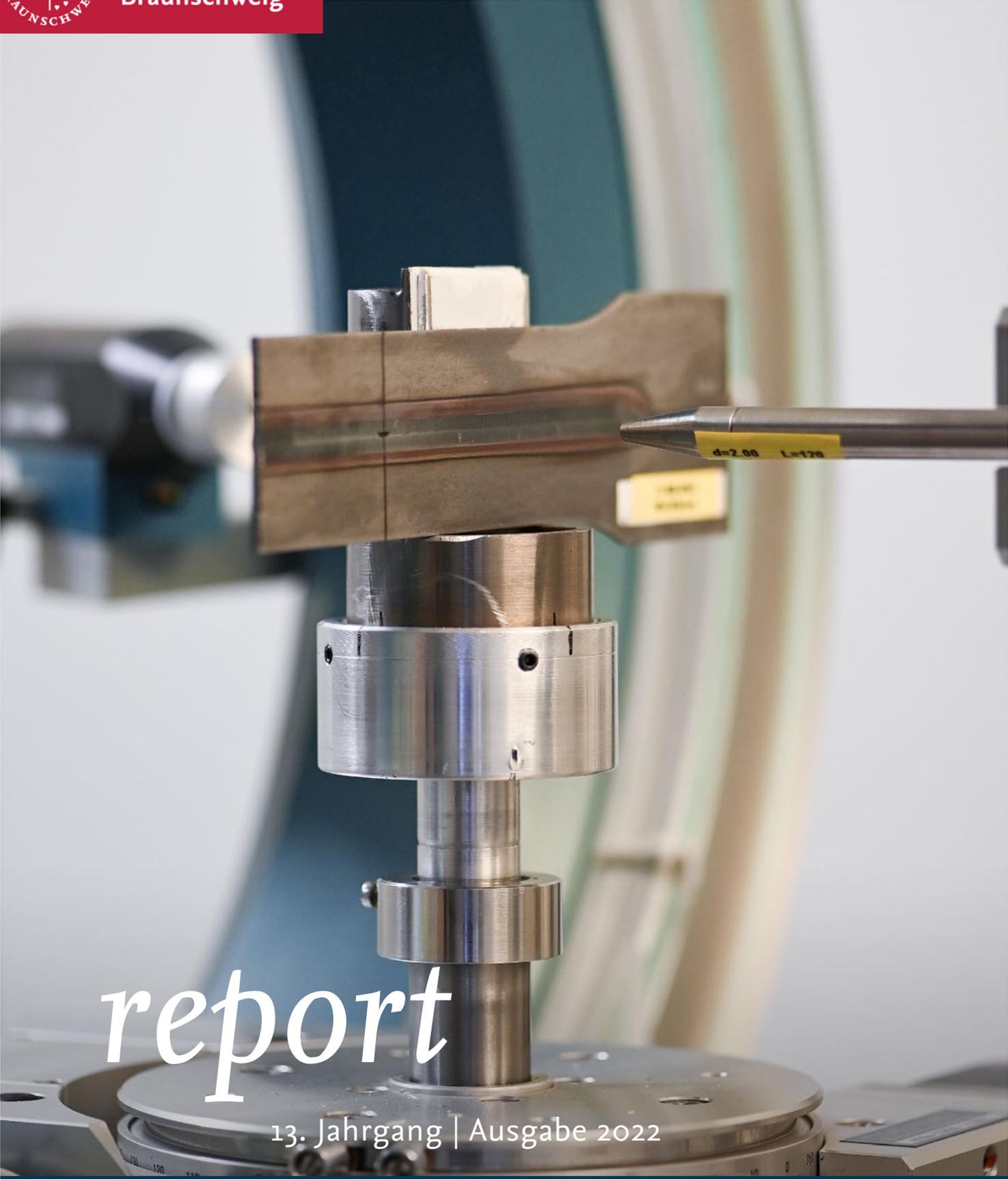




Technische  
Universität  
Braunschweig

Institut für Füge- und  
Schweißtechnik

*ifs*



*report*

13. Jahrgang | Ausgabe 2022

# INHALT

## Berichte aus der Forschung

Prüflabor für Eigenspannungsanalysen erfolgreich akkreditiert .....	4
35 Jahre Fördergemeinschaft Druckgießforschung und die Geschichte vom Leichtmetallzentrum Soltau .....	6
Vorhersage der mechanisch-technologischen Eigenschaften von Aluminium-Druckguss Bauteilen .....	10
Bauen und Sanieren mit Holz-Sandwich-Verbindungen .....	14
Elektronenstrahlschweißen von Duplex-Stahl mit Nickelbasis- zusatzwerkstoff ohne Wärmenachbehandlung .....	18
Entwicklung innovativer Trocknungstechnologien für die Lithium-Ionen-Batterieproduktion .....	22
Untersuchung der Einflüsse des Spritzgießprozesses auf die Klebarkeit von Thermoplasten .....	26
Design von Klebverbindungen in der additiven Fertigung .....	29
MoNoPoLi - Neue Nachwuchsgruppe am ifs .....	33
Qualifizierung thermografischer Verfahren zur Schweißnahtprüfung .....	36

