkfrequenz und den oben genannten Prozessparametern muss unter Berücksichtigung der werkstoffspezifischen Variablen noch hergestellt werden.

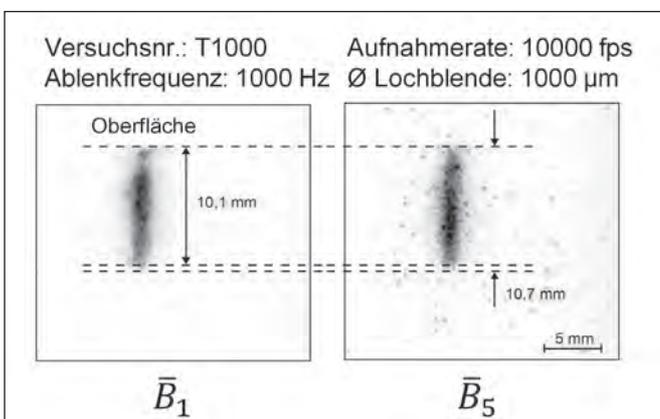
Förderhinweis

Die vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen des Projekts „x-ray EB capillary“ an der RWTH Aachen durchgeführt und durch die Dobeneck-Technologie-Stiftung gefördert. Für die Förderung und Unterstützung sei an dieser Stelle gedankt.

Literaturangaben

- [1] S. Gach, S. Olschok, S. Jakobs und U. Reigen, „Utilisation of the X-ray emission of an electron beam capillary for visualisation of the beam-material interaction“, *Materials Testing*, Jg. 64, Nr. 2, S. 151–160, 2022, doi: 10.1515/mt-2021-2126.
- [2] H. Schultz, *Elektronenstrahlschweißen*, 2. Aufl. Düsseldorf: Verl. für Schweißen und Verwandte Verfahren DVS-Verl., 2000.
- [3] C. M. Weber, E. R. Funk und R. C. McMaster, *Penetration Mechanism of Partial Penetration Electron Beam Welding: A new technique utilizing a pinhole X-ray camera can record secondary X-radiation given off at the point of impact to reveal the characteristics of beam-metal interaction and the spiking phenomenon*. Ohio: Ohio State University, 1970. [Online]. Verfügbar unter: https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_1972_02_s90.pdf
- [4] T. Miyazaki und N. Taniguchi, *An experimental analysis of penetration mechanism of high power density electron beam*, 1972.
- [5] Y. Arata, M. Fujisawa und E. Abe, „A Study on Dynamic Behaviours of Electron Beam Welding (Report I): The Observation by a Fluoroscopic Method“, *Transactions of JWRI*, Nr. 5, S. 1–9, 1976. [Online]. Verfügbar unter: https://ir.library.osaka-u.ac.jp/repo/ouka/all/10360/jwri05_01_001.pdf

Abbildung 9:
Optische Analyse der Nahttiefe über
Durchschnittsbilder des Versuchs T1000



FOCUS ON FUTURE



LOHNFERTIGUNG MIT DER ELEKTRONENSTRAHLTECHNIK

Ressourcen entlasten – Effektivität steigern!

Wir sind Ihr Partner – vom Prototypen bis zur Serienproduktion. Verlassen Sie sich auf unsere Elektronenstrahltechnik, wenn es um hochfeste Verbindungen geht, die später enormen Belastungen ausgesetzt sind.

REFERENZEN



Hochleistungswärmetauscher in Kooperation mit Plansee SE für Wendelstein 7-X



www.ptr-ebeam.com

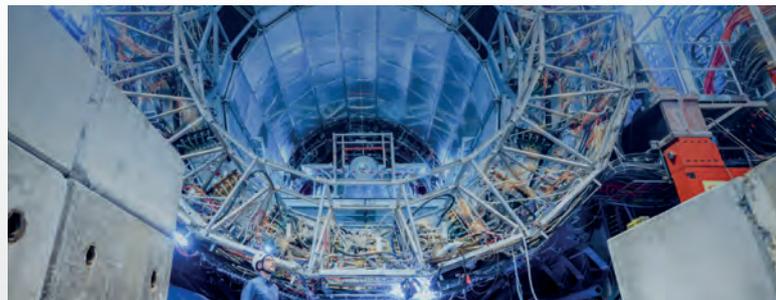
PTR Strahltechnik GmbH
Am Erlenbruch 9 · 63505 Langenselbold · Germany
Telefon: +49 6184 2055-0 · E-Mail: zentrale@ptr-ebeam.com

THE INNOVATORS OF THE ELECTRON BEAM

Fit für die Zukunft!

Wir haben die Elektronenstrahltechnik weiterentwickelt für neue, einzigartige Anwendungsmöglichkeiten, die Ihre Entwicklungskosten senken, Ihre Innovationsaktivitäten steigern und Ihnen Wettbewerbsvorteile verschaffen.

REFERENZEN



CERN – Mit dem Elektronenstrahl erforschen, was die Welt im Innersten zusammenhält



www.sst-ebeam.com

Steigerwald Strahltechnik GmbH
Emmy-Noether-Str. 2 · 82216 Maisach · Germany
Telefon: +49 8141 3535-0 · E-Mail: info@sst-ebeam.com

Rührreibschweißen – höchste Schweißnahtqualität und Prozessstabilität für Nichteisenmetalle und Mischverbindungen

Pascal Rabe, Alexander Schiebahn



Abbildung 1:
Rührreibschweißnaht in Aluminium mit Werkzeug [© Thilo Vogel]

Das Rührreibschweißen hat sich seit seiner Patentierung 1991 von einem hoch innovativen Fügeverfahren für Nischenanwendungen von lithiumhaltigen Aluminiumlegierungen in der Raumfahrt zu einem verlässlichen Schweißverfahren für die Großserie in einer Vielzahl von Industriesektoren entwickelt. Schwerpunktmäßig werden Aluminiumblech- und Aluminiumgusskomponenten gefügt. Zur Anwendung kommt es auf Grund der hohen Zuverlässigkeit, Produktivität und Nahtqualität im Flugzeugbau, Schiff- und Schienenfahrzeugbau, der Herstellung medizinischer Geräte und der Automobilindustrie. Dort wird es sowohl für Karosseriekomponenten und Batteriekästen als auch für Aluminium-Kupfer Verbindungen in elektrischen Systemen verwendet.

Abbildung 2:
Prozessablauf beim Rührreibschweißen [Quelle: HZG]

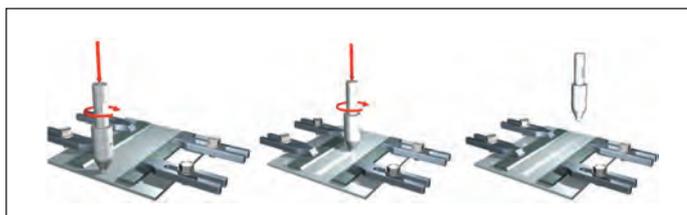
Abbildung 3:
Querschliff einer klebstofffixierten Überlapp-Rührreibschweißverbindung am Beispiel von zwei 14 mm dicken Aluminiumgussplatten (Schweißen erfolgte durch den Klebstoff)

Das Rührreibschweißen (engl.: Friction Stir Welding, FSW) lässt sich in drei Prozessarbeitschritte unterteilen (vgl. **Abbildung 2**). Im ersten Arbeitsschritt bewegt sich ein rotierendes zylindrisches Schweißwerkzeug auf der Oberfläche der zu verbindenden Werkstücke, die auf eine tragfähige Schweißunterlage gespannt sind. Durch die entstehende Reibungswärme zwischen verschleißfestem Schweißwerkzeug und Werkstück erweicht das Werkstückmaterial und der Schweißstift des

Rührreibschweißwerkzeugs wird bis zur Werkzeugschulter in das Werkstück eingedrückt. Im zweiten Arbeitsschritt bewegt sich das Werkzeug bei einer vorgegebenen Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit entlang der Fügelinie. Die Werkstücke werden im plastischen Zustand durchmischt und ein feinkörniges, rekristallisiertes Gefüge entsteht in der Verbindungszone. Im dritten Arbeitsschritt, nach Beendigung der Schweißaufgabe, fährt das rotierende Werkzeug aus dem Werkstück he-

raus. Am Ende der Schweißnaht verbleibt, bedingt durch den Schweißstift des Werkzeuges, ein Endloch.

Das Rührreibschweißverfahren zeichnet sich durch hohe Reproduzierbarkeit und beste Schweißnahteigenschaften aus. Gegenüber konventionellen Schmelzschweißverfahren ist der spezifische Wärmeeintrag gering, wodurch der Werkstoff im Nahtbereich lediglich plastifiziert und nicht aufgeschmolzen wird. Daraus ergeben sich viele Vorteile: geringer



KONTAKT

Dr.-Ing. Alexander Schiebahn
Tel.: +49 (0)241 8097233
schiebahn@isf.rwth-aachen.de
www.isf.rwth-aachen.de

Verzug, Vermeidung von Rissbildung und metallurgischen Poren sowie eine deutliche Reduktion der Anzahl metallurgischer Poren im durchmischten Bereich bei Aluminium-Gusswerkstoffen (vgl. **Abbildung 3**). Eine Entmischung oder ein Abbrand von Legierungsbestandteilen treten bei geeigneter Parameterwahl nicht auf. Ferner ist keine besondere Fügestellen- oder Oberflächenvorbereitung der Bauteile notwendig. Für den Schweißprozess werden in der Regel keine Schutzgase oder Zusatzwerkstoffe benötigt. Die Prozesskontrolle ist im Vergleich zu anderen Schweißverfahren von weniger Faktoren abhängig.

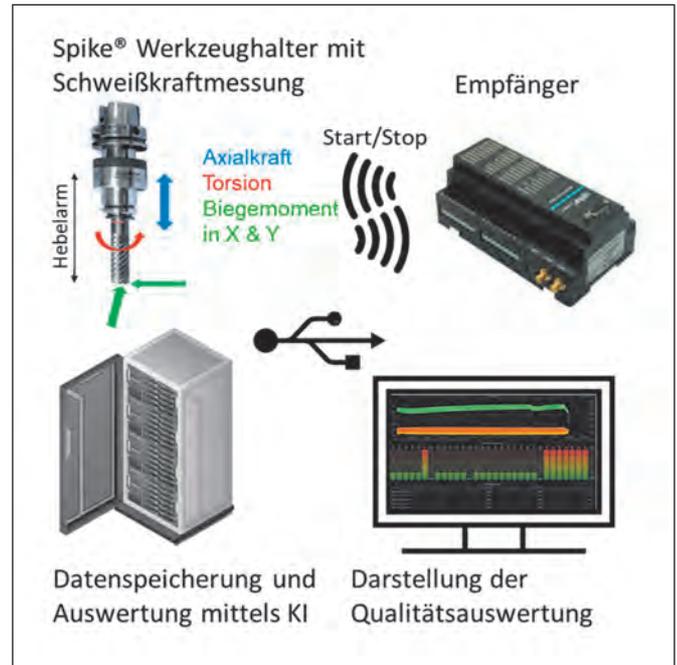
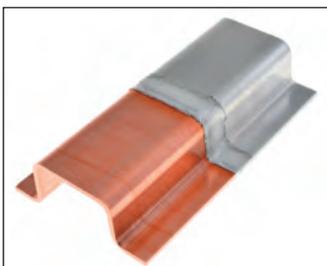
Das Rührreischweißen hat sich in den letzten Jahren in einer Vielzahl von Anwendungsfeldern etabliert. Besonders vorangetrieben wurde diese Entwicklung durch das Auslaufen des Patentschutzes im Jahr 2015. Zunächst wurde das Rührreischweißen im Bereich der Luft- und besonders Raumfahrt eingesetzt. Zeitnah erfolgt die Umsetzung im Bereich des Schiff- und Waggonbaus. Auch in der Automobilindustrie wurde das Potenzial dieser Schweißtechnologie erkannt, sodass rührreibgeschweißte Bauteile in der Produktion genutzt werden. Weitere Anwendung erhält das Rührreischweißen im aktuellen Themenfeld der Elektromobilität, in dem nicht nur strukturelle Batteriekästen, sondern auch elektrotechnische Teile gefertigt werden. Schwerpunkt ist die Erstellung von Mischverbindungen aus Aluminium und Kupfer mit geringen elektrischen Widerständen und hoher spezifischer Stromtragfähigkeit. Neben der hohen Schweißnahtqualität und der Vermeidung dicker intermetallischer Phasensäume, ermöglicht das Rührreischweißen das Fügen

von Mischverbindungen mit Blechdicken, welche mit klassischen Schmelzschweißverfahren nicht oder nur schwer zu erzeugen sind.

Das Rührreischweißen wird überwiegend für das Fügen von Aluminiumwerkstoffen im Bereich von 1-20mm 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.

In genau diesen Themengebieten arbeitet das ISF in industriell und öffentlich geförderten Forschungsprojekten an der Erweiterung der Anwendungsgebiete sowie Weiterentwicklung und Verbesserung des Prozesses. Im AiF-Projekt „FriForm“ wurden für Elektromobilität und Leichtbau unterschiedliche rührreibgeschweißte Mischverbindungen aus Aluminium, Kupfer, Stahl und Magnesium untersucht und durch Prozessparameteranpassung hinsichtlich der Umformbarkeit der Schweißnähte optimiert. **Abbildung 4** zeigt die Ergebnisse von Schweißungen mit optimierten Parametern nach der Umformung zu Hutprofilen mit unterschiedlichen Nahtorientierungen. Im oberen Bild ist eine Verbindung aus Reinaluminium mit Reinkupfer abgebildet, welche als stromführende Komponente implementiert und an den Bauraum angepasst werden kann. Im unteren Bild ist eine Mischverbindung aus Tiefziehstahl und einer naturharten Aluminiumlegierung gezeigt. Beide werden im Karosseriebau verwendet.

Um den Anwendungsbereich des Rührreischweißens zu erweitern



und die Produktivität des Verfahrens zu steigern, wird am ISF das konventionelle Rührreischweißen mit Komponenten aus der Widerstandsschweißtechnik kombiniert um eine zusätzliche Wärmeeinbringung unabhängig von der Reibung zu erzeugen. Weiterhin können komplizierte und nebenzeitsteigernde Spann- und Fixierelemente durch Klebtechnik reduziert oder ersetzt werden (vgl. **Abbildung 2**).

Neben der Erweiterung der Anwendungsfelder ist in der industriellen Umsetzung und Produktion die Nachverfolgbarkeit und Qualitätskontrolle von höchster Bedeutung, nicht nur in äußerst kritischen Anwendungen wie der Raumfahrt, sondern auch im Automobil- und Schienenfahrzeugbau. Dabei sind aktuell verbreitete Systeme zur Überwachung der Prozessparameter und Hüllkurvenüberwachung der Axialkraft meist nicht ausreichend für eine zuverlässige Überwachung der Nahtqualität. Zur Verbesserung der Qualitätsüberwachung und -vorhersage sowie Integration des Rührreischweißprozesses in die digitale Nachverfolgung und Beurteilung von Fertigungsketten arbeitet das ISF im Rahmen des RWTH-Exzellenzclusters „Internet of Production“ in einem interdisziplinären Team. Für die Überwachung der

Abbildung 5: Darstellung der Schweißdatenaufzeichnung, Verarbeitung und grafische Repräsentation der Ergebnisse

Abbildung 4: Hutprofile als Bauteildemonstratoren umgeformter Mischverbindungen aus Al-Cu und Al-Stahl

Qualität werden neben den Informationen zum Werkstoff und der Fügeaufgabe die Kraftmessdaten der drei Koordinatenrichtungen sowie das Prozessdrehmoment während des Schweißprozesses aufgezeichnet und online für eine nahezu Echtzeitüberwachung ausgewertet (vgl. **Abbildung 5**).

Die Auswertung der Daten erfolgt durch künstliche Intelligenz. Zur Klassifizierung von Schweißnähten wurden Computertomografieaufnah-

men von unterschiedlichen geschweißten Bauteilen erstellt. Defekte größer als 0,02 mm konnten so identifiziert und mit den aufgezeichneten Schweißdaten korreliert werden. Mit diesen Daten wurde ein Deep Learning Algorithmus basierend auf einem dicht vernetzten neuronalen Faltungsnetzwerk trainiert. Dieses ermöglicht nach dem Training die Online-Klassifizierung von Rührreißschweißungen verschiedener Aluminiumlegierungen und Blechdicken über einen weiten Schweißparame-

terbereich mit einer Genauigkeit von über 95%. Die lokal aufgelösten Qualitätsdaten werden in einer Datenbank abgelegt und können so in die weitere Produktionskette der jeweiligen Bauteile eingeschlossen werden.

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC 2023 Internet of Production – 390621612.

YOUR GLOBAL PARTNER FOR METALWORKING SOLUTIONS

www.knuth.com



Alles aus einer Hand: Die Komplettlösung für Draht und Drahtführung

RoboFeed

erweitert die Grenzen der Drahtförderung.



- kompatibel mit allen Schweißanlagen
- sicherer Drahttransport auch über extreme Längen
- umfangreiche Kontroll- und Steuerfunktionen – Industrie 4.0

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!

Numerische Simulation von Lichtbogenschweißprozessen

Dr. Oleg Mokrov, Sergej Warkentin, M.Sc.

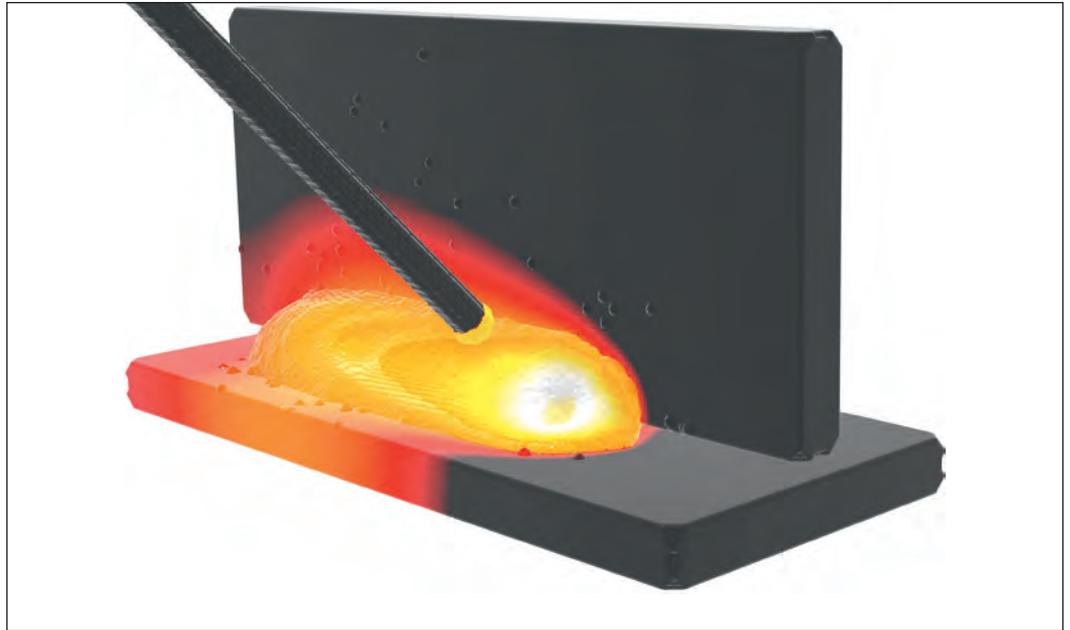


Abbildung:
SPH-Simulation einer
MSG-Kehlnahtschweißung

Lichtbogenschweißverfahren stellen einen hohen Anteil unter den industriell eingesetzten Fügeverfahren dar. Sie weisen eine hohe Produktivität auf, ermöglichen einen hohen Automatisierungsgrad und erzeugen Verbindungen mit konstanter und hoher Qualität.

Für eine anforderungsgerechte Auslegung beziehungsweise Konstruktion benötigt ein Ingenieur Informationen über das Temperaturfeld im Bauteil, die Schweißnahtform und die mechanischen Eigenschaften der Fugestelle. Diese Informationen können durch Anwendung von Schweißsimulation bereitgestellt werden. Hierbei erfolgt eine Zusammenführung der Bereiche: Prozesssimulation, Werkstoffsimulation und Struktursimulation. Die Teilbereiche Struktur- sowie Werkstoffsimulation beschäftigen sich entsprechend mit Eigenspannungen und Verzug sowie mit den Gefügeänderungen und Werkstoffeigenschaften. Bei der Prozesssimulation stehen die Phänomene der Energieeinbringung sowie die Vorgänge im Schmelzbad und die Ausbildung der Schweißnaht im Mittelpunkt.

Alle Teilbereiche sind miteinander gekoppelt, jedoch steigern die unterschiedlichen räumlichen sowie zeitlichen Skalen der physikalischen Vorgänge in den einzelnen Bereichen enorm den Aufwand einer in sich geschlossenen, simultanen Simulation aller beteiligten Prozesse. Aus diesem Grund gehört heute die Abstraktion sowie Dekomposition der Gesamtaufgabe zum Stand der Technik. Damit werden die Berechnungsergebnisse eines Bereiches als Eingangsparameter für den anderen Teilbereich definiert. So ist zum Beispiel das Konzept einer äquivalenten Wärmequelle (ÄWQ) sehr vorteilhaft für den Einsatz in der Struktursimulation: es wird eine volumetrische, geometrisch-parametrisierte Quelle für den Wärmeeintrag definiert, die die thermische Wirkung

des Plasmas in den Schichtbereichen abbildet. Die genaue Form und Intensität der Wärmequelle kann im Experiment ermittelt werden oder aber über eine Prozesssimulation in Abhängigkeit der Prozessparameter berechnet und kalibriert werden. Diese Aspekte werden bei der numerischen Simulation von Lichtbogenschweißprozessen innerhalb der Prozesssimulation als einem Teilbereich der Schweißsimulation behandelt.

Es existiert eine Vielzahl kommerziell erhältlicher Simulationsumgebungen, die unterschiedliche Fragestellungen der Schweißsimulation sehr erfolgreich lösen. Dennoch besteht großer Bedarf an der Entwicklung neuer Methoden und Ansätze, um sowohl weitere, bislang unberücksichtigte wichtige physikalische Phänomene

KONTAKT

Dr.-Ing. Rahul Sharma
Tel.: +49 (0)241 80-96267
sharma@isf.rwth-aachen.de
www.isf.rwth-aachen.de

beim Lichtbogenschweißprozess zu erfassen, als auch um die heutigen Berechnungsmethoden zu beschleunigen und zu optimieren.

Forschungsbedarf in der Prozesssimulation von Lichtbogenschweißprozessen

Der Forschungsschwerpunkt der Simulationsgruppe am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF) liegt im Bereich der Prozesssimulation. Das übergeordnete Ziel ist die Bestimmung der Schweißnahtgeometrie und Eigenschaften der Verbindung. Die Lichtbogenprozesse als Mechanismen mit besonderer Wirkung auf die Bildung der Schweißnaht stellen das Hauptuntersuchungsfeld dar.

Die wichtigsten Verfahren beim Lichtbogenschweißen sind das Wolfram-Inert-Gas-Schweißen (WIG), das Unterpulver-Schweißen (UP) sowie das Metall-Schutz-Gas-Schweißen (MSG), wobei je nach Werkstoff und Einsatzgebiet viele Variationen dieser Verfahren existieren. WIG weist eine nicht-abschmelzende Elektrode auf (**Abbildung 1**) und bei den Verfahren UP sowie MSG wird die ständig zugeführte Drahtelektrode abgeschmolzen (**Abbildung 2**).

Bei den Lichtbogenschweißverfahren wird ein Lichtbogen zwischen der Anode und Kathode gezündet. Dadurch entsteht ein ionisiertes Gemisch, das Plasma. Es besteht nicht nur aus Molekülen und Atomen, sondern auch aus freien Elektronen und Ionen. Das entstehende Plasma weist typischerweise Temperaturen im Bereich zwischen 8000 und 30000 Kelvin und bildet die Wärmequelle für den Schweißprozess. Wichtige Parameter für die sich einstellende Temperatur sind neben den Prozessparametern wie die Stromstärke, auch die Ionisierungsenergie des jeweiligen Schutzgases sowie Materials, aus denen das Plasma besteht. Je höher die Ionisierungsenergie ist, desto höher ist die Plasmatemperatur. Ein weit verbreitetes Schutzgas ist das Argon, das sowohl beim WIG- als auch beim MSG-Schweißen einge-

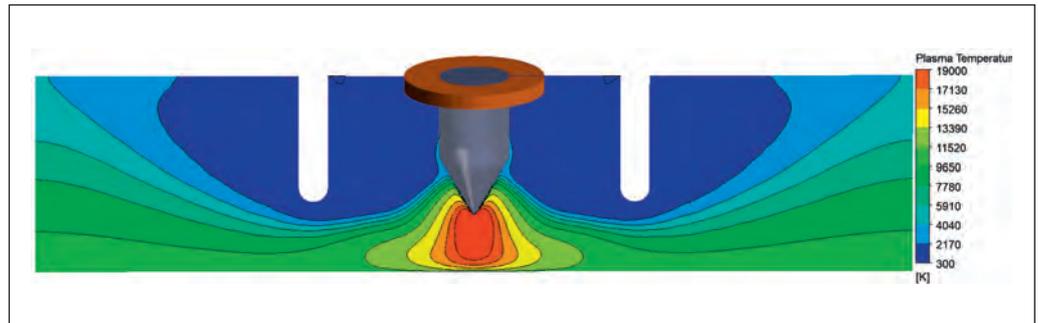


Abbildung 1:
Simulation des WIG Lichtbogens, 200 A,
Kathodendurchmesser 2,4 mm

setzt wird. Die Ionisierungsenergie von Argon ist mit 15,8 eV fast doppelt so hoch wie die von Eisen mit 7,9 eV. In der **Abbildung 1 und 2** ist die Temperatur des Plasmas dargestellt. Die niedrigere Plasmatemperatur beim MSG-Schweißen hängt mit der Existenz von Eisenionen im Plasma zusammen, wobei beim WIG-Prozess das Plasma ausschließlich aus einem Schutzgas, typischerweise Argon, besteht. Dieser Unterschied wird im Weiteren genauer beleuchtet.

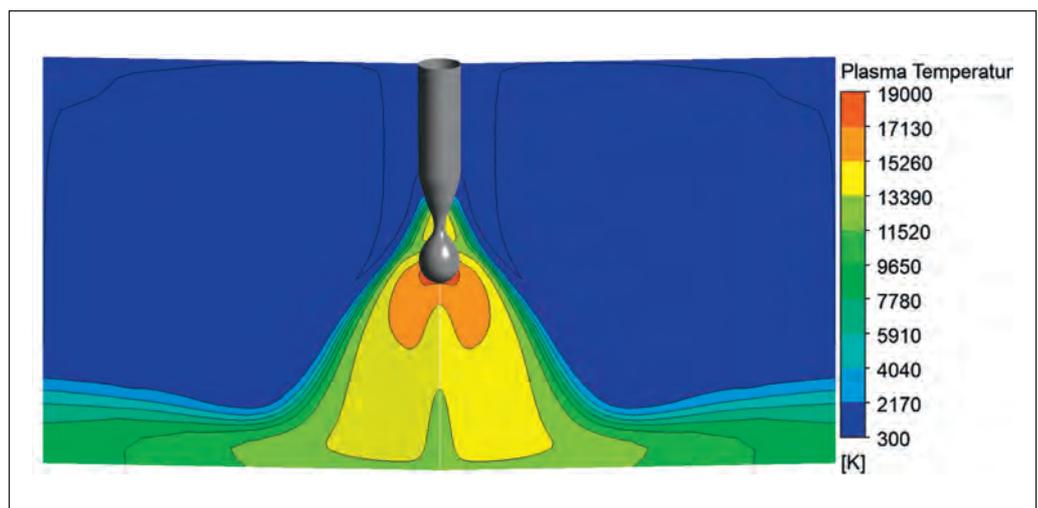
Durch den Kontakt des Plasmas mit dem Werkstück oder der Elektrode werden Schichten im Anoden- und Kathodenbereich gebildet, wobei circa 90% der gesamten Lichtbogenenergie in den Grenz-Schichten umgesetzt wird. Der resultierende Wärmeeintrag in Verbindung mit der entstehenden Stromdichteverteilung heizt die Drahtelektrode beziehungsweise die Wolfram-Kathode sowie das Werkstück auf, schmilzt das Material und beeinflusst die Trop-

fenablösung und die Bildung der Schweißnaht.

