



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für Füge- und
Schweißtechnik

ifs



report

11. Jahrgang | Ausgabe 2019

INHALT

Schweiß- und Strahltechnik

Lichtbogenbasierte additive Fertigung von Metallbauteilen 4

Kleben und mechanisches Fügen

Kleben generativ gefertigter Bauteile..... 9

Neue Analysemethoden für elastische Klebstoffverbindungen mittels in-situ

Computertomografie..... 12

Leichtmetall-Druckguss

Simulationsgestützte Randschichtwärmebehandlung von Formwerkzeugen mittels Elektronenstrahl am Beispiel des Warmarbeitsstahls X37CrMoV5-1 16

Battery LabFactory Braunschweig (BLB)

Neue Projekte im Bereich Feststoffbatterie (3D-SSB und ProLiMa)20

Dalion 22

Open Hybrid LabFactory (OHLF)

OHLF – Die neuen Projekte der zweiten Förderphase 24

Juniorprofessur S. Hartwig „Charakterisierung und Modifikation von Grenzschichten“ 26

Festigkeit und Bauteilverhalten

Zum Rissauswandern im Kerbschlagbiegeversuch bei der Prüfung

strahlgeschweißter Proben 28

Neuzugänge 31

Auszeichnungen

8 neue Dokortitel 32

Ehre wem Ehre gebührt 34

EDITORIAL



Liebe Ehemalige und Freunde des ifs,

neben den schon lange bearbeiteten Schwerpunkten wie der Beanspruchbarkeit gefügter Bauteile und dem Leichtbau beschäftigen wir uns in letzter Zeit auch verstärkt mit Themen zur Elektromobilität und der generativen Fertigung. In den Forschungszentren "Battery Labfactory Braunschweig, BLB" und „Open Hybrid LabFactory, OHLF“ sowie dem „Leichtmetallzentrum Soltau“ werden die Technologien von uns zusammen mit Kollegen von anderen Instituten und der Industrie weiter erforscht und zur Anwendung gebracht. Dies ist eine wirkliche Besonderheit unserer Arbeit, die Mitarbeiter*Innen und Studierenden die Möglichkeit gibt, die Brücke von der Wissenschaft in die Praxis zu schlagen und hier wertvolle Erfahrungen und Kontakte zu gewinnen. Wir freuen uns auf Ihre Rückfragen und Kommentare zu unseren Vorhaben und würden uns zusätzlich freuen, wenn wir Ihnen unsere Einrichtungen auch persönlich zeigen, bzw. wenn wir Sie für die Mitarbeit in einem Projekt gewinnen können.

Bleiben Sie uns gewogen!

Klaus Dilyer

PS: diese sowie alle anderen vorangegangenen Ausgaben stehen zum Download bereit unter <https://www.tu-braunschweig.de/ifs/dokumente/ifs-report>



Mit dem Lichtbogen aus dem Nichts – Additive Fertigung von Metallbauteilen

Die steigende Nachfrage nach Flexibilität und Funktionsintegration in Verbindung mit kurzen Produktentwicklungszyklen führt zu einer kontinuierlichen Entwicklung neuer Fertigungstechnologien. Aufgrund der Möglichkeit zur endkonturnahen additiven Fertigung vergleichsweise großer Bauteile mit kosteneffektiven Betriebsmitteln, gewinnt die lichtbogenbasierte additive Fertigung zunehmend an Bedeutung in Industrie und Forschung.

Eine hohe Werkstoffausnutzung, Designfreiheit und kurze Entwicklungszyklen haben in den vergangenen Jahren zu einem zunehmenden industriellen Einsatz schichtadditiver bzw. generativer Fertigungsverfahren geführt. Gleichzeitig konnte sich in Abhängigkeit der verwendeten Werkstoffe, der Art der Werkstoffzuführung und Energieeinbringung sowie der resultierenden Bauteilanforderungen eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren für die additive Fertigung etablieren. Für die flexible Fertigung großformatiger Bauteile stellt die drahtbasierte additive Fertigung mittels Lichtbogenschweißen (Engl.: Wire and arc additive manufacturing - WAAM) aufgrund hoher Auftragraten bei gleichzeitig hoher Materialausnutzung eine vielversprechende Alternative zu konventionellen abtragenden Fertigungsverfahren dar.

Stand der Technik

Additive Fertigungsverfahren sind den Rapid Manufacturing Technologien zugeordnet und dadurch gekennzeichnet, dass Bauteile durch ein Auf- bzw. Aneinanderfügen von Volumenelementen hergestellt werden. Dabei werden die Bauteile entgegen konventionellen abtragenden Fertigungsverfahren (Fräsen, Schleifen) nicht

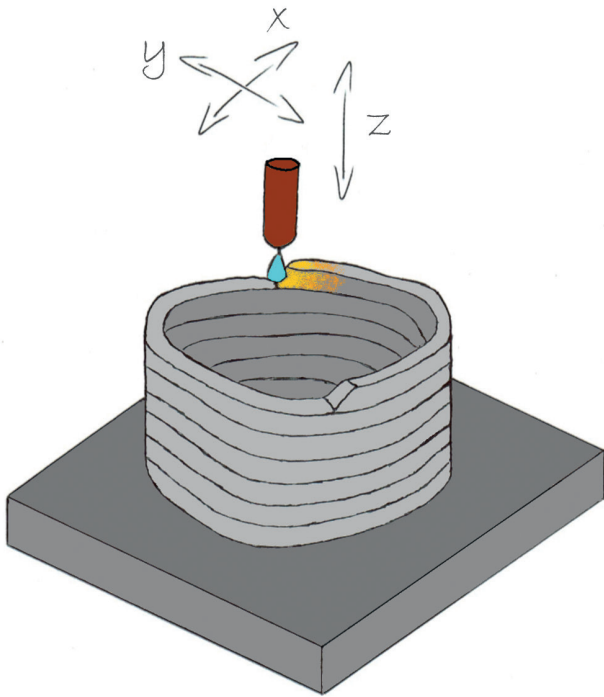


Abbildung 1: Geometrie bei der lichtbogenbasierten additiven Fertigung
(Bild: Niklas Wagner)

durch Entfernen, sondern durch einen schichtweisen Aufbau von Material gefertigt.

In Abhängigkeit des verwendeten Ausgangsmaterials, der Art der Werkstoffzuführung, der Energiequelle sowie der Energieeinbringung lassen sich in Literatur und Praxis eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahrensbezeichnungen finden, die sich zu meist auf die verfahrenstechnischen Besonderheiten beziehen. Dabei lassen sich die Verfahren zur Herstellung metallischer Komponenten und Bauteile primär anhand des verwendeten Ausgangsmaterials in pulver- und drahtbasierte Verfahren untergliedern. Aufgrund der höheren erreichbaren Bauteilgenauigkeiten sowie fortgeschrittener Prozess- und Anlagenentwicklungen pulverbasierter Verfahren stellen diese aktuell die verbreitetsten und zugleich industriell etablierten Verfahren zur additiven Fertigung dar.

Insbesondere im Hinblick auf die endkonturnahe Herstellung großformatiger Bauteile sowie die Durchführung selektiver Reparaturarbeiten bieten drahtbasierte Auftragprozesse aufgrund der vergleichsweise hohen Auftragraten eine wirtschaftliche Alternative gegenüber pulverbasierten Verfahren. Weitere Vorteile des Einsatzes drahtbasierter Verfahren bestehen in der hohen Verfügbarkeit der Werkstoffe und Betriebsmittel, der Materialreinheit sowie geringerer Kosten der Ausgangswerkstoffe. Bei der lichtbogenbasierten additiven Fertigung wird der drahtförmige Zusatzwerkstoff durch eine separate Energiequelle aufgeschmolzen (Wolfram-Inertgas-Schweißen, Plasmaschweißen) oder direkt als Drahtelektrode (Metall-Schutzgas-schweißen) eingesetzt. Der Materialauftrag erfolgt durch eine

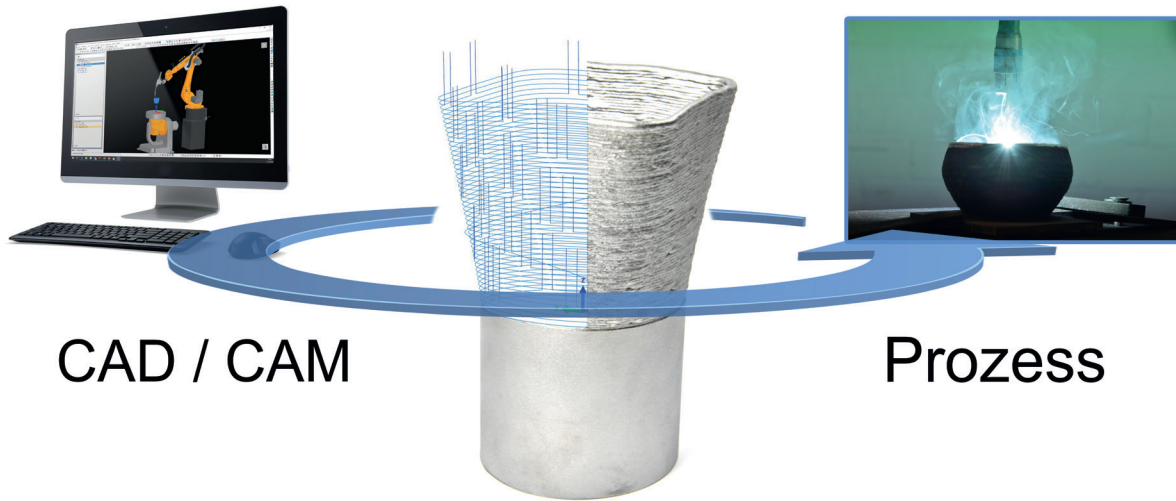
Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkstoffzuführung. Für den Fall des Metall-Schutzgasschweißens (MSG) ergibt sich dabei der Vorteil, dass Energie- und Werkstoffzuführung direkt über die abschmelzende Elektrode erfolgen. Dies führt zu einer höheren Freiheit der Prozessführung, da der Draht senkrecht zum Schmelzbad geführt und somit wechselnde Drahtorientierungen vermieden werden können. Weiterhin zeichnet sich die additive Fertigung mittels MSG-Schweißens durch vergleichsweise kostengünstige Anlagentechnik sowie eine hohe Automatisierbarkeit aus. Dabei lassen sich bezüglich der Brennerführung Robotersysteme und CNC-basierte Portalachsen unterscheiden. Abbildung 1 verdeutlicht anhand einer schematischen Darstellung die Geometrieerzeugung mittels WAAM. Da die Geometrie der einzelnen Schweißraupen in direktem Zusammenhang mit den verwendeten Schweißparametern steht, macht dies die Kenntnis materialspezifischer Prozessparameter erforderlich.

Beschreibung des Versuchsstands

Um den wachsenden Fragestellungen und Forschungsbedarf im Bereich der additiven Fertigung gerecht zu werden, wurde am ifs ein Versuchsstand zur lichtbogenbasierten additiven Fertigung aufgebaut (Abbildung 2). Der Versuchsstand beinhaltet einen KUKA 6-Achs Handlingsroboter für die Schweißbrennerführung. Zur Erstellung dreidimensionaler Bauteile stehen über den Schweißstisch zwei weitere Freiheitsgrade (Drehen, Schwenken) zur Verfügung.

Der 6-Achs Roboter ist mit der Stromquelle CMT Advanced 4000R der Firma Fronius gekoppelt. Die Schweißstromquelle eignet sich besonders für additive Anwendungen wie das WAAM, da sie über zahlreiche Prozessvarianten des Cold Metal Transfers (CMT) verfügt, die sich durch energiereduzierte Kurzlichtbogentechnik auszeichnen. Dies ermöglicht das generative Fertigen von Strukturen mit vergleichsweise niedrigem Wärmeeintrag. Durch die reversierende Drahtelektrode in Kombination mit einer schnellen Regelung verläuft das Neuzünden des Lichtbogens weitestgehend spritzerfrei, was einen weiteren Vorteil für den Einsatz im Bereich der additiven Verfahren darstellt. Zur berührungslosen Erfassung von Vorwärm- oder Zwischenlagentemperaturen wurde ein Pyrometer in den Versuchsaufbau integriert.

Um auch komplexe Geometrien fertigen zu können, die händisch nur schwer oder sehr zeitaufwändig zu programmieren sind, verfügt das ifs über eine CAD-CAM-basierte Bahnplanungssoftware. Hier können CAD-Dateien entweder erstellt oder direkt importiert werden, von denen dann Werkzeugbahnen abgeleitet werden, welche dem Roboter die Aufbaustrategie vorgeben. Die Werkzeugbahnen werden unter Berücksichtigung der Bauteilgeometrie, der Roboterkinematik und der Schweißraupengeometrie erstellt.



Die Software generiert aus den Werkzeugbahnen und den eingegebenen Parametern, wie z. B. Schweißgeschwindigkeit, Vor- und Nachströmzeit des Gases und Wartezeit zwischen einzelnen Lagen, den Maschinencode, der anschließend in die Robotersteuerung importiert werden kann.

Aktuelle Arbeiten

Aktuelle Arbeiten befassen sich mit dem Zusammenhang der verwendeten Schweißparameter, der Geometrie der einzelnen Schweißraupen sowie den resultierenden Material- und Bauteileigenschaften bei der additiven Fertigung mit Aluminium und Stahl als Aufbauwerkstoff.

Im Vorfeld der Untersuchungen zur additiven Fertigung mit einer Aluminiumdrahtelektrode (AlMg5) lag der Fokus auf der

Bestimmung der Haupteffekte der Prozessparameter Schweißgeschwindigkeit, Drahtvorschubgeschwindigkeit und Schutzgaszusammensetzung (Beimischung von Helium zu Argon) auf die Geometriebildung. Hierfür wurden Wandstrukturen, bestehend aus zehn alternierend geschweißten Lagen, unter Variation der Prozessparameter betrachtet und anschließend die Auswirkung der Prozessparameter auf die resultierende Geometriebildung über eine statistische Versuchsauswertung bestimmt. Anhand der in Abbildung 3 dargestellten Haupteffektdiagramme ist zu erkennen, dass sowohl die Drahtgeschwindigkeit als auch die Schweißgeschwindigkeit Einfluss auf die resultierende Aufbauhöhe nehmen, wobei die Schweißgeschwindigkeit als ausschlaggebender Parameter identifiziert werden kann. Weiterhin lässt sich anhand der dar-

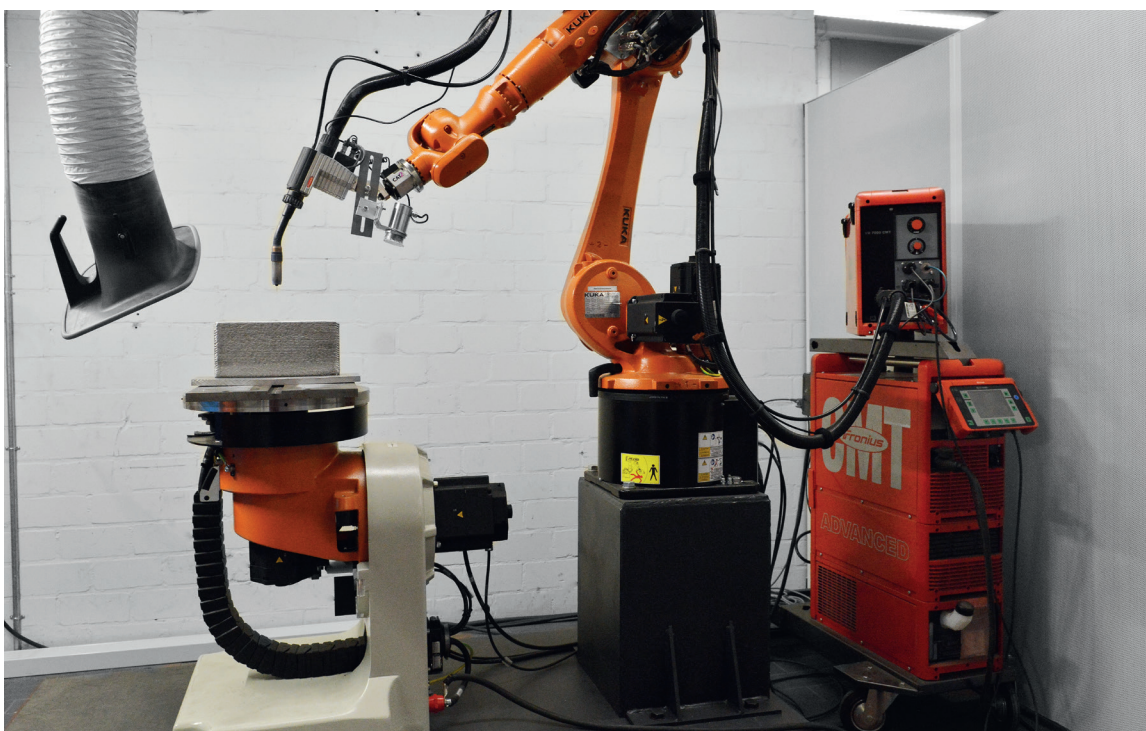


Abbildung 2: WAAM am Institut für Füge- und Schweißtechnik

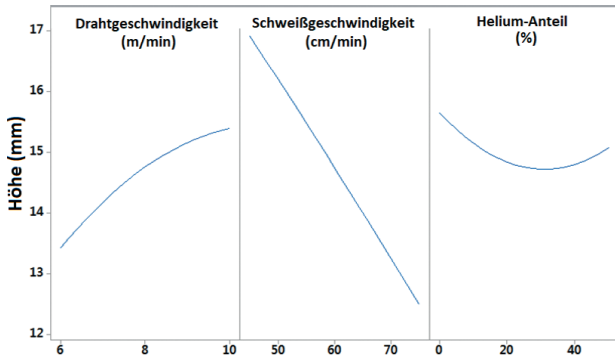


Abbildung 3: Haupteffektdiagramme bezüglich Höhe und Breite der resultierenden Wandstrukturen

gestellten Haupteffektdiagramme ein dominierender Einfluss der Drahtvorschubgeschwindigkeit auf die sich ergebende Strukturweite erkennen. Die Ergebnisse können weiterführend für gezielte Geometrieoptimierungen, die Erstellung komplexer Aufbaugeometrien sowie bei der Schweißprozessqualifikation angewendet werden.

Unter Verwendung optimierter Prozessparameter erfolgte die Ermittlung der mechanisch-technologischen Eigenschaften additiv gefertigter Wandstrukturen (Abbildung 4). Hierbei wurden Zugfestigkeitseigenschaften sowohl in Aufbau- als auch in Schweißrichtung bestimmt. Die ermittelten Zugfestigkeiten erreichten dabei im Mittel, unabhängig von der Prüfrichtung, die für den Schweißzusatz herstellerseitig angegebene Zugfestigkeit von 255 MPa. Unterschiede zeigten sich in den erreichten Bruchdehnungen. Dabei ergaben sich in horizontaler Prüfrichtung mit durchschnittlich 28 % signifikant höhere Bruchdehnungen im Vergleich zu vertikal entnommenen Proben (durchschnittlich 17 %). Diese Anisotropie kann auf Porosität im Schweißgut sowie auf Inhomogenitäten der Mikrostruktur entlang der Schmelzlinien zurückgeführt werden und bildet einen Schwerpunkt weiterführender Untersuchungen. Im Fokus zukünftiger Untersuchungen steht die Beantwortung der Frage, wie sich der Fertigungsprozess auf die Mikrostruktur, die Oberflächentopographie, Eigenspannungen und Verzug sowie auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften auswirkt.