## Abgeschlossene Forschungsvorhaben

Thermo-hygro-mechanische Charakterisierung und kontinuumsmechanische Modellierung schnell härtender Polyurethan-Klebstoffe .....	41
Erweiterung des Verarbeitungsspektrums von laserstrahlgeschweißten Komponenten durch den Einsatz einer Strahlablenkung und reduzierten Umgebungsdruck .....	42
Erhöhung der Sicherheit von Pouchzellen durch Standardisierung des Zellformats und Einbringung von Sicherheitsmechanismen auf Zellebene .....	43
Mechanisches Verhalten von Silikonklebstoffen in Abhängigkeit der Belastungsdauer (Kurzzeit-, Langzeit- und Schwingbelastung) .....	44
Elektronenstrahlschweißen von Kupfer-Hairpins für die Elektromobilität .....	45

## Veranstaltungen

Advanced Joining Processes (AJP) 2021 .....	46
Assistentenseminare .....	47

## Auszeichnungen

Neue Dokortitel .....	48
Berufungen .....	49

Neuzugänge .....	50
------------------	----

# EDITORIAL



Sehr geehrte Damen und Herren,  
liebe Ehemalige und Freunde des Instituts für Füge-  
und Schweißtechnik,

nach zwei Jahren Pandemie und fast drei Monaten des Krieges in der Ukraine haben wir vielen Widerständen getrotzt, getreu dem Motto unserer Alma Mater „Nec aspera terrent“, haben aber wahrscheinlich noch größere Herausforderungen vor uns. Niemand weiß, welche wirtschaftlichen Hürden wir noch nehmen müssen. Die Mittel, die jetzt anderweitig dringend benötigt werden, stehen zur Forschungsförderung nicht mehr zur Verfügung. Nichtsdestotrotz lassen wir uns den Mut nicht nehmen.

Die Herausforderungen bergen auch Chancen, die wir als Ingenieure und Ingenieurinnen bzw. Naturwissenschaftler und Naturwissenschaftlerinnen nutzen werden, um die Welt dann doch auch hoffentlich wieder ein bisschen besser zu machen. Welche Ansätze wir letztes Jahr hierzu hatten und was es sonst noch Neues am Institut gab, lesen Sie bitte in unserem *ifs*-report 2022. Ich hoffe, wir können Ihnen mit den Informationen eine kleine Freude bereiten.

Bleiben Sie uns gewogen.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Johannes Ihm'.

# Prüflabor für Eigenspannungsanalysen erfolgreich akkreditiert



Bildnachweis: ifs | TU Braunschweig

Am Institut für Füge- und Schweißtechnik können ab sofort im Norddeutschen Zentrum für Spannungsanalytik (NOSA) Eigenspannungen im jüngst akkreditier-tem Prüflabor gemessen und analysiert werden. Damit stellt das ifs den perfekten Ansprechpartner in Sachen röntgenogra-phischer Eigenspannungsbestimmung für Industrie und Unternehmen dar.

Eigenspannungen sind innere Spannungen, die ohne das Einwir-ken äußerer Kräfte im Bauteil auftreten. Sie entstehen während der Produktion oder Fertigung unter Einwirkung von plastischen Verformungen mikroskopischer und makroskopischer Werkstoffberei-che. Sie spielen auch eine Rolle, wenn es bei praktisch jeder Art von Bauteilbearbeitung zur Wärmeeinwirkung kommt, z.B. bei Getrie-bebauteilen, Zahnrädern, Turbinen oder anderen Komponenten der Automobil- sowie Luftfahrtindustrie.

Die Eigenspannungen können sowohl einen positiven als auch ne-gativen Einfluss auf das Bauteilverhalten haben. Aufgrund des jahrzehntelang angesammelten breiten Wissens um die Wirkung von Eigenspannungen stellen sie heute ein industriell genutztes Ingenieurswerkzeug für die gezielte Optimierung von Bauteilei-genschaften, insbesondere bei hoch- und höchstfesten Werkstof-fen dar.