Das Ziel der entsprechenden Prozesssimulation ist es, sowohl die thermische als auch die elektromagnetische Wirkung des Lichtbogens im Schweißprozess zu quantifizieren. Dafür werden Modelle und Ansätze entwickelt, um sowohl die einzelnen Systeme Anode, Lichtbogen und Kathode physikalisch zu beschreiben als auch deren Kopplung untereinander als ein Gesamtsystem zu erfassen. Die wichtigsten physikalischen Phänomene sind dabei der Masse- und Wärmetransfer, der Elektromagnetismus mit den Effekten Joulsche Erwärmung und Lorentzkraft, die Phasenwechsel Schmelzen/Erstarren/Verdampfung im makroskopischen Bereich aber auch die plasmaspezifischen Prozesse im mesoskopischen Bereich.

Zu dem Massetransfer gehört der Tropfenübergang (beim MSG-Verfahren) in das Schmelzbad sowie die

Abbildung 2:
Simulation des MSG Lichtbogens,
Stromstärke 352 A, Drahtdurchmesser
1,6 mm



resultierenden Strömungen unter der Wirkung der Lorentzkraft. Die **Abbildung 3** veranschaulicht die in einem WIG-Prozess erzeugten Strömungen im Schmelzbad. Die Berechnung ergab, dass im Falle einer möglichen Einschnürung des Lichtbogens durch die elektromagnetischen Kräfte ein erweiterter Tiefschweißeffekt entstehen würde.

Der Wärmetransfer beinhaltet neben der Wärmeleitung den konvektiven Eintrag durch Tropfen, die Verluste durch die Strahlung und insbesondere die Wärmeentwicklung durch die Aufheizung der Kathoden- und Anodenschichten durch plasmaspezifische Prozesse wie Rekombination.

Die Anbindung des Lichtbogens bildet somit den Schwerpunkt der Simulation von Lichtbogenschweißprozessen. Eine wichtige Voraussetzung für die Entstehung des Lichtbogens ist die Elektronenemission an den Elektroden für die Initialisierung der Plasmaionisation. Für die Beschreibung der Anfangsemission werden die zwei Effekte thermionische und Feldemission herangezogen. Für das Plasma im brennenden Lichtbogen wird ein Zustand des lokalen thermischen Äquilibrium – LTE) angenommen, bei dem die Ionen und Elektronen lokal die gleiche Temperatur aufweisen und das Plasma zwar elektrisch leitend, aber nach außen hin neutral ist.

kenntnissen bereits grundlegende Unterschiede ableiten:

Anodenbereich

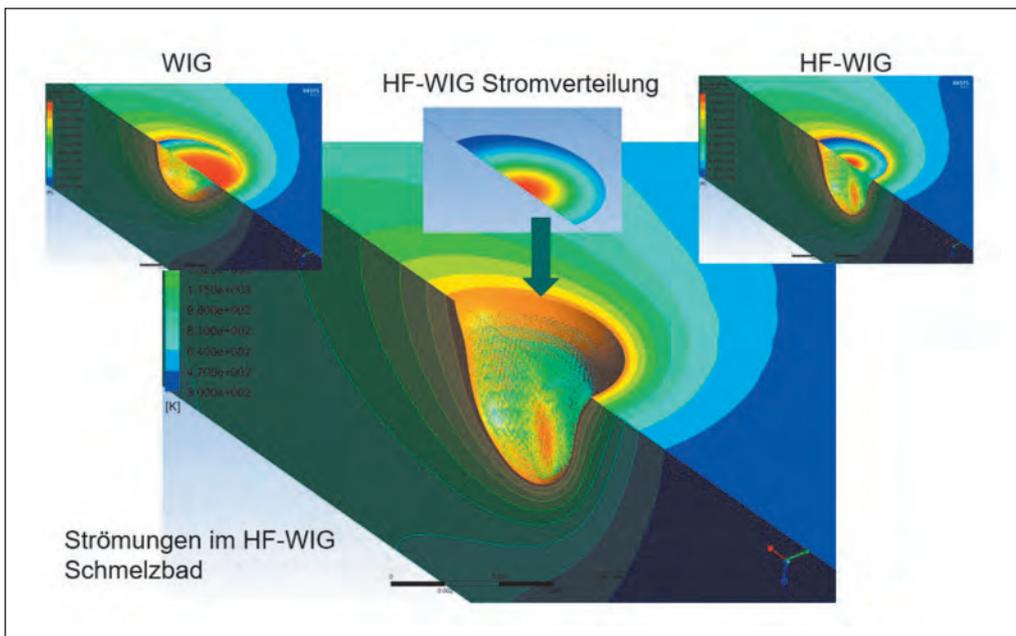
Die beiden Verfahren unterscheiden sich zunächst durch die Polarität: Beim MSG-Schweißen stellt die abschmelzende Drahtelektrode die Anode dar, während es beim WIG-Verfahren das Werkstück bzw. das Schmelzbad ist. Der Spannungsabfall im Plasma an den Anoden ist normalerweise sehr niedrig. Die Verdampfung von Material findet bei beiden Prozessen statt, wird aber beim WIG-Verfahren durch das anströmende Plasma unterdrückt, sodass kein Metalldampf in den Lichtbogen gelangt. Sowohl beim WIG- als auch beim MSG-Schweißen wird die Anode außerhalb der Zündungsphase durch Ionen-Rekombination geheizt. In der Anodenschicht findet zudem die sogenannte ambipolare Diffusion statt. Da in der Anodenschicht kein LTE besteht, bewegen sich die Elektronen schneller und bilden eine negative Schichtladung, die die positiv geladenen Ionen beschleunigt. Dadurch erhalten die Ionen eine Beschleunigung zur Anode. Bei Stößen mit der Oberfläche kommt es zu Rekombination und dadurch zur Wärme freisetzung.

Plasmabereich

Der große Unterschied zwischen dem WIG- und MSG-Verfahren ist das Vorhandensein von Metallatomen und -Ionen in der Plasmasäule beim MSG-Schweißen. Das Metall verdampft an der Anode, der Drahtelektrode, und wird durch den Schutzgasstrom mitgenommen. Nach der oben beschriebenen Ionisation werden die Metallionen durch die Lorentzkraft, welche nur auf die geladene Teilchen wirkt, im Inneren der Lichtbogensäule eingeschnürt. Eine charakteristische Verteilung der Ionen im MSG-Lichtbogen kennzeichnet einen metallischen Kernbereich und überwiegend Schutzgas-Ionen im Mantelbereich.

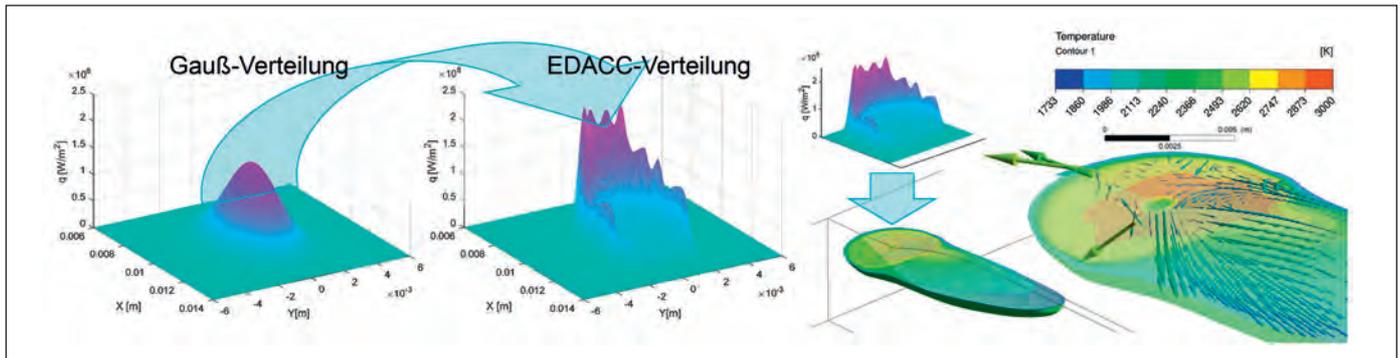
Beim WIG-Schweißen erreicht die Wolfram-Elektrode normalerweise nicht die Schmelztemperatur und

Abbildung 3: Simulation des WIG Schmelzbad für eine konventionelle und eine Hochfrequenz WIG-Schweißen (mittlere RMS-Strom 140 A für beide Fälle)



Die Aufheizung der Schichten steht im engen Zusammenhang mit der Anbindung des Lichtbogens an die Schichten. Dieses Phänomen stellt eine aktuelle Forschungsfrage dar, denn es besteht eine starke Rückkopplung zwischen der Temperatur der Schmelzbadoberfläche und den physikalischen Prozessen in der Anoden- sowie Kathodenschicht. Hierbei spielt die Verdampfung des Metalls eine wichtige Rolle, da sie sowohl die Temperatur der Elektroden- und Schmelzbadoberflächen als auch die Zusammensetzung und die Eigenschaften des Plasmas beeinflusst.

Im Gegensatz dazu ist diese Annahme in den Schichtbereichen an der Anode und Kathode nicht zulässig. Hier müssen die hohen Gradienten der elektrischen Felder, vorwiegend an der Kathode, sowie die Interaktion zwischen den verdampften Atomen und den geladenen Teilchen, Elektronen und Ionen, mitberücksichtigt werden. Entsprechend der Struktur des Lichtbogens werden die physikalischen Vorgänge in drei Teilmodellen modelliert: Anoden-, Plasma- und Kathodenbereich. Für die Varianten WIG (Abbildung 1, Abbildung 3) und MSG (Abbildung 1, Abbildung 2) lassen sich aus den aktuellen Er-



somit ist eine Verdampfung nicht möglich, wodurch keine Wolfram-Atome in das Plasma gelangen können. Das Plasma bei diesem Prozess besteht ausschließlich aus Schutzgas-Komponenten.

Kathodenbereich

Der Kathodenbereich beim MSG-Schweißen befindet sich am Werkstück und an dem Schmelzbad, für das WIG-Schweißen ist es die nicht abschmelzende Wolfram-Elektrode.

Die Lichtbogenanbindung an der Kathode beim WIG-Prozess kann als axialsymmetrisch angenommen werden. Der Spannungsabfall ist hier maximal. Die zugrunde liegenden Phänomene sind bekannt und ausführlich beschrieben. In der Kathodenschicht des WIG-Prozesses wird durch thermionische sowie Feld-Emission Elektronen ausgeschieden, die durch Stöße das Plasma beziehungsweise das Arbeitsgas ionisieren. Die Aufheizung erfolgt einerseits durch die hohe Stromdichte (Joulesche Erwärmung) an der spitzen Wolfram-Elektrode und andererseits durch Rekombination der Ionen an der Oberfläche. Damit wird Wolfram auf die Emissionstemperatur gebracht, aber noch nicht auf die Schmelztemperatur. Nach Überschreitung einer kritischen Temperatur verlassen die Elektronen die Kathode, weil die zugeführte Energie die notwendige Austrittsarbeit der Elektronen abdeckt. Die Barriere für die Elektronenemission wird einerseits durch die hohe Temperatur und andererseits durch den hohen Gradienten des elektrischen Feldes an der spitzen Wolfram-Elektrode herabgesetzt. An

der MSG-Kathode liegt auch ein hohes negatives Potential an, wodurch an der Oberfläche ein starkes elektrisches Feld entsteht. Das beschleunigt die positiven Ionen aus dem Plasma und es kommt zu hoher Wärmefreisetzung durch Rekombination. Die hohe Temperatur verursacht das Verdampfen des Materials. Einerseits senkt die Verdampfung die Temperatur des angrenzenden Plasmas, da die noch nicht ionisierten Atome aus Dampf zusätzliche Energie zur Ionisierung benötigen. Andererseits wird durch die Verdampfung die Oberflächentemperatur begrenzt und die Bedingungen für die Elektronenemission werden nicht erreicht. Es kann demnach keine ausreichende Emission in Folge des Zusammenspiels zwischen der thermionischen und der Feld-Emission stattfinden, sodass ein anderer Mechanismus für die Elektronenemission als Teil der Ionisierung des Plasmas gefunden werden muss. Deswegen können die Konzepte aus dem WIG-Bereich nicht einfach übernommen werden und es bedarf einer genauen Betrachtung sowie zeitlicher und örtlicher Auflösung der Verdampfung. Darüber hinaus haben die Verdampfung und die Schmelzbadgeometrie eine grundlegende Auswirkung auf die Verteilung

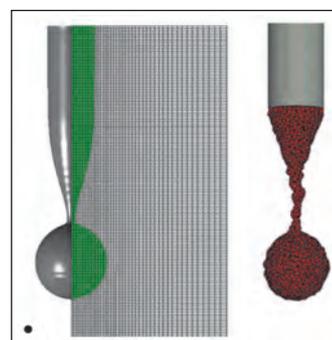
der Wärmestrom- sowie Stromdichte auf der Kathode und keine Annahmen von axialsymmetrischer Anbindung von Lichtbogens auf der Kathode getroffen werden können.

Am ISF entwickelte Ansätze

Die Lichtbogenanbindung hängt somit stark von dem abdampfenden Material insbesondere an der MSG-Kathode ab. Eine nicht axialsymmetrische Lichtbogenanbindung bewirkt andere Fließwege des elektrischen Stromes im Lichtbogenplasma mit der Konsequenz, dass auch die Lorentzkraft sowie die Wärmequellen anders wirken. Deswegen bleibt die Modellierung der Grenzschichtprozesse beim MSG-Prozess weiterhin herausfordernd.

Lichtbogenanbindung im Kathodenbereich beim MSG-Schweißen: EDACC

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde am ISF das Evaporation Determined Arc-Cathode Coupling Modell (EDACC) entwickelt. In der **Abbildung 4** ist die Wirkung einer berechneten Wärmestromdichteverteilung dargestellt. Im Gegensatz zu einer angenommenen Verteilung, die meistens durch eine vordefinierte Gauß-Verteilung dargestellt wird, basiert die EDACC-Verteilung auf der Modellierung der physikalischen Vorgänge in der Kathodenschicht.



In dem Konzept wird angenommen, dass keine wesentliche direkte Elektronen-Emission von der MSG-Kathode erfolgt, da die Emissionstemperatur der zu schweißenden Werkstoffe nicht erreicht wird. Die

Abbildung 4: links: Gaußsche versus EDACC-Wärmestromdichteverteilung, rechts: Wirkung des EDACC-Modells auf die Strömungen im MSG-Schmelzbad

Abbildung 5: Raum- versus Masse-Diskretisierung. Links ist eine Simulation der Tropfenablösung beim MSG-Schweißen mit dem Tool ANSYS CFX auf der Grundlage des Euler-Ansatzes zu sehen. Rechts ist der gleiche Fall mit SPH-Modellierung auf der Grundlage des Lagrange-Ansatzes dargestellt.

Abbildung 6:
SPH-Simulation einer Blindschweißnaht beim MSG-Schweißen, Oberflächenrekonstruktion



Abbildung 7:
SPH-Simulation des Geschwindigkeitsfeldes einer Blindschweißnaht beim MSG-Schweißen, Längsschnitt, Oberflächenrekonstruktion

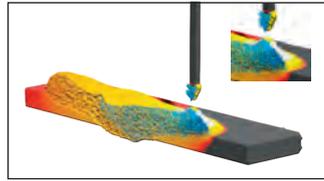
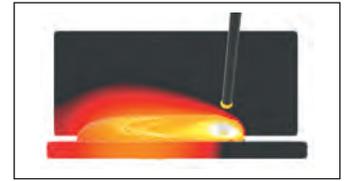


Abbildung 8:
SPH-Simulation einer MSG-Schweißnaht am T-Stoß, Oberflächenrekonstruktion



Vermehrung der Elektronen in der Kathodenschicht erfolgt durch eine Pseudoemission, bei der der Metaldampf zum Plasma gelangt und ionisiert wird. Die Ionisation erfolgt durch Stöße mit Elektronen aus dem Plasma. Nach einem Stoß liegen zwei Elektronen vor und ein ionisiertes Metallatom. Anschließend wird das Metallion durch das starke elektrische Feld wieder zur Kathode beschleunigt. Somit entstehen bei der Pseudoemission aus einem Elektron zwei und die Ionisationsquelle ist gesichert.

Die Ergebnisse der EDACC-Berechnung ergeben eine realistische Schmelzbadoberflächentemperatur, die zwar eine Verdampfung erlaubt, aber nicht weit darüber liegt. Bei einer vorgegebenen Gauß-verteilter Wärmestrom- beziehungsweise Stromdichte bildet die zu hohe Temperatur der Schmelzbadoberfläche eine große Diskrepanz zu den gemessenen Werten. Des Weiteren liegt der Peak der Wärmestromdichte nicht mehr im Zentrum entsprechend dem Maximum bei der Gauß-Verteilung, sondern in den Randbereichen des Schmelzbades (Abbildung 4).

Die in der **Abbildung 4** dargestellten Ergebnisse wurden mit einer Simulation nach dem Euler-Verfahren erstellt. Eine derartige detaillierte Berechnung dauert mehrere Tage. Das liegt unter anderem daran, dass die Diskretisierung der beweglichen Schmelzbadoberfläche sehr fein sein muss, um die feinen Strukturen und hohe Gradienten insbesondere bei der Erstarrung zu erfassen. Eine Dekomposition der Bereiche Lichtbogen und Schmelzbad würde zu einer Beschleunigung der Gesamtberechnung beitragen. Ein weiterer Ansatz, das am ISF verfolgt wird, ist die Verwendung der Smoothed Particle Hydrodynamics Methode (SPH) für die Berechnung der Strö-

mungen im Schmelzbad sowie im Tropfen inklusive der Tropfenablösung.

Wärme- und Stoffübertragung: Smoothed Particle Hydrodynamics

Die Smoothed Particle Hydrodynamics Methode (SPH) ist eine numerische Methode zur Simulation von Flüssigkeiten und Gasen, die im Gegensatz zum Euler-Ansatz die Masse diskretisiert und nicht den Raum, siehe **Abbildung 5**. Dabei wird das Fluid in viele kleine Partikel unterteilt, die relativ zueinander bewegt werden und bestimmte Eigenschaften haben, die in Abhängigkeit von ihrer Position und den umgebenden Partikeln berechnet werden.

Die SPH-Methode ermöglicht die Simulation von komplexen Topologien mit hoher Auflösung und Genauigkeit und benötigt im Vergleich zum Euler-Ansatz weniger Ressourcen, da sie nur die in Partikelform diskretisierte Masse und die Interaktionen dieser Partikel untereinander berücksichtigt. Sie wird zunehmend in der Forschung und Industrie eingesetzt, um komplexe Fluidprozesse zu simulieren und zu optimieren.

Ein weiterer Vorteil der SPH-Methode besteht darin, dass nur die Bereiche diskretisiert werden, die mit einer relevanten Masse behaftet sind. Da die Diskretisierung anhand der Masseverteilung erfolgt, ist die Massenerhaltung per Definition gegeben. Komplexe Topologien müssen nicht im Voraus diskretisiert werden, da die Fluidbewegung entsprechend der Massenbewegung erfasst wird.

Die Simulationsergebnisse des MSG-Schweißprozesses mittels SPH sind in den **Abbildungen 6 bis 8** dargestellt. Es ist die Form und die Temperatur der Schweißnaht dargestellt. In **Abbildung 7** ist ein Längsschnitt

durch die Schweißnaht aus **Abbildung 6** dargestellt, wobei die Schmelzlinie im Schweißbad anhand des Geschwindigkeitsfeldes erkennbar ist. Da die SPH-Simulation an Massepartikel gebunden ist, wurde hier keine Berechnung des Lichtbogens sowie des Elektromagnetismus durchgeführt. Für die Modellierung der Lichtbogenwirkung wurden an der Kathode und der Anode Ersatzmodelle definiert, welche den Abhängigkeiten der physikalischen Modelle annähernd entsprechen.

Fazit

Die Simulation von Lichtbogenschweißprozessen ist eine komplexe Aufgabe, die viele physikalische Prozesse berücksichtigt und eine individuelle Anpassung an die Verfahrensvarianten erfordert. Die Trennung der Prozesse in makroskopische und mesoskopische Vorgänge sowie die Kopplung dieser Ansätze können jedoch zu validen Ergebnissen führen und helfen, die Prozessoptimierung voranzutreiben. Die numerische Simulation ist ein wichtiger Bestandteil der modernen schweißtechnischen Fertigung und bietet sowohl Anwendungspotential als auch Forschungsperspektiven.



 SWISS MADE
SINCE 1976

Ultraschallschweißen

von Thermoplasten und
technischen Textilien

- ✓ **Energieeffizient**
- ✓ **Höchste Präzision**
- ✓ **Absolute Prozesskontrolle**
- ✓ **Höchste Reproduzierbarkeit**
- ✓ **Audit Trail**
- ✓ **Remote Access**

Kontaktieren Sie uns für
mehr Informationen.





AROUND YOU EVERY DAY

rincoultrasonics.com

info@rincoultrasonics.com

+41 71 466 41 00

A CREST GROUP COMPANY

Machen Sie Ihre Produktion effektiver

Mit CoWelder Extended von Migatronik

CoWelder wurde für ambitionierte fertige Unternehmen sämtlicher Größen und Branchen entwickelt, die ihre Produktivität erhöhen und ihre Qualität verbessern möchten.

Migatronik Schweißmaschinen GmbH
Telefon: (+49) 641-982840
info@migatronik.de

MIGATRONIK



Entdecken Sie das Potenzial
cowelder.com/de



Verzugsreduzierung mittels Legierungsdesign für das Laser- und Elektronenstrahlschweißen

Maximilian Gamerdinger M.Sc., Fatma Akyel M.Sc.

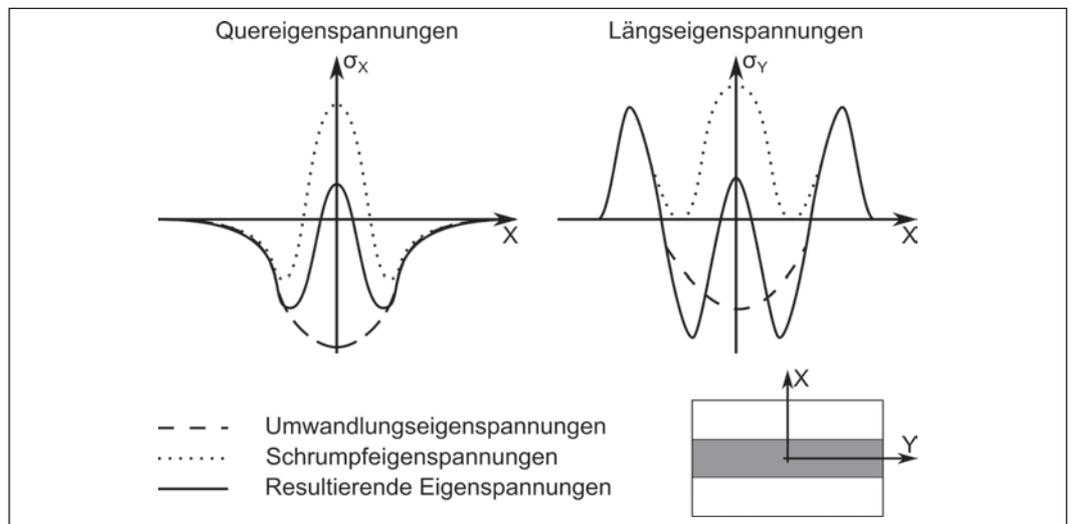


Abbildung 1:
Eigenspannungen aus thermischer Schrumpfung und Phasenumwandlungen nach [1]

Durch die Anwendung eines Low-Transformation-Temperatur-Effekts (LTT) können gezielt Druckspannungen in der Schweißnaht eingeleitet und Einfluss auf den Schweißverzug genommen werden. Hierbei wird die Volumenexpansion bei einer martensitischen Gefügeumwandlung gezielt genutzt, indem eine chemische Variation im Schmelzbad während des Schweißprozesses erfolgt. Untersucht wurden vier Legierungen aus drei Werkstoffkombinationen für den Laserstrahlschweißprozess. Mit der Nutzung handelsüblicher Werkstoffe konnte ein LTT-Effekt erzeugt werden. Untersuchungen konnten unter Anderem Änderungen in der Härte und den resultierenden Eigenspannungen zeigen. Weiterhin konnte die Verzugkompensation in einem elektronenstrahlschweißten Dünnblech nachgewiesen werden.

Motivation

Die schmelzschweißtechnische Verarbeitung von Bauteilen ist eine der gängigsten Fügevarianten in den großen Industriezweigen wie dem allgemeinen Maschinenbau, der Automobilindustrie, Schiffbau oder der Herstellung von Schienenfahrzeugen. Unabhängig von dem Schweißverfahren kommt es durch die lokale Wärmeinbringung und inhomogene Temperaturverteilung im Bauteil zur Entstehung von Eigenspannungen. Während des Schweißens dehnen sich die heißeren nahtnahen Bereiche stärker aus als das kältere umliegende Gefüge, was in einer inhomogenen

Spannungsverteilung beziehungsweise Zwängung im Bauteil resultiert. Daraus entstehen beim Erwärmen zunächst Druckspannungen in der Schweißnaht. Im Abkühlzyklus hingegen erfährt die Schweißnaht eine Kontraktion im Vergleich zu den nahtfernen Bereichen und es kommt zu einer Schrumpfungsbegrenzung. Dies resultiert in der typischen Eigenspannungsverteilung mit Zugeigenspannungsmaxima in der Schweißnaht, **Abbildung 1**.

Die Spannungen im Bauteil haben einen direkten Einfluss auf den Bauteilverzug. Überschreiten diese im Aufheiz- oder Abkühlzyklus die tem-

peraturabhängige Streck-/Druckgrenze, werden diese durch plastische Deformation abgebaut und Schweißverzug entsteht. [2]

Letzteres reduziert die geometrische Bauteilpräzision und führt zu einer unzulässigen Abweichung von Form- und Maßtoleranzen. Daraus resultieren nicht selten erhöhte Ausschusszahlen oder zusätzlicher Kosten- und Zeitaufwand für Richtarbeiten. Um dem wachsenden Anspruch nach Qualität gerecht zu werden, ist die Kompensation von Schweißverzug und die Beeinflussung der Eigenspannungen von zentraler Bedeutung.

KONTAKT

Dr.-Ing. Simon Olschok
Tel.: +49 (0)241 80-96253
olschok@isf.rwth-aachen.de
www.isf.rwth-aachen.de

Der Low-Transformation-Temperatur-Effekt (LTT)

Großes Interesse der Forschung liegt in den letzten Jahren auf der Entwicklung von Legierungen mit einem sogenannten *Low-Transformation-Temperature-Effekt (LTT)*. Bei dem LTT-Effekt handelt es sich um eine martensitische Umwandlung während der Abkühlung in der Schweißnaht bei einer reduzierten Umwandlungstemperatur (M_s -Temperatur) [3]. Die Phasenumwandlung zu Martensit erfolgt durch das Umklappen der kubisch flächenzentrierten (kfz) Elementarzelle des Austenits zur tetragonal verzerrten kubisch raumzentrierten Elementarzelle. Es erfolgt eine kontinuierliche Volumenausdehnung bis zum Ende der Umwandlungstemperatur (M_f -Temperatur). Somit kann bei einer Reduktion der M_s -Temperatur bis zum Erreichen der Raumtemperatur fortwährend Martensit gebildet und Druckspannungen in der Schweißnaht eingeleitet werden, welche den Zugspannungen durch die thermische Schrumpfung entgegenwirken, **Abbildung 1** [2, 4]. Folglich kann das Überschreiten der Streckgrenze unterbunden und der Verzug beeinflusst werden. Da die M_s -Temperatur das Maß der entstehenden Druckspannungen beeinflusst, dient sie als Stellgröße für den LTT-Effekt. Sie lässt sich durch die chemische Zusammensetzung variieren, wobei in dieser Veröffentlichung der Cr und Ni Gehalt als Stellgröße der M_s -

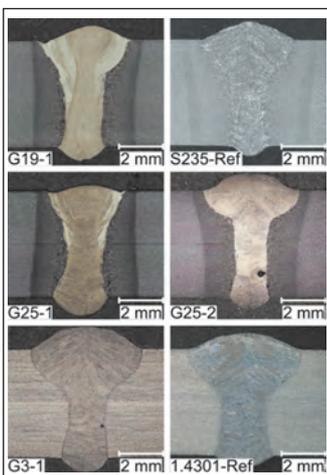


Abbildung 3:
Makroschliffe der Schweißnähte

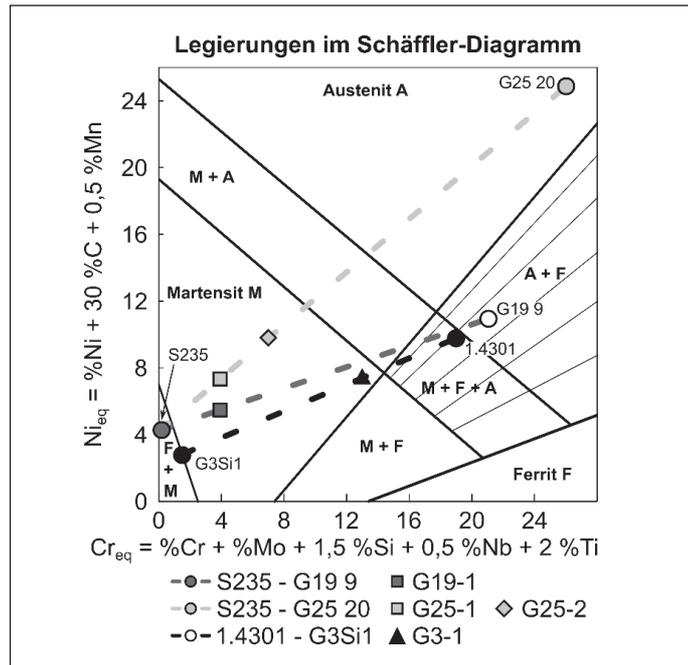


Abbildung 2:
Untersuchte Legierungen im Schöffler-Diagramm

Temperatur genutzt wird. Basierend darauf bestehen zwei grundlegende Verfahrensvarianten; das Auflegieren eines unlegierten Grundwerkstoffs (GW) oder das Ablegieren eines hochlegierten CrNi Stahls. Die Erhöhung/Reduzierung des CrNi-Gehaltes erfolgt durch die Nutzung passender Schweißzusätze (SZ).