Im Bereich der Stähle wurden bereits Prozesse für die Generierung von Basisstrukturen, wie z. B. eindimensionale Stäbe oder auch zweidimensionale Wände qualifiziert und untersucht.

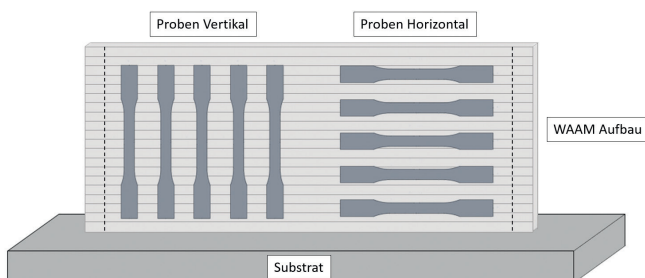
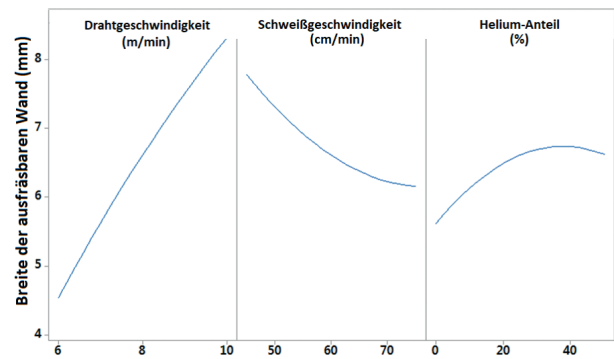
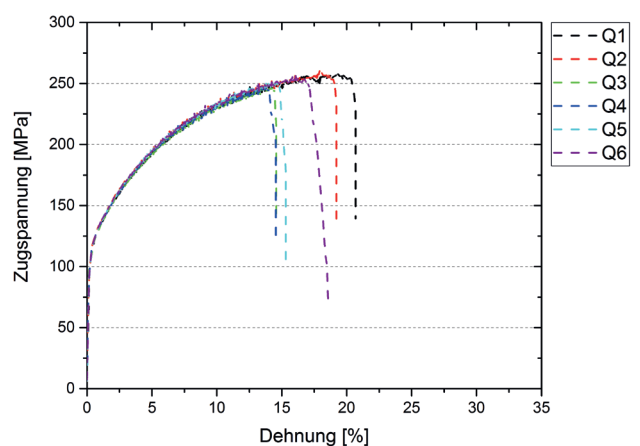
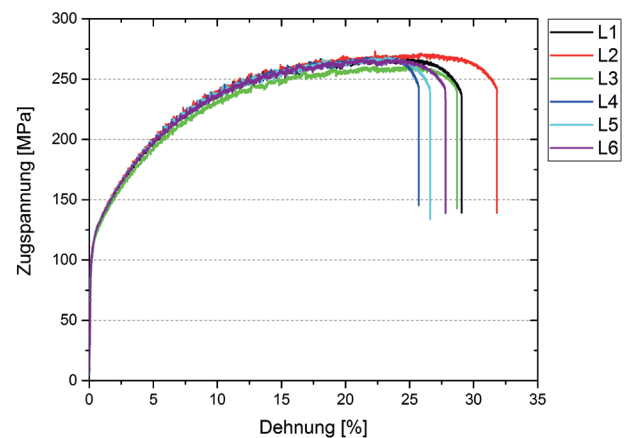


Abbildung 4: Zugfestigkeiten von additiv verarbeitetem AlMg5



Durch diese grundlegenden Versuche können Abhängigkeiten zwischen Schweißgeschwindigkeit, Drahtvorschubgeschwindigkeit (und damit Energieeintrag), Zwischenlagentemperatur und deren Auswirkungen auf die Schweißraupengeometrie, die Aufbaurrate, die Oberflächentopografie, die Härte und das Gefüge sowie auf die mechanischen Eigenschaften ermittelt werden. Ausgehend von diesen elementaren Erkenntnissen ist weiter das Schweißen von komplexeren Geometrien möglich, bei denen dann Fragen zur Entwurfs- und Konstruktionsfreiheit im Mittelpunkt stehen.

Fokus der Arbeiten mit Stahl als Zusatzwerkstoff ist der industrielle Einsatz von AM im Bauwesen. Denkbar sind hier der Einsatz von Stabstrukturen als Freiform-Bewehrungsstäbe, als



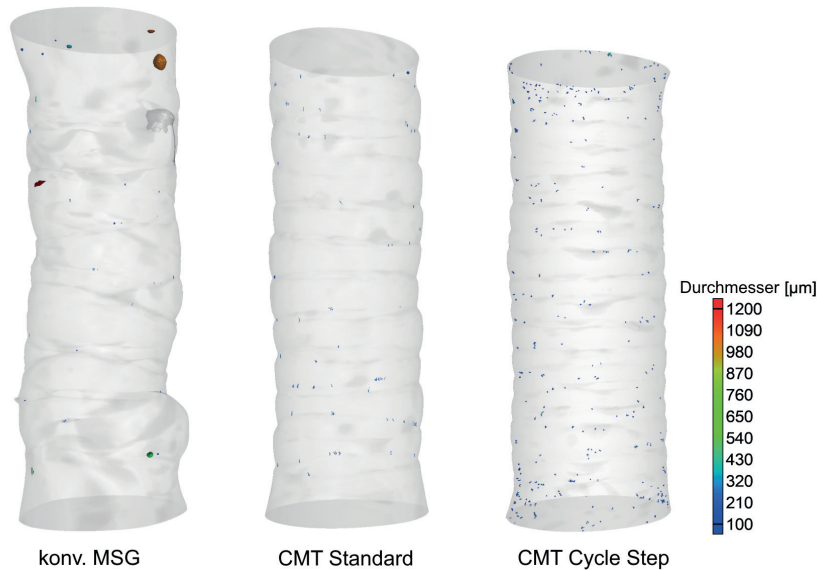


Abbildung 5: Computertomografie-Aufnahmen mit Porenanalyse

Verankerung von Tragwerksknoten in Beton oder als einfaches, eindimensionales Grundelement, welches in Kombination mit mehrdimensionalen Elementen zu komplexeren geometrischen Strukturen, wie kraftflussoptimierte Knoten, kombiniert werden kann.

Für erste Untersuchungen wurden durch lagenweises Aufeinanderersetzen von Schweißpunkten Stabstrukturen mit drei verschiedenen MSG-Prozessvarianten erzeugt. Ein konventioneller MSG-Prozess und energiereduzierte Kurzlichtbogenprozesse (CMT Standard, CMT Cycle Step) wurden hinsichtlich der sich einstellenden Geometrie, Oberflächentopografie, Porosität und mechanischen Eigenschaften untersucht. Abbildung 5 zeigt die CT-Aufnahmen der gefertigten Stabstrukturen, die nicht nur die Porosität abbilden, sondern auch die 3D-Oberflächenstruktur. Es zeigen sich große Unterschiede zwischen den beiden CMT-Prozessen und dem konventionellen MSG-Prozess. Der konventionelle MSG-Prozess führt zu einer unebenen und unregelmäßigen Oberfläche mit vielen Kerben, die unter Belastung örtliche Spannungskonzentrationen bewirken. Bei Verwendung des CMT-Standard-Prozesses, ist die Oberfläche wesentlich regelmäßiger und die einzelnen Lagen sind deutlich erkennbar. Der CMT Cycle Step Prozess führt zur ebenmäßigsten Oberfläche mit einer Spanne von größtem zu kleinstem Durchmesser von nur 0,35 mm. Zum Vergleich: die konventionelle MSG Probe hat eine Spanne von 1,4 mm. Sichtbar wurde dieser Einfluss der Kerben auch in Dehnungsmessungen, bei denen die Stäbe im elastischen Bereich belastet wurden. Bereiche mit hohen lokalen Dehnungen konnten den gekerbten Bereichen der Proben zugeordnet werden. Näheres zu den durchgeführten Untersuchungen an den Stabstrukturen

kann der unten aufgeführten Veröffentlichung entnommen werden.

Im Hinblick auf die zunehmende Bedeutung von additiven Fertigungsprozessen in verschiedenen Bereichen der Industrie, ist das ifs durch die nun vorhandene Anlagentechnik und das damit wachsende Know-How in der Lage, neu auftretenden Fragestellungen und dem steigenden Forschungsbedarf auf diesem Themengebiet gerecht zu werden.

Autoren:

Johanna Müller, M.Sc.
Dipl.-Ing. Markus Köhler

Zu den Veröffentlichungen



Wire and Arc Additive Manufacturing of Aluminum Components
Markus Köhler, Sierk Fiebig, Jonas Hensel und Klaus Dilger



Design and Parameter Identification of Wire and Arc Additively Manufactured (WAAM) Steel Bars for Use in Construction
Johanna Müller, Marcel Grabowski, Christoph Müller, Jonas Hensel, Julian Unglaub, Klaus Thiele, Harald Kloft und Klaus Dilger

Kleben additiv gefertigter Bauteile

Im Vergleich zu herkömmlichen subtraktiven oder werkzeuggestützten Fertigungsverfahren bietet die additive Fertigung (AM) neue Gestaltungsfreiheit und damit großes Potenzial für den Leichtbau oder individualisierte Produkte in geringen Stückzahlen. Additive Verfahren sind dabei nicht mehr auf die Fertigung von Prototypen beschränkt, sondern eignen sich mehr und mehr für die direkte Herstellung von Serienendprodukten. Da die Kosten der AM vergleichsweise hoch sind und der verfügbare Bauraum und die Geschwindigkeit der Maschinen begrenzt, lohnt sich der Einsatz von AM nur dort, wo eine zusätzliche Wertschöpfung in der Teilekonstruktion generiert wird. Innovative Fügeverfahren, die über eine rein mechanische Verbindung der Bauteile hinausgehen und zusätzliche Funktionalitäten integrieren, können hierzu einen Beitrag leisten.

Das Potenzial der Klebtechnik hängt dabei stark mit der Gestaltung der Klebflächen zusammen. Herkömmliche Herstellungsverfahren der Bauteile führen in der Regel zu Klebverbindungen mit einer vergleichsweise einfachen Geometrie. Die maximale Belastbarkeit der Verbindung wird durch Spannungsspitzen an

den überlappenden Enden begrenzt. Der hohe Freiheitsgrad von AM bietet jedoch die Möglichkeit, die Fügeflächen gezielt an den zu erwartenden Lastfall anzupassen, so dass eine homogene Kraftverteilung über die gesamte Fügefläche möglich ist. Dadurch kann die Tragfähigkeit der Klebverbindung deutlich erhöht werden. Bisher wurden nur sehr wenige Studien durchgeführt, um die Eignung des Klebens für das Fügen von additiv gefertigten Teilen zu untersuchen. Im Projekt „GeneSys - Klebeignung generativ gefertigter Systeme“ der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF 19206 N/ DVS 08.104) wurde am ifs gemeinsam mit dem Institut für Konstruktionstechnik der TU Braunschweig daher eine grundlegende Wissensbasis geschaffen.

Prozesse und Materialien

Im Vergleich zu herkömmlichen Herstellungsverfahren erzeugt die additive Fertigung ein Bauteil nicht durch Reduktion oder Umformung des Materials, sondern durch sukzessives Hinzufügen von Material in Schichten. Diese werden bisher im sogenannten Slicing-Verfahren direkt aus dem 3D-CAD-Modell generiert. Das Bauteil wird virtuell in horizontale Schichten zerlegt und dann Schicht für Schicht mit dem jeweiligen additiven Herstellungsverfahren physikalisch aufgebaut. Abhängig von der Teileorientierung und der Auswahl der Prozessparameter führt das Schichtprinzip zu prozessspezifischen Anisotropien in den mechanischen Eigenschaften und der Oberfläche, was bei der Konstruktion berücksichtigt werden muss.

Im Projekt wurden neben der Materialeextrusion auch Pulverbettverfahren betrachtet. Die Klebeignung der generativ gefertigten Bauteile wurde dabei mit der von Spritzguss- bzw. Druckgussproben gleicher Zusammensetzung verglichen. Im Materialextrusionsprozess (MEX) wird das Material über Vorschubrollen in den Extrusionskopf transportiert, plastifiziert und dann auf die Bauplattform oder auf bereits abgeschiedenes Material über die Extrusionsdüse in einer definierten x-y- Ebene aufgebracht. Die einzelnen Materialstränge verbinden sich beim Abkühlen miteinander. Nach Fertigstellung einer Schicht wird die Bauplattform in z-Richtung um eine Schichtstärke abgesenkt und der Prozess wiederholt.

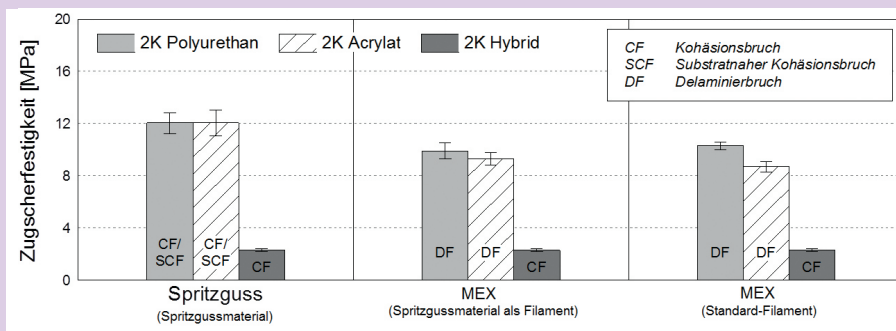


Abbildung 1: Vergleich der Klebbarkeit von Spritzguss- und MEX-Bauteilen über Zugscherversuche (links), typisches Bruchbild mit Delaminierungsversagen der Bauteile (rechts)

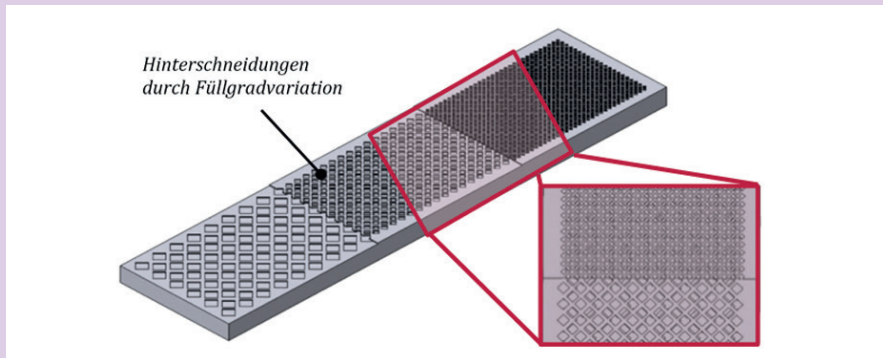


Abbildung 2: Variation des Füllgrades in den oberen Schichten der Bauteile

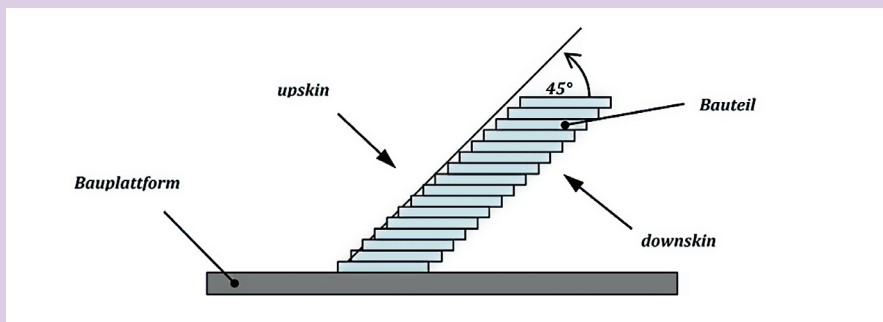


Abbildung 3: Treppenstufeneffekt aufgrund der Bauteilorientierung im Fertigungsprozess mit sog. „upskin“ und „downskin“ Oberflächen

Im Projekt wurden hierzu u.a. kommerzielle Filamente aus Acryl-Butadien-Styrol (ABS) sowie selbst hergestellte Filamente aus Spritzgussmaterial zu AM Bauteilen verdruckt. Diese wurden mit Spritzgussproben aus dem Spritzgussmaterial verglichen.

Bei den laserbasierten Pulverbettverfahren wird mit Hilfe einer Streuvorrichtung (z.B. Rakel) eine Pulverschicht im Bauraum aufgebracht. Das Pulver wird dann selektiv in der gewünschten Kontur durch einen Laser selektiv geschmolzen (Selective Laser Melting, SLM) oder gesintert (Selective Laser Sintering, SLS).

Als Rohstoffe können sowohl thermoplastische Polymere als auch Metalle verwendet werden. Bei metallischen Werkstoffen werden jedoch zusätzliche Stützstrukturen zur Abstützung von Überhängen, zur Ableitung von Wärmeenergie und zur Reduzierung von Wärmeverzug eingesetzt. Nach Fertigstellung des Bauteils müssen die Stützstrukturen mechanisch entfernt werden.

Im Projekt wurde beim SLS Verfahren Polyamid 12 Pulver verdruckt und mit Spritzgussbauteilen des gleichen Materials verglichen. Für das SLM Verfahren kam eine Aluminiumlegierung zum Einsatz, für die für vergleichende Untersuchungen auch Druckgussproben zur Verfügung standen.

Die Klebeignung der polymeren Bauteile wurde u.a. an Zugscherproben mit zweikomponentigen Klebstoffen validiert: Ein Polyurethan-System, ein Acrylatsystem und ein silanterminiertes System. Die metallischen Bauteile wurden mit einem heißhärtenden einkomponentigen Epoxidharz geklebt.

Bauteile aus dem Materialextrusionsprozess und ihre Klebeignung

Die allgemeine Klebeignung der MEX-Proben aus ABS wird durch einen direkten Vergleich mit entsprechenden Spritzgussproben bewertet. Das Ergebnis des Vergleichs und ein typisches Bruchbild sind in Abbildung 1 dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit den spritzgegossenen Proben für die beiden relativ steifen Klebstoffe (Polyurethan und Acrylat) höhere Festigkeiten erreicht werden können als mit den additiv hergestellten Proben. Nur der weichere Hybridklebstoff hat vergleichbare Festigkeiten bei kohäsivem Versagen. Ein genauerer Blick auf die Bruchflächen zeigt, dass die Haftfestigkeit der MEX-Proben durch die Schichthaftung begrenzt ist, was bei Überschreitung des Wertes zu einer Delamination im Bereich der Verbindung (Bruchbild in Abb. 1 rechts) führt. Dieses Verhalten tritt bei beiden ABS-Typen auf. Aus diesem Ergebnis lässt sich schließen, dass der Schichtaufbau des MEX-Verfahrens bei Verwendung von steifen Klebstoffen nicht nur die Bauteilfestigkeit, sondern auch die Festigkeit der Verbindung reduziert. Die Bauteilfestigkeit lässt sich durch Maßnahmen wie eine Trocknung des Filamentes vor dem Verdrucken oder Tempern des Bauteiles erhöhen. Der schichtweise Materialauftrag während des Additivprozesses führt auch zu Kerben auf der Bauteiloberfläche. Das Ergebnis ist eine Verringerung der Zugscherfestigkeit. Über einen Nassschliff der Bauteiloberfläche kann dieser Kerbeffekt und damit die Delamination der Proben reduziert werden. Die Klebeeigenschaften einer erzeugten Oberfläche können durch verschiedene Methoden optimiert werden, z.B. Füllgradvariation, 3D-Gitterstrukturen und Multimaterialdruck. Die Prüfkörper für diese Prüfungen bestehen aus Polypropylen (PP). Ohne entsprechende Vorbehandlung ist dieses Material schwer zu kleben und eignet sich daher sehr gut zur Bewertung der Verbesserungsmaßnahmen.