Schon seit vielen Jahren beschäftigt sich das Institut für Füge- und Schweißtechnik im Rahmen des Norddeutschen Zentrums für Spannungsanalytik mit der Ermittlung von Eigenspannungen in metallischen Werkstoffen und Bauteilen. Dabei werden bei der Werkstoffanalyse sowohl zerstörende als auch zerstörungsfreie Prüfmethoden angewendet. Seit diesem Jahr ist das NOSA nun von der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS) als Prüflabor zur Eigenspannungsanalyse nach DIN 17025 akkreditiert. Dadurch werden die hohen Anforderungen an die Kompetenz, die einheitliche Arbeitsweise sowie die Qualitätsansprüche bestätigt.

In unterschiedlichen eigens entwickelten stationären sowie mobilen Röntgendiffraktometern werden täglich eine Vielzahl von Eigenspannungs-, Phasen- und Texturanalysen im Rahmen grundlagenbezogener und anwendungsorientierter Forschungsvorhaben durchgeführt. Da insbesondere die Ermittlung bearbeitungsspezifischer Eigenspannungszustände ein seit langem industriell eingeführtes Mittel zur serienbegleitenden Qualitätskontrolle sowie zur Prototypenentwicklung darstellt, ist das Institut zudem als Dienstleister auf diesem Gebiet im Rahmen von bilateralen Industrieprojekten tätig. Angeboten werden derartige Untersuchungen für Unternehmen, die auf solche Analysen angewiesen sind, selbst aber nicht über das notwendige Knowhow sowie die notwendige Ausrüstung verfügen. Die Akkreditierung des Prüflabors ist dabei für viele Industriepartner eine Grundvoraussetzung für gemeinsame Projekte und stellt für das NOSA eine große Entwicklungschance dar.



Bild 1: Positionierung einer Probe im Röntgendiffraktometer  
(Bildnachweis: Paul Diekhoff)

Das Prüflabor verfügt über eine größere Anzahl von Röntgendiffraktometern, die neben der Eigenspannungsermittlung auch Texturanalysen sowie Phasenanalysen wie z.B. die quantitative Restaustenitbestimmung ermöglichen. Die selbst entwickelten Messplätze sind vor allem auf das Ziel ausgerichtet, verhältnismäßig große Prüfkörper zerstörungsfrei untersuchen zu können und dabei einen je nach Messaufgabe möglichst großen Automatisierungsgrad zu ermöglichen. Dies bietet den Wissenschaftlern die Möglichkeit, im Rahmen von Forschungsvorhaben sehr detaillierte

Analysen des Eigenspannungszustandes an unterschiedlichen Versuchskörpern in einem akzeptablen Zeitrahmen vornehmen zu können. Neben den wissenschaftlichen Anwendungen werden die Einrichtungen aber auch für anwendungsnahe Arbeiten im Kundenauftrag eingesetzt.

Seit diesem Jahr verfügt das Labor auch über ein neues portables Kleinstdiffraktometer, mit dem Eigenspannungsanalysen an Prüfkörpern und Bauteilen durchgeführt werden können, bei denen aufgrund ihrer Größe und/oder ihres Gewichts zerstörungsfreie Untersuchungen mit Hilfe von Labordiffraktometern nicht mehr möglich sind. Die Kompaktheit des Gerätes erlaubt z.B. auch die unmittelbare Applikation in Prüfaufbauten und In-situ-Messung, z.B. bei der Schwingfestigkeitsprüfung und bietet daher die Möglichkeit, wesentlich detaillierter veränderliche Eigenspannungszustände über die Lebensdauer von Prüfstücken zu verfolgen, wodurch eine verfeinerte Bewertung des Eigenspannungseinflusses auf das Festigkeitsverhalten erreicht werden kann. Aufgrund eines gegenüber Labordiffraktometern veränderten Mess- und Auswertprinzips sind dabei zudem erhebliche Verkürzungen der Messzeiten realisierbar.