LTT-Effekt durch in situ Legieren

Im Rahmen der Arbeiten des „SFB1120 Präzision aus Schmelze“ wurde von den Autoren ein in situ Legierungsprozess für die Anwendung des LTT-Effekts im Laser- und Elektronenstrahlschweißen entwickelt [5-7]. Untersucht wurde der LTT-Effekt durch die Kombination handelsüblicher Werkstoffe aus drei Werkstoffkombinationen mit vier resultierenden Legierungen.

- System S235JR (GW) + G19 9 (SZ)
o Legierung G19-1
- System S235JR (GW) + G25 20 (SZ)
o Legierung G25-1 und G25-2
- System 1.4301 (GW) + G3Si1 (SZ)
o Legierung G3-1

Ein Überblick über die Systeme und Legierungen gibt das Schöffler-Diagramm in **Abbildung 2**. Erzeugt

wurden die Legierungen, indem im **Laserstrahlschweißprozess** der entsprechende Schweißzusatz durch eine Kaltdrahtzufuhr eingebracht wurde. Um einen spezifischen Legierungsgehalt im Legierungssystem einzustellen, werden unterschiedliche Drahtvorschubgeschwindigkeiten verwendet und der Aufmischungsgrad variiert. Daher zeigen die Schweißnähte aus den Querschliffen in **Abbildung 3** eine unterschiedliche geometrische Ausbildung.

Als erster Indikator für das Erreichen eines LTT-Effekts und der entstandenen reduzierten M_s -Temperatur kann der Legierungsgehalt berücksichtigt werden. In **Abbildung 4** ist der typische Verlauf des Legierungsgehaltes an den Beispielen der Legierungen G19-1 und G3-1 für Cr und Ni quer zur Schweißnaht dargestellt.

Für die Legierung G19-1 basierend auf S235 mit G19 9 zeigt sich der geringste CrNi-Gehalt der untersuchten

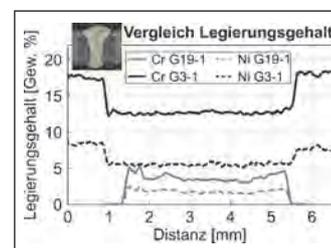


Abbildung 4:
Legierungsgehalt in den Schweißnähten am Beispiel der Legierung G19-1 und G3-1

Legierung	Hauptlegierungselemente [Gew.%]		Ms-Temperatur nach [8] [°C]
	Cr	Ni	
G19-1	3.73 ± 0.62	1.83 ± 0.35	381
G25-1	3.89 ± 0.64	3.12 ± 0.57	349
G25-2	6.88 ± 0.84	5.1 ± 0.64	258
G3-1	12.73 ± 0.5	5.58 ± 0.38	180

Tabelle 1: Hauptlegierungselemente und Ms-Temperatur der untersuchten Legierungen

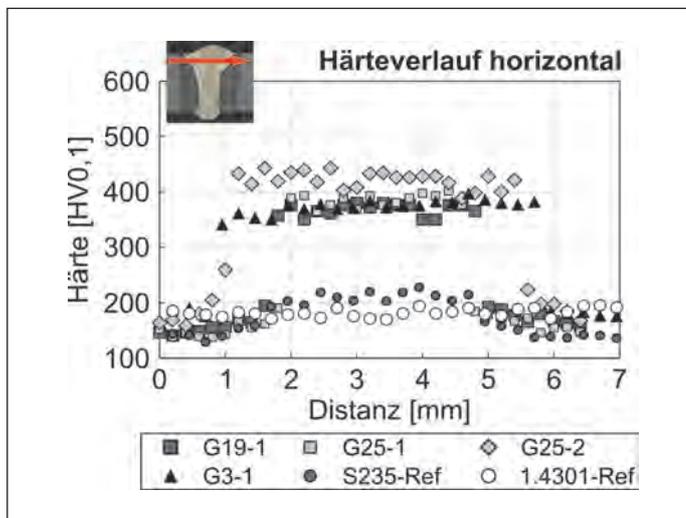


Abbildung 5: Härteverlauf über die Schweißnähte

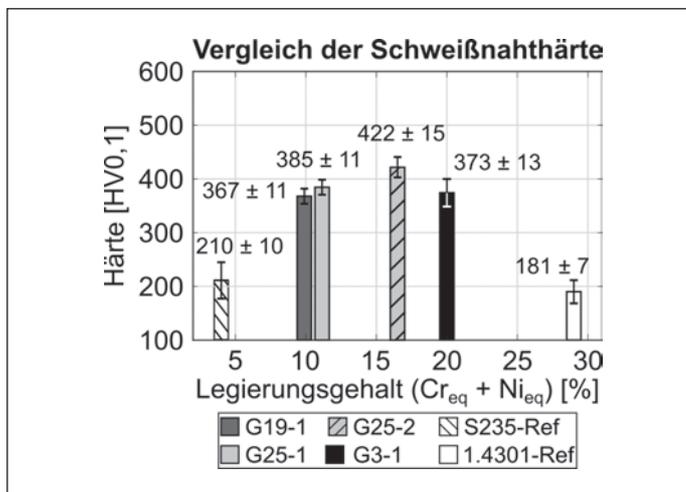


Abbildung 6: Mittlere Härte der Schweißnähte im Vergleich der Legierungsgehalte (Cr_{eq} und Ni_{eq} nach Schöffler)

Legierungen. Ausgehend von einem Grundwerkstoff mit keinem nennenswerten CrNi-Gehalt steigt der Legierungsgehalt sprunghaft auf 3,7 % Cr und 1,8 % Ni in der Schweißnaht an. Für die Legierung G3-1 basierend auf dem hochlegierten CrNi-Stahl 1.4301 (GW) mit dem unlegierten Schweißzusatz zeigt sich das umgekehrte Bild. Hier besitzt der Grundwerkstoff mit ca. 18 % Cr und 8 % Ni einen höheren Legierungsgehalt als die Schweißnaht, welche auf 12,7 % Cr und

5,6 % Ni reduziert ist. Die chemischen Zusammensetzungen der weiteren Legierungen sind in **Tabelle 1** zu finden. Durch die Kombination der verschiedenen Werkstoffe wurde ein breites Feld mit verschiedenen Legierungsvariationen untersucht. Als Resultat wurde eine Reduzierung der Ms-Temperatur zwischen 381 °C bis zu 180 °C erreicht.

Martensit wird in der Schweißtechnik für Verbindungsschweißungen gezielt

vermieden, da dieser für hohe Härte und Sprödigkeit bekannt ist. Bei den Legierungen mit einem LTT-Effekt hingegen wird die Bildung des Martensits nicht durch den Kohlenstoffgehalt erreicht, sondern erfolgt durch Chrom und Nickel. Resultierend daraus stellen sich geringere Härten als aus der Literatur bekannt ein. Das Härteprofil der Nähte ist in **Abbildung 5** dargestellt. Ähnlich wie bei dem Legierungsgehalt springt die Härte von einem geringen Niveau des Grundwerkstoffes auf die höheren Werte der Schweißnaht. Für die Legierungen mit LTT-Effekt erreichen die Härtewerte zwischen 367 HV_{0,1} und 422 HV_{0,1}. Die beiden Referenzlegierungen S235-Ref (S235 + G3Si1) und 1.4301-Ref (1.4301 + G19 9) zeigen geringere Härtewerte. Bei 1.4301-Ref lässt sich keine Aufhärtung in der Schweißnaht erkennen, da es sich um einen umwandlungsfreien Austenit handelt.

Hingegen zeigt die Legierung S235-Ref zur Mitte der Schweißnaht einen Anstieg der Härte, was mit den geringen Mengen sich bildenden härteren Phasen (Martensit, Bainit) durch die hohe Abkühlgeschwindigkeit im Laserstrahlschweißen konform ist. Die Bildung eines Härteplateaus lässt sich hingegen nur bei den Legierungen mit LTT-Effekt erkennen. Das Härteplateau ist hierbei ein Indikator für eine vollständige Durchhärtung der Schweißnaht und deutet somit auf eine vollständige Umwandlung hin.

In **Abbildung 6** ist die Härte der Schweißnähte über den Cr- und Ni-Äquivalenten nach Schöffler aufgetragen (Cr_{eq} und Ni_{eq} siehe **Abbildung 2**). Ganz links im Graphen ist die Probe S235-Ref zu finden, in welcher die Schweißnaht vorwiegend perlitisch-ferritisch ist (geringe Anteile Bainit und Martensit). Hier zeigt sich keine stark erhöhte Härte. Bei einer weiteren Erhöhung des Legierungsgehaltes steigt die Härte kontinuierlich an. Dies liegt darin begründet, dass mit dem Sinken der Ms-Temperatur zunehmend mehr Martensit im Schweißgut erhalten bleibt, bis zu einem Höchstwert bei der Legierung G25-2. Wird der Legie-

rungsgehalt weiter erhöht, dann sinkt die Ms- und Mf-Temperatur weiter ab und Mf kann unter Raumtemperatur fallen. Fällt Mf unter Raumtemperatur, kann keine vollständige Martensitumwandlung mehr erfolgen und es bleibt Austenit in der Schweißnaht übrig.

Da der LTT-Effekt zur gezielten Kontrolle von Schweißspannungen genutzt wird, ist es wichtig, den Einfluss auf die Eigenspannungen festzuhalten. Um den Einfluss des LTT-Effekts auf die Eigenspannungen nachzuweisen, wurden diese mittels Bohrlochmethode mit *elektronischer Speckelmuster-Interferometrie (ESPI)* gemessen. In **Abbildung 7** sind die Ergebnisse der Längseigenspannungen mittig auf der Naht über dem Legierungsgehalt dargestellt. Für die Referenzlegierungen zeigt sich ein Spannungszustand in der Schweißnaht, welcher von hohen Zugeigenspannungen geprägt ist. Die Legierungen mit LTT-Effekt die den geringsten Legierungsgehalt haben (G19-1 und G25-1), zeigen hingegen eine Reduzierung des Spannungsniveaus auf Werte um die -40 MPa herum. Die Legierung G25-2 hingegen besitzt einen höheren Cr/Ni-Gehalt und hier werden die Eigenspannungen der Schweißnaht bereits deutlich in den Druckbereich auf -176 MPa verschoben. Die Legierung G3-1 ist die Legierung mit dem höchsten Cr/Ni-Gehalt und erreicht die höchsten Druckeigenspannungen mit -362 MPa.

Verzugsreduzierung durch Anwendung des LTT-Effekts als PMI

Schweißverzug ist besonders bei Bauteilen mit geringen Blechdicken eine verstärkt auftretende Herausforderung. Um den Schweißverzug zu reduzieren, lässt sich der LTT-Effekt in Form einer *partiellen metallurgischen Injektion (PMI)* einbringen. Hierbei wird der LTT-Effekt nur partiell im oberen Bereich der Schweißnaht erzeugt. Für die folgenden Versuche wurden Schweißproben aus 1.4301 mit 100 x 50 x 2 mm mit dem **Elektronenstrahl** als Einschweißung

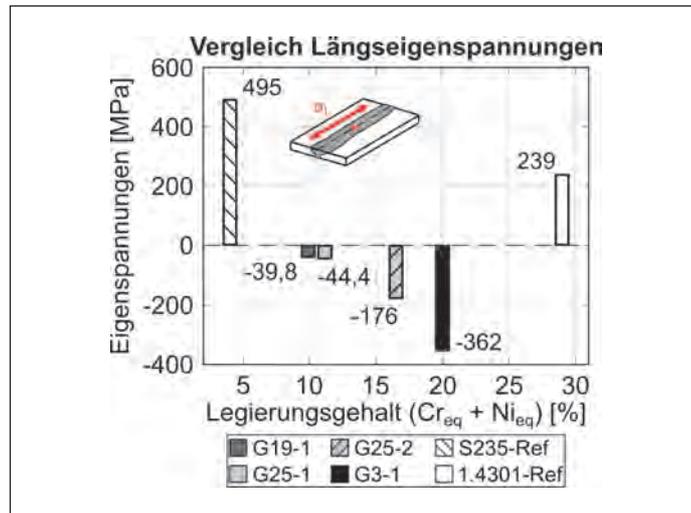


Abbildung 7: Spannungszustand der geschweißten Legierungen, Bohrtiefe 0,2 mm, Bohrdurchmesser 1,6 mm

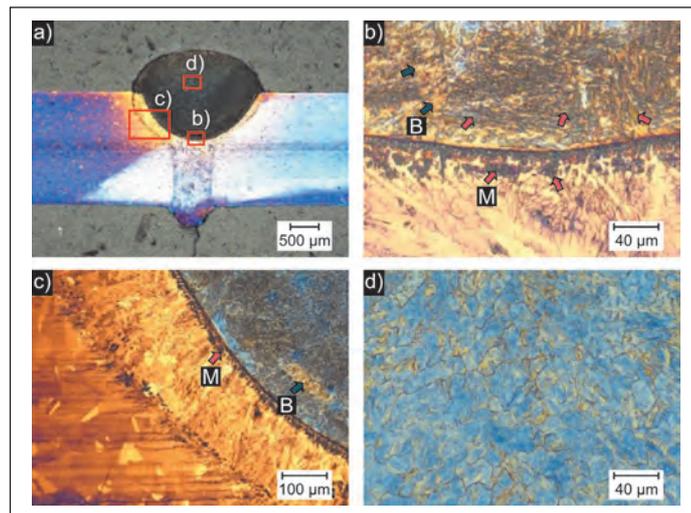


Abbildung 8: Makro- und Mikroschliffe der Dünnschleifprobe geätzt nach Beraha I. a) Makrobild der Schweißstelle, b) Übergang zwischen oberem und unterem Nahtbereich, c) Übergang zwischen Schweißnaht und Wärmeeinflusszone, d) Schweißnaht

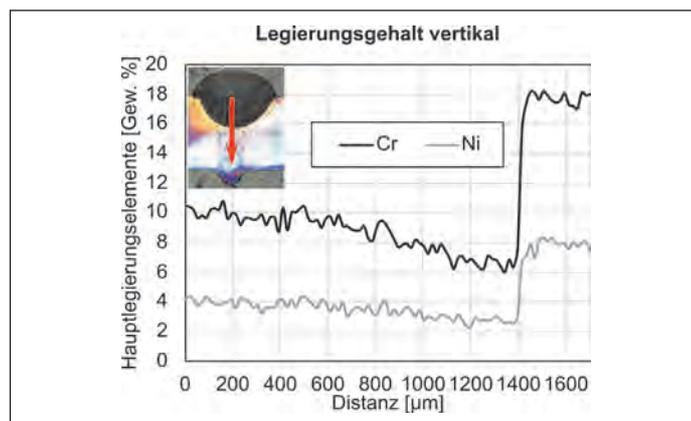


Abbildung 9: Verlauf der Legierungselemente vertikal über die Naht

hergestellt. Als Schweißzusatz wurde ebenfalls ein G3Si1 in den Schweißprozess eingebracht. In **Abbildung 8** sind Makro- und Mikroschliffe mit einer Farbniederschlag-sätzung nach Beraha I dargestellt. Im Kopfbereich der Naht zeigt sich eine deutlich dunklere Färbung der

Schweißnaht als in den restlichen Bereichen (Teilbild a). Eine braunblaue Färbung des Gefüges deutet auf eine martensitische Schweißnaht hin, wobei eine braun-gelbliche Färbung auf bainitische Phasen hinweist. Somit zeigt sich im Kopfbereich (d) ein Gefüge, welches auf

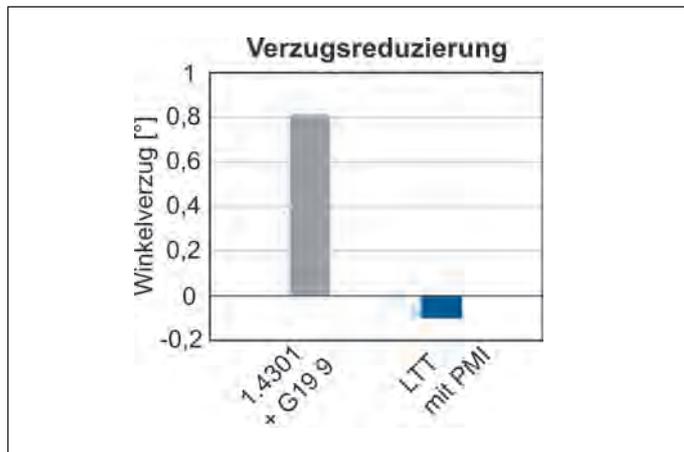


Abbildung 10: Verzugsreduzierung durch Anwendung des LTT-Effekts und der PMI

Martensit mit geringen Anteilen Bainit hindeutet und von einem martensitischen Saum (b, c) umgeben ist. Somit wurde ein partieller LTT-Effekt gezielt nur in der Nahtoberseite eingeleitet.

Die chemische Analyse mittels *energiedispersiver Röntgenspektroskopie* (EDX) in **Abbildung 9** zeigt den Einfluss der PMI auf den Legierungsgehalt. Somit stellt sich in dem Schweißnahtkopf ein Cr Gehalt mit 6-11 % und für Ni zwischen 2 und 7 % ein. Hingegen handelt es sich bei der restlichen Naht um eine Grundwerkstoffverbindung mit ca. 18 % Cr und 8 %Ni.

Um den Einfluss auf den Schweißverzug zu bestimmen, wurden die Nähte mit PMI mit einer artgleichen Referenzlegierung (1.4301 + G19.9) verglichen. **Abbildung 10** zeigt den maximal auftretenden Winkelverzug.

Im Vergleich zur Referenzprobe zeigt die LTT-Naht mit PMI eine deutliche Verzugsreduzierung. Der Verzugswinkel wird von 0,8 ° auf -0,1 ° kompensiert. Somit führt die Nutzung der PMI hier sogar zu einer geringen Überkompensation des Schweißverzuges.

Ausblick

Der LTT-Effekt und sein Einfluss auf Eigenspannungen und Verzug hat in den letzten 20 Jahren ein großes Interesse durch viele schweißtechnische Forschungsinstitutionen weltweit genossen. Der Fokus beläuft

sich vor allem auf die gängigen Lichtbogenschweißverfahren und war bisher sehr grundlagenorientiert. Um einen industriellen Einsatz zu fördern, gilt es neben der Erweiterung auf weitere Schweißverfahren (hier z. B. dem Laserstrahlschweißen), auch einen wirtschaftlichen Schweißprozess zu ermöglichen. Der hier vorgestellte in situ Legierungsprozess basiert auf der Anwendung kommerziell erhältlicher Werkstoffe. Weiterhin ist die Kontrolle der Eigenspannungen in Hochleistungsschweißverfahren wie dem Laser-MSG-Hybrid oder dem Laser-Unterpulver-Hybridschweißen (LUPuS) im Dickblechbereich von Interesse. Für den Bereich des reinen Laserstrahlschweißens ist im Rahmen des SFB1120 ein Transferprojekt angesiedelt, in dem die Verzugsreduzierung mittels LTT-Effekt in CrNi-Stählen für den Schienenfahrzeugbau untersucht wird.

Förderhinweis

Die vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB1120-236616214 „Bauteilpräzision durch Beherrschung von Schmelze und Erstarrung in Produktionsprozessen“ an der RWTH Aachen durchgeführt und durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V. (DFG) gefördert. Für die Förderung und Unterstützung sei an dieser Stelle gedankt.



Literaturangaben

- [1] Nitschke-Pagel, T.; Wohlfahrt, H.: Residual Stresses in Welded Joints – Sources and Consequences. In: Materials Science Forum 404-407 (2002), S. 215–226
- [2] Dilthey, U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2: Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen. 3., bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005 (VDI-Buch)
- [3] Kromm, A.; Böllinghaus, T.: Umwandlungsverhalten und Eigenspannungen beim Schweißen neuartiger LTT-Zusatzwerkstoffe. 2011. Berlin BAM-Dissertationsreihe 72
- [4] Jones, W. K. C.; Alberly, P. J.: A model for stress accumulation in steels during welding. Residual stresses in welded construction and their effects. In: International Conference (1977)
- [5] Akyel, F. et al.: Residual Stress Reduction with the LTT Effect in Low Carbon Manganese-Steel through Chemical Composition Manipulation Using Dissimilar Filler Material in Laser Beam Welding. In: Metals 12 (2022), Nr. 6, S. 911
- [6] Akyel, F.; Olschok, S.; Reisgen, U.: Reduction of distortion by using the low transformation temperature effect for high alloy steels in electron beam welding. In: Welding in the World (2020)
- [7] Akyel, F.; Gamerding, M.; Olschok, S.; Reisgen, U.; Schwedt, A.; Mayer, J.: Adjustment of chemical composition with dissimilar filler wire in 1.4301 austenitic stainless steel to influence residual stress in laser beam welds. In: Journal of Advanced Joining Processes 5 (2022), S. 100081
- [8] Steven, W.; Haynes, A. G.: The temperature of formation of martensite and bainite in low-alloy steels. Some effects of chemical composition. In: Journal of the Iron and Steel Institute (1956), Nr. 183, S. 349–359



Jahresmagazin **Werkstofftechnik**

Ingenieur
wissenschaften
2023

ISSN 1618-8357
EUR 9,80

Herausgegeben vom Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen



Anfragen zur kostenfreien Übersendung von
Belegexemplaren oder zwecks redaktioneller Mitarbeit
richten Sie bitte an



Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen (IWV)

Finkenstraße 10 • D-68623 Lampertheim

www.institut-wv.de

Telefon 06206 939-0 • info@alphapublic.de

Die Widerstandsschweißtechnologie ist ausgeforscht – Oder doch nicht?

Maike Epperlein, Alexander Schiebahn

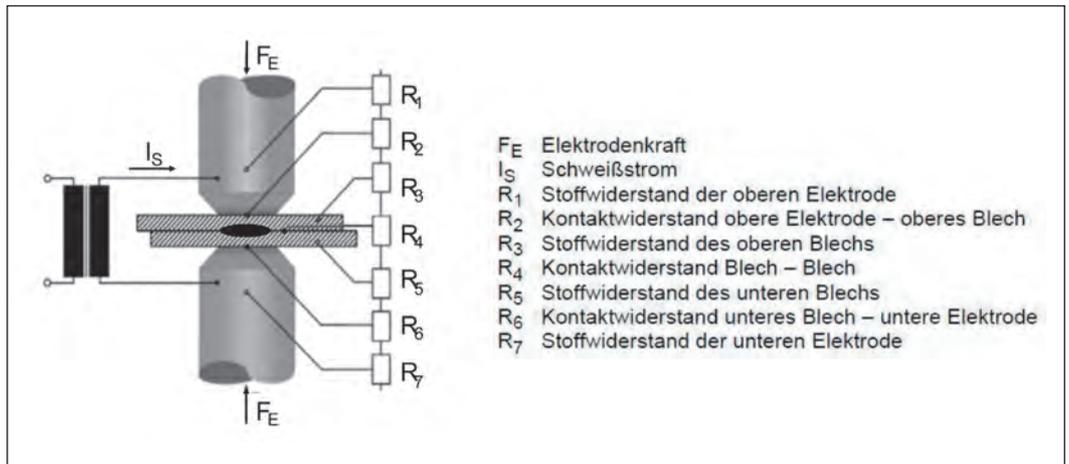


Abbildung 1: Prinzipskizze und Widerstände beim Widerstandspunktschweißen [1]

Das Widerstandspunktschweißen (RP) erfreut sich seit Jahrzehnten großer Beliebtheit. Dies liegt insbesondere an einer äußerst hohen Wirtschaftlichkeit sowie der guten Automatisierbarkeit, Robustheit und Prozessstabilität. Dies führt dazu, dass das Verfahren insbesondere in der Automobilindustrie für das stoffschlüssige Fügen metallischer Konstruktionsbauteile angewendet wird – Und das bereits seit mehr als 100 Jahren. Aufgrund der weit zurück reichenden Historie wird das Verfahren, und dessen inzwischen zahlreichen Verfahrensvarianten, hält sich die These „Das Widerstandsschweißen ist eine ausgeforschte Technologie“ hartnäckig.

Aufgrund der stetigen Weiterentwicklung von Strategien zu einer ressourcenschonenden Produktion von Last- und Personenkraftfahrzeugen sowie deren energieeffizienter Nutzung, wie zum Beispiel die Substitution von konventionell eingesetzten Stahlwerkstoffen durch ultrahochfeste Stähle, resultieren jedoch immer wieder neue Herausforderungen.

In diesem Beitrag werden aktuelle, industriell relevante Themen vorgestellt, die am ISF derzeit intensiv behandelt werden. Dazu zählt neben dem RP von Aluminium und dessen Legierungen auch die Flüssigmetallversprödung (LME) beim RP duktiler, verzinkter Stähle. Letzteres führt aufgrund von Festigkeitssprüngen und Kerbwirkung zu einer verminderten Verbindungsfestigkeit und führt aufgrund des mitunter statistischen

Auftretens zu Einbußen in der Reproduzierbarkeit erzielbarer Verbindungseigenschaften.

Das Widerstandspunktschweißen (RP, engl.: resistance spot welding, RSW) ist ein Pressschweißverfahren, bei dem Werkstücke durch elektrischen Strom mittels Widerstandserwärmung (Joule'sches Gesetz) erwärmt und gefügt werden (vgl. **Abbildung 1**). Die größte Wärmeentwicklung erfolgt dabei an der Stelle mit dem größten elektrischen Widerstand, idealerweise also in der Fügeebene (vgl. **Abbildung 1**, R_4). Das Ergebnis der Schweißung ist die sogenannte Schweißlinse, eine stoffschlüssige Verbindung mit punktförmiger Anbindungsfläche.

Die Einleitung des Schweißstroms (I_S) erfolgt dabei über zwei Elektroden,

die die Fügepartner mit einer vordefinierten Elektrodenkraft (F_E) aneinanderpressen. Moderne Anlagentechnik ermöglicht die Anwendung von Schweißstrom- und Elektrodenkraftprofilen, individuell angepasst an die vorliegende Fügeaufgabe. Anleitungen und entsprechende Handlungsempfehlungen sind für den Anwender bereits in verschiedenen Normen und Richtlinien, wie beispielsweise DIN EN ISO 14373, DIN EN ISO 18595, DVS 2092, DVS 2932 und VDA 238 401 enthalten. Darüber hinaus kann durch die zusätzliche Verwendung adaptiver Regelsysteme die Schweißpunktqualität, bspw. durch Vermeidung übermäßiger Schweißspritzerbildung, verbessert werden.