Durch Variation des Füllgrades in den oberen Schichten der Prüfkörper (siehe Abbildung 2), können mechanische Verankerungsstrukturen geschaffen werden, die sich positiv auf das Klebverhalten auswirken. Die Festigkeit des Verbundes wird erhöht, so dass sie auf dem gleichen Niveau wie bei einer Plasma-Vor-

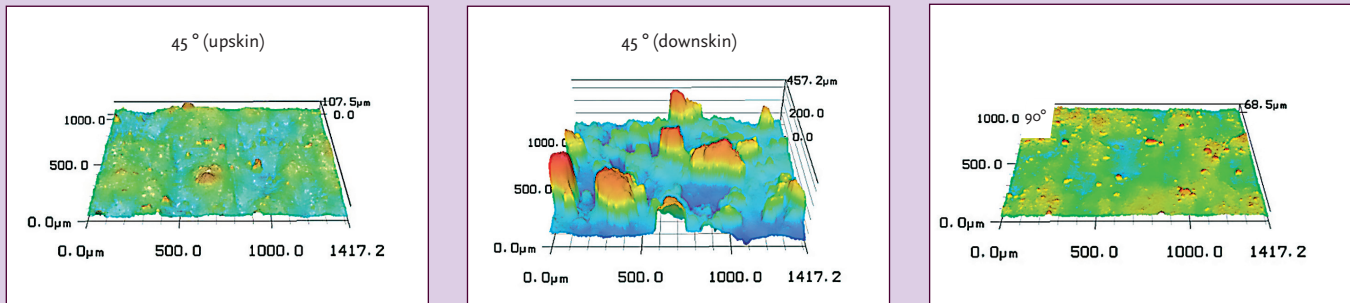


Abbildung 4: Aufnahmen des Laser-Scanning-Mikroskopes von Oberflächen beigestellter Aluminiumbauteile (LSM Verfahren); gut erkennbar ist die unterschiedliche Rauheit der Oberflächen

behandlung liegt. Das Bruchbild zeigt ein Mischversagen mit überwiegend kohäsivem Versagen in der Klebschicht. Aufgrund der geringen Standardabweichung zeigen die Ergebnisse, dass die Füllgradvariation für die industrielle Praxis gut geeignet ist.

Effekte aus dem additiven Prozess bei pulverbasierten Herstellverfahren

Bei den pulverbasierten Verfahren führt eine horizontale Ausrichtung des Bauteils während des Fertigungsprozesses zum sogenannten "Treppenstufen"-Effekt (siehe Abbildung 3). Aus diesem Grund kann die Oberfläche, wie in Abbildung 4 dargestellt, unterschiedliche Rauigkeiten aufweisen, die die Klebbarkeit beeinflussen.

Die aus der Industrie beigestellten SLM-Aluminiumbauteile wiesen nach der Vorbehandlung mittels Korund (Stand der Technik) oder Laser keinen signifikanten Unterschied in der Zugscherfestigkeit gegenüber Aluminiumdruckgussproben auf; Schwankungen aufgrund unterschiedlicher Komponentenhersteller und -systeme waren von vergleichbarer Größenordnung. Bei SLS mit PA 12 ist dagegen der Unterschied zwischen Spritzguss und additiv gefertigten Bauteilen deutlich sichtbar. Die Rauheit führt bei Zugscherversuchen von SLS-Proben aufgrund des Mikroformverschlusses zu deutlich höheren Festigkeiten.

Zusammenfassung und Ausblick

Fügeverfahren für additiv gefertigte Bauteile werden in der Zukunft an Bedeutung gewinnen, da ihr Einsatz neue Materialien und Materialkombinationen ermöglicht. Die Klebtechnik ist daher ein besonders geeignetes Verfahren zum Fügen von Komponenten und Bauteilen. Durch eine angepasst Konstruktion und unter Berücksichtigung der für das Kleben wichtigen Parameter aus dem additiven Fertigungsprozess können die Vorzüge der Verfahren in besonderer Weise kombiniert und ausgenutzt werden.

Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die vergleichsweise hohe Oberflächenrauheit von additiv gefertigten Bauteilen die Klebfähigkeit nicht beeinträchtigt, sondern durch Mikroformverschluss - also einer mechanischen Verzahnung - sogar positiv beeinflussen kann. Dies konnte u.a. am Beispiel von

Polyamid 12 gezeigt werden.

Im Fall der über eine Materialextrusion hergestellten Bauteile ist die Klebkraft durch die Zwischenlagenhaftung begrenzt und daher bei steifen Klebstoffen geringer als bei Bauteilen aus dem Spritzgießprozess. Bei weicheren Klebstoffen sind keine Unterschiede zwischen den Herstellprozessen auszumachen. Lasergesinterte Aluminiumbauteile zeigen für ungealterte Probekörper keine Verringerung der Zugscherfestigkeiten beim Kleben im Vergleich zu Druckgussproben. Eine Trennmittelentfernung, wie im Druckguss in der Regel notwendig, kann jedoch entfallen.

Auch konstruktive Möglichkeiten zur Anpassung der Fügezonengeometrie von schwer zu klebenden Kunststoffen durch Verankerungsstrukturen und Materialkombinationen in der Fügezone tragen zur guten Klebbarkeit bei.

Zukünftig werden weitere Untersuchungen notwendig sein, um die bislang gefundenen Ergebnisse zu ergänzen. Neben der Validierung weiterer Bauteilsubstrate und Klebstoffsysteme werden vor allem Aspekte wie Alterung sowie statische und dynamische Lasten im Fokus der Untersuchungen stehen. Hierzu sind Folgeprojekte in der Beantragung.

Eine umfassende Darstellung der bislang untersuchten Parameter und erzielten Ergebnisse ist im Abschlussbericht des Projektes zusammengefasst. Dieser ist auf Anfrage beim *ifs* erhältlich.

Danksagung

Das IGF-Projekt 19206N der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf, wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie auf Beschluss des Deutschen Bundestages gefördert. Wir bedanken uns für die Förderung und bei den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für die hervorragende Unterstützung.

Autorin:

Dipl.-Chem. Elisabeth Stammen

Kontakt:

e.stammen@tu-braunschweig.de

Durch den Einsatz von in-situ Computertomografie (CT) in der Klebtechnik ergeben sich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten, wie zum Beispiel die Analyse von Einschlüssen oder Fehlstellen.

Im Rahmen eines aktuellen Projektes wird die in-situ CT als innovative Methode zur lokalen Dehnungsmessung in Klebstoffen eingesetzt.

Neue Analysemethoden für elastische Klebstoffverbindungen mittels in-situ Computertomografie

Im Rahmen eines Projektes der industriellen Gemeinschaftsforschung zwischen dem ifs und dem Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF) der Universität Paderborn wird ein Konzept zur Auslegung von elastischen Klebstoffverbindungen entwickelt. Im Fokus steht dabei die Erforschung einer neuen Methode zur direkten hochaufgelösten Dehnungsmessung innerhalb von Klebschichten. Das Prinzip beruht auf der Partikelverfolgung von im Klebstoff eingebrachten Markerpartikeln mittels in-situ CT Messungen nach [1]. Bei stufenförmig ansteigender Last werden pro Lastniveau CT Messungen nach Ausklang der Relaxation durchgeführt. Aus den detektierten Bewegungen der Partikel werden zunächst über Delaunay-Triangulation Verschiebungsfelder berechnet und anschließend Dehnungszustände abstrahiert. Ein Schwerpunkt ist die Optimierung der Messmethodik bezüglich einer eindeutigen hochaufgelösten Detektierbarkeit der Partikel. Während der Vorversuche haben sich Glasperlen der Fraktion 63-70 μm sowie Wolframpartikel $< 32 \mu\text{m}$ als ideale Markerpartikel zur Partikelverfolgung in Klebstoffen erwiesen.

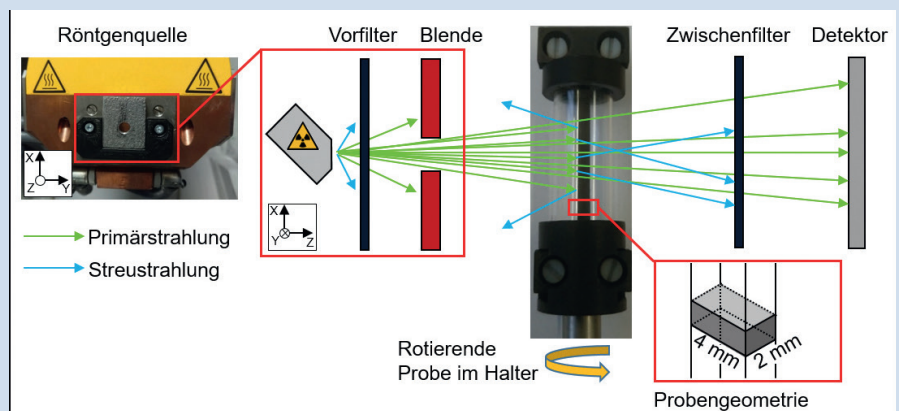


Abbildung 1: Schematische Abbildung des verwendeten Messaufbaus für in-situ CT Messungen mit prinzipieller Darstellung der Wirkungsweise von Filter bzw. Blende im Strahlengang der Röntgenstrahlung

Optimierung der Messmethodik

Bei der Computertomografie handelt es sich um ein rechnerbasiertes bildgebendes Verfahren aus dem Anwendungsbereich der Radiologie. Mittels eines Computers werden aus einer Vielzahl an Röntgenaufnahmen eines zu untersuchenden Objektes unter schrittweise fortschreitendem Rotationswinkel digital Schnittbilder rekonstruiert. Der auf Basis dieser Schnittbilder vollständig rekonstruierte 3D Scan ist aus sogenannten Voxeln aufgebaut. Die Bezeichnung *Voxel* setzt sich aus den Wörtern *Volumen* und *Element* zusammen und bezeichnet einen Gitterpunkt in einem dreidimensionalen Gitter, was mit einem Pixel in einem 2D-Bild vergleichbar ist. Da die Erkennbarkeit von Details mit der Voxelgröße korreliert, ist eine Zielsetzung, die Probe so nahe wie möglich vor der Röntgenquelle zu positionieren. Je geringer die Voxelgröße, desto höher ist die Detailerkennbarkeit. Ebenso wichtig ist die damit verbundene Unterscheidbarkeit, also die eindeutige Zuordnung der Voxel zu einem spezifischen Mate-

rial. Als Probengeometrie für die Optimierung der CT Parameter werden Substanzproben mit einer Querschnittsfläche von 4 x 2 mm verwendet, welche in einem zylindrischen Probenhalter mit 20 mm Durchmesser eingespannt wurden. Eine Voxelgröße von bis zu 8,4 µm kann somit realisiert werden, was einer 25-fachen Vergrößerung entspricht. Zusätzlich zur Optimierung der Betriebsparameter der Röntgenröhre und den Integrationsparametern in der Detektoreinstellung hat sich gezeigt, dass der Einsatz von metallischen Filterfolien als Vor- bzw. Zwischenfilter sowie die Verwendung einer Bleiblende erheblich zur Verbesserung des CT Scans beitragen. In Abbildung 1 ist schematisch der für die in-situ CT Messungen verwendete Messaufbau dargestellt.

Vorfilter dienen der Aufhärtung der Primärstrahlung durch Absorption niederenergetischer Streustrahlung und sorgen somit für eine verbesserte Durchdringung des Probenkörpers mit Röntgenstrahlung. Zwischenfilter werden zur Korrektur von Streueffekten eingesetzt, welche aufgrund der Interaktion der harten Primärstrahlung mit dem Probenkörper und der damit verbundenen Erzeugung weicherer Streustrahlung entstehen. Insbesondere bei stark absorbierenden Materialien, wie zum Beispiel Wolframpartikel innerhalb des Probenkörpers, sorgt der Einsatz von 100 µm Kupfer als Vorfilter in Kombination mit 30 µm Aluminium als Zwischenfilter für eine Kontrasterhöhung bei gleichzeitiger Reduktion der Streustrahlung. Bei schwach absorbierenden Materialien (Glasperlen oder Substanzproben) kann auf Filterfolien verzichtet werden. Die zusätzliche Verwendung einer 5 mm dicken Blende aus Blei mit einer 6 mm Bohrung vor dem Austrittsfenster der Röntgenstrahlung hat sowohl bei schwach als auch bei stark absorbierenden Materialien zu einer starken Verbesserung des rekonstruierten 3D Scans geführt. Durch die somit hauptsächlich auf den Probenkörper gerichtete Röntgenstrahlung werden die Intensitätsbereiche im gemessenen, dem jeweiligen 3D Scan zugehörigen Grauwert-Histogramm aufgefächert, welches eine präzisere Bestimmung der entsprechenden Luft- bzw. Materialpeaks ermög-

licht und somit die Unterscheidbarkeit erhöht.

Die erzielten Verbesserungen bezogen auf die Qualität des CT Scans und die Erkennbarkeit von Details ist exemplarisch in Abbildung 2 am Beispiel einer Substanzprobe gefüllt mit 5 Gew.% Wolframpartikel (< 32 µm) dargestellt. Unter Verwendung eines optimierten Parametersatzes sowie Messaufbaus sind sowohl die Klebstoffmatrix als auch die im Klebstoff eingebetteten Wolframpartikel und die ebenfalls enthaltenen Kavitäten nahezu artefaktfrei abgebildet. Zudem ermöglicht eine genaue Abstimmung der Betriebs- sowie Integrationsparameter eine Reduktion der Messdauer von anfänglich 48 Minuten auf 24 Minuten bei gleichbleibend hoher Bildqualität.

Ebenfalls wurde auch ein optimierter Parametersatz für die Verwendung von Glasperlen als in Frage kommende Markerpartikel erstellt. Dieser unterscheidet sich im Vergleich zum auf Wolframpartikel optimierten Parametersatz nur im Röhrenstrom I_R , welcher für Glasperlen 120 µA beträgt.

Ein auf Klebungen optimierter Parametersatz kann zudem auch bei vielfältigen artverwandten Fragestellungen eingesetzt werden. Im Folgenden werden einige Anwendungsmöglichkeiten vorgestellt.

Anwendungsmöglichkeiten für In-situ CT Messungen in der Klebtechnik

Die Analyse des Partikelverhaltens in Klebstoffen unter Lasteinwirkung stellt eine interessante Anwendungsmöglichkeit dar. Bei optimierten in-situ Messungen an Substanzproben, gefüllt mit 10 Gew.% 170-180 µm Glasperlen, ist unter Lasteinwirkung bei 25% technischer Dehnung eine starke Delamination der Klebstoffmatrix von der Oberfläche der Glasperlen aufgefallen. Stark vereinzelt tritt dieser Delaminationseffekt auch bei Glasperlen geringeren Durchmessers (63-70 µm) auf. Indem die Glasperlen vor der Einbringung in den Klebstoff mit einem Primer nasschemisch vorbehandelt wurden, konnte der Delaminationseffekt bei den

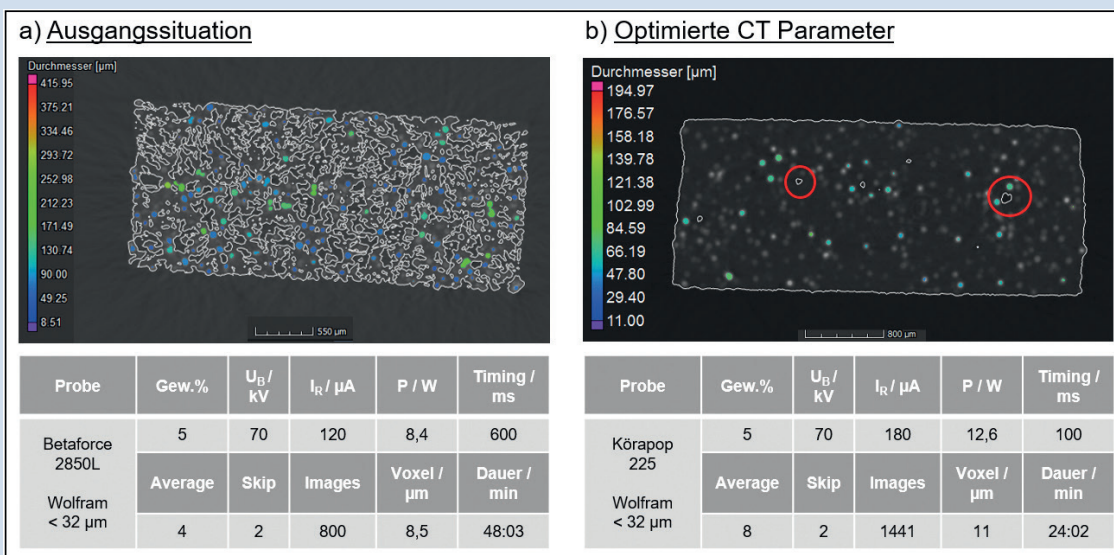


Abbildung 2: Gegenübergestellt sind hier die Ausgangssituation a) mit auf Vorversuchen basierenden Messparametern sowie der CT Scan unter Anwendung eines optimierten Parametersatz b) mit zwei beispielhaft rot hervorgehobenen detektierten Kavitäten

untersuchten Substanzproben vollständig verhindert werden. Erst bei einer technischen Dehnung von 50% wurden erneut vereinzelt Delaminationseffekte detektiert.

In Abbildung 3 ist exemplarisch die erzielte Haftverbesserung durch die Vorbehandlung der 170-180 µm Glasperlen mit einem Primer dargestellt.

Im Hinblick auf später ebenfalls mittels Partikelverfolgung zu untersuchende geklebte Zug-Scher-Proben galt es zu überprüfen, inwieweit sich die optimierten Parametersätze hierfür eignen. Bereits nach wenigen Testmessungen zur Parameteranpassung bezüglich Leistung und Belichtungszeit konnte jeweils ein für die Materialkombinationen Klebstoff/Glasperlen/CFK bzw. Klebstoff/Wolframpartikel/Stahlblech optimierter Parametersatz aufgestellt werden. Die Substratdicke von CFK und Stahlblech lag bei 2 mm. Neben den sehr gut zu erkennenden Partikeln können auch Luftkavitäten innerhalb der Klebungen detektiert werden. Luftblasen bzw. einschüsse detektieren zu können eröffnet hier neue Möglichkeiten hinsichtlich der Analyse von Klebungen. So kann z.B. bereits vor dem Durchführen einer Zugmessung überprüft werden, ob Fehlstellen innerhalb der Klebung vorliegen. Als weiteres Beispiel für den Einsatz von in-situ CT Messungen bietet sich die Analyse des eigentlichen Mischvorgangs von zweikomponentigen Klebstoffen mittels eines Statikmischers des Typs Quadro 8.7/24 an, um z.B. eine Aussage zur Mischgüte machen zu können. Daher wird gleichzeitig auch ein gezielt beschädigter Statikmischer analysiert. Als Beschädigung wurde eine Mischerlamelle vor der dritten Mischerstufe mittels Skalpell entfernt. Vergleichbare Schnittansichten des unbeschädigten bzw. beschädigten Statikmischers sind in Abbildung 4 gegenübergestellt.