Bild 2: Mobile Messung mit dem portablen Kleinstdiffraktometer  
(Bildnachweis: Paul Diekhoff)

Ansprechpartner für weitere Informationen:  
Dr.-Ing. Thomas Nitschke-Pagel  
t.pagel@tu-braunschweig.de

# 35 Jahre Fördergemeinschaft Druckgießforschung und die Geschichte vom Leichtmetallzentrum Soltau



Gruppenbild der Fördergemeinschaft Druckgießforschung im Oktober 2021 (Bildnachweis: ifjs | TU Braunschweig)

Ende der 1970er Jahre wurden Bürostühle mit vier Rollen verboten und das Institut erhielt neue Bürostühle mit fünf Rollen. Kurze Zeit später brach beim Stuhl des damaligen Oberingenieurs das Fußkreuz aus Aluminium. Für eine Reparatur des Stuhles – das gebrochene Teil war ja aus Aluminium – brachte er es zum Lehrsweißer. Der erklärte ihm und dem damaligen Institutsleiter, Prof. Dr.-Ing. J. Ruge, dass Aluminium-Druckguss nicht schweißgeeignet sei. Das war der Startschuss für das Institut, sich mit den Untersuchungen zur Schweißeignung von Aluminium-Druckguss zu befassen.

---

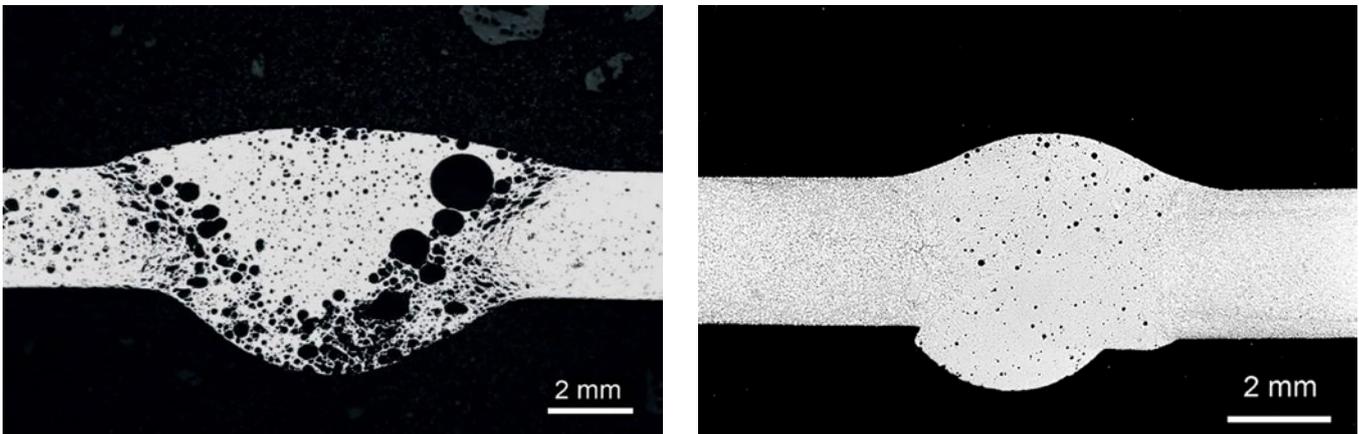


Bild 1: Schweißnähte an Aluminium-Druckguss (links: WIG-Schweißnaht zu Beginn der Untersuchungen; rechts: MIG-Schweißnaht an einem schweißgeeigneten Aluminium-Druckguss-Bauteil) (Bildnachweis: ifs | TU Braunschweig)

Bereits am Anfang war deutlich, dass die eingeschlossenen Gase verantwortlich für die nicht vorhandene Schweißeignung von Aluminium-Druckguss waren. Die Schweißnähte wiesen erhebliche Porositäten auf, Bild 1. Anfang der 80er erhielt das Institut eine gebrauchte Druckgießanlage vom Typ Wotan DmkH 160 einschließlich Peripherie geschenkt, Bild 2. Diese Anlage wurde am ifs in der damaligen wie heutigen Schweißwerkstatt aufgebaut. Bestandteil der Anlage war eine damals moderne Datenerfassung vom Typ Injektrol. Basierend auf den ersten Untersuchungsergebnissen wurde ein Forschungsantrag vorbereitet.