Die Anwendungsfelder des Widerstandspunktschweißens liegen über-

KONTAKT

Dr.-Ing. Alexander Schiebahn
Tel.: +49 (0)241 80-97233
schiebahn@isf.rwth-aachen.de
www.isf.rwth-aachen.de

wiegend im Bereich Automobilindustrie, wo das Verfahren aufgrund der kurzen Taktzeiten (1 s - 2 s) und der sehr guten Automatisierbarkeit, aber auch dank der Prozessstabilität und der Robustheit nahezu konkurrenzlos in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit ist. Grundsätzlich kann das Verfahren überall dort eingesetzt werden, wo Blechbauteile mit Dicken von bis zu 3 mm im Überlapp gefügt werden sollen. Je nach Zugänglichkeit kann das Verfahren auch als einseitiger Fügeprozess (einiges Widerstandspunktschweißen) eingesetzt werden. Nähere Informationen zu der einseitigen Prozessvariante können [2] entnommen werden.

Widerstandspunktschweißen von Aluminium

Das Widerstandspunktschweißen von Aluminium und dessen Legierungen wird bereits in der industriellen Serienfertigung eingesetzt, weist im Gegensatz zum RP von Stahlwerkstoffen jedoch einige Herausforderungen auf.

Möglich wurde das Punktschweißen von Aluminium durch die Entwicklung von Schweißanlagen mit Mittelfrequenz Gleichstrom (MFDC) Invertern. Während Stahl auch mit einfachen Wechselstromanlagen geschweißt werden kann, führen die hohe Wärmeleitfähigkeit und hohe Stromleitfähigkeit des Aluminiums dazu, dass bei Verwendung von Wechselstromanlagen kein ausreichender Leistungseintrag in das Bauteil erfolgen kann (Nulldurchgang). Auch bei Verwendung von Gleichstrominvertern werden für das Schweißen von Aluminium deutlich höhere Schweißströme benötigt als dies für Stahl der Fall ist. Aufgrund der guten thermischen und elektrischen Leitfähigkeit des Aluminiums liegen diese in etwa um das 3 bis 5 fache höher als es für das Fügen von Stahl notwendig ist. Neben den hohen Schweißströmen werden ebenfalls deutlich höhere Elektrodenkräfte benötigt, die ein mechanisches Aufbrechen der hochschmelzenden Aluminiumoxidschicht ermöglichen, sodass eine aufwendige Oberflächenvorbehandlung, zum

Beispiel Oxidentfernung durch Beizen, vermieden werden kann.

Im Gegensatz zu anderen Schmelzschweißverfahren spielt die ungerne gesehene Porenbildung in der Schmelze beim RP jedoch keine signifikante Rolle. Zudem ist die in der Fügeebene entstehende Schweißlinse durch die Grundwerkstoffe vor der wasserstoffhaltigen Atmosphäre abgeschirmt, sodass auch die Verwendung von Schutzgasen entfällt (vergl. **Abbildung 1**). Bedeutender ist hingegen insbesondere die geringe Elektrodenstandmenge sowie metallurgische Eigenschaften einzelner Legierungstypen. Je nach Legierungszusammensetzung der Fügepartner bringt hierbei jede Fügeaufgabe ihre eigenen Herausforderungen mit.

Zum Einsatz kommen Elektroden, bzw. Elektrodenkappen aus Kupferlegierungen, meist CuCr1Zr. Bei Einsatz dieser hohen Stromstärken kommt es zwangsläufig zu Diffusionsvorgängen zwischen Aluminiumbauteil und Elektrode und der Bildung intermetallischer Phasen aus dem binären Al/Cu-System. Diese führen wiederum zu einer Änderung der lokalen Widerstände, da diese intermetallischen Phasen von keramischem Charakter sind und somit eher isolierende Eigenschaften besitzen (höherer Widerstand). Das Resultat ist eine signifikante Herabsetzung der Elektrodenstandmenge auf nur einige hundert Schweißpunkte, in Extremfällen sogar weniger, was wiederum kürzere Fräsintervalle (Nachbearbeitung der Kappenarbeitsflächen) bedeutet und damit die für RP eigentlich hohe Wirtschaftlichkeit bei dieser Fügeaufgabe enorm reduziert. [3]

Im Rahmen des IGF-Projektes 21.446N konnte das ISF zeigen, dass die

Verwendung von walzplattiertem Aluminium einen positiven Einfluss auf die Elektrodenstandmenge haben kann. In Abhängigkeit der im Verbundwerkstoff kombinierten Legierungen kann die Standmenge um den Faktor 4 gesteigert werden (weiter Untersuchungsergebnisse sind [4] zu entnehmen).

Hinsichtlich jüngster Fortschritte im Bereich der Leichtbaustrategien gewinnt auch die Erprobung des Widerstandspunktschweißens zum stoffschlüssigen Fügen artungleicher Aluminiumlegierungen zunehmend an Bedeutung. Das ISF erprobt hierzu im IGF-Projekt 22.700 N die Eignung des Widerstandspunktschweißens zum Fügen von Bauteilen aus Aluminiumdruckgusslegierungen mit solchen aus Aluminiumknetlegierungen.

Abbildung 2 zeigt exemplarisch Querschliffe von durch Elektronenstrahlschweißen an Atmosphäre erzeugten Schweißnähten mit wasserstoffbedingter Porosität im Schweißgut. [5]

Allgemein ist das Schweißen von Aluminiumdruckguss aufgrund des prozessbedingt (Druckguss) im Werkstoff eingeschlossenen Wasserstoffs problematisch, da dieser infolge der Schweißwärme zum Ausgasen neigt und damit zu ausgeprägter Porenbildung führt (vergl. **Abbildung 2**).

Bauteile aus Aluminiumdruckguss werden inzwischen verstärkt im Automobilbau für verschiedenste Komponenten eingesetzt, und mit verschiedenen Fügeverfahren an artungleiche Werkstoffe gefügt. Obwohl das Widerstandspunktschweißen insbesondere in der Automobilindustrie eine weit verbreitetes Fügeverfahren ist, ist das Punktschweißen von

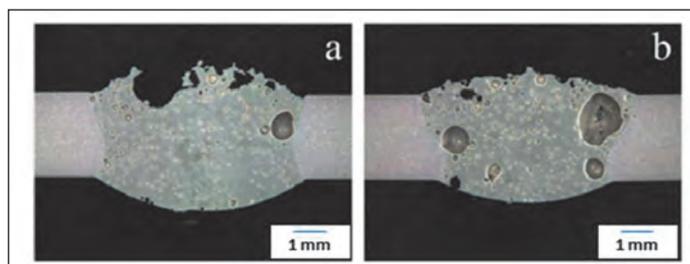


Abbildung 2: Querschliffe von durch Elektronenstrahlschweißen an Atmosphäre gefügte Al-Druckgussbauteile (Silafont 38) hergestellt bei Schweißgeschwindigkeiten von a) 3,0 m/min und b) 2,0 m/min [5]

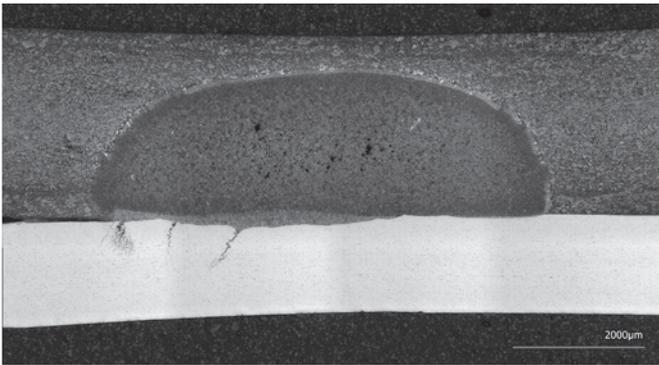


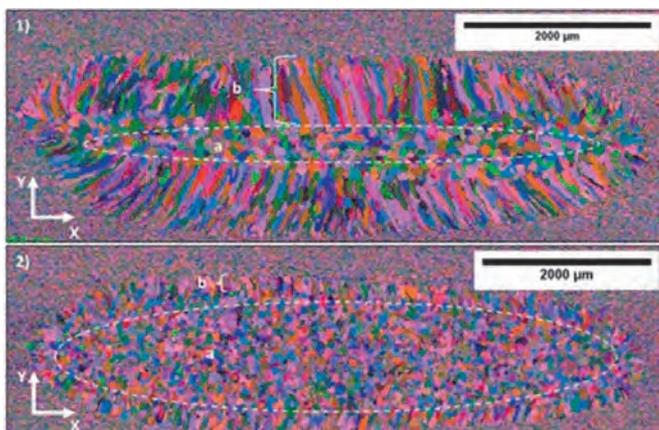
Abbildung 3: Querschliff einer durch Widerstandspunktschweißen gefügten Mischverbindung zwischen EN AC 43500 (oben) und EN AW-6008 (unten)

Aluminiumdruckguss und Aluminiumknetlegierungen bislang trotz der zahlreichen Vorteile gegenüber den aktuell verwendeten Fügeverfahren noch nicht etabliert. **Abbildung 3** zeigt einen Querschliff einer durch Widerstandspunktschweißen erzeugten Verbindung zwischen einer EN AC-43500 und einer EN AW 6008.

Im Vergleich zu den in **Abbildung 2** dargestellten Schweißnähten weisen durch Widerstandspunktschweißen erzeugte Verbindungen ein signifikant reduziertes Porenvolumen in der gussseitigen Schweißlinse auf. Die Zusammenhänge zwischen Schweißparametern, Schweißlinsengeometrie und Verbindungseigenschaften sind zentraler Inhalt des Forschungsvorhabens am ISF.

Ebenfalls seit Jahren vergeblich versucht wurde die Validierung eines für das Widerstandspunktschweißen von EN AW 7xxx geeigneten Prozessstrategie. Die Übertragbarkeit aktueller Richtlinien zum Fügen von EN AW 5xxx und EN AW 6xxx durch RP (s.o.) ist aufgrund der Legierungszusammensetzung der 7000er Legierungen

Abbildung 4: EBSD-Bilder von Schweißlinsenquer-schnitten nach Verwendung des Standard-schweißstromprofils nach VDA 238 401 (1) und mit neuem Ansatz (2) aus [6]



stark eingeschränkt. Zwar können damit stoffschlüssige Verbindungen erzeugt werden, jedoch sind eben diese nur von geringer Qualität und entsprechen nicht den in der Industrie geforderten Qualitätskriterien, wie bspw. Risse in der Wärmeeinflusszone.

Bamberg et al. [6] ist es jüngst gelungen die Qualität der Schweißlinsen beim RP artgleich gefügter EN AW 7075 signifikant zu modifizieren und das Auftreten kritischer Heißrisslängen zu reduzieren. **Abbildung 4** zeigt durch Elektronenrückstreuung (engl.: electron back-scattered diffraction, EBSD) erzeugte Aufnahmen von Schweißlinsen die durch die Verwendung unterschiedlicher Schweißprofile erzeugt wurden.

Während die Verwendung des Standardschweißstromprofils nach VDA 238 401 die Bildung kolumnarer, also säulenförmiger Körner in der Schweißlinse begünstigt, weist das durch die neuen Prozessführung erzeugte Gefüge überwiegend äquiaxiale Körner auf (vergl. **Abbildung 4**). Es wird davon ausgegangen, dass die geänderte Prozessführung zu einer Änderung der Wärmeverteilung über den gesamten Schweißprozess führt und damit zu einer Änderung der lokalen Abkühlgradienten. Insbesondere die Wärmeabfuhr ist hierbei richtungsweisend für die Kornbildung während der Erstarrung. Diese erfolgt in Richtung der größten Wärmeabfuhr, d.h. bei Anwendung des VDA 238 401 Ansatzes in Richtung der wassergekühlten Elektroden (vergl. **Abbildung 4**, y-Richtung). Der neue Ansatz hingegen führt zu einer signifikant gleichmäßigeren Struktur, bei der die maximalen Längen kolumnarer Körner im Vergleich dazu um den Faktor 4 kleiner sind.

Erste Ergebnisse aus quasi-statischen Versuchen, zeigen, dass die Verwendung des neuen Ansatzes ebenfalls zu signifikanten Verbesserungen der erzielbaren Scherzugkräfte führt. [6]

Das ISF hat dazu ein Projekt beantragt, welches auf die Erforschung

der durch Anwendung des neuen Ansatzes hervorgerufenen Mikrostrukturänderungen abzielt. Neben der Ermittlung der im Labormaßstab erzielbaren Verbindungseigenschaften sollen die Prozessabläufe durch projektbegleitende Simulationen begleitet werden, und die Beurteilung der industriellen Einsetzbarkeit zum Fügen von EN AW 7xxx beurteilt werden.

Das Problem der Flüssigmetallversprödung (LME)

Neben der Substitution von Stahlwerkstoffen durch Aluminium, kann auch durch die Entwicklung neuer Stahl-sorten Bauraum und Gewicht bei der Fahrzeugherstellung eingespart werden. Besonders die sogenannten Advanced High Strength Steels (AHSS) konnten in den vergangenen Jahren in der Automobilindustrie etabliert werden, da die hohen Festigkeiten (je nach Legierung 600 MPa bis 1500 MPa) beispielsweise die Wandstärkenreduktion an Konstruktionsbauteilen ermöglichen, bei gleichzeitig weiterhin guter Umformbarkeit. Die gesteigerten Festigkeitswerte verdanken diese Stahlsorten der Beimengung verschiedener Legierungselemente. Dazu zählen z.B. Mangan (Mn) und Silizium (Si). Beide Legierungselemente erhöhen die Festigkeit durch den Mechanismus der Mischkristallverfestigung, d.h. eine Erhöhung der Schubfestigkeit einzelner Ebenen im Kristallgitter. Nachteil solcher Stahllegierungen ist ein herabgesetzter Korrosionswiderstand, sodass eben diese Stahllegierungen oberflächenbehandelt werden müssen.

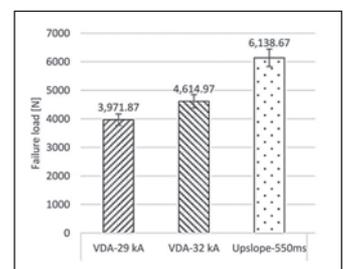
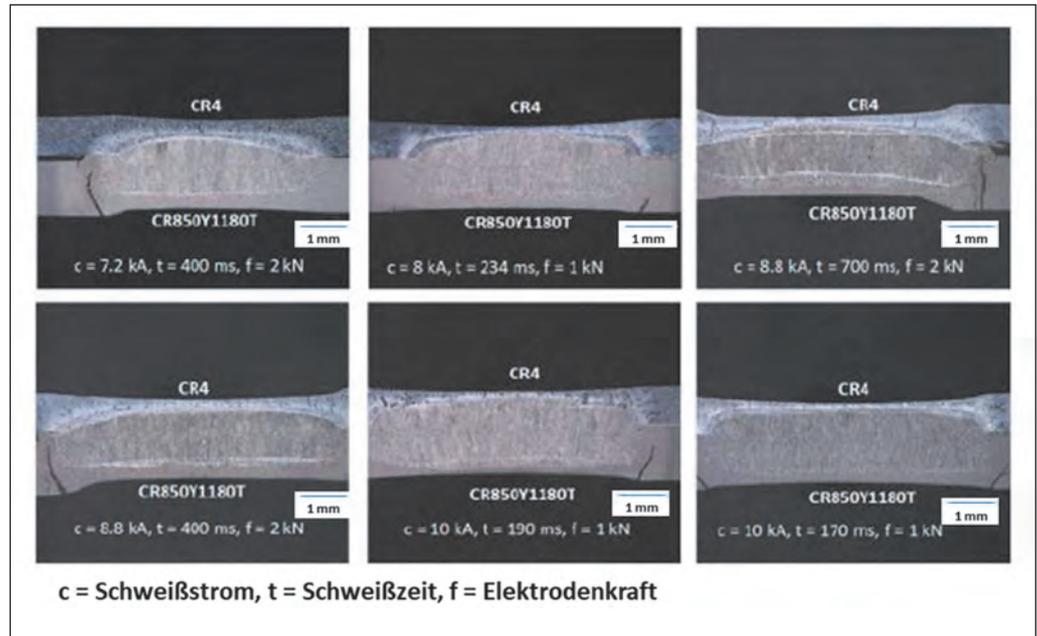


Abbildung 5: Erzielbare Scherzugkräfte (in N) bei Verwendung des VDA-Standardstromprofils und mit neuer Prozessführung [6]

Beim Widerstandspunktschweißen solcher galvanisch verzinkter AHSS mit hoher Duktilität stellt die Flüssigmetallversprödung (engl.: liquid metal embrittlement, LME) eine besondere Herausforderung dar, da sie zu einer Festigkeitsreduktion erzeugter Verbindungen führt. LME ist das Penetrieren von Korngrenzen des Grundwerkstoffes durch eine andere, niedriger schmelzende Legierung bei lokal vorliegenden Zugspannungen [7]. Am Beispiel verzinkter AHSS bedeutet es das Einfließen flüssigen Zinks in lokal aufgeweitete Korngrenzen des Grundmaterials Stahl. **Abbildung 6** zeigt beispielhaft Querschliffe widerstandspunktgeschweißter Mischverbindungen mit LME-Rissen am Schweißpunkttrand. Tückisch an solchen mit LME-Rissen geschwächten Verbindungen ist die schlechte Detektierbarkeit während der Produktion. Da die Risse erst nach Entfernen des verbliebenen Zinks durch Ätzen feststellbar sind werden sie bspw. in einer konventionellen Sichtprüfung selten sofort erkannt. Das ISF untersucht dazu die Anfälligkeit verschiedener Werkstoffe gegenüber LME-Rissbildung, sowie mögliche Strategien zur Risslängenreduktion, bzw. zur Vermeidung von LME-Rissbildung.

Zusammenfassung und Ausblick

Das Widerstandspunktschweißen zählt nach wie vor zu den wirtschaftlichsten Verfahren, wenn es um das stoffschlüssige Fügen von Stahlbauteilen in der Automobilindustrie geht. Dennoch bringen die Entwicklung neuer Legierungen, Werkstoffsysteme und auch die aktuellen Leichtbaustrategien stets neue Herausforderungen mit. Dies bedingt nicht nur die stetige Eignungsprüfung verschiedener Verfahrensvarianten für die unterschiedlichsten Fügeaufgaben, sondern auch die Prüfung der Übertragbarkeit des bereits in der Vergangenheit erarbeiteten Wissens auf neue Werkstofftypen und -kombinationen, um die zahlreichen Vorteile des Verfahrens für eine ökonomisch wertvolle Produktion von Automobil bis weiße Ware ausschöpfen zu können. Im Rahmen verschiedener öf-



fentlich geförderter Projekte forscht das ISF dafür an der Weiterentwicklung des Widerstandspunktschweißens und verwandten Verfahren. Dazu zählt insbesondere das Fügen von Leichtbaurelevanten Werkstoffen durch RP mit Analyse materialwissenschaftlicher und fertigungstechnischer Aspekte der erzeugten Verbindungen. Ausgeforscht ist das Widerstandspunktschweißen somit noch lange nicht.

Förderhinweis:

Das IGF-Vorhaben 22.700 N „Widerstandspunktschweißen von Aluminiumdruckgusslegierungen und Aluminiumknetlegierungen“ der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. (DVS) wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literaturangaben

- [1] DVS - Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. (2014). DVS 2929-1: Messung des Übergangswiderstands. Grundlagen, Messmethoden und -einrichtungen.
- [2] Bamberg, P., Gintrowski, G., Reisgen, U., Schiebahn, A. (2022). Robustness and reliability assessment of single-sided spot welding as a process for sheet to closed profile joining for body in white vehicle structures. *Welding International* 36/6, 331–343.

- [3] U. Diltay, S. Hicken (1998). Metallkundliche Untersuchungen zu Verschleißvorgängen an Elektroden beim Widerstandspunktschweißen von Aluminium. *Schweißen und Schneiden* 1, 34–38.
- [4] Bamberg, P., Seewald, R., Schiebahn, A., Reisgen, U., Precoma, N., Epperlein, M. (2022). Improvement of the resistance spot welding of Al-Mg-Si alloys by using cladding technology: An optical and mechanical characterization study. *Journal of Advanced Joining Processes* 5, 100090.
- [5] Reisgen, U., Senger, A., Olschok, S. (2018). Electron beam welding in atmosphere of aluminum die casting alloys made of different qualities. *Weld World* 62/6, 1207–1213.
- [6] Bamberg, P., Gintrowski, G., Liang, Z., Schiebahn, A., Reisgen, U., Precoma, N., Geffers, C. (2021). Development of a new approach to resistance spot weld AW-7075 aluminum alloys for structural applications: an experimental study – Part 1. *Journal of Materials Research and Technology* 15, 5569–5581.
- [7] B. Joseph, M. Picat, F. Barbier (1999). Liquid metal embrittlement: A state-of-the-art appraisal. *Eur. Phys. J. AP* 5/1, 19–31.
- [8] S. Mathi, P. Bamberg, A. Schiebahn, U. Reisgen (2022). Estimation of the Incidence of Liquid Metal Embrittlement Crack in 3rd Generation Advanced High Strength Steel During Resistance Spot Welding using 2D and 3D Weld Lobe Curve. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* 11-03, 345–354.

Abbildung 6:

Querschliffe von Widerstandspunktschweißungen von Mischverbindungen mit LME-Rissen am Rand des Elektrodenindrucks [8]

Additive Fertigung durch Lichtbogenschweißen

Max Mierzwa, Rahul Sharma

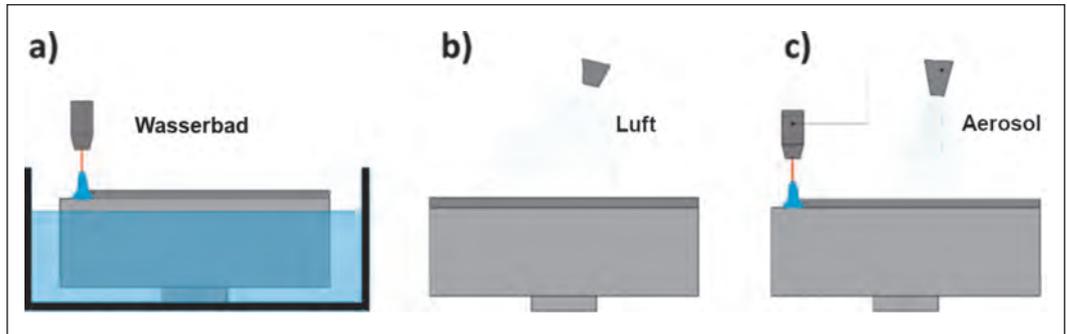


Abbildung 1: Schematische Darstellung der drei Kühlstrategien. Wasserbadkühlung (a) als In-situ-Kühlmethode, Druckluft (b) als Ex-situ-Kühlmethode während der Stillzeit und Aerosolkühlung als In-situ-Methode (c)

Lichtbogen- und drahtbasierte additive Fertigungsverfahren (DED-Arc / WAAM) 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.

Einführung

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 (siehe Abbildung 2).

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). Beide Technologien finden bereits Anwendung in der konventionellen Fertigung. Den geringen Abschmelzleistungen beider Verfahren und damit hohen Fertigungszeiten

steht eine hohe Bauteilauflösung gegenüber. Zur Herstellung kleinerer Bauteile wie Implantaten 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. Hierzu zählen beispielsweise Titan- oder Nickelbasissuperlegierungen

deren Verbreitung als Hochleistungswerkstoffe stark zunimmt.

Verfahren, welche ein hohes Potential für die Fertigung großer Bauteile mit gleichzeitig hohen Abschmelzleistungen aufweisen, sind Lichtbogenschweißprozesse. 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]. Zusätz-



Abbildung 2: WAAM-Bauteil aus Aluminium mit charakteristischem Schichtaufbau (links) und geräster Oberfläche (rechts) (Foto: Lukas Oster – Plasma Additive Labs)

KONTAKT

Dr.-Ing. Rahul Sharma
 Tel.: +49 (0)241 80-96267
 sharma@isf.rwth-aachen.de
 www.isf.rwth-aachen.de

lich sind die Anlagen- und Betriebskosten verfahrensbedingt deutlich geringer als bei Laser- und Pulverbasierten Verfahren.

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.

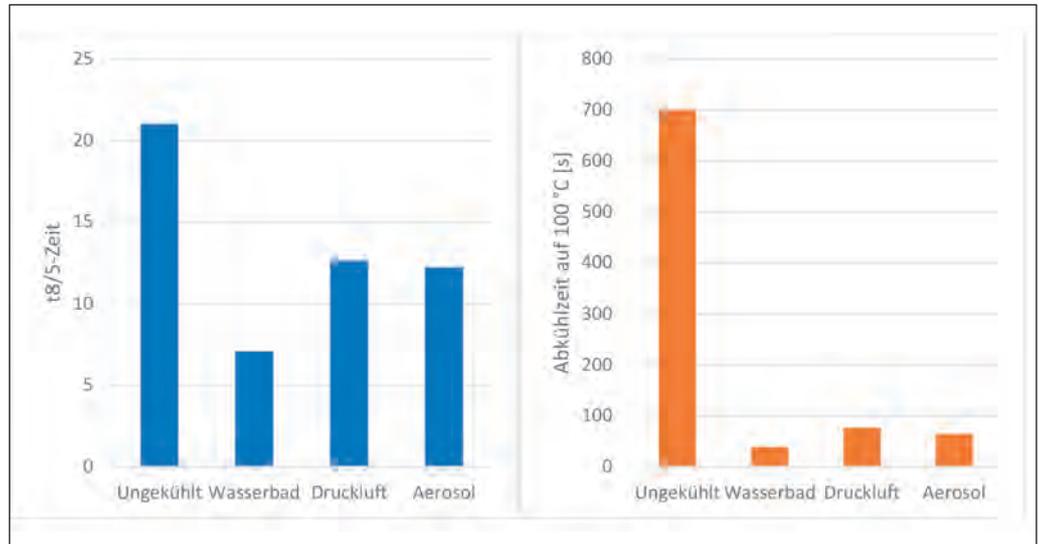
Ein Beispiel für die erfolgreiche Anwendung von Lichtbogenschweißverfahren zur additiven Fertigung ist in der Luftfahrt zu finden. Die Umsetzung moderner Leichtbaustrategien in diesem Anwendungsbereich erfordert zunehmend eine Verbundbauweise mit kohlefaserverstärkten Kunststoffen. Hier werden hochfeste Aluminiumlegierungen verstärkt durch Titanlegierungen substituiert. 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. 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 Schiffschrauben aus Nickel-Aluminium-Bronze(NAB)-Legierungen oder die Herstellung von Turbinenschaufeln mit dem MSG-Verfahren.

Entwickelte Ansätze

Kühlmethoden

Effizientere Fertigung

Die draht- und lichtbogenbasierte additive Fertigung (WAAM) ist eine vielversprechende Technologie für die additive Fertigung von großformatigen Metallbauteilen. Aufgrund des hohen Wärmeeintrags durch den Lichtbogen verlangsamt die Zwischenkühlzeit jedoch den Gesamtfertigungsprozess. Da künftige Anwendungen auf die Herstellung großer Stahlbauteile abzielen, ist die



Fertigungsgeschwindigkeit ein Schlüsselparameter, um WAAM nutzbar zu machen.

Verschiedene Prozesskühlungsstrategien wurden im Hinblick auf die Effizienz, die Auswirkungen auf den Prozess sowie den Einfluss auf die Mikrostruktur des verarbeiteten Stahls miteinander verglichen. Für die thermische Bewertung wurden Schweißungen an vertikal angeordneten Blechen mit dem MSG-Verfahren durchgeführt. Was die verschiedenen Kühlmethoden betrifft, so wird das MSG-Verfahren mit Wasserbadkühlung, Hochdruckluftkühlung und auch mit Aerosolkühlung durchgeführt. Die Temperaturkurven wurden mit Hilfe von Thermoelementen ermittelt, die in das Schmelzbad getaucht werden (siehe **Abbildung 1** und **Abbildung 3**).

Im Vergleich zum ungekühlten MSG-Verfahren wurde bei allen drei Kühlmethoden eine starke Auswirkung auf die Abkühlgeschwindigkeit festgestellt.

Die Druckluftkühlung scheint ein effizientes Mittel zur globalen Abkühlung der gesamten Struktur zu sein. Jedoch kann sie nur bei ausgeschaltetem Schweißlichtbogen erfolgen. Die Aerosolkühlung zeigt gute Ergebnisse in Bezug auf die t8/5-Zeit und die 100 °C-Abkühlzeit. Der Vorteil ist hier, dass sie an Ort und Stelle während des Schweißprozesses ange-

wandt werden kann und es daher möglich ist, die t8/5-Zeit im Betrieb zu senken. Generell könnte eine Kombination aus Hochdruckluftkühlung und Aerosolkühlung eine effiziente Strategie sein, um die prozessbedingten Stillstandzeiten zu verringern und das Phasenumwandlungsverhalten zu beeinflussen. Da viele Werkstoffe anfällig für Wasserstoff- oder Sauerstoffverunreinigungen sind, werden in Zukunft auch andere Prozessmedien untersucht werden.