Deutliche Unterschiede in den Mischvorgängen sind besonders im vorderen bzw. mittleren Bereich erkennbar. Bei einem unbeschädigten Statikmischer (Abbildung 4a) hat ca. ab der sechsten Mischerstufe eine weitestgehend homogene Durchmischung der Klebstoffmatrix (helle Phase) mit dem Härter (dunkle Phase) stattgefunden, wohingegen beim beschädigten Statikmischer (Abbildung 4b) in diesem Bereich die beiden Phasen teilweise noch deutlich voneinander getrennt vorliegen. Auch liegt im Falle einer Beschädigung im mittleren Bereich des Statikmischers prinzipiell ein abweichendes Mischungsverhältnis vor, erkennbar an den unterschiedlichen Dicken der beiden Phasen. Im Bereich des Auslasses sind beim beschädigten Statikmischer zudem einige kleine Luftkavitäten in der Klebstoffphase detektiert worden, welche wahrscheinlich auch im applizierten Klebstoff zu finden sind.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen von in-situ CT Messungen an mit Markerpartikeln gefüllten Klebstoffen konnte gezeigt werden, dass eine Optimierung des Messaufbaus sowie ein auf die jeweiligen Markerpartikel abgestimmter optimierter Parametersatz für die CT Messungen in einer erheblichen Verbesserung der Detektierbarkeit bzw. Detektierbarkeit der eingebrachten Partikel (Glasperlen 63-70 µm bzw. Wolframpartikel < 32 µm) resultiert. Durch den Einsatz einer Bleiblende sowie Metallfolien (Kupfer und Aluminium) als Vor- bzw. Zwischenfilter konnte die Qualität des CT Scans in Bezug auf die Erkennbarkeit von Details signifikant erhöht werden. Die Klebstoffmatrix wird nahezu artefaktfrei abgebildet und neben den im Klebstoff eingebetteten Partikeln sind die ebenfalls enthaltenen Kavitäten deutlich zu erkennen.

Aufgrund der durchgeführten Optimierungen und den damit verbundenen Vorteilen in der Detektierbarkeit ergeben sich verschiedenste Anwendungsmöglichkeiten für in-situ CT Mes-

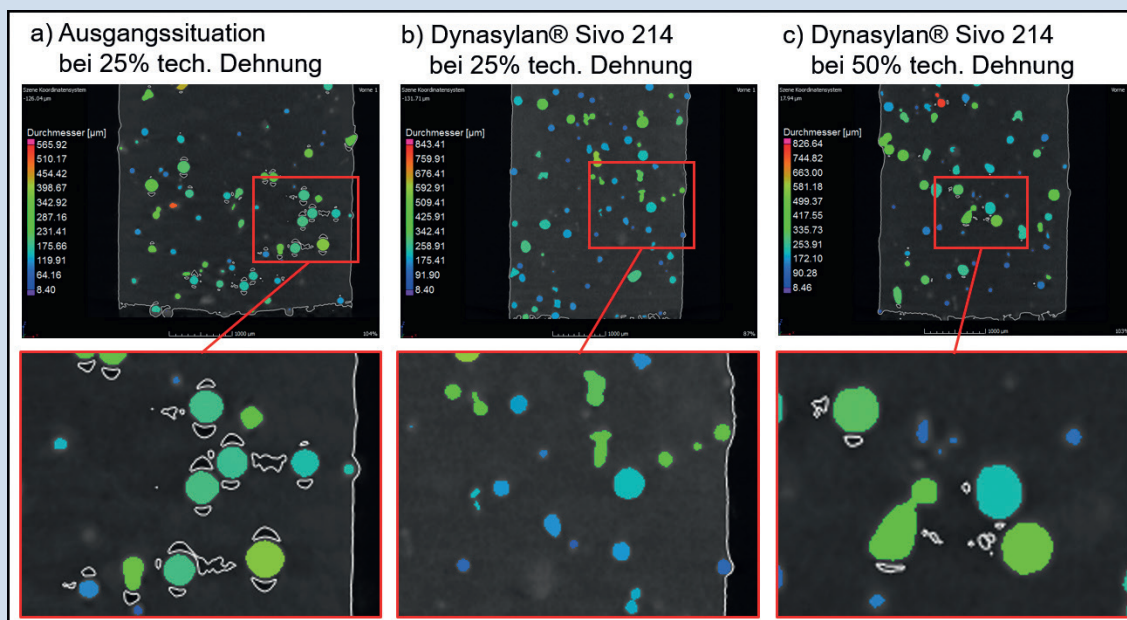
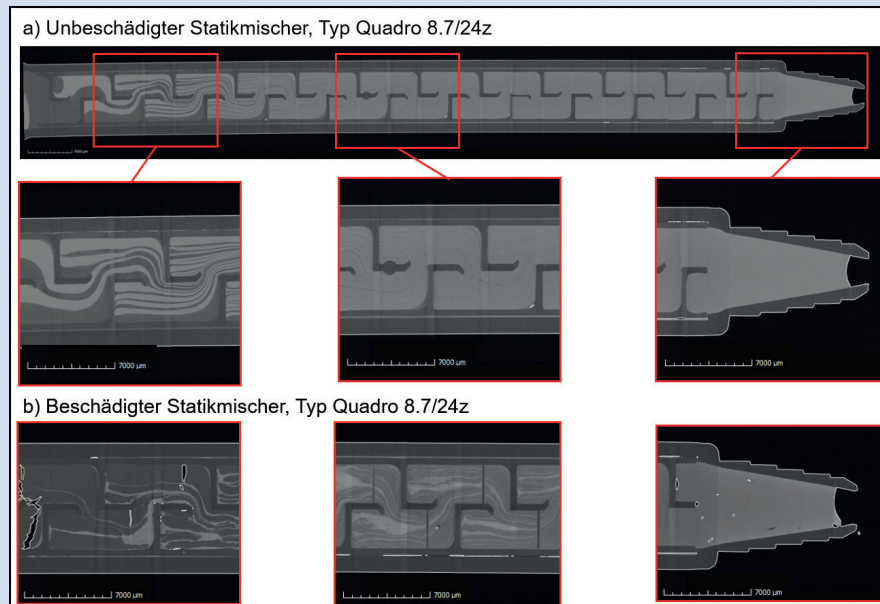


Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung der Haftverbesserung von Klebstoff auf 170-180 µm Glasperlen gegenüber der Ausgangssituation a) durch die nasschemische Vorbehandlung der Glasperlen mittels Primer (hier Dynasytan® Sivo 214). In b) ist der vergleichbare Belastungsfall bei 25% technischer Dehnung und in c) der Belastungsfall bei 50% technischer Dehnung dargestellt. In den unteren Detailansichten sind die durch Delamination hervorgerufenen Kavitäten weiß umrandet

Abbildung 4: Gegenüberstellung von jeweils vergleichbaren Schnittansichten eines CT Scans eines unbeschädigten Statikmischers a) und eines in der dritten Mischerstufe beschädigten Statikmischers b). Deutlich zu erkennen sind die Unterschiede im Mischungsverhalten zwischen der Klebstoffmatrix und den Härter sowie Luftkavitäten innerhalb des Klebstoffes im Bereich des Auslasses im Falle des beschädigten Statikmischers



sungen an Klebungen. Die Analyse des Partikelverhaltens in Klebstoffen unter Lasteinwirkung stellt ein interessantes Anwendungsbeispiel dar. Delaminationseffekte zwischen der Klebstoffmatrix und 170-180 µm Glasperlen können detektiert sowie eine Haftverbesserung durch den Einsatz eines Primers überprüft werden. Auch könnten durch das Einbringen von Partikeln oder Fasern bzw. Fäden gezielt Fehlstellen erzeugt werden, um eine mögliche Korrelation zwischen Fehlstellenart und typischen Schadensbild untersuchen zu können. Die optimierten Parametersätze lassen sich auch auf Materialkombinationen wie Klebstoff/CFK bzw. Klebstoff/Stahlblech nach wenigen Parameteranpassungen anwenden. Somit wäre zum Beispiel die Positionsüberprüfung einer POF-Faser bei der faseroptischen Sensorik innerhalb von Klebungen bzw. die Überprüfung einer möglichen Delamination dieser POF-Faser von der Klebstoffmatrix bei Belastung ein praxisnahes Anwendungsbeispiel. Durch die Optimierung der Messmethodik ist zudem die Unterscheidbarkeit merklich angestiegen, sodass im Falle eines zweikomponentigen Klebstoffes zwischen Klebstoff und Härter eindeutig

unterschieden werden kann. Mittels in-situ CT Messung lässt sich das Mischverhalten innerhalb eines Statikmischers analysieren und die Auswirkung von beschädigten Mischerlamellen auf die Mischgüte im Detail untersuchen.

Förderhinweis und Danksagung

Das IGF-Vorhaben 19830 N der FOSTA-Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren bedanken sich für die Förderung und bei den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für die hilfreichen Diskussionen sowie die Bereitstellung von Versuchsmaterialien.

Literatur

[1] H. Kunz, E. Stammen and K. Dilger, *J. Adhes.*, 93, 531 (2017).

Autoren:

Dipl.-Ing. Jens Philipp
Dipl.-Chem. Elisabeth Stammen

Kontakt:

jens.philipp@tu-braunschweig.de

Simulationsgestützte Randschichtwarmebehandlung von Formwerkzeugen mittels Elektronenstrahl am Beispiel des Warmarbeitsstahls X₃₇CrMoV₅₋₁

Die Steigerung der Lebensdauer von Formwerkzeugen ist ein fortwährendes Thema bei Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich der Ur- und Umformtechnologien. Mögliche Ansätze können dabei werkstoff- oder prozesstechnischer Natur sein. Werkstoffseitig werden häufig Ansätze verfolgt die z. B. eine Variation der Legierungszusammensetzung bei den verwendeten Warmarbeitsstählen beinhalten. Daneben finden sich auch Untersuchungen wieder, die sich mit der Verwendung nicht-eisenbasierter Formwerkstoffe oder der Aufbringung von Beschichtungen befassen. Ungeachtet derartiger Konzepte werden Warmarbeitsstähle wie der X₃₇CrMoV₅₋₁ nach wie vor zumeist unbeschichtet für den Formenbau eingesetzt. Dies begründet sich zum einen durch ein ausgewogenes Eigenschaftsprofil aus Zerspanbarkeit, Zähigkeit, Warmfestigkeit, Duktilität und Härbarkeit des Stahls, zum anderen durch die vergleichsweise moderaten Werkstoffkosten. Legierungsvariationen, bei denen z. B. Festigkeit oder Wärmeleitfähigkeit gesteigert werden konnten sowie alternative Formwerkstoffe können zwischen 10- und 20-mal höhere Kosten pro

Kilogramm Material aufweisen und werden daher verhältnismäßig selten angewandt. Beschichtungen sind ebenfalls mit einem erhöhten Kostenaufwand verbunden und werden nur vereinzelt bei besonders hochbeanspruchten Formkomponenten wie Kerne oder Squeeze-Pins eingesetzt. Zudem erweisen sie sich lediglich als probates Mittel gegen Verschleiß bzw. Erosion und Korrosion, jedoch nicht gegen thermo-mechanisch induzierte Schädigungen.

Generell sind Druckgießformen prozessbedingt zyklisch starken thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt. In Bezug auf die thermisch induzierte Belastung resultiert dies aus den hohen Temperaturunterschieden zwischen heißer Schmelze, dem aufzubringenden Trennstoff und der innentemperaturierten Form. Zusätzlich wirken aufgeprägte mechanische Belastungen infolge des Öffnens und Schließens der Formhälften sowie dem Verdichten der Aluminiumschmelze in der Nachdruckphase. Überlagernd zu den thermisch induzierten und mechanischen Belastungen treten chemische und tribolo-

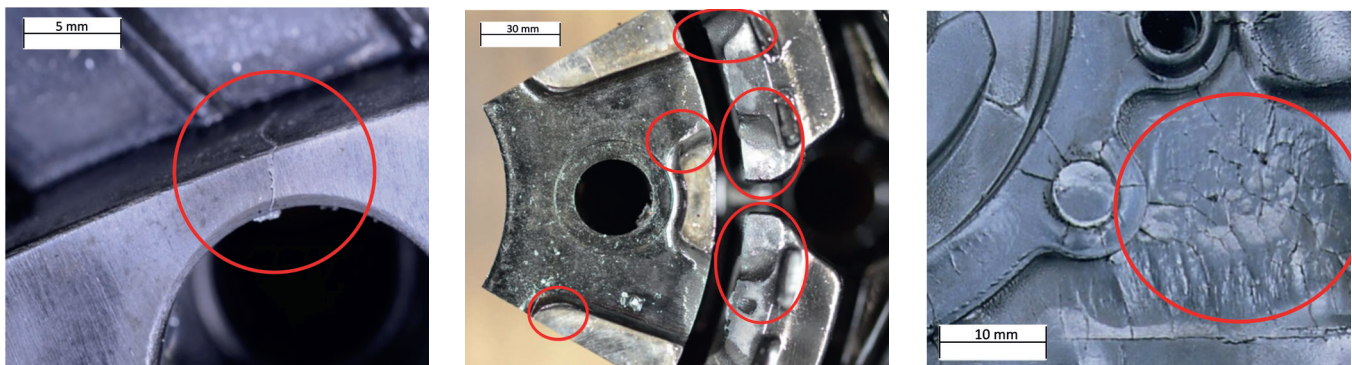


Abbildung 1: Typische Schäden bei Druckgießformen (Spannungsrisse (a), Erosion (b), Brandrisse (c))

gische Wechselwirkungen zwischen Schmelze und Formoberfläche auf. Aus diesen Vorgängen resultieren Schädigungen an verschiedenen Bereichen der Form. In diesen Zusammenhang werden drei signifikante Schadensbilder beschrieben, die sogenannten Spannungsrisse, Brandrisse oder Auswaschungen (vgl. Abbildung 1). Mit steigender Zyklenzahl und somit Schädigung der Formoberfläche reduziert diese die Qualität der produzierten Gussteile und erhöht den Nachbearbeitungsaufwand der Gussbauteile sowie die Wahrscheinlichkeit von ungewollten Prozessunterbrechungen.

Um den beschriebenen Belastungen zu widerstehen, werden eisenbasierte Formwerkstoffe, wie der Warmarbeitsstahl X37CrMoV5-1, ausschließlich im vergüteten Zustand eingesetzt. Als Optimum hat sich dabei eine Zielhärte von 45+/-1 HRC herausgestellt, welche über eine entsprechend angepasste Wärmebehandlung eingestellt wird. Der Stand der Technik ist eine ofenbasierte Wärmebehandlung bestehend aus Austenitisieren, Abschrecken und zumeist mehrstufigen Anlassvorgängen. Bei der ofenbasierten Wärmebehandlung besteht jedoch oft ein Zielkonflikt in Bezug auf das geforderte Werkstoffverhalten. Die Anforderungen an eine hohe Warmfestigkeit und eine hohe Härte bei gleichzeitig hoher Zähigkeit sind im Prinzip gegensätzlich und können im vergüteten Zustand des Werkstoffs nur als Kompromiss erfüllt werden. Höhere Anlasstemperaturen führen in Verbindung mit geeigneten Austenitisierungstemperaturen zu höheren Bruchzähigkeits- und zugleich niedrigeren Härtewerten des Warmarbeitsstahls. Bezugnehmend auf die erreichbare Lebensdauer haben jedoch Untersuchungen gezeigt, dass hohe Härtewerte von ca. 50 HRC bei dynamischer Beanspruchung des X37CrMoV5-1 in eine höhere Lebensdauer münden. Aus der Literatur kann allerdings entnommen werden, dass eine Rissinitiierung bereits nach 1 % der Gesamtwerkzeugsdauer entsteht. Deswegen kann die Anforderung an möglichst hohe Zähigkeitseigenschaften des Formwerkstoffs wiederum nicht vernachlässigt werden. Tribologisch hervorgerufene Wechselwirkungen erfordern ihrerseits eine möglichst hohe Oberflächenhärte.

Randschichtwärmebehandlungen

Die Ergebnisse zahlreicher Untersuchungen zeigen, dass Verbesserungen in der Temperaturwechselbeständigkeit und Verschleißresistenz eingesetzter Warmarbeitsstähle der Stahlsorte X37CrMoV5-1 durch eine gezielte thermische oder chemische Beeinflussung des oberflächennahen Gefüges erreicht werden können. Ansätze sind hier z. B. das thermisch hervorgerufene Randschichthärtens als Festphasenprozess, das Umschmelzlegieren als Flüssigphasenprozess oder das Nitrieren als thermo-chemischer Prozess. Die Festphasenprozesse basieren in der Regel auf kurzen Aufheiz- bzw. Haltezeiten und einer materialinternen, raschen Selbstabkühlung, um martensitische Umwandlungen der oberflächennahen Bereiche hervorzurufen. Beim Flüssigphasenprozess hingegen wird der Ausgangswerk-

stoff aufgeschmolzen und gleichzeitig ein Zusatzwerkstoff in das Schmelzbad eingebracht. Als Energiequelle für den Fest- und Flüssigphasenprozess dient vorwiegend der Laser. Daneben kann beim Festphasenprozess die Energieeinbringung auch durch Induktion herbeigeführt werden. Die erarbeiteten Erkenntnisse haben jedoch aus unterschiedlichen Gründen wenig Eingang in den industriellen Formenbau gefunden. Zum einen besteht die Problematik, dass aufgrund der Charakteristik der Laserstrahlung steile Flanken der Druckgießform nur sehr eingeschränkt wärmebehandelt werden können. Die hier entstehenden Reflektionen müssten durch eine zusätzliche Beschichtung der Oberfläche unterdrückt werden. Dazu besteht stets die Herausforderung, dass beim Umschmelzlegieren in diesen schrägen Bereichen die entstehenden Raupen durch die Schmelzbaddynamik schwer zu beherrschen sind. Zum anderen verlangt eine komplexe Werkzeugkontur eine aufwändige Regelung bzw. Nachführung des Laserstrahls. Eine ähnliche Problematik zeigt sich auch bei der induktiven Randschichtwärmebehandlung. Für jede Werkzeuggeometrie müsste hier ein eigens geformter Induktor angefertigt werden, was die Flexibilität dieses Verfahrens deutlich herabsetzt. Nitrierte Randschichten weisen, bedingt durch den hohen Härtegradienten zum Grundwerkstoff, die Problematik des Abplatzens bei hohen Flächenpressungen auf.

Randschichtwärmebehandlung im Rahmen des Forschungsvorhabens EBHeat

Im Hinblick auf die eigenen Erfahrungen zu den Standzeiten von Druckgießwerkzeugen sowie den erzielten Ergebnissen zu den Randschichtmodifikationen des X37CrMoV5-1 anderer Wissenschaftler, verfolgt das Institut für Füge- und Schweißtechnik im Rahmen des Forschungsvorhabens EBHeat Ansätze der Randschichtwärmebehandlung, die sich mittels Elektronenstrahl erzielen lassen. Infolge des Teilchencharakters der Strahlung und der damit verbundenen Möglichkeit der hochfrequenten Strahlableitung, bietet der Elektronenstrahl beim Energieeintrag in die Werkstückoberfläche eine deutlich höhere Flexibilität im Vergleich zum Laser oder zur Induktion. Das technologische Gesamtkonzept sieht dabei vor, die ofenbasierte Wärmebehandlung bei der Fertigung von Formwerkzeugen durch eine lokale und bedarfsorientierte Randschichtwärmebehandlung mittels Elektronenstrahl zu ersetzen. Ermöglicht wird dies durch den Einsatz von vorvergüteten Halbzeugen, welche vor der Randschichtwärmebehandlung bereits auf Endmaß gefertigt werden können. Das typische Schlichten bzw. ein aufwendiger Erodierprozess auf das Endmaß der Form könnten somit entfallen.

Experimenteller Ansatz

Untersucht wird ausschließlich der Festphasenprozess, wobei die Energieeinbringung des Elektronenstrahls entweder statisch oder mit einer Relativbewegung zwischen Strahl und

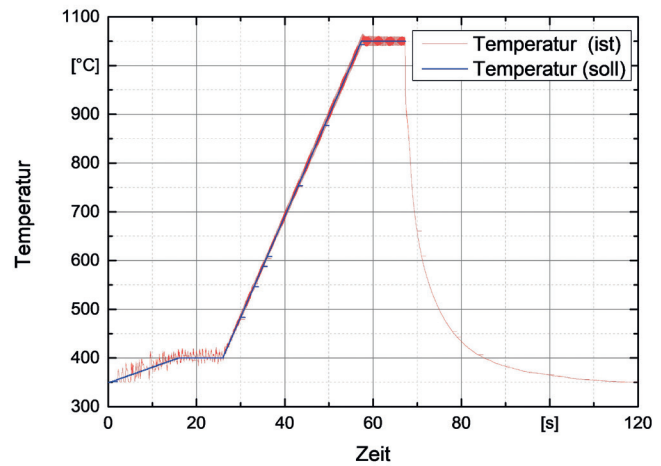
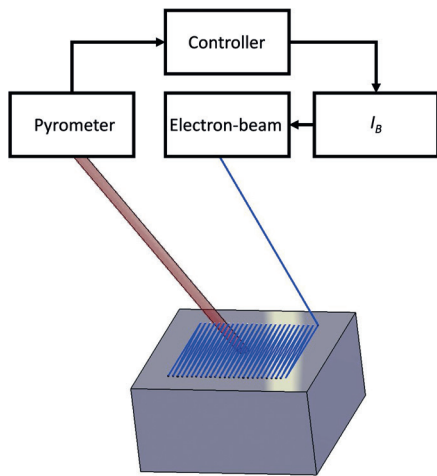


Abbildung 2: Schematisches einfaches Blockschaltbild der Regelung (a) und eine gemessene Temperaturkurve (b)

Bauteil erfolgt. In zahlreichen Vorversuchen hat sich bei dem Finden der geeigneten Anlagenparameter gezeigt, dass die Variationsmöglichkeiten sehr umfangreich sind. Zudem ist ein Arbeiten mit konstanten Parametern wie z. B. den Strahlstrom nicht immer sinnvoll. Dies resultierte zum Teil in einem Aufschmelzen der Probenoberfläche. Es empfiehlt sich daher, den Erwärmungsprozess auf die Parameter Temperatur und Haltezeit bzw. Vorschub herunterzubrechen. Bei der weiteren technischen Umsetzung wurde somit, analog zu der schematischen Darstellung in Abbildung 2a, eine Temperaturregelung mittels eines Quotientenpyrometers etabliert. Das Quotientenpyrometer lässt sich durch die 2-Kanal-Technik im Prinzip unabhängig vom Emissionskoeffizienten betreiben und eignet sich daher sehr gut für Erwärmungsprozesse blanker Stahloberflächen. Ein Beispiel für eine aufgenommene Temperaturkurve bei einem geregelten Aufheiz- und Halteprozess bis bzw. bei 1050 °C ist in Abbildung 2b dargestellt. Im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens wird das Pyrometer um eine intern installierte Infrarotkamera ergänzt, welche es zukünftig erlauben wird, Temperaturprofile auch bei komplexen, großflächigen Konturen einzustellen.

Numerische Berechnung des Gefügestandes

Neben der experimentellen Ermittlung der Wärmebehandlungsabläufe mit der Elektronenstrahlanlage werden zur Ermittlung des resultierenden metallurgischen Gefüges sowie den damit erzielbaren Härten numerische Simulationen durchgeführt. Die Simulationen erfolgen transient und dreidimensional. Zur Vereinfachung des Modells wird die Bewegung des einzelnen fokussierten Elektronenstrahls als solches nicht

berücksichtigt. Stattdessen wird die resultierende Fläche des abgelenkten Strahls über eine Ersatzwärmequelle abgebildet. Dies begründet sich mit den hochtransienten Prozessen bei der Strahlablenkung (welche bis zu 1 MHz betragen kann) und den damit einhergehenden sehr kurzen Zeitschritten bei der Simulation. Überlagernd mit der erforderlichen feinen Vernetzung der zu behandelnden Bereiche (vgl. Abbildung 3) zur Kalkulation des Gefüges, würden sich unverhältnismäßig lange Rechenzeiten ergeben. Die thermodynamischen Prozesse basieren auf den bekannten Wärmeübertragungsgesetzen. Zur Kalkulation des Gefüges werden die Modelle nach Leblond und Devaux für diffusionsgesteuerte Umwandlungen bzw. Koistinen und Marburger für die diffusionslose martensitische Umwandlung herangezogen. Hierfür wurden die einzelnen Abkühlkurven des X37CrMoV5-1 mit den jeweiligen zu erwartenden Gefügeanteilen in das Modell implementiert.

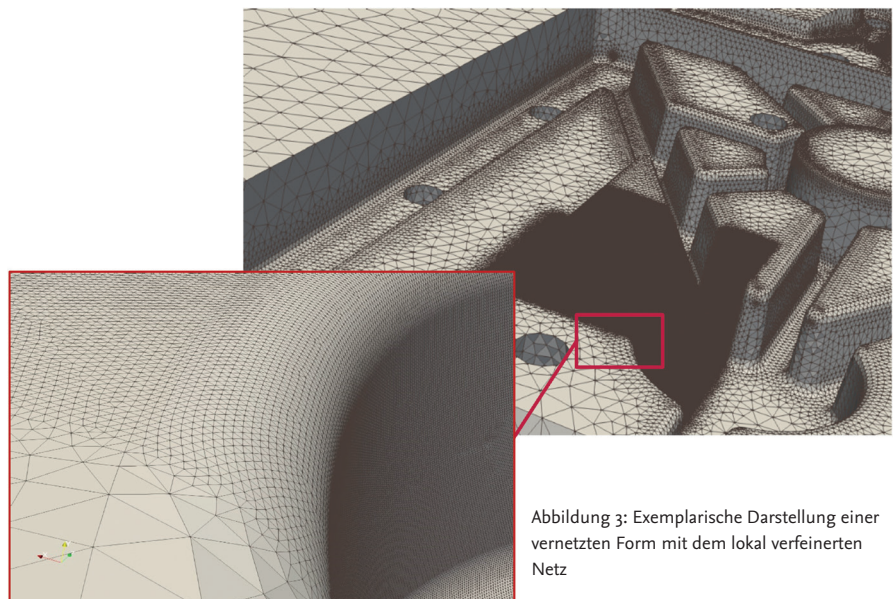


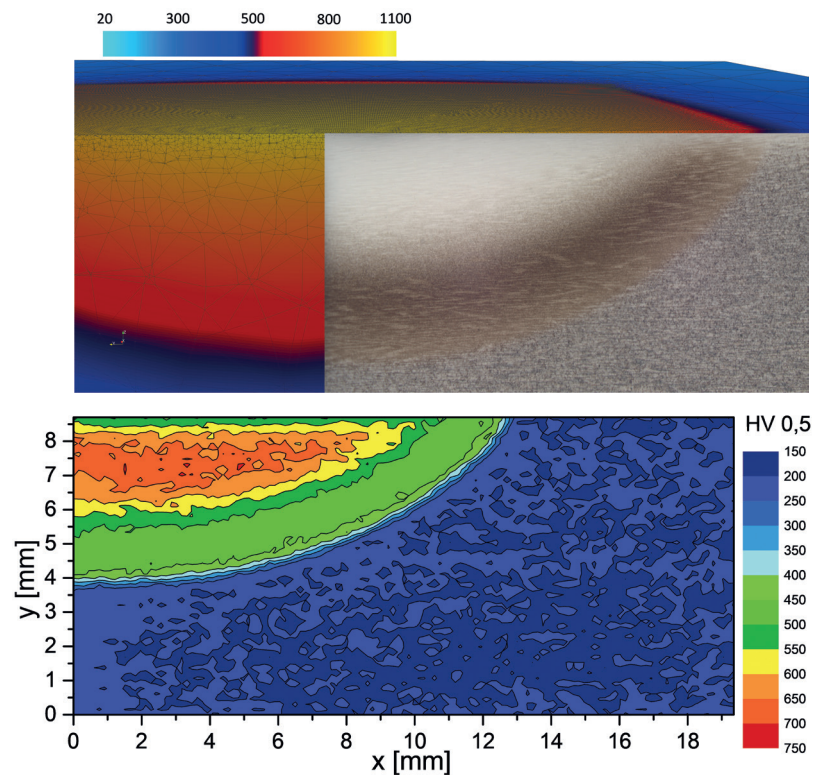
Abbildung 3: Exemplarische Darstellung einer vernetzten Form mit dem lokal verfeinerten Netz

Für die Validierung werden die Temperaturfelder bei der Randschichtwärmebehandlung messtechnisch erfasst und mit den Ergebnissen der Simulation verglichen. Schritt für Schritt werden so die statische bzw. die dynamische Ersatzwärmequelle in der Simulation kalibriert. Daneben erfolgt ein Abgleich über metallographische Querschliffe sowie Messungen der Härteverteilung, wie die Abbildungen 4a und 4b beispielhaft zeigen. Die Validierung des Modells erfolgt zunächst an ebenen Probekörpern. Im weiteren Verlauf des Projekts werden die Ergebnisse auf komplexere Oberflächen und Formeinsätze übertragen. Die experimentellen Ergebnisse werden zeigen, ob das angewendete Modell zur Kalkulation des Gefüges auch unter Berücksichtigung der vorherrschenden Abkühlkurven bei einer Kurzzeitaustenitisierung, wie sie bei der Randschichthärtung vorherrscht, hinreichend genau die werkstoffkundlichen Zusammenhänge abbildet. An bereits durchgeführten praktischen Versuchen konnte gezeigt werden, dass mit einer geeigneten Regelung in Abhängigkeit von der Probegeometrie Einhärtetiefen bis 4 mm Tiefe möglich sind. Es konnten dabei an unvergüteten Proben mit einer Ausgangshärte von ca. 180 HV Härtewerte bis 700 HV in den oberflächennahen Bereichen eingestellt werden (vgl. Abbildung 4b). Das resultierende Gefüge ist in den behandelten Bereichen nahe der Oberfläche fein martensitisch und damit sehr spröde. Ein nachgeschalteter Anlassvorgang ist in diesen Fall auch in Hinsicht auf die Ausscheidung von Sekundärkarbiden zwingend erforderlich. Das Realisieren des Anlassens mit dem Elektronenstrahl ist Stand derzeitiger Untersuchungen.

Ausblick

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine lokale Wärmebehandlung Abkühlgeschwindigkeiten erzeugen kann, die in der konventionellen, ofenbasierten Wärmebehandlung entweder technisch nicht möglich sind oder aufgrund eines zu hohen Fertigungsrisikos (Härterisse, Verzug) nicht durchführbar sind. Basierend auf der modifizierten Temperaturführung wird davon ausgegangen, dass gegenüber der konventionellen ofenbasierten Wärmebehandlung eine Standzeiterhöhung von ungefähr 20 % erreicht werden kann. Diese Annahme, die sich auf thermisch induzierte Defekte an der Formoberfläche bezieht, wird dadurch begründet, dass bei möglichst gleichbleibender Duktilität höhere Härten an der Werkzeugoberfläche und damit höhere ertragbare Spannungsschwingbreiten erzielt werden können. In Kombination mit den simulationsgestützten Modellen zur Vorhersage von den bekannten Schadenmechanismen kann somit ein wertvoller Beitrag zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit im Druckgießprozess geleistet werden.

Abbildung 4: Validierung des Modells anhand von Querschliff und simulierter Temperaturverteilung [°C] (a); flächige Härteverteilung gemessen mittels UCI-Härteprüfverfahren (b)



Danksagung

Das IG-Forschungsvorhaben 20552N der Forschungsvereinigung Gießereintechnik FVG wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert. Die Autoren bedanken sich für die Förderung sowie die Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses.

Autor:

Torsten Schuchardt, M.Sc

Kontakt:

t.schuchardt@tu-braunschweig.de
sebastian.mueller@tu-bs.de

Neue Projekte zu Feststoffbatterien, auf Kathoden- und Anodenseite

Zukünftige Batteriegenerationen, wie z. B. Feststoffbatterien, versprechen einen technologischen Vorsprung gegenüber klassischen Flüssig-Batterie-Systemen, der bislang noch nicht erreicht wurde. Die energiedichten- und leistungsbestimmenden Parameter in der Prozessierung und Materialauswahl sind jedoch noch nicht vollkommen verstanden. In Feststoffbatterien werden dünne Lithiummetallfolien als Anoden eingesetzt, da diese gegenüber den konventionellen Anoden aus Graphit eine Vielzahl an Vorteilen aufweisen (geringere Masse, verkürzte Ein- und Auslagerungszeiten der Ionen). Für die Großserienproduktion von Batterien dieser Generation ist das Wissen um die geeignete Prozessierung der entsprechenden Materialien ein entscheidender Faktor. Während kathodenseitig bereits eine breite Forschung betrieben wird, wird die Anodenseite bisher eher ausgeklammert.



Prozessierung von Lithium-Metall-Anoden – Konfektionierung, Handhabung und Kontaktierung

Das Institut für Füge- und Schweißtechnik strebt gemeinsam mit einem Industriekonsortium und dem Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik als Partnerinstitute der Battery LabFactory Braunschweig, die ganzheitliche Erforschung der Prozessierung von Lithium-Metall-Anoden an. Vor diesem Hintergrund haben die Institute sich in Form des Verbundprojektes ProLiMA (Prozessierung von Lithium-Metall-Anoden – Konfektionierung, Handhabung und Kontaktierung) zusammengefunden und eine Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung beantragt.

Das geplante Vorhaben ProLiMA zielt auf eine Untersuchung und Verbesserung der Prozessierung von Lithium-Metall-Anoden vor dem Hintergrund ihrer Anwendung in All-Solid-State Lithium-Ionen-Batterien ab. Dieser Ansatz ist aufgrund der enormen Potenziale der Lithium-Metall-Anode von hoher Relevanz, da die industrielle Verarbeitung und Prozessierung von reinem Lithium-Metall hohen Herausforderungen (u. a. die geringe mechanische als auch chemische Stabilität, ergänzt um die stark adhäsiven Eigenschaften) gegenübersteht und bisher im Kontext der Batterieproduktion nicht methodisch untersucht wurde.

Im Verbundprojekt ProLiMA werden die einzelnen Prozessschritte Handhabung, Konfektionierung und Kontaktierung der biegeschlaffen, stark adhäsiven und hoch reaktiven Li-Metallfolie unter Variation der Prozessparameter als auch -atmosphäre (Schutzgas, trockene Luft, etc.) methodisch untersucht, bewertet und Produktionskonzepte erarbeitet. Dazu werden zunächst die relevanten Anforderungen an die spezifischen Projekteinhalte (materialtechnisch, elektrochemisch und prozesstechnisch) sowie die Qualitätskriterien einzelner Zwischenprodukte definiert. Darauf basierend findet eine detaillierte Charakterisierung der zu untersuchenden Lithiumfolien statt, um eine Methodik zur Wareneingangskontrolle/Qualitätssicherung sowohl im Projekt als auch in zukünftigen



Anwendungen vorzubereiten. Hierbei stehen sowohl mechanische als auch elektrochemische Fragestellungen im Fokus der Untersuchungen. Mit diesem Wissen werden anschließend die Konfektionierung, die Handhabung und die Kontaktierung bzw. das Fügen von Lithiumfolien detailliert erforscht. Die Zwischenprodukte der Einzelprozesse werden einer elektrochemischen Charakterisierung unterzogen, um die Material- und Prozesseinflüsse auf die potenzielle Batterieperformance abschätzen zu können. Da die umgebende Atmosphäre in den Prozessen einen signifikanten Einfluss auf die (Zwischen)Produktqualität und potenziell auch auf die Prozessschritte selbst hat, wird deren Variation (Feuchtigkeitsgehalt und Prozessgas) in einem eigenen Arbeitspaket untersucht. Ziel der verknüpften Arbeiten ist es, eine materialgerechte und gleichzeitig wirtschaftliche sowie skalierbare Prozessierung von Lithium-Metall-Anoden bereitzustellen.

Mit dem Projekt wird eine robuste, effiziente und skalierbare Prozessierung von Lithium-Metall-Anoden ermöglicht, so dass nach der Bereitstellung von innovativen Kathoden und Elektrolyten die industrielle Produktion der Energiespeicher möglich ist.



“3D-SSB” - 3D-Strukturierung von Solid-State Kathoden zur Erhöhung der Leistungs- und Energiedichte

Ziel dieses Projekts ist die Steigerung der Leistungsdichte von All-Solid-State Batterie-

rien durch die gezielte Strukturierung von hochkapazitiven Kathoden. In Zusammenarbeit mit den Partnerinstituten Institut für Partikeltechnik und dem Institut für Konstruktions-technik wird innerhalb des Projektes ein Strukturbaukasten entwickelt, der Bausteine mit unterschiedlichen Zusammensetzungen und Eigenschaften beinhaltet. Auf Grundlage dieser Bausteine werden innovative additive und subtraktive Verfahren zur gezielten Herstellung von zwei- und dreidimensional strukturierten All-Solid-State Kathoden evaluiert. Zur Identifizierung geeigneter hierarchischer und gradiertes Strukturen, die zu einer Erhöhung der Leistungsdichte führen, werden Struktursimulationen durchgeführt. Mit Hilfe von verbesserten Inaktivkomponenten werden die 3D-strukturierten Solid-State Kathoden zu hochkapazitiven SSB-Zellen weiterverarbeitet, die eine Steigerung der Leistungsdichte gegenüber Zellen mit unstrukturierten Kathoden aufweisen. Dabei liegt ein Hauptaugenmerk auf den Grenzflächen innerhalb der Kathode sowie zwischen den unterschiedlichen Zell-Komponenten. Parallel wird ein Bewertungskatalog entwickelt, mit dessen Hilfe die eingesetzten Einzelprozesse hinsichtlich ihrer Skalierbarkeit auf eine industrielle Produktion bewertet werden. Dies ermöglicht die Identifizierung einer geeigneten Prozesskette zur großtechnischen Herstellung von 3D-strukturierten SSB.