Verbesserte Werkstoffeigenschaften

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) zeichnet sich durch eine hohe Abschmelzleistung sowie ein weites Spektrum an verarbeitbaren metallischen Werkstoffen aus. Von Nachteil ist die hohe Wärmeeinbringung und damit verbundene lange Abkühlzeiten, welche sich sowohl negativ auf die Fertigungsgeschwindigkeit auswirken als auch die Metallurgie der hergestellten Strukturen beeinträchtigen können. Insbesondere für die schweißtechnische Verarbeitung von nichtrostenden Duplexstählen (DSS, duplex stainless steels) spielt die Abkühlgeschwindigkeit im Temperaturbereich von 1200°C bis 800 °C eine entscheidende Rolle, da sich in diesem Temperaturbereich der Austenitanteil des erwünschten Mischgefüges zur Einstellung der vorteilhaften mechani-

Abbildung 3: Abkühlzeiten 800 °C auf 500 °C (links) und Abkühlzeit auf 100 °C (rechts)

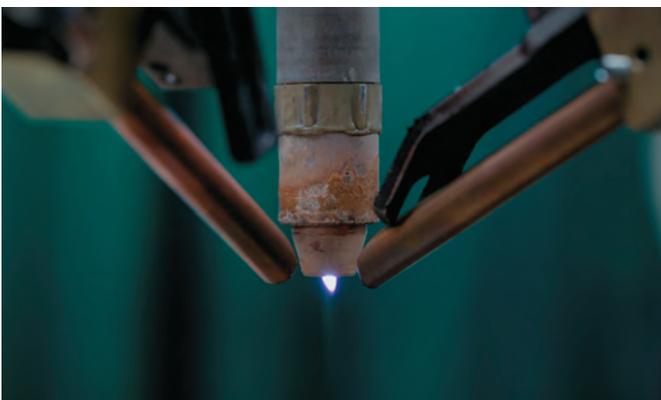


Abbildung 4: MSG mit Zusatzdraht für die additive Fertigung mit erhöhten Abschmelzleistungen, (Foto: Lukas Oster – Plasma Additive Labs)

schen und korrosionstechnischen Eigenschaften ausbildet. Kühlmethoden, welche die Verdampfungsenthalpie von Flüssigkeiten nutzen, bieten die Möglichkeit, unmittelbar hinter der Prozesszone während des Schweißens einen Kühleffekt zu erzielen, ohne den Prozess selbst zu stören. Am ISF wurde ein Aerosol-Kühlkonzept bezüglich des Einflusses auf das resultierende Phasenverhältnis Ferrit-Austenit eines DSS-Legierungssystems (CrNiMo22-9-3) untersucht.

Durch die Nutzung eines Gas-Wasser-Aerosols ist ein Kühleffekt erzielbar, wodurch sich die Nebenzeiten reduzieren lassen. Die Aerosolkühlung bewirkt im Vergleich zur Abkühlung an ruhender Luft eine deutliche Steigerung der Abkühlgeschwindigkeit nur unterhalb etwa 800 °C, wodurch diffusionsgesteuerte Prozesse potenziell eingeschränkt werden. Um einen direkten Einfluss auf das Phasenverhältnis Ferrit-Austenit im WAAM-Schweißgut auszuüben, müsste die Intensität der

Abbildung 5: Plasma-Mehrdraht-Brenner zur additiven Fertigung von Strukturen mit gradierter chemischer Zusammensetzung, (Foto: Lukas Oster – Plasma Additive Labs)



Aerosolkühlung im Temperaturbereich der Austenitbildung (ca. 1200 °C bis 800 °C) gesteigert werden. Aus der ungünstigen Kühlungscharakteristik ergeben sich spezifische Phasencharakteristika, die die resultierenden Gefügeeigenschaften bedeutend verändern können. In diesem Zusammenhang kann bspw. die Beständigkeit des DSS-Schweißgutes gegenüber selektiven Korrosionsformen angeführt werden. Der Korrosionswiderstand zwischen austenitischer und ferritischer Phase ist grundsätzlich unterschiedlich und wird jeweils durch örtliche Entmischungen weiter verändert. Speziell in Hinblick auf die wirksamenrelevanten Legierungselemente können sich hierbei entscheidende Verschiebungen ergeben, zumal sich die Wirksumme aus einer mit element-spezifischen Faktoren angepassten Gehaltsaddition des Stickstoffs (Austenitbildner) mit den ferritstabilisierenden Elementen Chrom und Molybdän errechnet.

Mehrdrahtschweißen

MSG-Mehrdraht-Schweißen

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 Drahtvorschubgeschwindigkeit 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 Heißdrahtzuführungen der Firma EWM (siehe Abbildung 4).

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.

Plasma-Mehrdraht-Schweißen

Schweißverfahren mit nicht abschmelzender Elektrode bieten 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 Schmelzades 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 Schmelzbadmischung sorgen. Als Versuchsaufbau wird ein Plasmaschweißbrenner um bis zu drei Heißdrahtzuführungen erweitern (siehe Abbildung 5).

Neben den Vorschubgeschwindigkeiten 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 Drahtvorschubgeschwindigkeiten im laufenden Prozess besteht zusätzlich die Möglichkeit, Strukturen mit gradiertem chemischer Zusammensetzung herzustellen. Dabei folgt einer Erhöhung der Drahtvorschubgeschwindigkeit 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 (siehe Abbildung 6).

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.

Höhenregelung

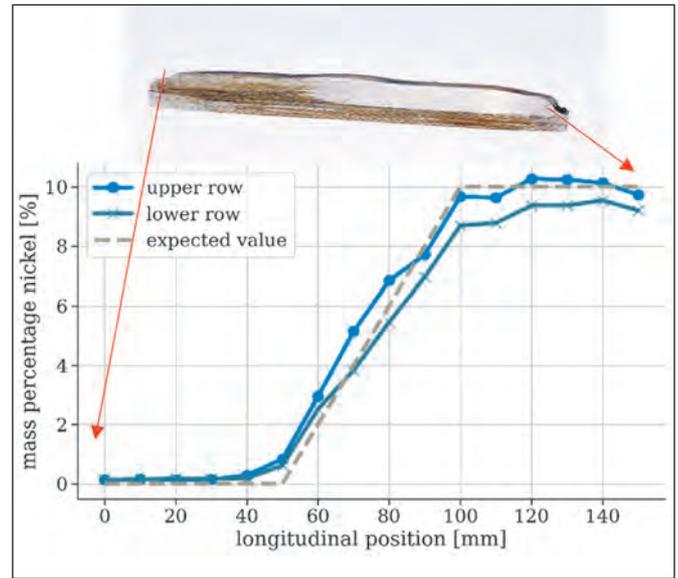
Eine Studie zur Höhenregelung von Werkstück und Schweißbrenner in WAAM-Anwendungen, die für eine Vielzahl von Werkstoffen angewendet werden kann, wurde konzeptionell erarbeitet und ausgewertet. Die aktuelle Draht-Stickout-Länge wurde mit Hilfe der Bildverarbeitung erfasst und mit der aktuellen Position des Schweißbrenners kombiniert, um eine Werkstück-Höhenkarte zu berechnen. Es wurden zwei konzeptionelle Regelungsstrategien vorgestellt und getestet. Werkstückhöhenabweichungen, verursacht durch Prozessunregelmäßigkeiten und absichtlich herbeigeführte Störungen, wurden

erfolgreich kompensiert. Darüber hinaus wurde der Abstand zwischen Brenner und Werkstück automatisch angepasst, um die Prozessstabilität zu gewährleisten.

Die Ergebnisse zeigen, dass es möglich ist, den gemessenen Draht-Stickout des Schweißprozesses zur Kompensation von Oberflächenfehlern und zur Steuerung des Kontaktspitzen-Werkstück-Abstands zu nutzen. Die geometrische Abweichung eines additiv gefertigten Testwürfels konnte durch das Schweißen mit dem implementierten Regelalgorithmus deutlich reduziert werden (siehe Abbildung 7).

Zusammenfassung

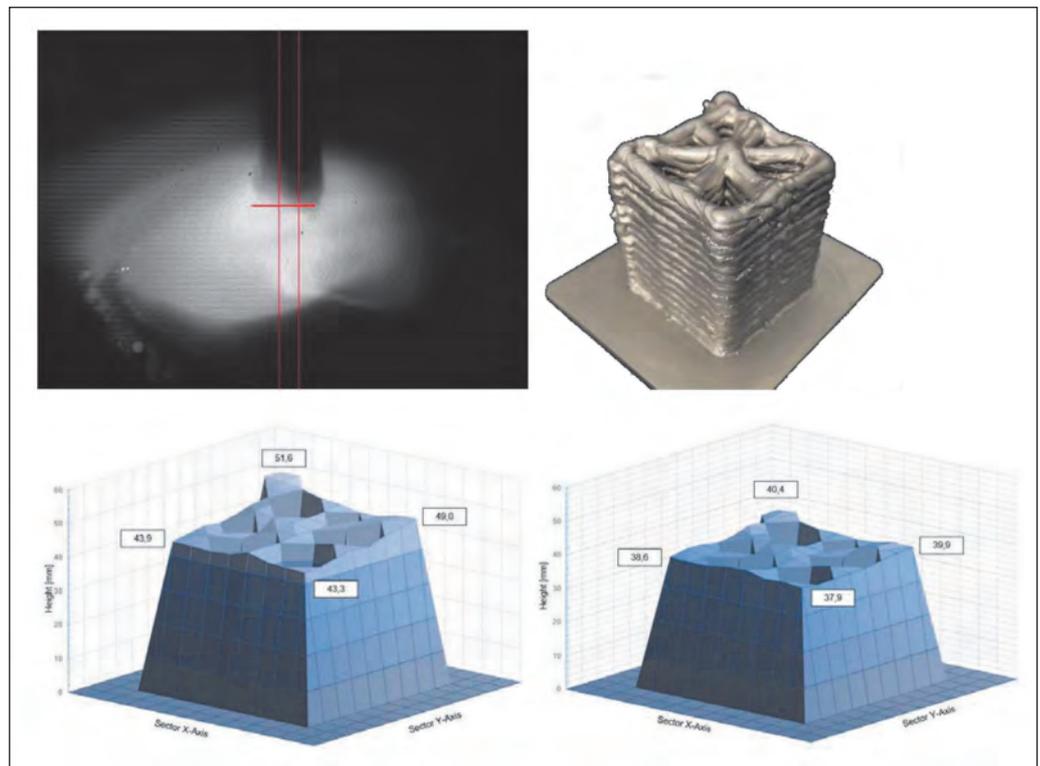
Die zunehmende Bedeutung der lichtbogen- und drahtbasierten additiven Fertigungsverfahren hat in den letzten Jahren zu einer weltweiten Zunahme an Forschungsaktivitäten geführt. Insbesondere die Themenfelder Prozesstechnologie, Werkstoffverhalten sowie Sensorik und Automatisierung sind entscheidend für eine Umsetzung im industriellen Umfeld. Auch wenn sich industrielle Lösungen abzeichnen, sind weiterhin



erhebliche Entwicklungsschritte notwendig. Hier ist insbesondere die softwareseitige Implementierung von Prozesswissen kritisch.

Abbildung 6: Herstellung einer gradierten Schicht durch Variation des Vorschubverhältnisses beim Mehrdrahtschweißen

Abbildung 7: Adaptive Höhenregelung durch Nutzung einer Prozesskamera



Metall-Ultraschallschweißen

Florian Müller, Eric Helfers, Alexander Schiebahn

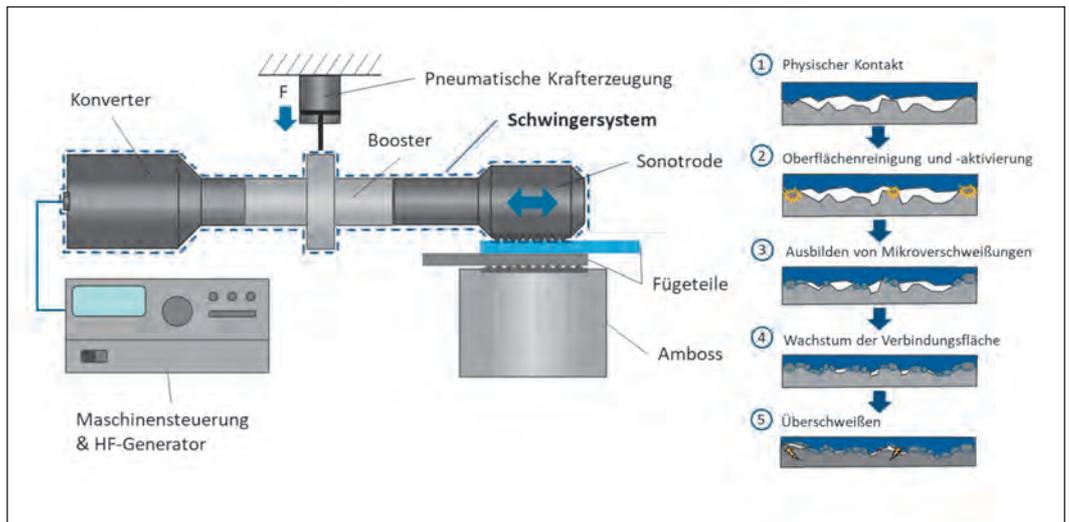


Abbildung 1:
Typischer Anlagenaufbau beim Metall-Ultraschallschweißen (links), Ablauf Verbindungsbildung (rechts)

Das Metall-Ultraschallschweißen ist für viele fügetechnische Herausforderungen in der Elektrotechnik und Elektromobilität das Mittel der Wahl. Das Schweißverfahren, bei dem nur mittels Kraft und hochfrequenten Schwingungen gefügt wird, kommt ohne Schmelze oder Zusatzwerkstoffe aus und ist daher besonders für Mischverbindungen geeignet. Dabei können Verbindungen hoher Qualität mit geringer thermischer und mechanischer Belastung der Werkstücke erzeugt werden. Trotz seiner industriellen Relevanz sind nicht alle Details der Verbindungsbildung bekannt. Das ISF beschäftigt sich hier in der Grundlagenforschung und bringt die neuesten Erkenntnisse in Form von Methoden zur Prozessüberwachung direkt in die Praxis.

Das Metall-Ultraschallschweißen (M-USS, engl.: Ultrasonic Metal Welding – USMW) ist ein stoffschlüssiges Festphasenfügeverfahren. Damit unterscheidet es sich vom ebenfalls sehr verbreiteten Kunststoff-Ultraschallschweißen, bei dem die Fügeteile im Kontaktbereich aufgeschmolzen werden.

Die typische M-USS Anlage, dargestellt in **Abbildung 1**, besteht aus einem Schwingersystem mit Konverter, Booster und dem eigentlichen Schweißwerkzeug, der Sonotrode. Dieses Schwingersystem wird mittels einer pneumatischen Krafterzeugung auf die Fügeteile gepresst. Unter den Fügeteilen befindet sich meist ein starrer Amboss. Der HF-Generator

steuert den Konverter mittels hochfrequenter elektrischer Signale in der Arbeitsfrequenz an, dieser wandelt die Signale in mechanische Schwingungen um. Die Sonotrode überträgt die Schwingungen mittels geriffelter Struktur in das obere Fügeteil.

Die Verbindungsbildung beim Metall-Ultraschallschweißen lässt sich in Prozessphasen zusammenfassen, die durch die unterschiedlichen Relativgeschwindigkeiten der Fügeteile und Werkzeuge zueinander geprägt sind. Angefangen vom ersten physischen Kontakt, bei dem Rauheitsspitzen der beiden Fügeteile nach Aufbau der Prozesskraft aufeinanderpressen folgen durch Einleitung des Ultraschalls die Oberflächenreinigung und

-aktivierung, das Ausbilden erster Mikroverschweißungen und deren Wachstum zu einer großflächigen Verbindungsfläche, sowie abschließend das Überschweißen. Im Optimalfall wird der Prozess just vor dieser Phase beendet, sodass eine übermäßige mechanische und thermische Belastung der Fügezone, die mit Schwächung der Fügeteile und einer teilweisen Zerrüttung der Verbindungszone einhergeht, ausbleibt. Die beschriebenen Phasen sind ebenfalls in **Abbildung 1** schematisch dargestellt.

Auch Mischverbindungen aus Kupfer und Aluminium sowie Aluminium und Messing, die mit den klassischen Schmelzschweißverfahren nicht oder nur schwer zu erzeugen sind, stellen

KONTAKT

Dr.-Ing. Alexander Schiebahn
Tel.: +49 (0)241 80-97233
schiebahn@isf.rwth-aachen.de
www.isf.rwth-aachen.de



Abbildung 2:
Al/Cu Mischverbindung

keine besondere Herausforderung dar. **Abbildung 2** zeigt das Beispiel einer homogenen Al/Cu-Verbindung.

Aufgrund der zahlreichen Verfahrensvorteile lassen sich in der modernen Welt eine Vielzahl von Beispielanwendungen für das M-USS finden. Das Verfahren ist fest im Bereich der Elektrotechnik etabliert. So wird das Verfahren in den Bereichen Windkraft, Fahrzeugbau, elektrische Anlagen, Batteriezellen u.v.m. erfolgreich in der Serienfertigung eingesetzt. Mit dem M-USS lässt sich eine vielfältige Auswahl an Füge­teilgeometrien fü­gen, ein Auszug ist in **Abbildung 3** dargestellt.

Besondere Aufmerksamkeit findet das Verfahren im Kontext der Elektromobilität, so wird im gesamten elektrischen Antriebsstrang mittels M-USS gefügt: Von Ladestecker über Kabelbaum, Batteriespeicher und Leistungselektronik bis hin zum Elektromotor selbst. Hier dienen die Schweißverbindungen zur Leistungsübertragung, sind also sicherheits- und funktionsrelevant. Dabei eignet sich das M-USS auch für die sensiblen Bauteile. **Abbildung 4** zeigt die intakte Nickel-Sperrschicht auf dem Terminal bei einer Litze-Terminal-Schweißung.

Ein Schwerpunkt des ISF ist der Bereich Prozessüberwachung und Verbindungsbildung. Hier konnten in den letzten Jahren mehrere Forschungsprojekte mit und ohne Industriebeteiligung erfolgreich abgeschlossen werden. Am ISF stehen inzwischen zahlreiche Sensorlösungen zur Prozesscharakterisierung und

-überwachung zur Verfügung. **Abbildung 5** zeigt den Einsatz von Lasertriangulationssensoren zur Erfassung der Werkzeugschwingung.

So konnte die Bedeutung externer Messdaten zur Qualitätsüberwachung für verschiedene Störeinflüsse im Projekt „SIMUSS: Systemidentifikation und Monitoring von Metall-Ultraschallschweißprozessen“ gezeigt werden.

Das IGF-Vorhaben Nummer 20.161N 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 Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Aktuell stehen insbesondere Sensorlösungen ohne direkte Beobachtung der Schweißstelle im Blick der Forschung – hier wird durch innovative Sensorik die elektrische Schwingung zwischen Generator und Konverter überwacht, berührungslos und ohne Beeinflussung der Hochfrequenzleitung. Basierend auf diesen und weiteren Signalen wird am ISF im Rahmen des Projekts „DEGU – Demonstration einer energieoptimierten Prozessregelung für das Metall-Ultraschallschweißen anhand von Prozesskenngrößen“ an der Entwicklung einer optimierten Prozessführung gearbeitet. Durch einen für jedes Füge­teil optimierten Energieeintrag lassen sich für die einzelne Verbindung höhere Festigkeiten erzielen und in der Gesamtheit eine geringere Qualitätsstreuung erreichen. Dafür wird das optimale Prozessende im laufenden Schweißprozess in Abhängigkeit der tatsächlichen Verbindungsbildung ermittelt und entsprechend eingestellt. Die

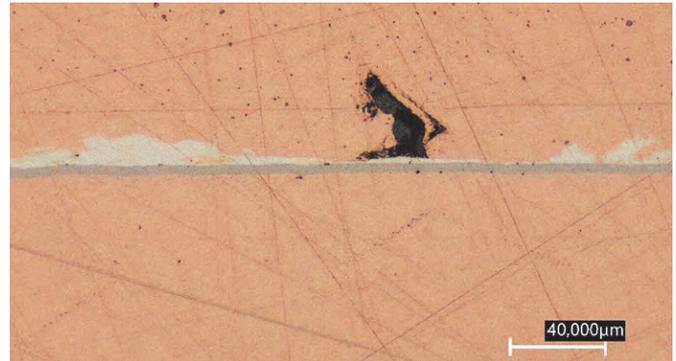


Abbildung 4:
Intakte Ni-Sperrschicht bei einer Litze-Terminal-Schweißung

notwendige Datenverarbeitung wird mittels echtzeitfähiger Hardware (FPGA + Controller) umgesetzt.

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – 470052705 „Demonstration einer energieoptimierten Prozessregelung für das Metall-Ultraschallschweißen anhand von Prozesskenngrößen“.

In den bisherigen Projekten am ISF konnte die Bedeutung des Oberflächeneinflusses auf den Schweißprozess verdeutlicht werden. Um Bestrebungen der Industrie zu erfüllen und einen definierten Oberflächenzustand für den Schweißprozess zu entwickeln, arbeitet das ISF im Projekt „Laser-Pro-M-USS – Effiziente und gezielte Oberflächenbehandlung mittels Laserstrahlung für prozesssicheres Metall-Ultraschallschweißen“ an der Verbesserung der Gesamtprozessstabilität gegenüber Verunreinigungen und undefinierten Oberflächeneigenschaften durch eine gezielte Laservorbehandlung des Schweißbereichs mit einem Reinigungs- oder Strukturierungslaser vor dem Ultraschallschweißprozess. Eine Bauteilreinigung vor dem Prozess ist üblich, zum Erzielen einer konstanten Qualität muss der Reinigungsprozess jedoch an den Zustand des ungereinigten Bauteils und an die gewünschte Oberfläche angepasst werden. In der industriellen Anwendung erfolgt

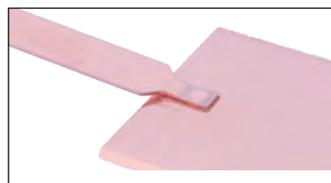


Abbildung 3:
Beispiele für das M-USS (von links nach rechts) Litze-Terminal, Blech-Ableiter, Blech-Folienstapel

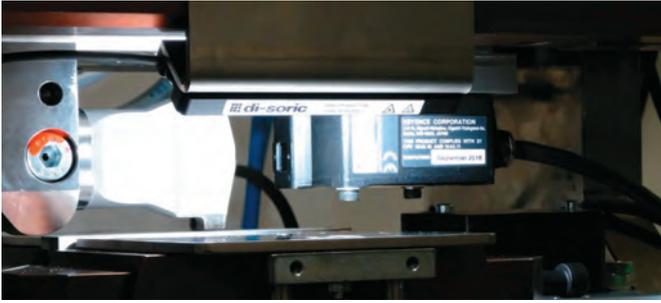


Abbildung 5:
Messung der Schwingungsamplitude an der Sonotrode

die Reinigung bisher häufig mit aufwendigen und umweltbelastenden Verfahren, die auf mechanischen und chemischen Prinzipien beruhen. Im weiteren Projektverlauf werden erstellte Proben einer detaillierten Qualifizierung, zum Beispiel in Form von Alterungsversuchen unterzogen, um einen möglichen negativen Einfluss einer Laserbehandlung auf die Verbindungseigenschaften auszuschließen. Die Reproduzierbarkeit der Oberflächenbehandlung wird durch die Evaluierung einer inlinefähigen Qualitätssicherung dargestellt.

Das IGF-Vorhaben Nummer 22.475N der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Das Metall-Ultraschallschweißen gilt als umweltfreundlicher und ressourceneffizienter Schweißprozess. So können ohne Zusatzwerkstoffe Mischverbindungen in fester Phase gefügt werden. Durch die geringen Prozesstemperaturen bildet sich kein klassischer Schweißrauch aus. Bedingt durch die mechanische Belastung der Fügeteile durch die Schwingungen können jedoch Partikel freigesetzt werden. Ebenso ist es möglich, dass Rückstände auf den Fügepartner, wie Walz- oder Ziehöle verdampfen und Isolationsmaterial in unmittelbarer Nähe der Fugestelle aufschmilzt. Zu diesen bekannten Phänomenen gibt es bisher keine öffentlichen Untersuchungen. Die gas- oder partikelförmigen Bestandteile von Emissionen

können gesundheitsgefährdend sein. Entscheidend ist dabei die chemische Zusammensetzung der Emissionen. Bei partikelförmigen Emissionen spielt auch die Partikelgröße eine wichtige Rolle, da sie entscheidet, ob Partikel respirierbar sind ($<10\ \mu\text{m}$) oder gar bis in die Alveolen vordringen können ($<5\ \mu\text{m}$). Ziel des Forschungsvorhabens „**EmUs – Physikalische und chemische Charakterisierung der Emissionen beim Metall-Ultraschallschweißen von Litze-Terminal-Verbindungen und ihre toxikologische Bewertung**“ ist die Erfassung und toxikologische Charakterisierung der Emissionen beim Metall-Ultraschallschweißen von Litze-Terminal-Verbindungen.

Das IGF-Vorhaben Nummer 21.568 N der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Für die schweißtechnische Verbindung von elektrisch stark belasteten Bauteilen gibt es eine Reihe von industriell etablierten stoffschlüssigen Fügeverfahren. Diese unterscheiden sich nicht nur in wesentlichen Aspekten der Prozessführung, sondern weichen auch in den erzielbaren Fügestellengeometrien und deren mikrostrukturellem Aufbau stark voneinander ab. Hier sind neben dem Metall-Ultraschallschweißen auch das Laserstrahlschweißen, das Rührschweißen, das Widerstands(buckel)schweißen und viele andere Prozesse zu nennen.

Wesentliches Gütekriterium dieser Verbindungen ist die dauerhafte Sicherstellung eines ausreichend dimensionierten elektrischen Kontaktes, also eines niedrigen Übergangswiderstandes. Die Widerstandsmessung einer solchen Schweißverbindung nach gängigen Methoden ist

bezüglich der Bewertung der Verbindungstechnologie und insbesondere der Verbindungsgüte jedoch eingeschränkt aussagekräftig. Die geringen, aber messbaren Widerstände sind nicht gegenüber den üblichen Schweißfehlern sensitiv. In der Praxis erfolgt die Qualitätsbestimmung solcher Verbindungen daher mechanisch mittels einer zerstörenden Prüfung. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Elektrifizierung und aktueller Produktentwicklungen besteht ein Bedarf an einem geeigneten elektrischen Prüfverfahren, welches fehlersensitive und aussagekräftige Qualitätskennwerte für elektrische Verbindungen liefert. Im Rahmen des Forschungsprojekt „**EleQuant – Elektrische Quantifizierung von Schweißverbindungseigenschaften für Hochstrom- und Hochspannungsanwendungen**“ wird ein solches Prüfverfahren entwickelt und standardisiert, in dem Fügestellen durch einen kurzzeitigen hohen Stromfluss belastet und hinsichtlich ihrer transienten Antwort auf diese Belastung (Widerstand, lokale Erwärmung, ...) bewertet werden. Die Auswertung dieser Messgrößen erfolgt dabei auch unter Zuhilfenahme Maschinellen Lernens.

Das IGF-Vorhaben Nummer 21.956 N der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Neben der öffentlichen Forschung arbeitet das ISF auch im direkten Auftrag an aktuellen Fragestellungen und akuten Problemen der Industrie. Beispiele sind die Implementierung von Maßnahmen zur Qualitätsüberwachung, Auswahl und Beratung der Schweißkonfiguration, schwingungstechnische Bewertung von Fügeteilen und Spannvorrichtungen sowie die fachgerechte Prüfung von geschweißten Bauteilen.