Autorin:

Dr. rer. nat. Maja Kandula

Kontakt:

m.kandula@tu-braunschweig.de

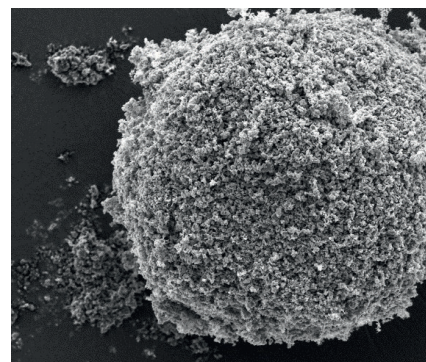


Abbildung 1: Bausteindesign in 3D-SSB
(Bild: BLB)

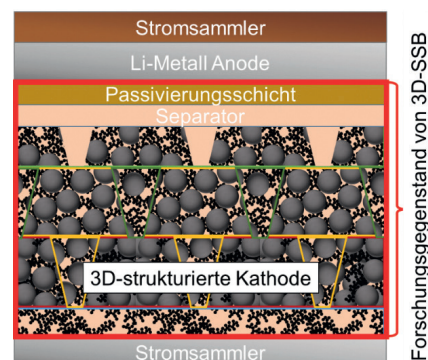


Abbildung 2: SSB mit 3D-strukturierter hochkapazitiver Kathode (Bild: BLB)

DALION

Motivation des Dalion Projektes

Die Auswirkungen des Klimawandels haben das Bewusstsein der Bevölkerung in Industrieländern für umweltfreundliches und klimaneutrales Verhalten geschärft und treiben die Entwicklung neuer, umweltfreundlicherer und effizienterer Technologien für die CO₂-produzierenden Sektoren Stromerzeugung und individuelle Mobilität voran. Die Elektromobilität wird dabei als Schlüsseltechnologie angesehen, um CO₂-Emissionen im Bereich der individuellen Mobilität zu senken. Die Batteriezellherstellung nimmt einen Anteil von ca. 50 % an den gesamten produktionsbedingten CO₂-Emissionen eines Elektrofahrzeuges ein. Neben der Nutzung von elektrischer Energie aus erneuerbaren Energiequellen muss somit auch die Produktion von Batteriezellen effizienter und damit ökologischer gestaltet werden, um eine positive CO₂-Bilanz der Elektromobilität zu erreichen bzw. aufrechtzuerhalten.

Im Rahmen des DaLion Projektes wird Wissen über die Wirkzusammenhänge der klassischen aufeinander folgenden Produktionsschritte Kalandrieren, Laserschneiden und z-Falten einer Lithium-Ionen-Zelle erarbeitet. Durch die detaillierte Betrachtung dieser Einzelprozesse und die genaue Kenntnis der Wirkzusammenhänge soll die Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit der Batterieproduktion systematisch verbessert werden. Die Optimierung dieses Prozesses geschieht über ein Data Mining Konzept. Hierzu werden alle mess- und einstellbaren Größen von Produkten und Prozessen entlang der gesamten Produktionslinie erfasst und in einer Datenbank gespeichert. Diese Daten bilden die Grundlage für eine Analyse, Bewertung und Entscheidungsunterstützung in Hinblick auf die Qualitätssicherung und Effizienzsteigerung der Produktionslinie.

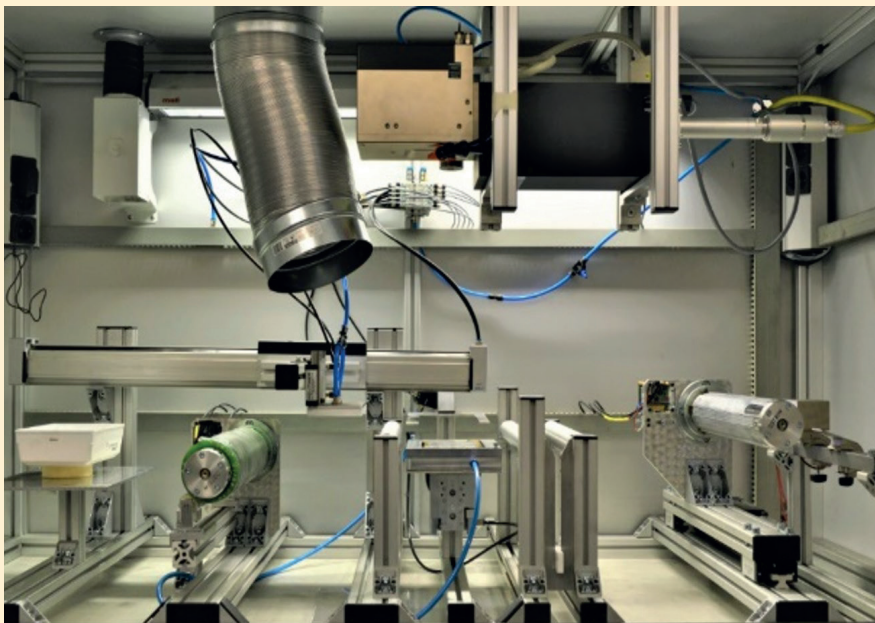
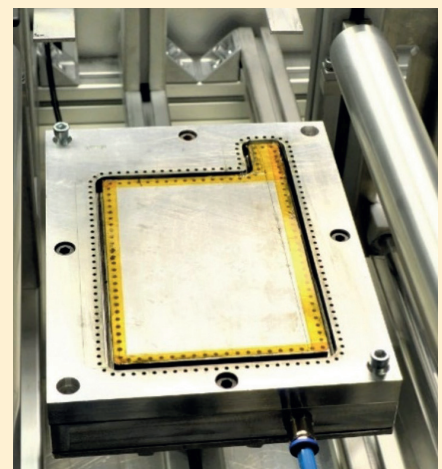


Abbildung 1:
ifs-Anlage zur Batteriezell-Konfektionierung



Forschungsschwerpunkte des ifs

Die Forschungsaktivitäten des ifs liegen im Bereich der Vereinzelung von Elektroden mittels eines gepulsten Nanosekunden-Lasers im Infrarotbereich (1062 nm). Die Elektroden werden in der eigens konzipierten und entwickelten Anlage (Abb. 1) vollautomatisch in einem diskontinuierlichen Prozess vereinzelt und magaziniert. Ziel der auf dieser Anlage durchgeführten Versuche ist es, ein Modell zu entwickeln, das die Wirkungszusammenhänge zwischen Prozessparameter, Schnittkantenmerkmale und elektrochemischer Performance beschreibt. Ein weiterer wesentlicher Teil des Projektes ist die Entwicklung einer inline Überwachung des Schneidprozesses. Hierzu wird mittels Pyrometrie die Laser-Material-Wechselwirkung des Schneidprozesses beobachtet.

Ergebnisse

Die Untersuchungen zeigen, dass neben den wesentlichen Einflussparameter der Pulsfolgefrequenz und der Verfahrensgeschwindigkeit bzw. der Linienenergie (Abbildung 3) die Reduzierung der Pulsspitzenleistung bei konstanter Pulsenergie zu einer Reduzierung der WEZ auf der Anode führt. Die Untersuchungen an großformatigen Pouchzellen zeigen, dass neben den Schnittkantenmerkmalen (Abb. 2) die Kontaminationsprodukte auf der Elektrodenoberfläche die Performance der Zelle wesentlich beeinflussen. Die elektrochemische Leistung der Elektroden oder der Zellen werden im Wesentlichen durch Kontaminationsprodukte und weniger durch die in dieser Studie untersuchte Faserbreite oder Wärmeeinflusszone beeinflusst. Basierend auf diesem Wissen ist es unerlässlich, herauszufinden, welche Kontaminationen und Konzentrationen hinsichtlich der elektrochemischen Leistung als kritisch anzusehen sind. Forschungen zu dieser Fragestellung werden seitens des ifs in dem Folgeprojekt Dalion4.0 adressiert.

Förderhinweis und Danksagung

Die BMWi-Vorhaben Dalion und Dalion 4.0 werden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Autor:

Dipl.-Ing. Tobias Jansen

Kontakt:

m.kandula@tu-braunschweig.de
 tobias.jansen@tu-braunschweig.de

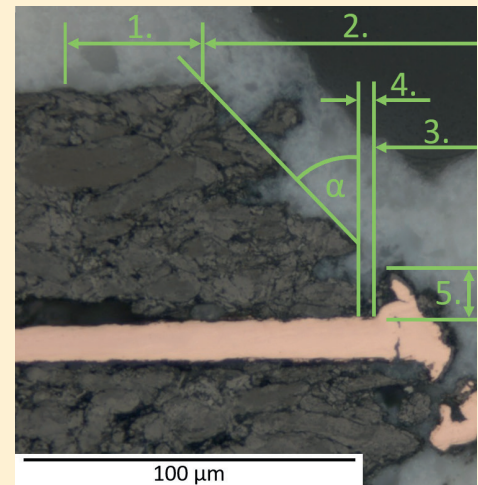


Abbildung 2. Schnittkantenmerkmale: 1. Faserbreite, 2. Wärmeeinflusszone (WEZ), 3. Schmelzbildung, 4. Ablation, 5. Schmelzüberhöhung, 6. Delamination, α Faserwinkel, (Laserparameter: 1062 nm, 72 W, 400 mm s⁻¹, 490 kHz, 240 ns)

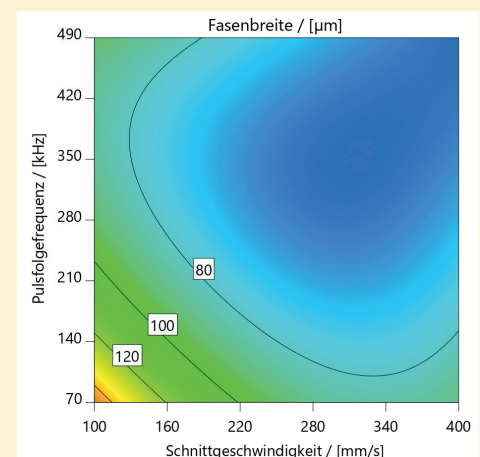
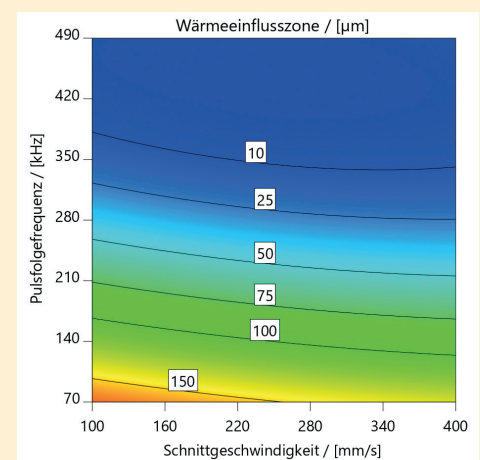


Abbildung 3: Abhängigkeit der Faserbreite sowie der WEZ auf Kathodenseite

Bericht zur zweiten Förderphase der Open Hybrid LabFactory

Im Rahmen der ersten Förderphase der Open Hybrid LabFactory (OHLF) lag der wesentliche Fokus auf der Entwicklung von Prozessen und Technologien zur Herstellung von hybriden Bauteilen. In der zweiten Förderphase (2020-2024) wird auf diesen Erkenntnissen aufgebaut, wobei insbesondere der Ansatz des funktionsintegrierten Leichtbaus verfolgt wird. Die hohe Bedeutung der funktionsintegrierten Leichtbauweise ist neben der zunehmenden Elektrifizierung und informationstechnischen Durchdringung der Fahrzeuge vor allem auf die stets wachsenden Anforderungen an eine höhere Funktionalität der Produkte und Prozesse zurückzuführen.

Folglich zielt die OHLF zukünftig verstärkt auf die Weiterentwicklung und Zusammenführung methodischer, werkstofftechnischer und produktionstechnischer Kompetenzen ab, um multifunktionale Fahrzeugstrukturen und -systeme für komplexe Anforderungskombinationen und unter der Maßgabe geringer Umweltwirkungen über den Produktlebenszyklus auslegen und wirtschaftlich fertigen zu können. Für die Erreichung übergeordneter Umwelt- und Kostenziele werden in der zweiten Förderphase Technologieentscheidungen (z.B. Materialauswahl, Bauteilauslegung) in ein systematisches Life Cycle Engineering eingebettet. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der digitalen Verknüpfung von Modellen, welche Teilaspekte des Produktlebenszyklus abbilden.

Im Rahmen der zweiten Förderphase werden drei eng miteinander verbundene Projekte geplant. Im Projekt „TechnoHyb“ erfolgt die Entwicklung einer multifunktionalen Heckklappe, wobei vor allem die Prozessentwicklung von funktionsintegriertem Spritzguss sowie die Entwicklung von funktionsintegrierten Halbzeugen im Vordergrund stehen. Das Projekt „HiFiVe“ erforscht zum einen die Variantenbildung durch innovative Werkzeug- und Halbzeugkonzepte bei der Herstellung von hybriden Bauteilen. Zum anderen werden großserientaugliche, additive Fertigungsverfahren auch vor dem Hintergrund der Funktionsintegration erforscht. Im Projekt „LCT“ erfolgt die Entwicklung von Methoden und Befähigung von Technologien zur Auslegung und Gestaltung von Bauteilen in Multimaterialbauweise mit einer integrierten, ganzheitlichen Betrachtung technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Zielgrößen über den gesamten Bauteillebenszyklus hinaus. Der Schwerpunkt befindet sich in der Bauteilnutzungsphase, der Reparatur unter Berücksichtigung der Entwicklung von Schadensanalysemethoden sowie der Aufarbeitung und Aufbereitung am Lebensende.

Das Projekt „LCT“ berücksichtigt zudem die beiden zentralen Themenfelder der OHLF Digitalisierungsstrategie, „digital integrierte Produktgestaltung“ und „Digitalisierung in der Produktion“. Die digital integrierte Produktgestaltung findet sich in einem ganzheitlichen Produktentwicklungsprozess wieder, der den gesamten Produktlebenszyklus bereits früh in der Entwicklungsphase berücksichtigt. Dabei wird auf verschiedene digitale Werkzeuge und modell- sowie auch datenbasierte Methoden zurückgegriffen. Dieses zeigt sich im Projekt „LCT“ in der frühzeitigen Berücksichtigung der Randbedingungen für die Nutzungsphase sowie in der Entwicklung von End-of-Life Optionen für ein hybrides Bauteil. Die Digitalisierung der Produktion wird durch die Datenerfassung bei der Fertigung von Demonstratorbauteilen und die daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen aufgegriffen. Insgesamt ermöglichen diese digitalen Methoden eine frühzeitige Ermittlung der Umweltauswirkungen, der Gesamtkosten sowie der technischen Funktionserfüllung über den gesamten Lebenszyklus eines Hybridbauteiles. In der Abbildung 1 sind die drei Projekte sowie die Vernetzung zwischen diesen dargestellt.

Autor:

Prof. Dr. rer. nat. Sven Hartwig

Kontakt:

s.hartwig@tu-braunschweig.de

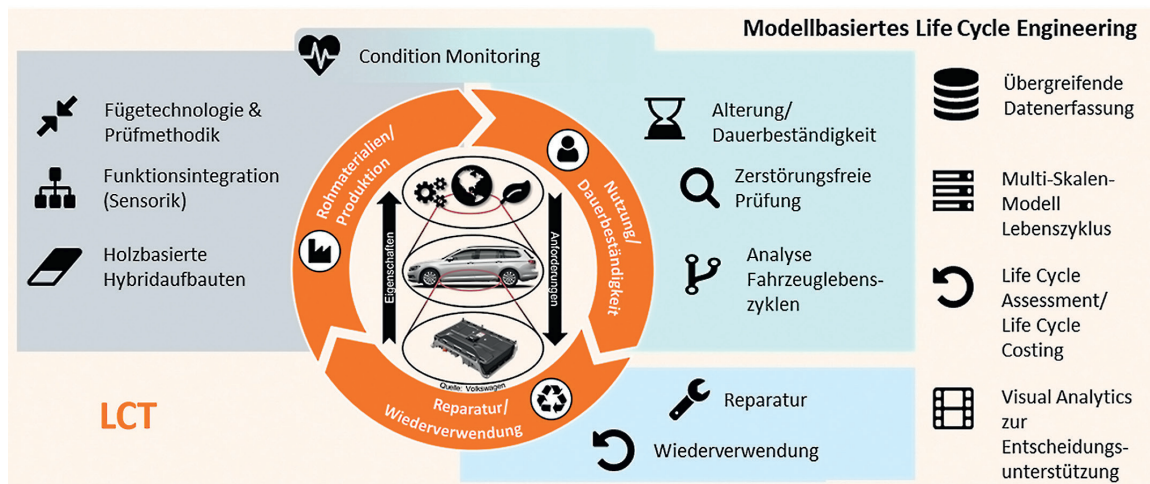
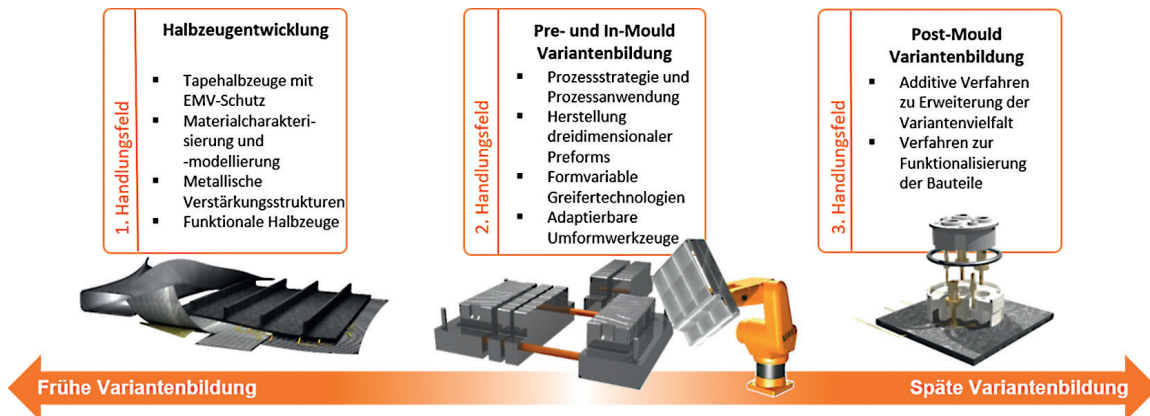
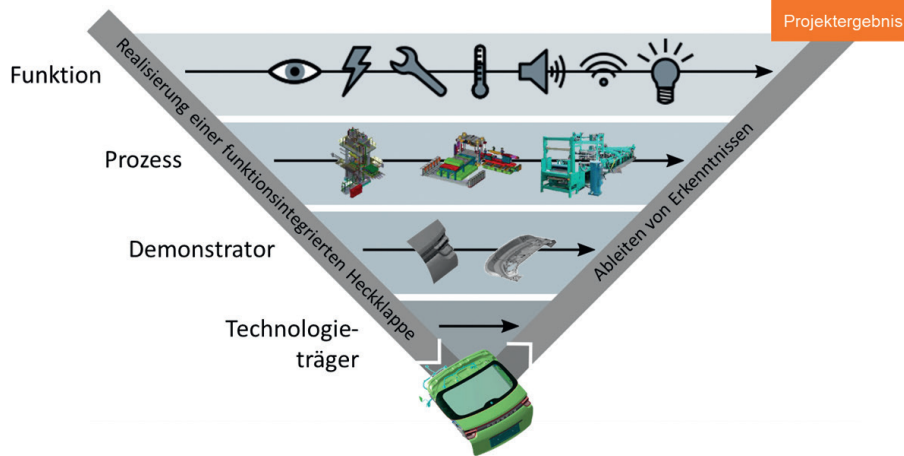


Bild oben: Institut für Konstruktionstechnik

Bilder mittig und unten: Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

Juniorprofessor am Institut für Füge- und Schweißtechnik

Seit Februar 2019 wird das Institut für Füge und Schweißtechnik durch eine neue Juniorprofessur mit dem Titel „Charakterisierung und Modifikation von Grenzschichten“ unterstützt. Besetzt wird diese Position durch Prof. Dr. rer. nat. Sven Hartwig, welcher bereits seit 2017 am Institut arbeitet und die Abteilungsleitung der Gruppe „Werkstoffverbunde und Grenzschichten“ in der Open Hybrid Lab-Factory in Wolfsburg übernommen hat.

Prof. Sven Hartwig hat an der TU Braunschweig Chemie studiert und auf dem Gebiet der Polymerwissenschaften seine Vertiefungsrichtung gewählt. Während der Promotion am Institut für Oberflächentechnik hat er sich mit der Erforschung von metallischen Verschleißschutzschichten beschäftigt, die elektrochemisch mit einer Nanopartikelverstärkung hergestellt wurden. Die Kombination dieser beiden Themenrichtungen, die Untersuchung der Fügeverfahren von metallischen und polymeren Werkstoffen, wird jetzt im hybriden Leichtbau weitergeführt und bildet den Forschungsschwerpunkt der Juniorprofessur. Weiterhin stehen hierbei vor allem die Charakterisierungsmethoden und Modifikationen der Grenzschichten für dauerhaft feste Verbindungen und eine Umsetzung von Funktionsintegrationen in hybriden Bauteilen im Fokus.

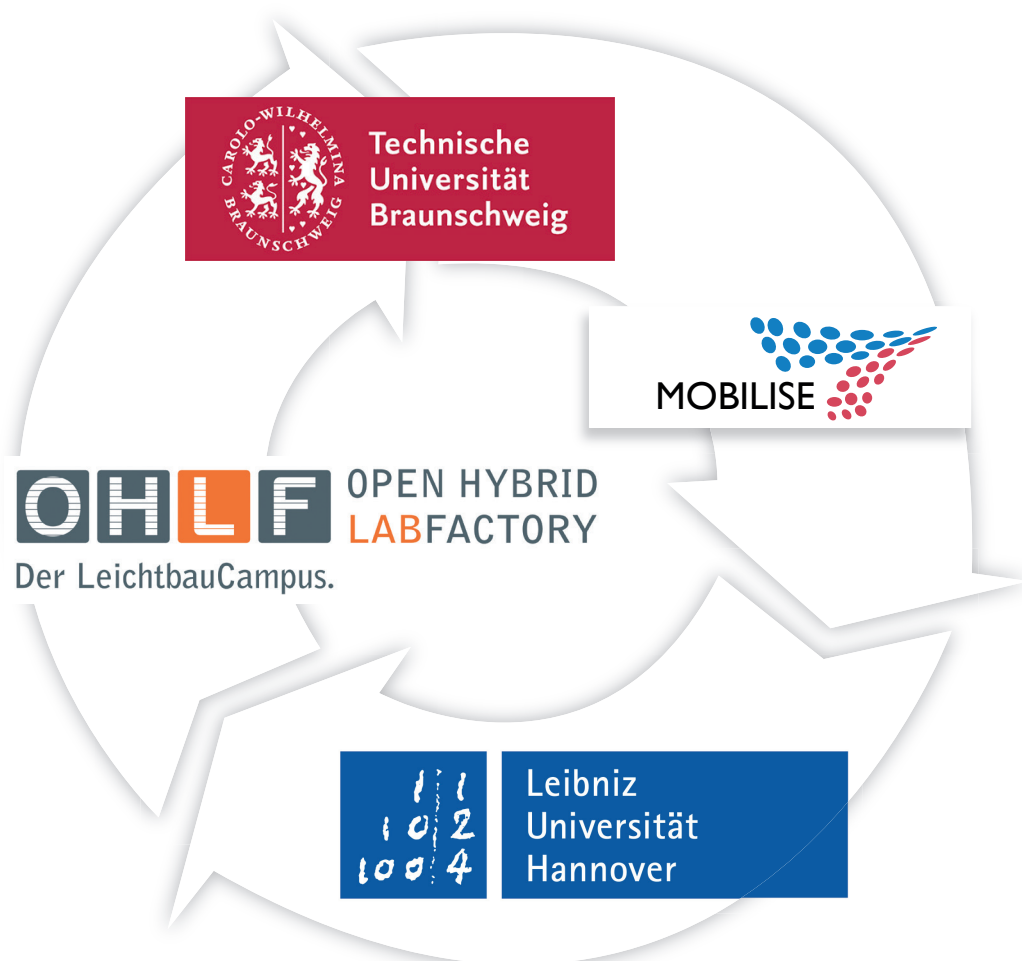
Die Juniorprofessur ist der gemeinsamen Forschungslinie „Mobilise“ der TU Braunschweig zusammen mit der Leibniz Universität Hannover zugeordnet, die Herausforderungen in den mobilitätsbezogenen Wissenschaften, insbesondere in den Fokusbereichen Digitalisierung, Energie-



Juniorprofessor Sven Hartwig

wende in der Luftfahrt, sowie Produktion und Leichtbau adressiert. Ziel ist die Bündelung von Forschungsaktivitäten und die Stärkung der internationalen Sichtbarkeit der Forschungsstandorte in Niedersachsen. Innerhalb der Fokusbereiche werden wissenschaftliche Fragestellungen und technologische Entwicklungen über Verkehrsträgergrenzen hinweg erforscht. Im Bereich Produktion und Leichtbau wird sich mit den Themenfeldern "Automobiler und massentauglicher Leichtbau" und "Fertigung und Prozessketten für den hybriden Leichtbau" auseinandergesetzt. Diese Themenfelder haben zum Ziel, den Energie- und Ressourcenverbrauch zukünftiger Mobilitätskonzepte maßgeblich zu reduzieren. Im Hinblick auf die Fertigungskette müssen Verfahrenskombinationen für eine bessere technologische Ausnutzung bestehender Fertigungsmethoden erforscht und entwickelt werden. Gegenstand der Untersuchungen im Themenfeld "Fertigung und Prozessketten für den hybriden Leichtbau" sind Bewertungsmethoden für die Fertigung und Prozesskettenauslegung hybrider Bauteile. Hierzu zählen besonders die Grenzflächen und Grenzschichten zwischen den verschiedenen Werkstoffen.

Die Nachwuchsgruppe von Prof. Hartwig erforscht Grenzschichten aus der Sicht der Fügetechnik hinsichtlich ihrer Eigenschaften, Behandlungs- und Charakterisierungsmethoden. Im Fokus der Forschungsaktivitäten steht die gezielte Einstellung der Eigenschaften von Grenzschichten, deren geeignete und industrialisierbare Charakterisierung sowie die Korrelation mit den Eigenschaften des übergeordneten Verbundwerkstoffes oder Werkstoffverbundes. Adhäsion, Benetzung sowie Korrosion bzw. Degradation stehen in direktem Zusammenhang mit der chemischen Zusammensetzung und der Morphologie von Grenzschichten. Dadurch sind Grenzschichten von höchster Relevanz für die Ausprägung der Eigenschaften hybrider Verbundsysteme und somit für eine Vielzahl von Aktivitäten im Rahmen der Mobilitätsforschung wesentlich.



Infolge der geringen geometrischen Ausdehnung ist die Charakterisierung von Grenzschichten sehr aufwändig und bestehende Erkenntnisse auf wenige spezielle Betrachtungen und Methoden beschränkt. Die Anwendung hochauflösender Analyseverfahren und die Entwicklung geeigneter Charakterisierungsmethodik am Beispiel von hybriden Bauteilen ist ein Forschungsschwerpunkt der Nachwuchsgruppe. Neben der Analytik ist die gezielte chemische und morphologische Modifikation von Grenzschichten ein weiterer Forschungsschwerpunkt. Die untersuchten Methoden zur Grenzschichtmodifizierung sind die Laserbearbeitung und -strukturierung, chemische

und elektrochemische Behandlung, Plasmabehandlung und -beschichtung, Einbau von Nanopartikeln und die molekulare Anpassung von Polymeren an der Grenzschicht.

Autor:

Prof. Dr. rer. nat. Sven Hartwig
Foto: Thomas Heinig

Kontakt:

s.hartwig@tu-braunschweig.de

Zum Rissauswandern im Kerbschlagbiegeversuch bei der Prüfung strahlgeschweißter Proben

Kerbschlagbiegeversuche sind seit Jahrzehnten ein anerkanntes Verfahren, um die Zähigkeit von Metallen zu charakterisieren. In einem Forschungsprojekt am ifs wurden Laserstrahlschweißungen mit Hilfe von Kerbschlagbiegeversuchen charakterisiert und eine Methode vorgeschlagen, mit der die Versuche, getrennt nach ihrem Rissverlauf, ausgewertet werden.

Der Kerbschlagbiegeversuch ermöglicht Aussagen über die Zähigkeit von Materialien und damit eine Beurteilung der Spröbruchneigung. Der Versuch geht auf S.B. Russell und G. Charpy zurück, welche Ende des 19. Jahrhunderts eine Reihe von bis dahin unerklärlichen Schäden im Eisenbahnsektor untersuchten. Auch heute hat der Kerbschlagbiegeversuch eine wichtige Stellung in der Charakterisierung von Grundwerkstoffen und Schweißverbindungen, insbesondere in der industriellen Praxis. So findet er sich beispielsweise in den technischen Lieferbedingungen von Stählen wieder, in denen eine bestimmte Mindestkerbschlagarbeit bei vorgegebenen Temperaturen gefordert wird. Zur genauen und normgerechten Bestimmung der Kerbschlagarbeit steht seit Ende 2018 ein modernes Pendelschlagwerk mit automatisierter Pendelanhebung am ifs zur Verfügung, welches eine anwenderfreundliche und sichere Durchführung des Kerbschlagbiegeversuchs ermöglicht.

Rissauswandern im Kerbschlagbiegeversuch

Werden Laserstrahlschweißungen mit Hilfe des Kerbschlagbiegeversuchs geprüft, so lässt sich vielfach ein Rissauswandern beobachten. Beim Rissauswandern bewegt sich der Riss während des Versuchs aus dem Schweißnahtbereich, welcher ursprünglich gekerbt wurde, in andere Bereiche der Schweißnaht. Häufig ist dies der Fall, wenn eine im Vergleich zum Grundwerkstoff harte Schweißnaht, beispielsweise in einem Baustahl, geprüft wird und der Kerb in die Schweißnaht gelegt wird. Durch das Rissauswandern gibt die ermittelte Kerbschlagarbeit keine Information über den ursprünglich avisierten Schweißnahtbereich, sondern bildet einen integralen Wert über alle während des Rissfortschritts durchwanderten Bereiche.



Abbildung 1: Modernes Kerbschlagbiegewerk mit automatischer Pendelanhebung und externer Probertemperaturung (rechts unten), wie es seit Ende 2018 am ifs zur Verfügung steht | Fotomontage: Das Umwälzthermostat ist von der Peter Huber Kältemaschinenbau AG und das Kerbschlagwerk von der Walter + Bai AG (Bilder sind ebenso von den Unternehmen)

Experimentelle Untersuchungen

Um das Phänomen des Rissauswanderns näher zu beleuchten, wurden in einem Forschungsprojekt am ifs (IGF-Nr. 18.187 N) eine große Anzahl an Kerbschlagarbeits-Temperatur-Kurven aufgenommen. Hierfür wurden laser- und elektronenstrahlgeschweißte Proben aus drei Baustählen (S355NL, S690QL und S960QL) in drei verschiedenen Blechdicken (10 mm, 15 mm und 30 mm) genutzt. Alle Proben wurden mit einem Kerb in der Schweißnaht versehen. Bei der Auswertung der Versuche zeigte sich ein temperaturabhängiges Verhalten, welches in Abbildung 2 dargestellt ist: In der Tieflage und im unteren Übergangsbereich (grün umrandet) verbleibt der Riss in der Schweißnaht (SN), in der Hochlage (violett umrandet) wanderte der Riss immer in den Grundwerkstoff (GW) aus. Das Auswandern in die Fusionslinie (FL) im Übergangsbereich

(blau umrandet) zeigte sich nicht durchgehend. Bisher wurden zur Darstellung von Kerbschlagarbeits-Temperatur-Kurven in der Regel sigmoidale oder andere, überwiegend punktsymmetrische Ausgleichsfunktionen genutzt. Dieses Vorgehen wird strahlgewweißten Nähten allerdings aufgrund des Rissauswanderns nicht gerecht, da eine Ausgleichsfunktion Proben mit unterschiedlichem Verhalten verbinden würde. Darüber hinaus zeigen die Kerbschlagarbeits-Temperatur-Kurven strahlgewweißter Nähte häufig keinen durchgehenden Verlauf, sondern es kommt zu einem bimodalen Verhalten: Bis zu einer bestimmten Temperatur verbleibt der Riss in der Schweißnaht, es resultieren im Vergleich geringe Zähigkeiten. Beim Überschreiten einer charakteristischen Temperatur entwickelt sich dann ein Rissauswandern in den Grundwerkstoff, die ermittelte Kerbschlagarbeit dieser Proben ist höher. Wird eine solche Kerbschlagarbeits-Temperatur-Kurve mit einer kontinuierlichen Funktion ausgewertet, so würde durch die Funktion auch ein Bereich zwischen den beiden Extrema abgebildet, welcher nicht durch Versuche belegt werden kann.

Daher wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens ein Vorgehen vorgeschlagen, welches die Kerbschlagarbeits-Temperatur-Kurve in verschiedene Bereiche aufteilt, welche sich an dem Rissverlauf orientieren. Hierzu ist eine Klassifizierung der Rissflächen und insbesondere des Rissverlaufs nach dem Versuch notwendig. Dies kann überwiegend durch makroskopische Betrachtung geschehen, nur in wenigen Fällen wird eine aufwendigere Bestimmung des Rissverlaufs im metallographischen Querschliff notwendig. Innerhalb der einzelnen Bereiche

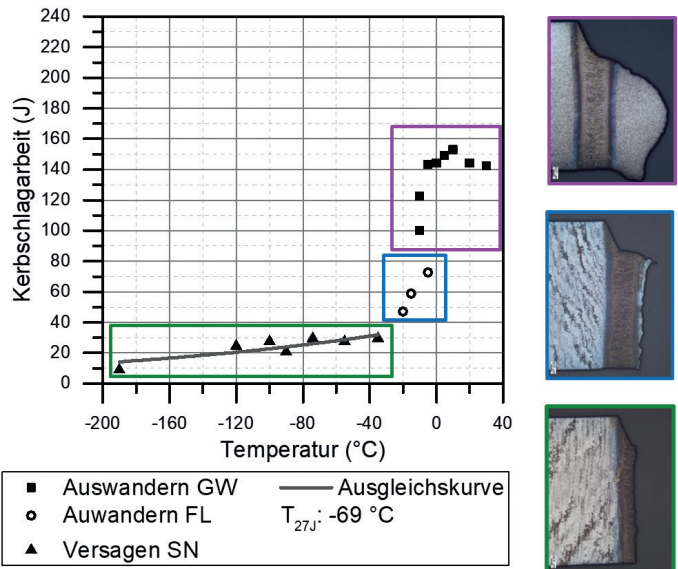


Abbildung 2: Rissverlauf im Kerbschlagbiegeversuch

(Rissverlauf in der Schweißnaht, Auswandern in die Fusionslinie und Auswandern in den Grundwerkstoff) kann nun jeweils eine eigene Ausgleichsfunktion genutzt werden. Da im durchgeführten Forschungsprojekt ein Vergleich der Schweißnähte mit den Anforderungen aus den technischen Lieferbedingungen der Grundwerkstoffe angestrebt war, wurde jeweils eine Ausgleichsfunktion durch die Proben gelegt, deren Riss in der Schweißnaht verblieben war. Die technischen Lieferbedingungen der untersuchten Stähle fordern in der Regel eine

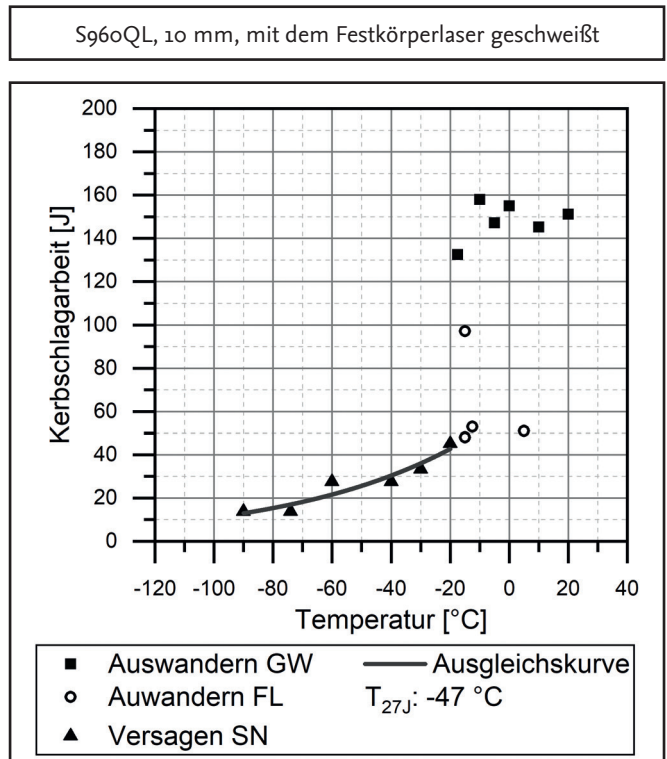
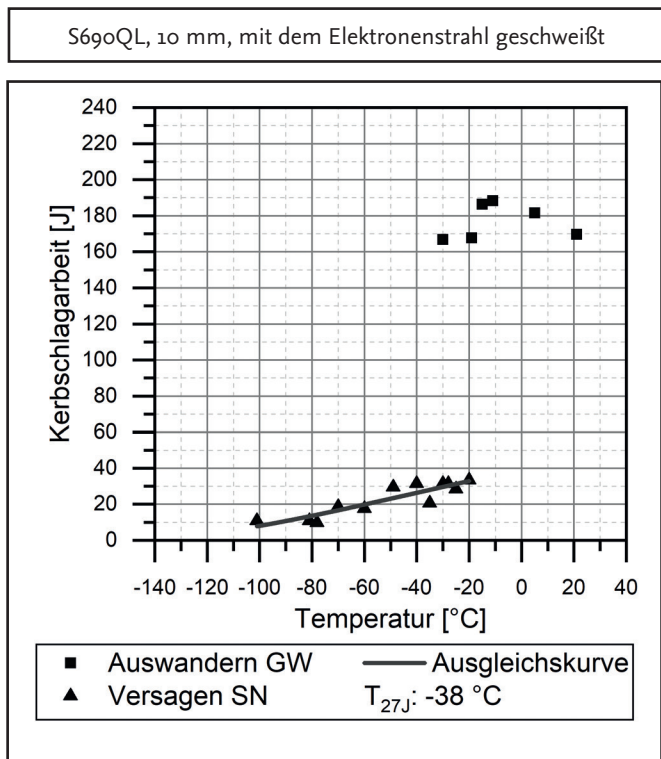
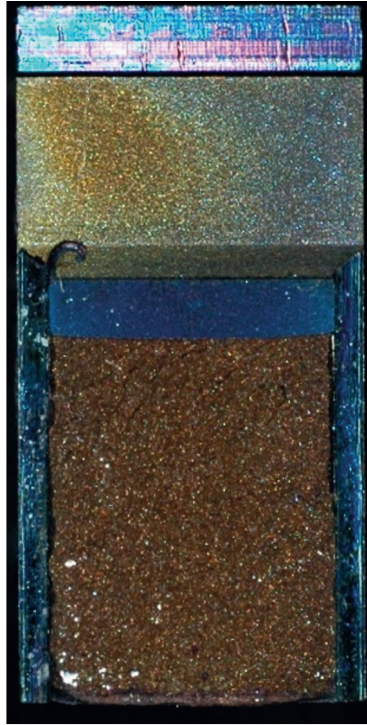


Abbildung 3: Exemplarische Kerbschlagarbeits-Temperatur-Kurven strahlgewweißter Stähle



Gefräster Kerb

Erodierter Kerb

**Anfangriss
(Schwingriss)**

Restbruchfläche

Abbildung 4: Prüfaufbau des Bruchmechanikversuchs (links) und Bruchfläche einer Bruchmechanikprobe (rechts)

Mindestkerbschlagarbeit von 27 J bzw. 40 J bei einer bestimmten Temperatur. Mit Hilfe der gewählten Ausgleichsfunktion war ein Vergleich der ermittelten Werte mit den normativen Anforderungen möglich.