Automatisiertes Metallschutzgasschweißen – Anwendung optischer Sensorik zur adaptiven Prozessführung

Alexander Biber, Rahul Sharma

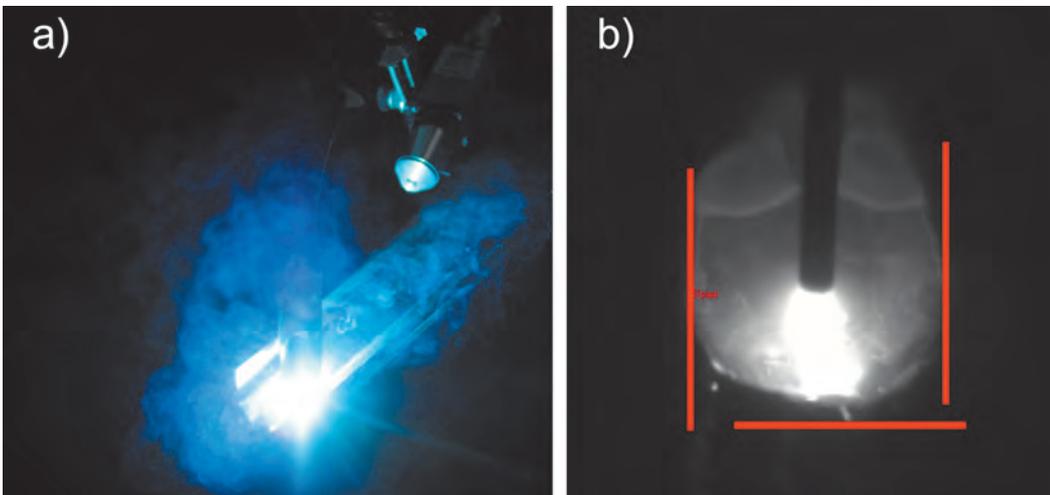


Abbildung:
 Optische Prozessbeobachtung:
 a) Schweißprozess mit Kamera,
 b) Schmelzbadaufnahme mit detektierten Kanten

Das Metallschutzgasschweißen kommt seit mehreren Jahrzehnten zum Einsatz und ist fester Bestandteil in der schweißtechnischen Fertigung in vielen Industriezweigen. Aufgrund steigender Anforderungen an die Produktivität, Qualität und Reproduzierbarkeit wird die Prozessautomatisierung intensiv weiterentwickelt. Herausforderungen bei dem automatisierten MSG-Schweißen sind sich stets ändernde Prozessrandbedingungen, die unter anderem durch wärmeinduzierten Verzug oder Abweichungen in der Nahtvorbereitung verursacht werden. Um diese Änderungen erfassen und ausgleichen zu können wird Sensorik benötigt. Die kamerabasierte Prozessbeobachtung eignet sich aufgrund des hohen Informationsgehalts der Bilder zur Prozessbeobachtung. Durch eine echtzeitfähige, online-Bildverarbeitung können Prozessabweichungen detektiert werden und Anpassungen in der Prozessführung vorgenommen werden. Die Prozessanpassungen können mechanisch (Schweißgeschwindigkeit, Brennerorientierung, Schweißpfad etc.) oder elektrisch über die Synergieeinstellungen der Schweißstromquelle erfolgen.

1 Einleitung

Wechselnde Prozessrandbedingungen in der schweißtechnischen Fertigung können zu Ungängen und somit zu aufwendiger Nachbearbeitung oder Ausschuss führen. Zu den veränderlichen Prozessrandbedingungen gehören unter anderem Abweichungen in der Nahtvorbereitung oder thermisch induzierter Verzug. Durch passende Sensorik können diese erfasst werden. Durch

eine echtzeitfähige Bildverarbeitung können Prozessunregelmäßigkeiten direkt erkannt werden und mittels Anpassungen der Prozessparameter kompensiert werden. Die inline-Anpassung der Prozessparameter wird als Adaptives Schweißen bezeichnet. Am ISF wird die kamerabasierte Prozessbeobachtung seit vielen Jahren erforscht. Mittels eines vernetzten, echtzeitfähigen Schweißfertigungssystems können die Bildinformationen für eine adaptive Prozessführung

angewandt werden. Im Folgenden werden grundlegende Konzepte zur Bilderfassung und -verarbeitung, sowie realisierbare adaptive Schweißstrategien vorgestellt.

2 Kameratechnik

Die schweißtechnische Umgebung stellt für optische Komponenten eine Herausforderung dar. Schweißrauch, Spritzer und die intensive und teils variierende Lichtbogenstrahlung (z.B.

KONTAKT

Dr.-Ing. Rahul Sharma
 Tel.: +49 (0)241 80-96267
 sharma@isf.rwth-aachen.de
www.isf.rwth-aachen.de

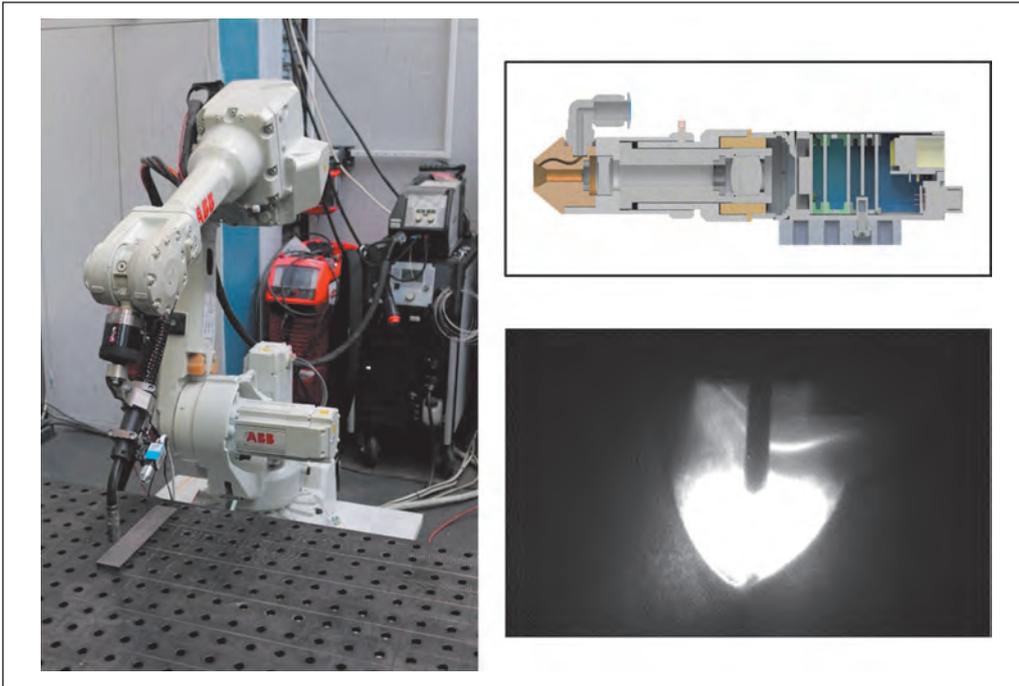


Abbildung 1:
Aufbau des Schweißfertigungssystem

Impulslichtbogen) erfordern eine entsprechende Auslegung der optischen Komponenten dar. In **Abbildung 1** ist eine Optik dargestellt, die diesen Herausforderungen durch konstruktive Lösungen entgegenwirkt. Wesentliche Komponenten sind eine Pinholeblende, ein Badpassfilter und eine in der Optik integrierte Querströmung. Durch die Synchronisation der Kamera mit dem Schweißprozess können variierende Prozesshelligkeiten beim Impulslichtbogen egalisiert werden. Somit werden im Prozessablauf alle Bilder in der Grundstromphase aufgenommen und ohne Anpassungen der Belichtungszeit über den Prozess hinweg gleichbleibende Bildqualitäten erzeugt. Im nächsten Schritt erfolgt die Bildverarbeitung. In **Abbildung 2** ist der Bearbeitungsalgorithmus gekennzeichnet. Durch eine Binarisierung der Originalbilder und nachfolgender Kantendetektion in vertikaler und horizontaler Richtung können unter

anderem die Schmelzbadbreite und -position detektiert werden. Die Bildverarbeitung erfolgt inline und somit können die extrahierten Schmelzbadinformationen für eine Prozessregelung angewandt werden.

3 Aufbau des adaptiven Schweißfertigungssystem

Die Adaption der Prozessparameter kann in mechanischer oder elektrischer Form erfolgen. Zu den mechanischen Prozessparametern gehören unter anderem die Schweißgeschwindigkeit, Brennerorientierung oder der Stromkontaktrahabstand. Zu den elektrischen Prozessparametern gehören die elektrischen Führungsgrößen der Schweißstromquelle. Hierfür wurde ein Schweißfertigungssystem implementiert, welches einen flexiblen Einsatz adaptiver Systeme ermöglicht. Dieses System ist in mehrere deterministisch und parallel laufende Bausteine unter-

teilt: Robotersteuerung, Schweißstromquelle, Prozessleiteinheit, Kamerasteuerung. Die Robotersteuerung ermöglicht eine Vorgabe der Positionsdaten mit adaptiver Verfahrensgeschwindigkeit, Brennerorientierung und Positionskorrektur. Die Parameter können mit einer Frequenz von 10 Hz angepasst werden. Die Schweißstromquelle ist über einen D/A-Wandler integriert, worüber die Synergieparameter, sowie Prozess-Start und -Stopp-Sequenzen eingestellt werden können. Die Kamera ist über das TCP/IP-Protokoll mit der Prozesssteuerung verbunden. Übermittelt werden Informationen direkt aus der Bildverarbeitung. Die Prozessleiteinheit kombiniert diese Bestandteile. Es werden die übermittelten Kameradaten ausgewertet und eine Adaptionstrategie ausgewählt. Die Adaptionstrategie wird an die jeweiligen Aktoren übermittelt.

4 Anwendungsbeispiele

Ein Anwendungsbeispiel ist die Übertragung manuell genutzter Prozessanpassungsstrategien auf ein automatisiertes System. Beim manuellen Schweißen werden auf Grundlage von Erfahrung und Prozessbeobachtung im Wesentlichen die Brennerorientierung und die Streckenenergie als Prozessanpassungsgrößen angewandt. Durch das implementierte Schweißfertigungssystem können diese Strategien auf das entwickelte Schweißfertigungssystem übertragen werden.

In **Abbildung 3** sind zwei Fehlerbilder dargestellt. Im ersten (**a**) wird eine Fallnahtschweißung durchgeführt. Diese Schweißposition führt zu einer erhöhten Gefahr vom Vorlaufen des Schmelzbades und somit Bindefehlern. Dieses Fehlerbild ist detektierbar und durch die Anpas-

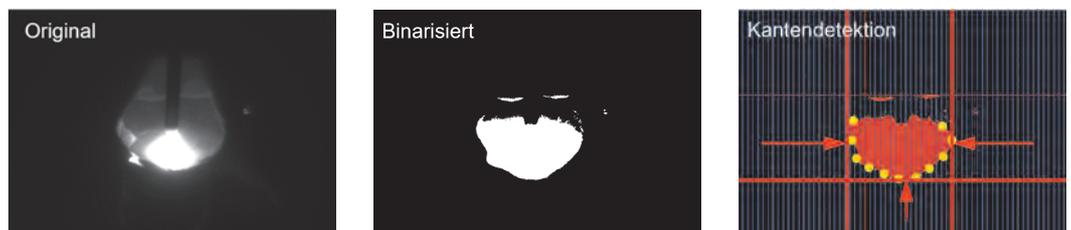


Abbildung 2:
Bildverarbeitungsalgorithmus zur Kantendetektion

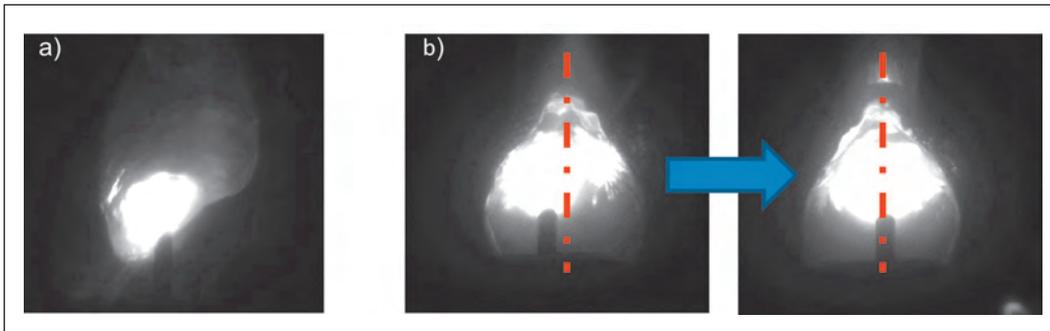


Abbildung 3:
Detektierte Fehlerbilder a) vorlaufendes Schmelzbad, b) dezentrale Drahtpositionierung zum Schmelzbad

sung der Brennerorientierung und/oder der Streckenenergie kann diesem entgegengewirkt werden. In **Abbildung 3 b)** wird eine Steignacht an einem T-Stoß durchgeführt. Es ist eine Fehlpositionierung des Schweißdrahtes zur Kehle erkennbar. Durch die Anpassung des Schweißpfades wird die Fehlpositionierung korrigiert.

5 Fazit und Ausblick

Die Prozesskamera ist ein flexibel einsetzbarer Sensor mit einem sehr hohen Informationsgehalt. Durch Anpassungen in der Bildverarbeitung können eine Vielzahl an Prozessinstabilitäten detektiert werden und durch das flexibel einsetzbare adaptive Schweißfertigungssystem aus-

geglichen werden. In kommenden Arbeiten werden weitere Herausforderungen beim automatisierten Schweißen untersucht (z.B. Nahtanfangsfindung). Außerdem werden alternative Bildverarbeitungsalgorithmen (z.B. KI-basierte Modelle) getestet und im Hinblick auf Echtzeitfähigkeit und Genauigkeit gegenübergestellt.

GYS POWER SOURCES

TECHNOLOGY & SUPPORT

BASED IN AACHEN

INVEST IN THE FUTURE

NEOPULSE & TITANIUM

Komplett kompatibel mit Cobots & Robots führender Hersteller

FRANZÖSISCHER HERSTELLER SEIT 1964

www.gys-schweissen.com

Laserstrahlschweißprozess im Vakuum: Potential und Risiken

T. Krichel, T. Twiehaus, C. Frey

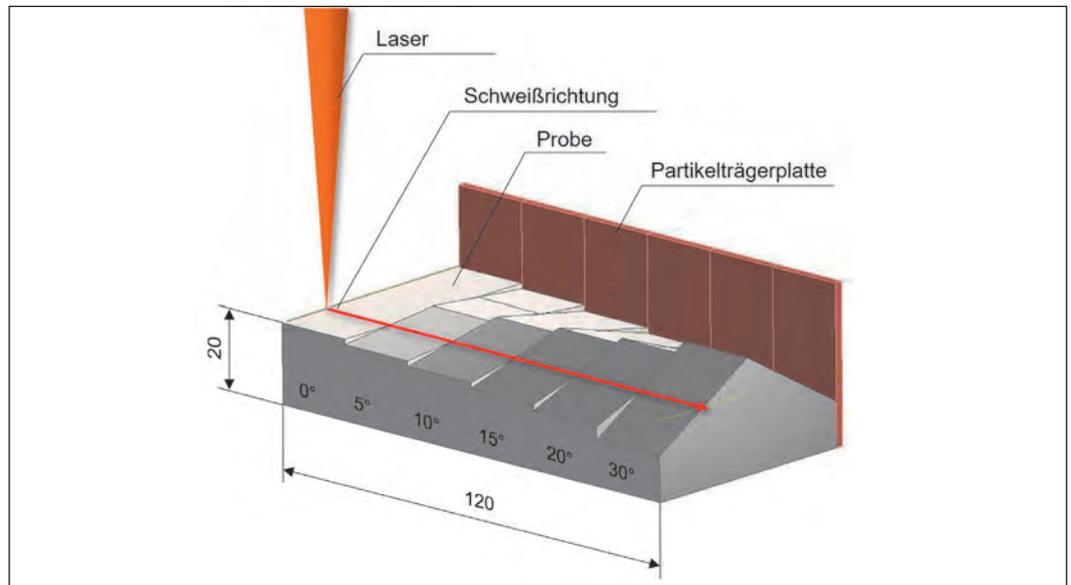


Abbildung 1:
Schematischer Aufbau des Versuchs

Das Laserstrahlschweißen im Vakuum (LaVa) mit Hochleistungsfestkörperlasern, welche eine hohe Strahlqualität aufweisen, wurde bereits vor einigen Jahren genauer bezüglich der Einschweißtiefe und Schweißnahtgeometrie untersucht [1]. Nahezu zeitgleich untersuchte das Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF) den damals wieder entdeckten Prozess hinsichtlich des Einflusses des variierenden Arbeitsdrucks auf die Nahtgeometrie und verglich diesen mit dem prinzipiell ähnlichen Elektronenstrahlprozess (EB, engl.: Electron Beam) [2; 3]. Hierbei konnten einige Parallelen, aber auch wesentliche Vorteile des Laserstrahls herausgearbeitet werden. Ein wesentlicher Vorteil des LaVa-Prozesses ist, dass bereits im Druckbereich von 1 mbar bis 10 mbar vergleichbare Einschweißtiefen zum EB erreicht werden, wodurch die anlagenseitigen Kosten für die Vakuumtechnik deutlich reduziert werden.

Die Verringerung des Arbeitsdruckes von Umgebungsdruck auf 0,1 mbar zeigt eine signifikante Senkung der Siedetemperatur, beispielsweise um rund 1300 K für den Werkstoff Eisen [4; 5]. Infolgedessen dringt die Laserstrahlung bei gleicher Strahlleistung tiefer in das Werkstück ein, wodurch weitestgehend parallele Nahtflanken entstehen, wie sie vom EB-Prozess bekannt sind. Neben der Absenkung der Siedetemperatur hat die Reduzierung des Umgebungsdrucks auch einen wesentlichen Einfluss auf die Metaldampfdichte in und über der

Kapillare. Die Ausdehnung der sichtbaren Metaldampffackel nimmt mit sinkendem Arbeitsdruck deutlich ab [6]. Die überwiegend inerte Atmosphäre im Vakuum verändert außerdem die Menge und Art der festen Prozessemissionen, die sich ebenfalls auf den Laserstrahl und den Schweißprozess auswirken, sofern der Schweißrauch nicht vom Strahlengang ferngehalten wird. Eine Verringerung des Umgebungsdrucks reduziert daher nicht nur die Ausprägung der Metaldampffackel [2] sondern auch die Partikelgröße [7]. Die werk-

stoffabhängigen Emissionen wirken sich sowohl auf den Schweißprozess selbst [8], als auch auf das Prozessergebnis aus, was sich insbesondere in einer deutlich reduzierten und/oder ungleichmäßigen Einschweißtiefe zeigt [9; 10]. Dabei treten auf dem Weg von der Laseroptik bis zur gewünschten Schweißstelle auf dem Werkstück verschiedene Effekte auf, die die Nahtqualität beeinflussen können. Zum Beispiel können die vom Laserstrahlschweißen erzeugten stofflichen Prozessemissionen in Form eines Gemischs aus unterschiedli-

KONTAKT

Dr.-Ing. Simon Olschok
Tel.: +49 (0)241 80-96253
olschok@isf.rwth-aachen.de
www.isf.rwth-aachen.de

chen Anteilen und Teilchengrößen von Metaldampf, der zu Mikrotropfen kondensiert und zu Mikropartikeln erstarrt, bestehen [11]. Alle diese Phasen hängen von der Atmosphäre in der unmittelbaren Prozessumgebung ab, sei es durch Änderung der Abkühlungsgeschwindigkeit und damit der Phasenumwandlung oder durch chemische Reaktionen [7; 12]. Dabei gehört die Oxidation, insbesondere bei unzureichender oder fehlender Schutzgasabdeckung, zu den größten Einflussfaktoren und kann die Schweißnahtausformung und -qualität erheblich verändern [13]. Daher gilt, um Schweißnähte von exzellenter Qualität zu erzeugen, muss der Einfluss der Metaldampffackel im Rahmen der Prozessauslegung in Betracht gezogen werden.

Charakteristik der Metaldampffackel

Um die Metaldampffackel zu charakterisieren, wurden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen an einer Laserstrahlschweißanlage LaVa 95 von der Fa. FOCUS durchgeführt. Diese ermöglicht sowohl das Schweißen im druckgeregelten Bereich von 1 mbar bis 100 mbar als auch das Schweißen bei Atmosphärendruck. In beiden Fällen wird über das von ISF patentierte OptiShield-System koaxial Argon in die Vakuumkammer injiziert. Der verwendete Multimode-Scheibenlaser TruDisk 16002 (Fa. TRUMPF) mit einer Wellenlänge von 1030 nm und die 2D-Scanner-Optik D50 vom Hersteller IPG resultieren in einem Spotdurchmesser von 400 µm. Die Schweißungen wurden an einem Cr-Ni-Stahl (1.4301) durchgeführt, welcher in der Form präpariert ist, dass sich die Oberfläche entlang der Schweißrichtung sukzessive neigt, wie in **Abbildung 1** visualisiert. Ein reines Kupferblech, das seitlich neben den Proben angebracht ist, fängt die Materialemission für die SEM Analyse auf.

Mit einer Laserleistung von 900 W, einer Schweißgeschwindigkeit von 15 mm/s, einem Arbeitsdruck von 100 mbar und einer Kreispendelung von 0,3 mm bei 60 Hz zeigt sich ein

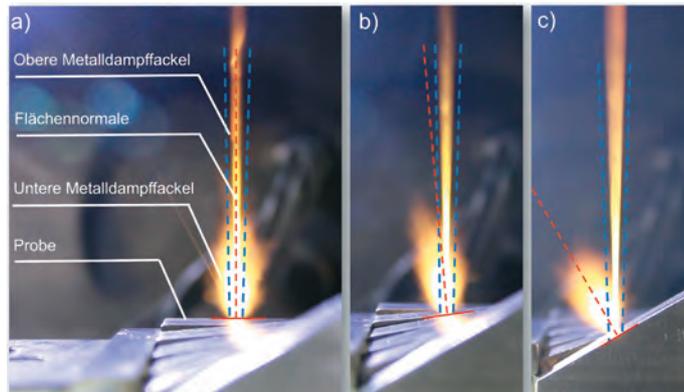


Abbildung 2: Beobachtung der Metaldampffackel bei a) 0°, b) 5°, c) 30°

spritzerfreier Tiefschweißprozess. Die Beobachtung des Prozessleuchtens präsentiert eine kleine Metaldampffackel, welche sich der Neigung der Werkstückoberfläche anpasst. Selbst bei geringen Neigungswinkeln von 5° ist dieser Effekt im Vergleich zur horizontalen Oberfläche (0°) deutlich sichtbar, siehe **Abbildung 2**. Mit zunehmendem Neigungswinkel der Oberfläche kippt die Metaldampffackel weiter von der senkrecht einfallenden Laserstrahlung weg. Diese Metaldampffackel hat eine elliptische Form mit unscharfen Rändern. Die Entstehung beruht vermutlich auf austretenden glühenden Teilchen an der Schmelzfront in der Kapillaroberseite. Die Intensität der unteren Metaldampffackel nimmt in Richtung des Schmelzbades zu, vermutlich aufgrund der zunehmenden Teilchendichte und Temperatur. Der obere Metaldampf, der unabhängig von der Oberflächenneigung ist, zeigt eine scharfe Abgrenzung mit dem gleichen Effekt, dass die Intensität des Prozesslichts zum Schmelzbad hin zu-

nimmt. Eine Erklärung kann sein, dass Restpartikel im Vakuum bei 100 mbar mit der Laserstrahlung wechselwirken. Das intensive Prozesslicht in Richtung Werkstück basiert auf dem fokussierten Laserstrahl, der die Intensität und damit die Anregung der Partikel erhöht.

Die Richtung des unteren Metaldampfes bei 30° Oberflächenneigung zeigt interessanterweise auch im Makroschliff der Schweißnaht in **Abbildung 3**, dass im oberen Bereich eine Neigung der Schweißnaht stattfindet, während der untere Bereich der Richtung der Laserstrahlung folgt. Dieser Effekt ist auch bei höherer Laserleistung (2300 W) und reduziertem Arbeitsdruck (10 mbar) deutlich sichtbar. Die beiden Bereiche der Schweißnaht, die sich durch die veränderte Wärmeleitung und Oberflächenspannung der Schmelze erklären lassen, könnten die Einflussfaktoren des oberen und unteren Metaldampfes sein. Dies wiederum lässt sich nur durch Echtzeitbeobachtung der Dampfkapillare feststel-

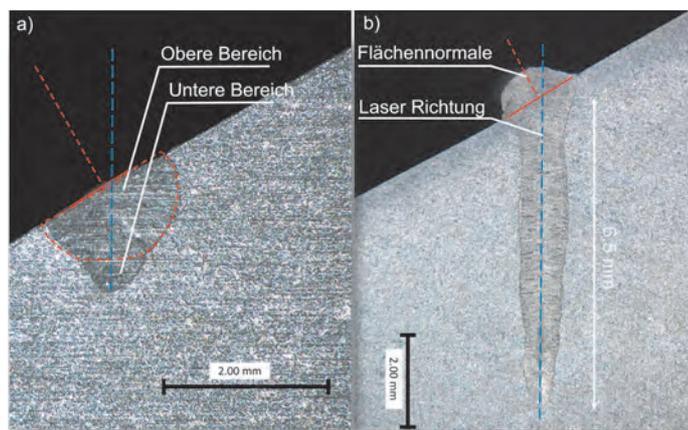


Abbildung 3: Makroschliff der Schweißnaht bei a) 900 W und 100 mbar, b) 2300 W und 10 mbar

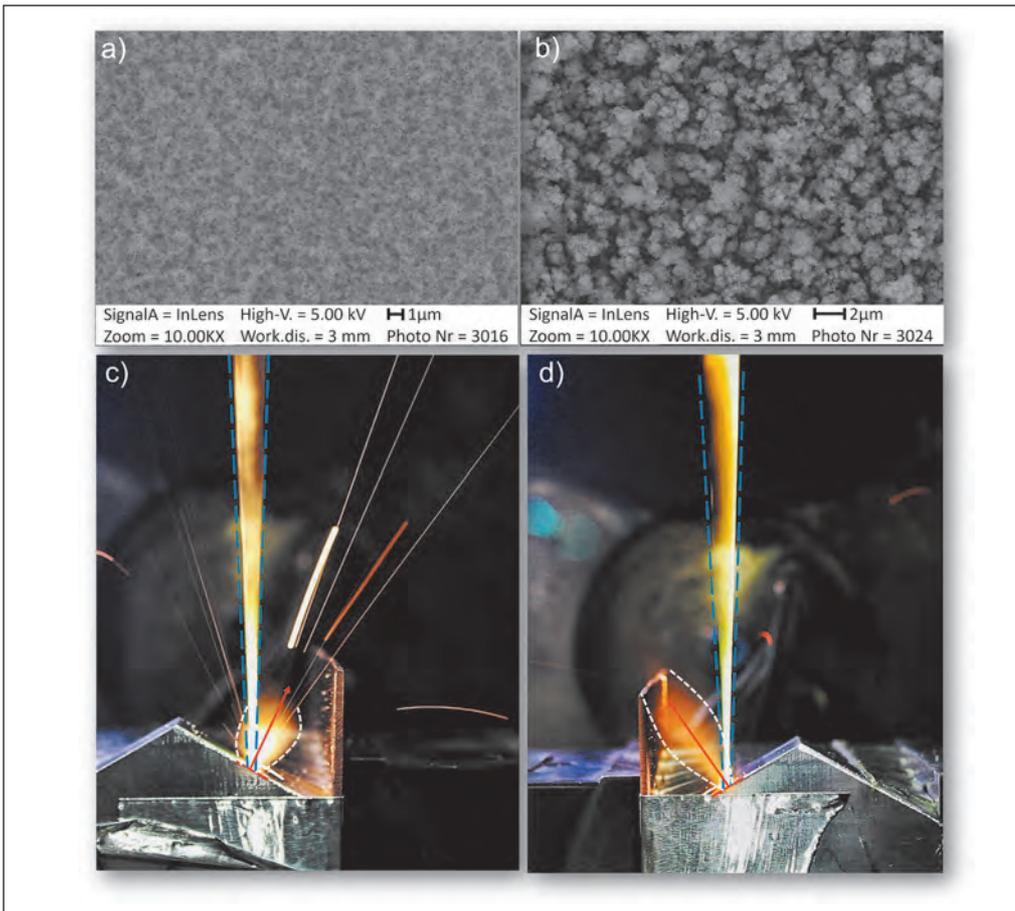


Abbildung 4: Materialemissionen bei a) 100 mbar b) 10 mbar sowie die zuvor observierten Metalldampffackel bei c) 100 mbar und d) 10 mbar

len, was im weiteren Verlauf in einem Forschungsvorhaben am ISF untersucht wird.

Mit zunehmender Laserleistung von 2300 W und 10 mbar Arbeitsdruck ist die untere Metalldampffackel größer mit vermutlich geringerer Dichteverteilung der Partikel, siehe **Abbildung 4 d)**. Die Metalldampffackel der identischen Laserleistung bei 100 mbar ist kompakt und es treten häufiger Spritzer auf, dargestellt in **Abbildung 4 c)** als bei den verwendeten 900 W, dargestellt in **Abbildung 2 c)**. Die Ablagerungen auf den Kupferträgern nehmen aufgrund der geometrischen Anordnung bei beiden Arbeitsdrücken mit zunehmendem Oberflächenwinkel zu. Die bei 30°

Oberflächenwinkel und 100 mbar abgeschiedenen Partikel sind fein verteilt und kleiner als 10 nm, wie in **Abbildung 4 a)** gezeigt. Im Vergleich zu 10 mbar wie in **Abbildung 4 b)** dargestellt, agglomerieren die Partikel in der Größenordnung von < 200 nm [12; 14; 15]. Während die Partikel bei 100 mbar vernetzt/verriegelt aussehen, scheinen die Agglomerate bei 10 mbar fest verankert zu sein. Der verringerte Arbeitsdruck reduziert die Anzahl der Moleküle im Umgebungsmedium, wodurch das Abkühlen der Metalldampfpartikel durch Aufprall reduziert wird. Dadurch können die Partikel einerseits eine längere Strecke zurücklegen – gleiche Anfangsgeschwindigkeit vorausgesetzt – und andererseits können zwei oder mehr Partikel miteinander verschmelzen.

Der Aufbau dieser Studie legt die Komplexität der entstehenden Materialemission beim Laserschweißen im Vakuum dar. Die unterschiedliche Struktur und Zusammensetzung der

Metalldampffackel nimmt Einfluss auf die Schweißnahtqualität wie im Folgenden beschrieben.

Einfluss bei filigranen Schweißungen von Elektroblechen

Der Laserstrahl als Werkzeug bietet vielfältige Anwendungsmöglichkeiten vom Schneiden über die Oberflächenbehandlung bis hin zum Schweißen. Die Verfahrensvariante des LaVa-Prozesses eignet sich sowohl für den Einsatz im Dickblechbereich, als auch für filigrane Strukturen wie Bipolarplatten oder Elektrobleche [16–18].

Grundlegende Elemente eines jeden Elektromotors sind eine starre (Stator) und eine rotierende Komponente (Rotor). Beide Komponenten beinhalten einen Eisenkern, der mit Kupferdraht umwickelt ist. Zur Umwandlung von elektrischer in mechanische Leistung wird im Stator durch das Anlegen einer elektrischen Spannung ein Magnetfeld erzeugt, welches durch wiederholte Umpolung bzw. Ummagnetisierung den Rotor in eine Drehbewegung versetzt. Die Eisenkerne, auch „Ringkerne“ genannt, sind aus vielen Lagen voneinander elektrisch isolierter Lamellen aufgebaut, um die Induktivität der Eisenkerne zu erhöhen und Wirbelstromverluste zu reduzieren [19; 20].

Zur Paketierung werden unterschiedliche Fügeprozesse eingesetzt (Wolfram-Inert-Gas- (WIG) oder Laserstrahl-Schweißen, Stanzen, Nieten und Kleben). Beim Einsatz von Laserstrahlprozessen werden üblicherweise lineare Verbindungsnahte auf dem Außenmantel des Eisenkerns aufgebracht (**Abbildung 5**). Der dadurch unvermeidliche Wärmeeintrag beeinflusst das Korngefüge und führt zu Schweißspannungen; beides reduziert die Effizienz des Elektromotors. Alternativ zu diesem Verfahren werden im Folgenden einzelne, statistisch gleichverteilt angeordnete Schweißpunkte betrachtet.

In **Abbildung 6** werden Schlibfbilder von Punktschweißungen bei unterschiedlichen Arbeitsdrücken darge-

Abbildung 5: unterschiedliche Fügestrategien von Ringkernen, Links: Liniennahte, Rechts: statistisch gleichverteilte Schweißpunkte



stellt. Es werden drei Elektrobleche verglichen, die sich maßgeblich in ihrer Materialdicke und der Dicke der Isolationsbeschichtung unterscheiden. Bei den ersten beiden Werkstoffen A und B zeigt sich eine Abhängigkeit der Kornstruktur vom verwendeten Arbeitsdruck. Dieser Zusammenhang tritt bei Werkstoff C nicht auf; stattdessen besteht ein Einfluss des Arbeitsdrucks auf die Nahtgeometrie.

Bei Werkstoff A entsteht mit einem Arbeitsdruck von $p = 10$ mbar eine nahezu identische Kornstruktur wie beim Grundwerkstoff. Allerdings ist eine leichte dunkle Verfärbung der erstarrten Schmelze erkennbar. Die Verfärbung wird deutlicher bei $p = 100$ mbar und $p = 1.000$ mbar, wobei eine ausgeprägte Kornfeinung hinzukommt. Diese entsteht, weil die Isolationsbeschichtung der Lamellen aufschmilzt bzw. verdampft und die flüssige Schmelze kontaminiert. Dabei dienen Verunreinigungen aus der Beschichtung als Keimbildner; außerdem wird Kohlenstoff in die Schmelze eingetragen, der zur Bildung von Karbiden führt [21; 22]. Eine deutliche Steigerung der Härte mit steigendem Arbeitsdruck unterstreicht diesen Zusammenhang (Abbildung 7).

Bei Werkstoff B zeigen sich identische Effekte, wobei aufgrund der deutlich dickeren Isolationsbeschichtung bereits bei $p = 10$ mbar eine starke Verfärbung erkennbar ist. Außerdem sind die Korngrenzen deutlich ausgeprägter, da die sich bildenden Karbide dort agglomerieren.

Bei Werkstoff C konnten weder Feinkornbildung noch Aufhärtung beobachtet werden; die Kornstruktur ist der des Grundwerkstoffs bei allen untersuchten Arbeitsdrücken sehr ähnlich. Berücksichtigt man das Verhältnis von Materialdicke zur Dicke der Beschichtung, wird deutlich, dass die vergleichsweise dicke Isolationschicht der Werkstoffe A und B für die beschriebenen Effekte verantwortlich ist, die bei der deutlich geringeren Menge an Isolationsbeschichtung auf Material C nicht auftreten.

Bei Werkstoff C ist mit steigendem Arbeitsdruck eine deutliche Reduktion der Nahtbreite und Einschweißtiefe erkennbar. Dieser Effekt kann auf den Einfluss des Arbeitsdrucks auf die Dampfackel zurückgeführt werden, die bei geringerem Arbeitsdruck deutlich schwächer ausgeprägt ist (Abbildung 8: 7 und 9) [23; 24]. Dadurch trifft der Laserstrahl bei $p = 10$ mbar ungehindert auf das Werkstück, wohingegen die deutlich größere Dampfackel bei $p = 1.000$ mbar die am Werkstück auftreffende Leistung zu verringern scheint. Zudem ist die druckabhängige Siedetemperatur der Werkstoffe bei $p = 1.000$ mbar deutlich höher als in der Unterdruckatmosphäre. Die verringerte auftreffende Leistung verdampft weniger Werkstoff und kann daher nur kleine Schmelzbäder bilden. Dieser Effekt tritt bei den Werkstoffen A und B nicht auf; vermutlich da der Einfluss des Arbeitsdrucks auf die Dampfackel auch hier erkennbar, aber deutlich geringer ausgeprägt ist (Abbildung 8: 1, 3, 4, 6).

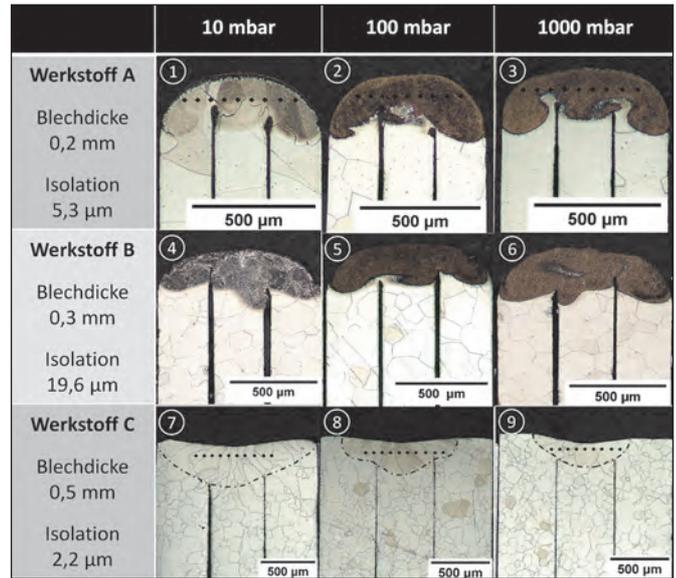


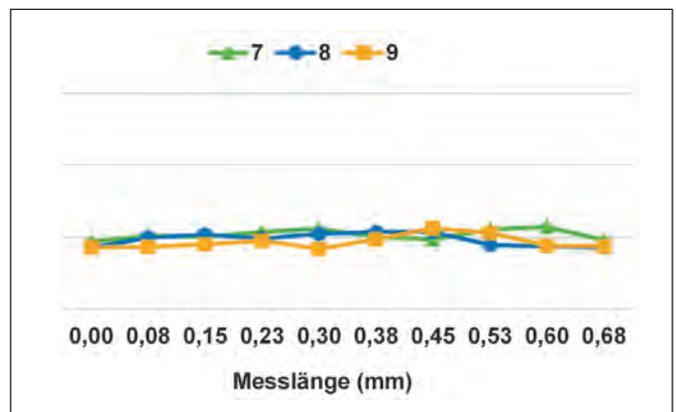
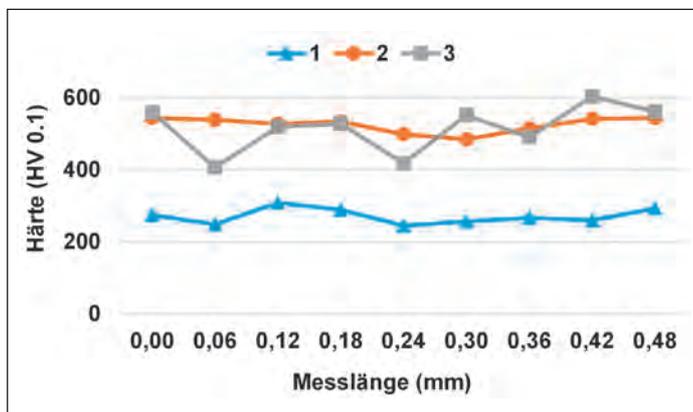
Abbildung 6: Querschliffe mit Position der Härtemessung an unterschiedlichen Elektroblechen

Beim Vergleich der untersuchten Werkstoffe bei $p = 10$ mbar (Abbildung 8: 1, 4, 7) fällt auf, dass sich bei den Werkstoffen A und B oberhalb der Schmelze ein hoch aufragender Kegel bildet, der die Strahlkaustik abbildet. Dieser Kegel entsteht vermutlich durch die direkte Interaktion des Laserstrahls mit der verdampfenden Isolationsbeschichtung. Diese Vermutung wird dadurch gestützt, dass dieser Effekt bei Werkstoff C ausbleibt, da hier deutlich weniger Isolationsbeschichtung vorhanden ist.

Exzellente Schweißungen höchster Qualität

Prozessbeobachtungen beim LaVa-Schweißen zeigen, dass unmittelbar nach Prozessstart eine Belegung der Bauteiloberseite entsteht. Untersuchungen von [25] zeigen, dass die oberflächlichen Belegungen für

Abbildung 7: Härtemessung der Werkstoffe A und C



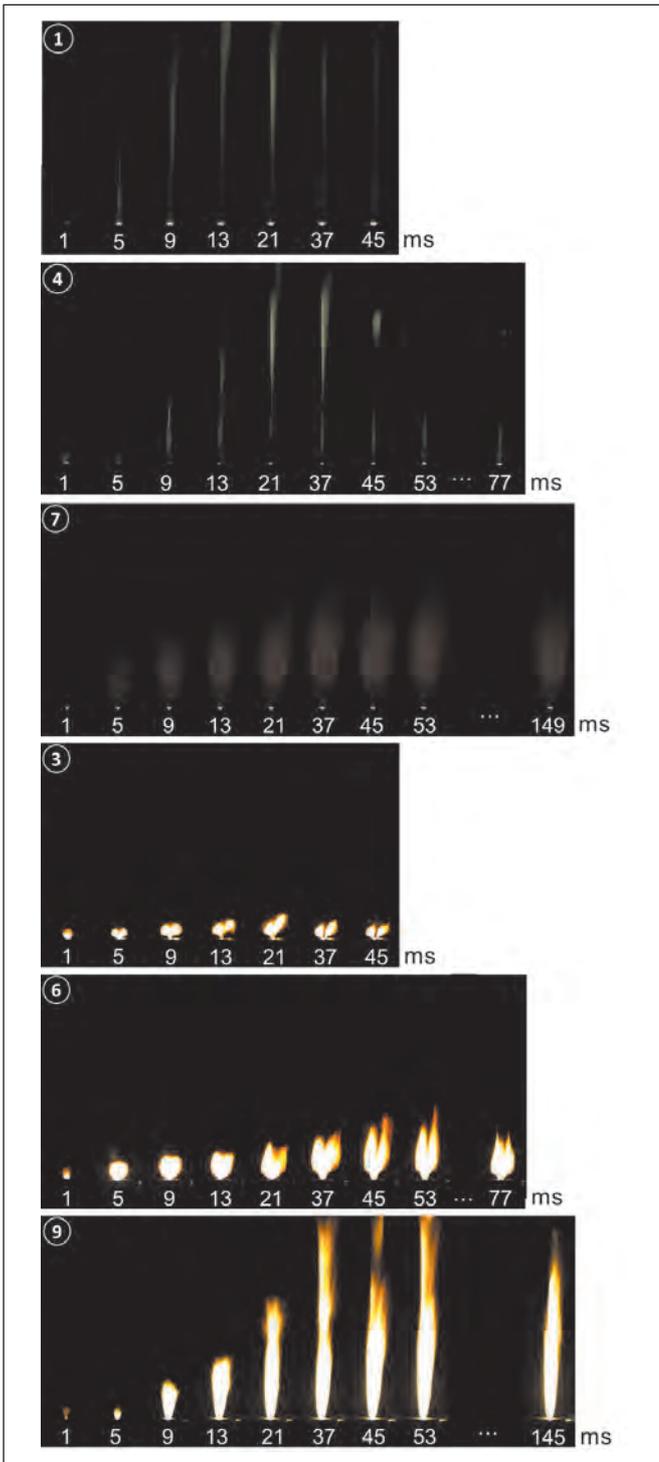


Abbildung 8:
Auszug aus Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Dampfackel

Baustähle typischerweise aus durch Kondensation und Erstarrung entstandenen, metallischen Agglomeraten bestehen. Da beispielsweise für nichtrostende Stähle neben derartigen Belegungen teilweise auch Anlauffarben auf der Probenoberfläche zu beobachten sind, liegt die Vermutung nahe, dass diese Ablagerungen sowie die Anlauffarben aus

einer Interaktion der Schweißprozesszone mit der Restatmosphäre innerhalb der Vakuumkammer entstehen.

Um dieser Vermutung nachzugehen, wurde der vorhandene Anteil an Restsauerstoff innerhalb der Vakuumkammer mit Hilfe eines Sauerstoffsensors gezielt aufgezeichnet. Erste Probeschweißungen zeigten dabei, dass die vorhandenen Anteile an Restsauerstoff während Schweißungen deutlich abgenommen haben. Dies unterstützt die Annahme, dass die verbliebene Atmosphäre innerhalb der Vakuumkammer mit der Prozesszone interagieren kann und so einen, potenziell negativen, Einfluss auf die resultierende Schweißnahtqualität, z.B. die Qualität der Bauteiloberfläche, nehmen kann.

Um diesen Einfluss der Umgebungsatmosphäre zu minimieren bzw. zu eliminieren, wurde gezielt der vorhandene Restsauerstoffanteil innerhalb der Vakuumkammer reduziert. Dazu wurde der Vakuumatmosphäre konstant ein inertes Schutzgasvolumenstrom, für diesen Fall Argon, zugeführt. Um trotz zugeführtem Schutzgasvolumenstrom einen konstanten Arbeitsdruck zu gewährleisten, arbeitet die Vakuumpumpe fortlaufend weiter. Diese Arbeitsweise ist durch die verwendete Anlagenregelung inklusive des vom ISF patentierten OptiShield-Systems möglich.

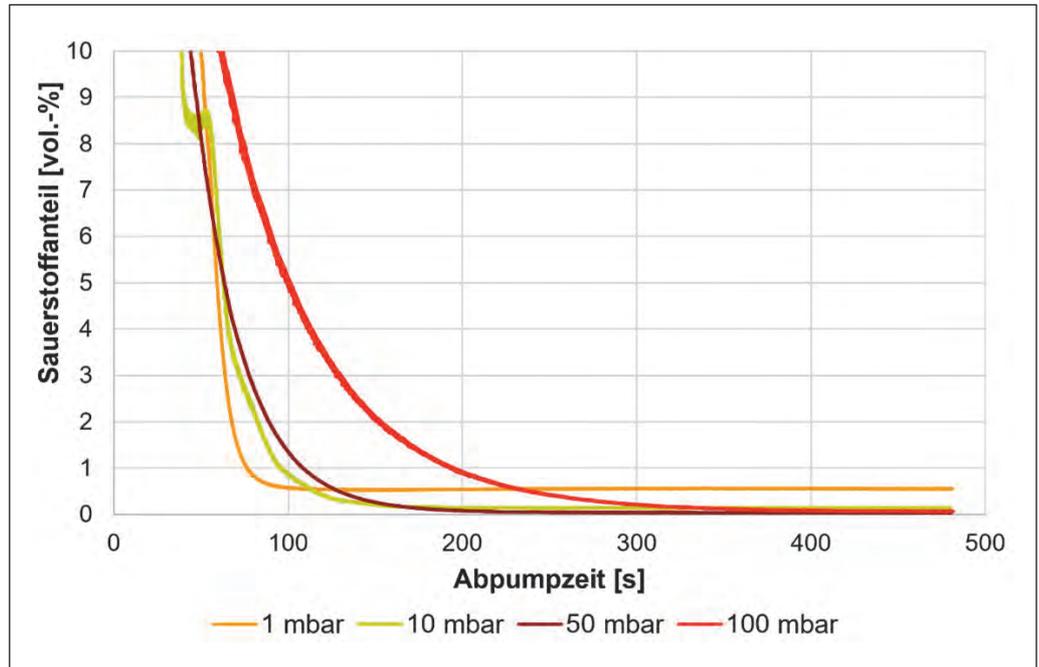
Abbildung 9 visualisiert beispielhafte Sauerstoffanteile innerhalb der Vakuumkammer für vier unterschiedliche Druckbereiche. Deutlich zu erkennen ist, dass der Sauerstoffanteil für alle Druckbereiche mit dem Schließen der Vakuumkammer (Zeitpunkt $t = 0$ s) umgehend abfällt. Die Geschwindigkeit, mit welcher der Anteil an Sauerstoff innerhalb der Vakuumkammer abfällt, ist vom gewählten Arbeitsdruck abhängig, wobei der Arbeitsdruck dem Kammerdruck entspricht. Für geringere Arbeitsdrücke fällt der Sauerstoffanteil schneller als für höhere Arbeitsdrücke. Deutlich zu erkennen ist allerdings auch, dass der verbleibende Sauerstoffanteil für alle unter-

suchten Arbeitsdrücke gegen einen individuellen Grenzwert konvergiert. Dieser Grenzwert wird umso geringer, je höher der Arbeitsdruck ist. Folglich können für den geringsten Arbeitsdruck (1 mbar) auch nach längeren Abpumpzeiten noch höhere Anteile an Sauerstoff innerhalb der Arbeitskammer gemessen werden als für die höheren Arbeitsdrücke (>10 mbar). In Zahlen ausgedrückt kann für einen Arbeitsdruck von 1 mbar

Nachdem festgestellt werden konnte, dass in Abhängigkeit von der Evakuierungszeit sowie der zugeführten Schutzgasmenge unterschiedliche Restsauerstoff-Anteile innerhalb der Arbeitskammer vorliegen, sind Einschweißungen am untersuchten Werkstoff (nichtrostender Stahl 1.4301) durchgeführt worden. **Abbildung 10** stellt die entstehende Schweißnahtqualität für den Arbeitsdruck 100 mbar sowohl in Form von Lichtbildern als auch in Form von Schlibbildern dar. Für die vier dargestellten Schweißungen bei 100 mbar wurden alle Parameter neben der Evakuierungszeit konstant gehalten. Deutlich wird sowohl im Bereich der Nahtoberfläche als auch bei Betrachtung des Schlibbildes, dass sich ein deutlicher Einfluss der Evakuierungszeit und somit des vorhandenen Restsauerstoff-Anteils innerhalb der Arbeitskammer auf die resultierende Schweißnaht ergibt. Die Lichtbilder zeigen, dass sich die Schweißnahtoberfläche von der kurzen Evakuierungszeit (60 Sekunden) hin zur längsten untersuchten Evakuierungszeit (480 Sekunden) von dunkel bzw. oxidiert hin zu nahezu metallisch blank verändert. Für eine Evakuierungszeit von 60 Sekunden sind deutlich dunkle Bereiche auf der Schweißnaht zu erkennen und leichte dunkle Belegungen neben der Schweißnaht. Für eine Evakuierungszeit von 480 Sekunden können keinerlei Anlauffarben oder Oxide auf der Schweißnahtoberfläche festgestellt werden. Lediglich ein schmaler Streifen mit dunkler Belegung kann neben der Schweißnaht ausgemacht werden. Dabei handelt es sich um eine staubartige Belegung, welche sich einfach mit Hilfe eines Tuches

entfernen lässt. Für die dazwischenliegenden Evakuierungszeiten 120 Sekunden und 240 Sekunden ist eine nahezu fortlaufende Entwicklung vom Nahtaussehen für 60 Sekunden hin zum Nahtaussehen für 480 Sekunden zu erkennen. Diese Beobachtungen stimmen dabei sehr gut mit den aufgezeichneten Messschrieben für den Restsauerstoff-Anteil innerhalb der Arbeitskammer überein. Nach 60 Sekunden kann hier noch kein definierter Zustand für den Anteil an Sauerstoff festgestellt werden, sondern der Restsauerstoff-Anteil ist noch hoch. Für 480 Sekunden Evakuierungszeit hat der Restsauerstoff-Anteil innerhalb der Kammer sein Minimum für diesen Arbeitsdruck erreicht. Daraus lässt sich schließen, dass der innerhalb der Kammer eingeschlossene Sauerstoff während des Schweißprozesses mit der Prozesszone interagiert und Einfluss auf die Nahtausformung nimmt.

Eine Betrachtung der Schliffbilder untermauert die These, dass der Restsauerstoff innerhalb der Kammer mit der Prozesszone interagiert. In den Schliffbildern ist deutlich erkennbar, dass die Einschweißtiefe für die längeren Evakuierungszeiten deutlich absinkt. Die Schweißnahtbreite nimmt dagegen deutlich zu. Die Änderung der Einschweißtiefe und der Nahtbreite führen dazu, dass für die Evakuierungszeit von 480 Sekunden nahezu ein "Nagelkopf" im Schliffbild der hergestellten Schweißnaht erkennbar ist, wie diese auch häufig beim Elektronenstrahlschweißen beobachtet werden können. Als Ursache dafür wird angenommen, dass sich ähnlich, wie [26] für das Elektronenstrahlschweißen, [27] für das Laserstrahlschweißen und [28] für das WIG-Schweißen mit Aktivierungsschicht beschreiben, durch den Sauerstoff die Strömungsrichtung innerhalb des Schmelzbades ändert. Die Schmelzbadströmungen können durch den Marangoni-Effekt erklärt werden. Der Sauerstoff hat dabei zur Folge, dass sich die Strömungsrichtung umdreht. Für höhere Sauerstoffanteile ist die Strömungsrichtung in Richtung der Prozesszone ausgerichtet. Dies hat



zur Folge, dass die Einschweißtiefe durch diese Strömungsbildung erhöht werden kann. Für die geringeren Sauerstoff-Anteile bilden sich die Schmelzbadströmungen dagegen entgegengesetzt aus. Folglich sind die Schmelzbadströmungen nach außen von der Prozesszone weg gerichtet, was eine Verbreiterung der Schweißnaht zur Folge hat. Die dargestellten Beobachtungen für einen Arbeitsdruck von 100 mbar konnten in analoger Form auch für die geringeren Druckbereiche festgestellt werden. Die Erkenntnis, dass der vorhandene Restsauerstoff einen Einfluss auf die Schweißnahtausformung sowie die resultierende Bauteiloberfläche hat, führt zu der Schlussfolgerung, dass sich beides durch eine gezielte

Prozessführung optimieren lassen. Bild 11 zeigt dazu die Möglichkeiten bei einer Übertragung auf das Refraktärmetall Titan bzw. eine entsprechende industriell verbreitete Titanlegierung (Ti-10V-2Fe-3Al). Für alle dargestellten Schweißungen wurde der Anteil an Restsauerstoff auf das mit der verwendeten Anlage mögliche minimale Maß reduziert. Deutlich erkennbar ist, dass so für alle Druckbereiche trotz der hohen Sauerstoffaffinität von Titan eine von Anlaufarben freie Nahtoberfläche erreicht werden kann. Die Schliffbilder zeigen weiterhin eine defektfreie Schweißnaht für alle Arbeitsdrücke. Insbesondere für einen Druckbereich von 100 mbar und einen minimalen Sauerstoffanteil innerhalb

Abbildung 9: Sauerstoffanteil in der Arbeitskammer in Abhängigkeit von der Abpumpzeit

Abpumpzeit	Arbeitsdruck: 100 mbar; Schutzgasvolumenstrom: 10 l _n · min ⁻¹	
	Schweißnahtoberfläche	Querschliff
60 s		
120 s		
240 s		
480 s		

Abbildung 10: Resultierendes Schweißnahtaussehen für unterschiedliche Anteile an Sauerstoff in der Arbeitskammer (1.4301)

	Schutzgasvolumenstrom [l _n /min]	Sauerstoffgehalt [vol.-%]	Nahtoberfläche (ungereinigt)	Querschliff
100 mbar	10	0,022		
50 mbar	10	0,025		
1 mbar	0,6	0,624		

Abbildung 11: Resultierendes Schweißnahtaussehen für minimalen Sauerstoff in der Arbeitskammer (Ti-10V-2Fe-3Al)

der Arbeitskammer ergibt sich eine nacharbeitsfreie Schweißnahtoberfläche.

Die Ergebnisse verdeutlichen den Einfluss, den die verbleibende Restatmosphäre auf die resultierende Schweißnahtqualität hat, so dass insbesondere der vorhandene Restsauerstoff innerhalb der Arbeitskammer für eine reproduzierbare Nahtqualität überwacht werden sollte. Wenn die Freigabe für eine Schweißung erst nach Unterschreiten eines Maximalwertes an Restsauerstoff erfolgt, kann von konstanteren Prozessrandbedingungen ausgegangen werden, welche zu einem reproduzierbaren Prozessergebnis beitragen können.

Förderhinweis

Die vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen der Projekte RE 2755/64-1 „Elektromagnetische Bewertung und Quantifizierung von Schweißprozessen zur Paketierung von Elektroblechen“ und RE 2755/72-1 „Einfluss des Metaldampfs auf die Strahleigenschaften und die Kapillare beim Laserstrahlschweißen durch Untersuchungen bei Umgebungsdruck und Vakuum“ an der RWTH Aachen durchgeführt und durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V. (DFG) gefördert. Für die Förderung und Unterstützung sei an dieser Stelle gedankt.