Abbildung 3 zeigt exemplarisch zwei der ermittelten Kerbschlagarbeits-Temperatur-Kurven für zwei unterschiedliche Werkstoffe (S690QL und S960QL) sowie mit zwei unterschiedlichen Strahlschweißverfahren geschweißt (Laser und Elektronenstrahl). Beide Kurven zeigen das charakteristische Nahtauswandern. Es zeigt sich ebenfalls, dass die vorgeschlagene Art der Auswertung zu einer guten Anpassung der Ausgleichsfunktion an die Messwerte führt.

Fazit

Der Kerbschlagbiegeversuch bietet auch heutzutage noch die Möglichkeit, bei Werkstoffen und deren Fügeverbindungen eine ausreichende Zähigkeit nachzuweisen. Durch die Verknüpfung mit den technischen Lieferbedingungen und ihrer weiten Verbreitung in der Praxis sind sie gut geeignet, um Erkenntnisse aus Forschungsprojekten mit einer Zähigkeitsanforderung zu verknüpfen und so einen schnellen Ergebnistransfer zu gewährleisten.

Das durchgeführte Forschungsprojekt hat gezeigt, dass das Rissauswandern bei strahlschweißten Nähten im Kerbschlagbiegeversuch durchgehend bei allen Kerbschlagarbeits-Temperatur-Kurven nachzuweisen war. Dieser Effekt tritt allerdings nur im Übergangsbereich und in der Hochlage der Kerbschlagarbeits-Temperatur-Kurve auf, sodass die Werte im unteren Übergangsbereich und in der Tieflage genutzt werden

können, um Aussagen über den anvisierten Schweißnahtbereich zu treffen. Hier bietet es sich an, diesen Bereich mit einer getrennten Ausgleichsfunktion zu bewerten und damit von den bisher verbreiteten sigmoidalen Funktionen abzuweichen. Zusätzlich wurden im Projekt Bruchmechanikversuche und bauteilähnliche Großzugversuche durchgeführt, welche gezeigt haben, dass eine Ableitung des tatsächlichen Bauteilverhaltens aus Kerbschlagbiegeproben nicht möglich ist: Auch in Temperaturbereichen, in denen bei den Kerbschlagbiegeproben bereits ein Auswandern in den Grundwerkstoff zu beobachten war, konnte dies im Bruchmechanikversuch nicht nachgewiesen werden. Es zeigt sich somit, dass die größere Kerbausrundung und die höhere Belastungsgeschwindigkeit im Kerbschlagbiegeversuch signifikante Auswirkungen auf die Neigung zum Rissauswandern haben. Für detaillierte Probencharakterisierungen und für Abschätzungen des Rissverlaufs in realen Bauteilen sind daher weitergehende Untersuchungen mittels Bruchmechanikversuchen (Abbildung 4) und Bauteilproben unerlässlich, da diese Proben durch vorheriges Anschwingen einen Anriss aufweisen, wie er auch in realen Bauteilen als Folge schwingender Belastungen entstehen kann.

Autorin:

Ann-Christin Hesse, M.Sc.

Ansprechpartner:

a.hesse@tu-braunschweig.de

Neuzugänge 2019



Wir haben einen neuen Juniorprofessor!

Im Januar 2019 wurde **Sven Hartwig** die Ernennungsurkunde zur Professur "Charakterisierung und Modifikation von Grenzschichten" übergeben.



Seit Februar 2019 ist **Sven Grünke** am ifs in der Abteilung Festigkeit und Bauteilverhalten tätig. Er beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit der Nutzung von Potentialen höherfester Stähle durch Schweißprozessoptimierung und Entwicklung neuer lokaler Bemessungskonzepte.



Im März 2019 kam **Johanna Müller** als neue Kollegin in die Abteilung Schweiß- und Strahltechnik. Nach ihrem Studium an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg bearbeitet sie aktuell Fragestellungen zum Reparaturschweißen von Stahlbauwerken unter Betriebsbeanspruchung.



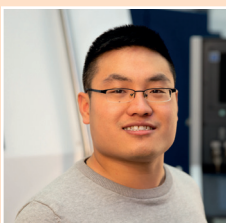
Tamás Tóth hat bereits im vergangenen Jahr ein Praktikum am Institut absolviert. Nach seinem erfolgreichen Studium an der TU Budapest unterstützt er seit April 2019 die Arbeitsgruppe Schweiß- und Strahltechnik mit dem Schwerpunkt Elektronenstrahlschweißen von Duplex-Stählen.



Nach ihrem Studium an der HAWK Hildesheim in Advertising Design ist **Christiane Milizia** seit Juni 2019 am ifs als Grafikdesignerin. Sie ist Ihre Ansprechpartnerin bei der Visualisierung von Präsentationen, dem *ifs report*, Visitenkarten, Logos, Social Media, Videos und der Bibliotheksverwaltung.



Lars Oliver Schmidt ist seit September 2019 am ifs tätig. Nach seinem Studium des Bio- und Chemieingenieurwesens an der TU Braunschweig unterstützt er nun die Arbeitsgruppe Faserverbund & Elektromobilität, insbesondere im Projekt ProLiMa. Zuvor arbeitete er als Hilfwissenschaftler für das ifs.



Seit dem 01.11.2019 verstärkt **Jiamin Sun** die Arbeitsgruppen Festigkeit & Bauteilverhalten und Schweiß- & Strahltechnik bei der Lösung anwendungsorientierter Fragestellungen der Schweißstruktursimulation. Hierbei kann er auf seine fundierten Kenntnisse aus der kürzlich am ifs abgeschlossenen Promotion zurückgreifen.

Ehre wem Ehre gebührt

Gleich vier Auszeichnungen haben in diesem Jahr dem Institut auch überregionale Aufmerksamkeit beschert. Prof. Klaus Dilger, Dr. Jonas Hensel und unser ehemaliger Mitarbeiter Holger Kunz wurden für ihre Arbeiten ausgezeichnet.

Prof. Klaus Dilger erhielt auf der diesjährigen Fachkonferenz „adhesion '19“ (Bristol, UK) Anfang September die „De Bruyne Medal“, eine Auszeichnung der „Society for Adhesion & Adhesives - SAA“ in Großbritannien. Die Auszeichnung wird alle drei Jahre an Wissenschaftler und Ingenieure vergeben, die sich genau wie der Namensgeber, Norman Adrian de Bruyne, im Cambridge der 1920er- bis 1940er-Jahre um Fortschritte im Bereich der Klebtechnik und Verbundwerkstofftechnik verdient gemacht haben. So spannte auch der Vortrag von Prof. Dilger den Bogen von der allgemeinen Klebtechnik über die modernen Anwendungen im Automobilbau bis zur Gründung der Open Hybrid Lab Factory - OHLF.

Der zweite Preis ging an Dr. Jonas Hensel. Im Rahmen der 72. IIV Annual Assembly and International Conference wurde Dr. Jonas Hensel der Henry-Granjon-Preis in der Kategorie C für seine Untersuchungen zum Thema „Mean stress correction in



Prof. Klaus Dilger bei der Auszeichnung in Bristol. Auf den oberen Abbildungen ist die „De Bruyne Medal“ zu sehen


fatigue design under consideration of welding residual stress“ überreicht. Dem noch nicht genug erhielt Dr. Jonas Hensel in Zusammenarbeit mit Markus Köhler und Tamás Tóth im Oktober diesen Jahres den „Best-Poster-Award“ bei der International Conference on Advanced Joining Processes für das Poster zum Thema „Effects of reduced ambient pressure and beam oscillation on gap bridging ability during solid state laser beam welding“.

Ebenfalls ausgezeichnet wurde Holger Kunz mit dem diesjährigen 35. Technologietransferpreis der IHK Braunschweig. Verliehen wurde der Preis für die von Holger Kunz mitentwickelte Formhand-Technologie, welche es ermöglicht, mit einem geringen Aufwand unterschiedlichste Gegenstände greifen, anheben und positionieren zu können. Anwendung findet die Formhand-Technologie in flexiblen sowie anpassungsfähigen Greifern für Industrieroboter.


Autoren:

- Dipl.-Ing. Gregor Wisner
- Johanna Müller, M.Sc.
- Dipl.-Ing. Markus Köhler
- Dipl.-Ing. Jens Phillip

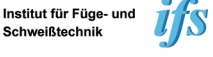




Technische Universität Braunschweig



WGF
Wissenschaftliche Gesellschaft
für Gewerbe und Dienstleistungen



Institut für Füge- und Schweißtechnik ifs

Effects of reduced ambient pressure and beam oscillation on gap bridging ability during solid state laser beam welding

Markus Köhler | Tamás Tóth | Jonas Hensel | Klaus Dilger
Technische Universität Braunschweig | Institut für Füge- und Schweißtechnik
markus.koehler@tu-braunschweig.de | Telefon +49 (0) 531 391-95575

Motivation

- Small focus diameters of modern solid state lasers lead to a decrease in gap bridging capability
- Increasing demands for accuracy and manufacturing tolerances of the parts to be welded
- Additional cost for weld seam preparation and cleaning of components

Challenge:
Improvement of gap bridging capability for reliable laser beam welding of joints containing manufacturing-related tolerances

Approach

- Determination of the limitations regarding gap bridging capability during laser beam welding using solid state laser
- Identification of the influences of a reduced ambient pressure on gap bridging capability due to change in melt viscosity
- Development of applicable beam oscillation patterns for enhanced gap bridging capability while obtaining high weld seam quality

Results

- Reduction of spatter formation and change of weld seam geometry with decreasing ambient pressure during welding
- Regardless of ambient pressure, gaps > 0.1 mm represent a challenge during laser beam welding with stationary beam
- Improved gap bridging capability at low welding speeds (≤ 1.0 m/min) due to broader weld seam geometry
- Beam oscillation is capable of shaping the weld seam geometry
- Weld seam geometry depends on oscillation pattern due to different energy deposition during welding

Outlook

- Extending the process boundaries regarding gap bridging capability through combination of beam oscillation and reduced ambient pressure
- Transferability of the results on welding of different materials (e.g. dissimilar joints)
- Component scale process application and feasibility study on laser beam welding at reduced ambient pressure

Acknowledgements

The IGF-research project 19 732N of the Research Association FOSTA-Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. is funded by the AIF within the program to promote Joint Industrial Research (IGF) by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, following a decision by the German Bundestag


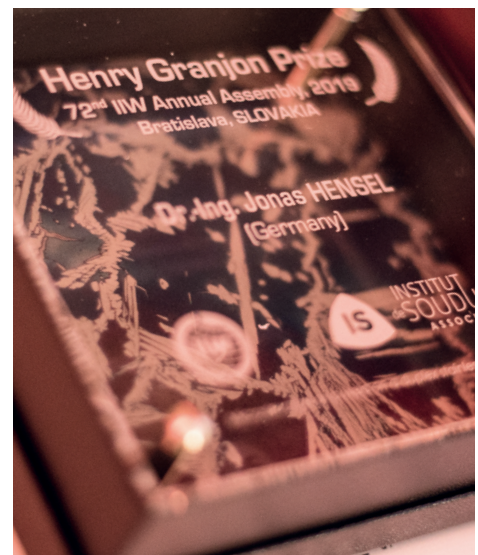


Abbildung oben: Das Poster mit dem Jonas Hensel und seine Gruppe den „Best-Poster-Award“ gewonnen haben

Abbildung Mitte links: Holger Kunz erhält den diesjährigen Technologietransferpreis der IHK Braunschweig
Foto: André Pause (IHK)

Abbildungen unten: Dr. Jonas Hensel bei der Verleihung des Henry Granjon Preis in Bratislava | Fotos: IIW



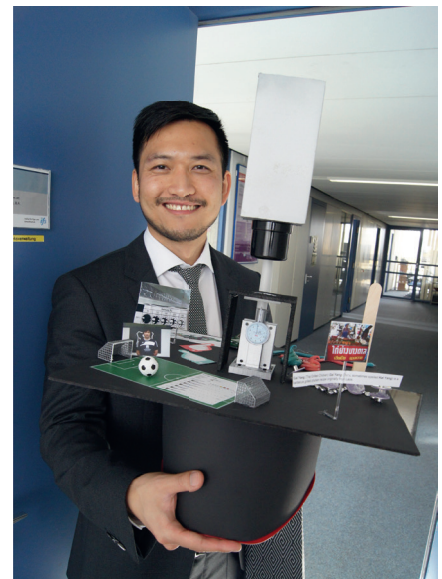
8 neue Dokortitel im Jahr 2019

Das Jahr 2019 war geprägt von zahlreichen Promotionen am ifs. Wir wünschen den Doktoranden alles erdenklich Gute auf ihrem weiteren Weg und hoffen, dass sie die Zeit am ifs in guter Erinnerung behalten!



David Matthias Blass verteidigte seine Doktorarbeit „Qualifizierung von Klebvorbehandlungsverfahren für Faserverbundkunststoffe – Anwendungsfall 3 µm-Laserstrahlung“ am 20. Mai vor den Referenten Prof. Klaus Dilger und Prof. Peter Horst.

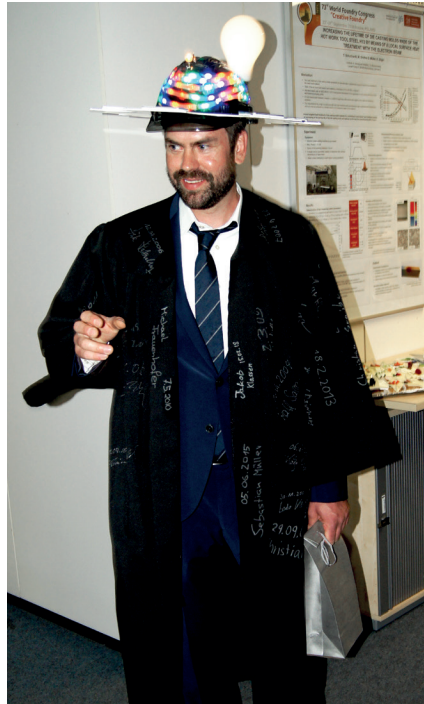
KRISTIAN LIPPKY verteidigte seine Doktorarbeit „Laservorbehandlung metallischer Fügeteile für das wärmeunterstützte Pressfügen“ am 23. September vor den Referenten Prof. Klaus Dilger und Prof. Klaus Dröder.



Kai Mi Yang überzeugte die Prüfungskommission Prof. Klaus Dilger und Prof. Stefan Böhm (Uni Kassel) am 16. Oktober. Der Titel seiner Arbeit lautet: „Viskose Fingerbildung in Klebungen des Fahrzeugbaus mit einkomponentigen Epoxidharzklebstoffen.“

Mathias Wendt

verteidigte seine Doktorarbeit „**Experimentelle Untersuchungen von Dünnschicht Lotsystemen**“ am 29. April vor den Referenten Prof. Klaus Dilger und Prof. Claus-Peter Klages.

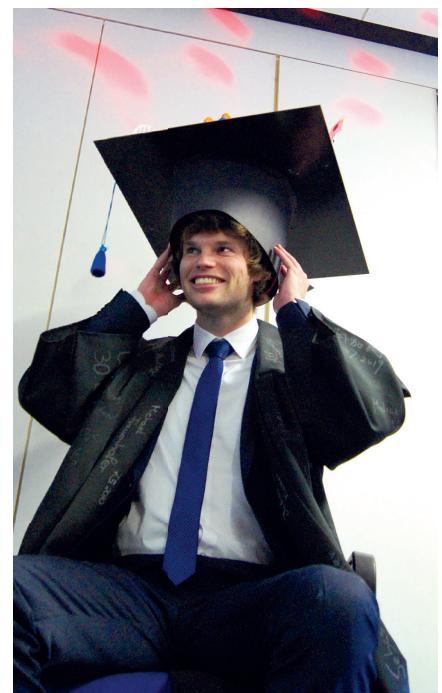


Gerrit Conermann

reichte den Titel „**Injektionskleben von Strukturbauteilen mit hochreaktiven 2K-PUR-Systemen**“ ein. Am 29. November wurde er von Prof. Klaus Dilger und Prof. Gerd Habenicht (TU München) geprüft.

Jiamin Sun

verteidigte seine Doktorarbeit „**Influence of heat input model parameters on the simulated properties in ferritic steel weldments**“ am 16. Juli vor den Referenten Prof. Klaus Dilger und Prof. Jean Pierre Bergmann (TU Ilmenau).




Dominik Schlingmann

verteidigte seine Doktorarbeit „**Einfluss einer hygromechanischen Beanspruchung auf das Eigenschaftsprofil eines Epoxidharzklebstoffes**“ am 17. Oktober vor den Referenten Prof. Klaus Dilger und Prof. Uwe Reissen (RWTH Aachen).

Tobias Reincke

verteidigte seine Doktorarbeit „**Die Fügezone als kritisches Element bei der kontinuierlichen Herstellung von hybriden Faserverbund-Metall Profilen**“ am 30. September vor den Referenten Prof. Klaus Dilger und Prof. Klaus Dröder.



Technische Universität Braunschweig
Institut für Füge- und Schweißtechnik
Geschäftsführender Leiter
Universitätsprofessor Dr.-Ing. K. Dilger

Langer Kamp 8
38106 Braunschweig
Deutschland

Tel. +49 (0) 531 391-95501
Fax +49 (0) 531 391-95599

E-Mail: ifs@tu-braunschweig.de
www.tu-braunschweig.de/ifs

IMPRESSUM

Herausgeber: Institut für Füge- und Schweißtechnik
Verantwortlich: K. Dilger
Redaktion: S. Müller
Grafik: C. Milizia