Literaturangaben

- [1] Katayama, Seiji et al. (2011): Development of Deep Penetration Welding Technology with High Brightness Laser under Vacuum. In: *Physics Procedia* 12, pp. 75–80. DOI: 10.1016/J.PHPRO.2011.03.010.
- [2] Reisgen, Uwe et al. (2010): Laser Beam Welding in Vacuum – A Process Variation in Comparison with Electron Beam Welding. In: *Proceedings of 29th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics ICALEO* (1807), 638-637.
- [3] Reisgen, Uwe et al. (2011): Hochleistungs-Laserstrahlschweißen von Dickblechen im Feinvakuum – Eine Alternative zum EB-Schweißen. In: *Schweißen und Schneiden* 63 (9), pp. 522–527.
- [4] Honig, R. E. et al. (1969): Vapor data pressure for the solid and the liquid elements. In: *RCA Review* (30), pp. 285–305.
- [5] Zhang, Y., J. R. G. Evans und S. Yang (2011): Corrected Values for Boiling Points and Enthalpies of Vaporization of Elements in Handbooks. In: *Journal of Chemical & Engineering Data*, 56, pp. 328–337. DOI: 10.1021/jc1011086.
- [6] Reisgen, U. und L. Stein (2016): Grundlagen der Fügetechnik – Schweißen, Löten und Kleben. Düsseldorf: DVS Media (Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 161). ISBN: 978-3-945023-49-5.
- [7] Matsunawa, Akira et al. (1986): Laser Production of Metallic Ultra-Fine Particles. In: *Transactions of the Japan Welding Research Institute* 15 (2), pp. 61–72.
- [8] Fabbro, Rémy et al. (2006): Experimental study of the dynamical coupling between the induced vapour plume and the melt pool for Nd-Yag CW laser welding. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* (39), pp. 394–400. DOI: 10.1088/0022-3727/39/2/023.
- [9] Michalowski, A et al.: Plume attenuation under high power Yb:YAG laser material processing, pp. 357–362.
- [10] Oiwa, S. et al.: Optical properties of laser-induced plume during high power laser welding, p. 359. DOI: 10.2351/1.5061579.
- [11] Shcheglov, Pavel (2012): Study of vapour-plasma plume during high power fiber laser beam influence on metals. Zugl.: Moskau, National Research Nuclear Univ., Diss., 2012. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) (BAM-Dissertationsreihe, 88). ISBN: 978-3-9815134-3-1.
- [12] Greses, J. et al. (2004): Plume attenuation under high power Nd:yttrium-aluminum-garnet laser welding. In: *Journal of Laser Applications* 16 (1), pp. 9–15. DOI: 10.2351/1.1642636.
- [13] Twiehaus, Thorsten et al. (2022): Influence of residual oxygen during laser beam welding under vacuum. In: *Materials Testing* 64 (7), pp. 945–953. DOI: 10.1515/mt-2021-2183.
- [14] Scholz, T., K. Dickmann und A. Ostendorf (2014): Impact of Process Parameters on the Laser-induced Nanoparticle Formation During Keyhole Welding under Remote Conditions. In: *Physics Procedia* 56, pp. 477–486. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.151.
- [15] Gong, J. e. a. (2021): Effect of plasma plume produced by vacuum laser welding on energy transmission. In: *Optics & laser technology*. DOI: 10.1016/j.
- [16] Gerhards, B., S. Koberg und C. Otten (2021): Innovative Fügetechnik für Wasserstofftechnologien – Fügen von Bipolarplatten für Brennstoffzellen. In: *DVS Congress 2021, DVS-Berichte Band 371, ISBN: 978-3-96144-147-1*.
- [17] Krichel, T., S. Olschok und U. Reisgen (2022): Comparison of penetration depth in bead-on-plate welds of thick-walled steel sheets with Laser Beam Welding in Vacuum and Electron Beam Welding. In: *Vacuum, Vol. 203, Article 111314*. DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.111314.
- [18] Krichel, T., Olschok, S., Reisgen, U. (2022): Influence of working pressure on laser beam welding in vacuum of electrical steel sheets. In: *Vacuum*, p. 111659. DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.111659.
- [19] Schneider, M., N. Urban und J. Franke (2017): Relation of joining parameters of stator core production and iron loss. DOI: 10.1109/EDPC.2017.8328148.
- [20] Kampker, A. (2014): Elektromobilproduktion. Springer-Verlag. DOI: 10.1007/978-3-642-42022-1.
- [21] Delagnes, D. e. a. (2005): Influence of silicon content on the precipitation of secondary carbides and fatigue properties of a 5%Cr tempered martensitic steel. In: *Materials Science and Engineering: A* 394 (1-2), pp. 435–444. DOI: 10.1016/j.msea.2004.11.050.
- [22] Traint, S. e. a. (2002): Influence of silicon, aluminium, phosphorus and copper on the phase transformations of low alloyed TRIP-steels. In: *Steel Research* 73 (6-7), pp. 259–266. DOI: 10.1002/srin.200202006.
- [23] Reisgen, U., S. Olschok und S. Jakobs (2013): Laser beam welding in vacuum of thick plate structural steel. In: *ICALEO 2013*, pp. 341–350. DOI: 10.2351/1.5062897.
- [24] Teichmann, F., S. Müller und K. Dilger (2017): The influence of ambient pressure during laser beam welding of aluminium high pressure die castings on the occurrence of weld bead porosity. In: *LiM – Lasers in Manufacturing Conference, München, 26.-29. Juni 2017*.
- [25] Jakobs, S. (2015): Laserstrahlschweißen im Vakuum: Erweiterung der Prozessgrenzen für dickwandige Bleche [Dissertation]. RWTH Aachen. Aachen: Shaker Verlag. ISBN: 978-3-8440-4032-6.
- [26] ZHANG, Ruihua et al. (2006): Electron Beam Welding with Activating Flux. In: *Transactions of JWRI* 35.
- [27] Mei, Lifang et al. (2017): Effect of activating flux on laser penetration welding performance of galvanized steel. In: *Int J Adv Manuf Technol* 91 (1-4), pp. 1069–1078. DOI: 10.1007/s00170-016-9815-6.
- [28] Chandrasekar, G. et al. (2020): Effect of Activating Flux (Metal Oxide) on the Weld Bead Nomenclature of Tungsten Inert Gas Welding Process – A Review. In: *IDP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 988 (1), p. 12084. DOI: 10.1088/1757-899X/988/1/012084.

Vacuum is not a burden - it is a feature

Electron Beam VS Laser In Vacuum

Highlighting the characteristics and benefits of Micro Electron Beam and Laser in Vacuum welding.

Laser and micro Electron Beam systems can both produce sub 50 μm spots with high power densities, but selection of an ideal welding technique is determined by the material(s) of the work piece. For insulating and magnetic materials, welding with electron beam can often be challenging due to surface charging and/or beam distortion. The FOCUS LaVa system brings the power of laser welding into a vacuum environment, enabling ultra clean deep penetration welding at much lower temperatures than at atmosphere. Since the boiling point of materials is pressure dependant, temperatures up to 1000°C lower than under atmospheric conditions are achieved when operating the laser under vacuum conditions.



FOCUS LaVa L95

Laser welding efficiency is limited when the workpiece reflects initially a large percentage of the laser light. The reflectivity of the material can be a problem when working with precious metals or joining dissimilar materials, where a well-adjusted temperature gradient across the material interface is required to minimize formation of intermetallic phases.

For these materials, the FOCUS Micro Electron Beam is the preferred solution, where energy absorption is independent of the workpiece material and that the operator is able to precisely vary the power from 50 W to 2 kW. A similarly broad power range with a laser platform would require multiple laser sources and would still not be able to match the single Watt, fine power control of an Electron Beam.



FOCUS MEBW-60 L135

The spot size can be continuously varied from 25 μm to greater than 1 mm with large 100 kHz deflection frequencies, when compared to 1 kHz for regular laser source mirrors.

With our experience in both forms of in-vacuum welding FOCUS has an integrated dual-source platform for a research institute to study a wide range of joining and machining technologies.

Our unrivalled experience at FOCUS in electron beam and Laser in Vacuum welding allows us to advise and support our customers when considering the best welding tool configuration for their needs, optimising performance, cycle times and cost.



Qualitätsüberwachung beim Schweißen durch den Einsatz von Künstlicher Intelligenz

Matthias Angerhausen, Guido Buchholz, Marion Purrio

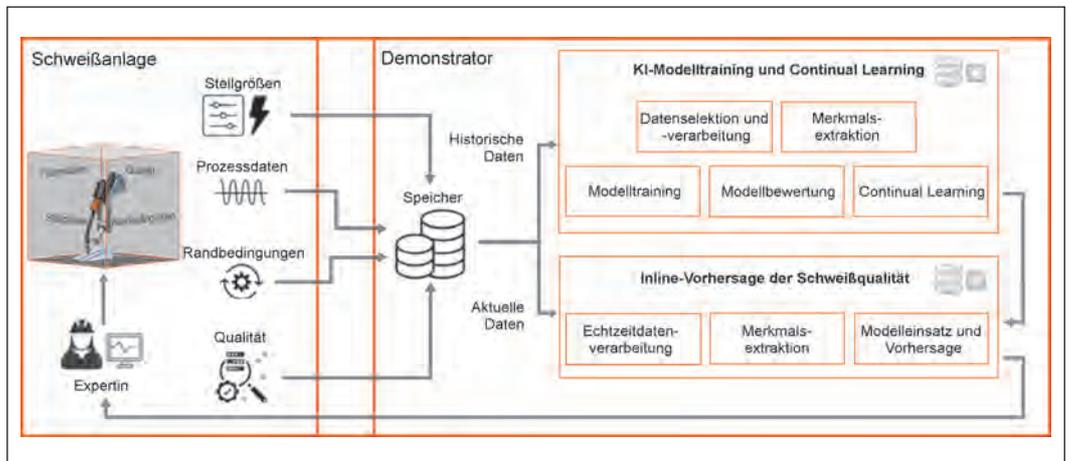


Abbildung 1: Prinzipskizze einer KI-basierten Qualitätsvorhersage, von der Datenaggregation über das Modelltraining bis zum Einsatz von Continual Learning Verfahren

Die Anforderungen an die Sicherstellung und nachhaltige Dokumentation des Fertigungsschrittes „Schweißen“ innerhalb einer Produktionskette gewinnt zunehmend an Bedeutung. IT-basierte, fertigungsunterstützende Konzepte, wie das des Digitalen Zwillinges und der vernetzten Produktion, bedingen, dass auch beim Schweißen qualitätsrelevante Daten aufgezeichnet, kontextualisiert und ausgewertet werden. Die FEF arbeitet in Kooperation mit der Universität Wuppertal an einer Lösung, die aus dem Schweißprozess gewonnenen Informationen mit Methoden der künstlichen Intelligenz bestmöglich für das Qualitätswesen nutzbar zu machen.

Neue Verfahren zur Qualitätsprädiktion komplexer Prozesse

1. Einleitung

Die Gruppe der Fügetechnologien stellt eine Schlüsselposition im Kontext eines modernen Fertigungsumfelds dar. Die Überwachung des Produktionsschrittes „Schweißen“ ist für eine lückenlose Dokumentation und für die Realisierung einer Produktion im Sinne von Industrie 4.0 unabdingbar.

Die Aufgaben reichen dabei von Prozessstabilitätsüberwachung über Inline-Parameteradaption bis zur Qualitätsprädiktion. Einige dieser Anforderungen können mittels analy-

tischer Modellierung bzw. modellprädiktiver Regelung gelöst werden – heutige Entwicklungen im Bereich der KI können für derartige Fragestellungen allerdings deutlich effizienter und effektiver genutzt werden, zumal durch den Einsatz moderner KI-Methoden eine holistische Betrachtung aller relevanten Prozess-, Anlagen- und Qualitätsdaten möglich wird.

Im Rahmen der BMBF-Förderschiene „Erforschung, Entwicklung und Nutzung von Methoden der Künstlichen Intelligenz in KMU“ hat die FEF daher, zusammen mit dem Institute for Technologies and Management of Digital Transformation (TMDT) der Universität Wuppertal, das Forschungsprojekt „AI System for Inline Monitoring of

Welding processes“, kurz ASIMoW erfolgreich auf den Weg gebracht.

Ziel des Projektes ist es, ein Demonstratorsystem zur Erkennung, Klassifizierung und Bewertung des aktuellen Schweißprozesszustandes zu entwickeln, auf Basis dessen eine belastbare, quantitative Prädiktion der zu erwartenden Schweißnahtqualität ableitbar ist. Dies ist ein fundamentaler und prinzipieller Unterschied zu den derzeit am Markt verfügbaren Schweißprozessüberwachungssystemen.

2. Datenerhebung und Vorverarbeitung

Auf den Schweißprozess wirken sehr viele unterschiedliche Faktoren, wel-

KONTAKT

Dr.-Ing. Marion Purrio
Tel.: +49 (0)241 990085-00
purrio@fef-aachen.de
www.fef-aachen.de

che teils in der Verantwortung des Schweißers liegen (Stellgrößen), sich teils jedoch außerhalb seines Einflussbereichs befinden (Randbedingungen). Zudem gibt es Faktoren, die zwar initial kontrolliert werden können, sich aber innerhalb des laufenden Prozesses ändern. Ein Beispiel für eine solche, sich ändernde Randbedingung ist z.B. die Breite des Spaltes in der Fügezone zweier Fügepartner. Die Breite des Spaltes beeinflusst nachhaltig das Schmelzbadgeschehen und damit die Schweißnahtausformung. Die Positionierung der zu fügenden Werkstücke und damit das sich einstellende Spaltmaß lässt sich durch Spannvorrichtungen zwar einstellen, der thermische Einfluss während des Schweißprozesses kann aber für Verzug in den Werkstücken sorgen, was zu Änderungen dieser Positionierung führt.

Das Konzept von ASIMoW sieht vor, mittels innovativer Methoden der künstlichen Intelligenz und des maschinellen Lernens in Kombination mit schweißtechnischem Expertenwissen mathematische Formulierungen zu nutzen, die es erlauben, Qualitätsgrößen auf Basis von Prozessdaten und Stellgrößen zu modellieren und somit automatisiert Aussagen bezüglich der gerade gefertigten Schweißnahtqualität zu treffen, s. **Abbildung 1**.

Für die Erstellung dieser Qualitätsmodelle muss eine umfassende Prozess- und Qualitätsdatenbank als Ausgangsbasis vorliegen. Um diese Daten nicht nur im Laborumfeld, sondern auch industrietauglich erfassen zu können, werden verschiedene Messwerterfassungsstrategien evaluiert, um die notwendige Datendichte, -tiefe und -qualität zu ermitteln.

Zielanwendung der Modellbildung ist zunächst das gepulste Metall-Schutzgasschweißverfahren. Als Referenzapplikationen wurden Schweißversuchskampagnen an Überlappstößen und T-Stößen aus Stahlblechen der Güte DC01 und mit Blechdicken zwischen 2 und 4 mm durchgeführt. Diese Stoß- und Materialkombina-

tionen stehen für häufig anzutreffende Anwendungen im Dünnschichtbereich. Typische und wiederkehrende Abweichungen im Prozessverhalten sind hierbei beispielsweise Kurzschlüsse, Variationen des transienten Leistungsverlaufs in der Grundphase, fehlende Tropfenablösung, etc.

Neben diesen Abweichungen, welche z.T. in Variationen der Prozessrandbedingungen begründet sind, ist insbesondere die interne Prozessregelung (Lichtbogenlängenregelung) der Schweißstromquelle für die Bestimmung und Bewertung des Prozesszustandes von Relevanz. Diese Regeleingriffe werden zwar seitens der Prozessführung zur Stabilisierung des Lichtbogengeschehens und somit der Gesamtprozessstabilisierung vorgenommen, allerdings sind die durch die Regeleingriffe eingebrachten Variationen für einen externen Beobachter zunächst nicht unmittelbar kausal nachvollziehbar. Daher müssen Strategien zum Umgang und zur Bewertung dieser Prozessregel-eingriffe entwickelt werden.

Ein zentraler, zu untersuchender Faktor ist nun, inwieweit das Auftreten von Anomalien und Prozesszustandsvariationen einen Qualitätsmangel implizieren. Dazu werden die transienten Datensignale in Pulszyklen separiert und diese Pulszyklen wiederum in die Funktionalphasen „Grundstromphase“, „Pulsphase“ und „Materialtransfer“ separiert, s. **Abbildung 2**. Der Vergleich der Signalverläufe einer jeden Phase mit einem erwarteten Signalverlauf ist schließlich mittels statistischer Güte- und Erwartungswerte möglich, wobei die Abweichungen hinsichtlich ihrer Ausprägung entsprechend klassifiziert werden.

Eine Herausforderung für die weiteren F&E-Arbeiten wird sein, Anomaliedetektion und Prozesszustandsevaluierung von der momentanen und applikationsspezifischen Versuchsdurchführung auf prozess- und anwendungsübergreifende Szenarien zu abstrahieren.

3. Neuronale Netze zur Qualitätsprädiktion

Zur Gewährleistung der späteren Nutzbarkeit im industriellen Umfeld und zur Vermeidung von Inselfösungen wird die Datengenerierung nach doppelgleisiger Strategie vorgenommen: Zur Modellierung der Qualität innerhalb einer Applikation werden graduelle Variationen im Prozessraum vorgenommen und die Resultate des Prozesses automatisiert dokumentiert. Darüber hinaus werden Deep Learning Verfahren für die multimodale Vorhersage von Fehlergrößen auf Basis der vorliegenden Sensordaten, Stellgrößen und quantifizierten Prozessparametern qualifiziert (siehe auch [Ain], [Scho]). Als Kandidat für eine mögliche Lösungsarchitektur wird eine Kombination aus Convolutional Layer zur Mustererkennung [Zhao, Zhe] aus den Signalverläufen und regulären Fully-Connected Layer zur Berücksichtigung der Prozessparameter untersucht.

Zur Realisierung und Evaluierung des Ansatzes des kontinuierlichen Lernens werden die zuvor betrachteten Prozessräume anschließend prinzipiellen Änderungen unterworfen, wie etwa einer anderen Schweißquelle, anderer Kennlinien oder Veränderung geometrischer Werkstückeigenschaften, welche vorher im Prozessraum noch nicht abgebildet wurden.

Diese Änderungen bilden die Transformation eines Qualitätsmodells auf eine neue schweißtechnische Anwendung ab, welche zwar grundsätzlich den gleichen Wechselwirkungen unterliegt, deren veränderte Randbedingungen allerdings ein anderes Schweißprozess- und Qualitätsverhalten bedingen. Um die nachhaltige Anwendung in dynamischen Schweißprozessen sicherzustellen, werden im weiteren Verlauf der F&E-Arbeiten State-of-the-Art Verfahren des Continual Learning [Par1, Par2, Rus] für die Anwendung auf Sensordaten adaptiert und qualifiziert. Die Motivation ist hierbei, die bereits trainierten und eingesetzten Modelle bei sich ändernden Bedingungen des Prozesses adaptiv anzupassen und kontinuier-

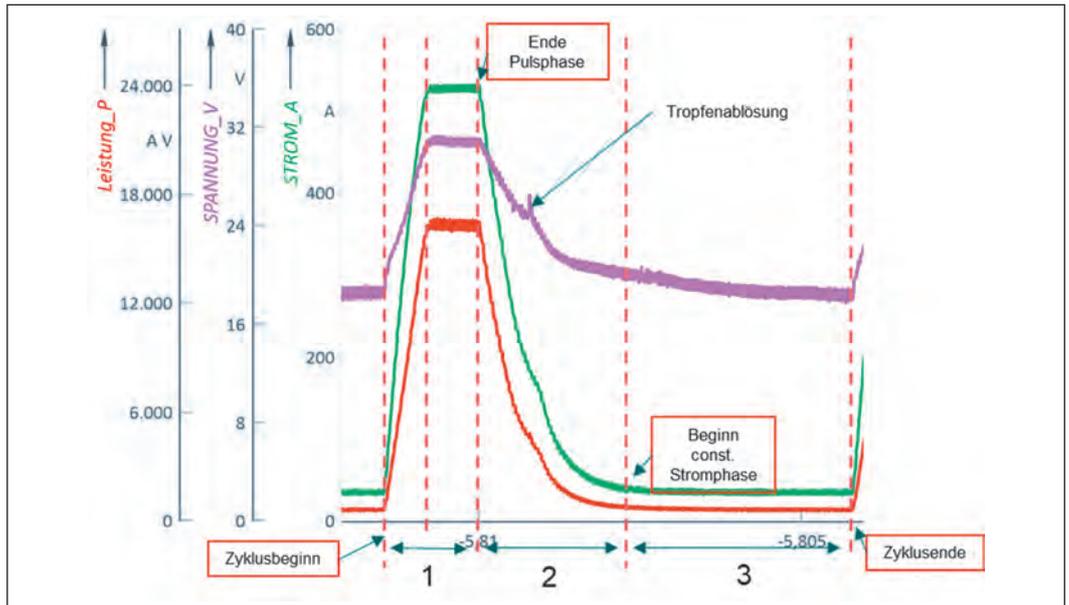


Abbildung 2: Zyklus- und Funktionalphasenseparation

lich mittels weniger „neuer“ Prozessdaten weiter zu trainieren und zu generalisieren.

Im Vorhaben werden vor allem drei Arten von Prozessänderungen in Betracht gezogen, die häufig in Füge- und Fertigungsverfahren auftreten:

- Das Aufkommen neuer Qualitäts- und Fehlergrößen,
- die Veränderung grundlegender Prozessparameter und
- das Fügen bisher unbekannter Werkstücke im Sinne einer neuen schweißtechnischen Applikation.

Jede dieser Änderungen erfordert unterschiedliche Lösungsansätze zum kontinuierlichen Lernen, beispielsweise die dynamische Erweiterung des neuronalen Netzes um neue Schichten und Parameter oder die Hinzunahme von Meta-Informationen (z.B. Informationen zum Werkstück) in den Lernprozess. In weiterführenden Trainings- und Evaluierungsphasen werden die Lösungsansätze mit Hinblick auf relevante Indikatoren (u.a. Genauigkeit, Dateneffizienz, Skalierbarkeit, Vergesslichkeit der Modelle) bewertet und somit zentrale Erkenntnisse für den Einsatz von Continual Learning in realweltlichen Lernproblemen in der Fertigung verstetigt.

4. Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse und weiteres Vorgehen

Die den Schweißprozess beeinflussenden Faktoren sind sehr vielfältig und nicht in Gänze erfassbar. Gleichzeitig werden die Anforderungen an eine Datenerfassung und datenbasierte Qualitätsüberwachung beim Schweißen höher, um die Zuverlässigkeit und Effizienz der Fertigung steigern zu können. Die FEF GmbH aus Aachen und der Lehrstuhl TMDT der Universität Wuppertal adressieren diese Anforderungen im Projekt „ASIMoW“. Ziel ist es, mittels Kombination von künstlicher Intelligenz und Prozessexpertise auf Basis transientser Prozessdaten zuverlässige Aussagen über die gefertigte Qualität treffen zu können, ohne die Schweißungen zerstörenden Prüfungen unterziehen zu müssen. Das Projekt ist zum Zeitpunkt der Veröffentlichung noch nicht abgeschlossen. Eine Detektion und Klassifikation von Anomalien in transienten Schweißprozessdaten ist jedoch bereits erfolgreich umgesetzt und zur Prozessbewertung herangezogen worden. Die nächsten Schritte werden die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere Anwendungen sowie die weiterführende Evaluierung und Optimierung neuronaler Netze zur Qualitätsprädiktion sein. Final erfolgt die Evaluierung und Erprobung eines

Demonstratorsystems zur Qualitätsprädiktion für den industriellen Einsatz.

Literaturangaben

[Ain] A. Ainapure, X. Li, J. Singh, Q. Yang, Lee, J.: Deep learning-based cross-machine health identification method for vacuum pumps with domain adaptation. *Procedia Manufacturing*, 48, 2020, pp. 1088-1093

[Scho] S. Schorr, M. Möller, J. Heib, D. Bähre: Quality prediction of drilled and reamed bores based on torque measurements and the machine learning method of random forest. *Procedia Manufacturing*, 48, 2020, pp. 894-901

[Zhao] B. Zhao, H. Lu, S. Chen, J. Liu and D. Wu: Convolutional neural networks for time series classification. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, Vol. 28, 2017, pp. 162-169

[Zhe] Y. Zheng, Q. Liu, E. Chen: Exploiting Multi-Channels Deep Convolutional Neural Networks for Multivariate Time Series Classification. *Frontiers of Computer Science*, 10, 2016, pp. 96-112

[Par1] G. I. Parisi, R. Kemker, J.L. Part, C. Kanan, S. Wermter: Continual Lifelong Learning with Neural Networks: A Review. *Neural Networks* 113, 2019, pp. 54-71

[Par2] G. I. Parisi, J. Tani, C. Weber, S. Wermter: Lifelong learning of human actions with deep neural network self-organization. *Neural Networks*, 96, 2017, pp. 137-149.

[Rus] A. A. Rusu, N. C. Rabinowitz, G. Desjardins, H. Soyer, J. Kirkpatrick, K. Kavukcuoglu, R. Pascanu, R. Hadsell. Progressive neural networks. *arXiv preprint arXiv:1606.04671*, 2016

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
www.isf.rwth-aachen.de

Bildnachweis:

Quelle durch ISF Aachen

Anzeigenverwaltung/Gesamtherstellung:

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

Vertriebs- und Marketingleitung:

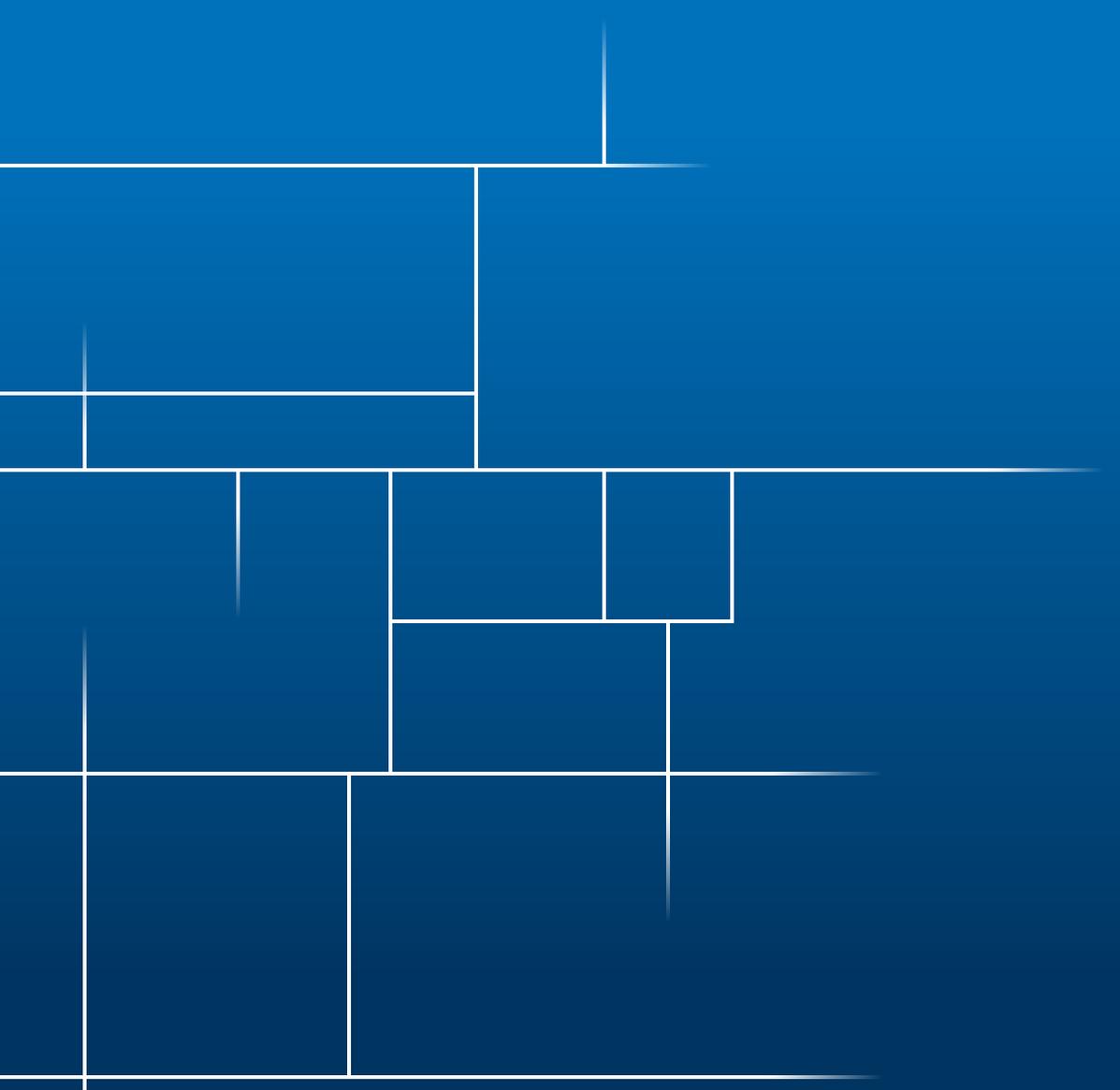
Arjeta Krasnici

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. 76-053



ISF

**RWTHAACHEN
UNIVERSITY**