Dieser Antrag sollte über den Verband der Deutschen Gießereifachleute, die Vorgängerinstitution des heutigen Bundesverbandes der Deutschen Gießerei-Industrie e. V., bei der AiF eingereicht werden. Auf der Sitzung des Fachausschusses Druckguss stellte Prof. Dr. J. Ruge den Antrag vor. Die Sitzungsteilnehmer erläuterten, dass ihr Druckguss schon in Ordnung sei und das Institut sich um die Schweißverfahren kümmern sollte. Der Vorsitzende des Fachausschusses, Hr. E. Rödgers aus Soltau, erhielt den Auftrag, dem Professor die Idee auszureden. Auf der gemeinsamen Zugfahrt von Düsseldorf nach Hannover diskutierten beide Herren über das Thema. Als sie in Hannover ausstiegen, waren sie sich einig, dass die Forschung notwendig ist und eine Fördergemeinschaft zur Unterstützung am Institut gegründet werden sollte. Der gestellte Antrag mit dem Titel „Schweißen von Aluminium-Druckguss“ wurde befürwortet und zur AiF weitergereicht und genehmigt. 1984 konnte das Vorhaben als erstes Vorhaben zum Thema Druckguss am Institut erfolgreich abgeschlossen werden.

Es zeigte sich jedoch schon frühzeitig, dass die zur Verfügung stehende kleine Druckgießmaschine veraltet und unzureichend für weitere Untersuchungen war. Parallel zu weiteren Anträgen für Forschungsvorhaben wurden Gespräche aufgenommen, wie eine moderne Gießmaschine für das Institut beschafft werden konnte.

Da für den Kauf einer Anlage und der zugehörigen Peripherie keine Gelder vom Institut zur Verfügung standen, wurde eine Alternative gesucht. Diese wurde im Rahmen der Fördergemeinschaft Druckgießforschung gefunden, die am 24. Oktober 1986 unter dem Namen „Freundeskreis der Forschung auf dem Gebiet der Druckgießtechnologie“ gegründet wurde. Durch die Mitgliedsbeiträge war es möglich, über den Hochschulbund eine moderne Druckgießanlage von der Firma Bühler vom Typ H400 B sowie der Peripherie zu leasen. Gleichzeitig stellten die finanziellen Zuwendungen der Mitglieder der Fördergemeinschaft den Betrieb der Anlage sicher. Regelmäßig trafen sich die Mitglieder mindestens zweimal pro Jahr und ließen sich über die laufenden Projekte berichten.

Kurze Zeit später erfolgte der Umzug der Gießerei in die hinter dem Institut stehende Wellblechhalle, Bild 3. Diese war ursprünglich für die Prüfung von Tresoren gebaut worden und stand zu dem Zeitpunkt leer. Mit dem Umzug der Gießerei wurde die Gießanlage vom Anlagenhersteller getauscht, so dass am Institut eine Anlage mit der modernsten Steuerung vom Typ H-400 SC zur Verfügung stand, Bild 4 (links). Einige Jahre später (2005) erfolgte ein weiterer Austausch der Anlage, um jeweils die neueste Technologie für die Forschung sicher zu stellen.

Da die Liegenschaft des Gießereigebäudes von der Universität für den Bau des Zentrums für Pharmaverfahrenstechnik benötigt wurde, musste eine neue Heimat für die institutseigene Gießerei gefunden werden. Diese wurde im Rahmen der Fördergemeinschaft Druckgießforschung durch ein Gründungsmitglied, die G. A. Rödgers in Soltau, beigestellt. 2014 erfolgte der Umzug der Maschine zum heutigen Standort in Soltau und die Gründung des Leichtmetallzentrums Soltau (LMZS). Nach einem elektronischen Ausfall musste 2019 die Steuerung der Anlage ausgetauscht werden. Somit steht dem Institut heute eine Druckgieß-Anlage mit moderns-

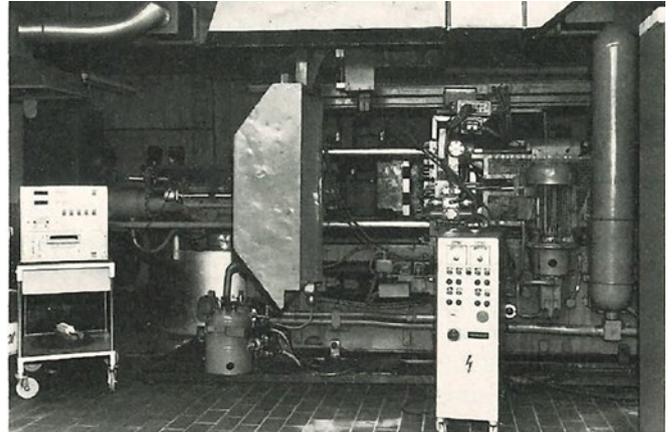


Bild 2: Schweißlabor 1981, bevor dort die Druckgießerei des Instituts aufgebaut wurde (links) und Druckgießanlage vom Typ Wotan DmkH 160 (rechts)  
(Bildnachweis: ifs | TU Braunschweig)

ter Steuerung und Peripherie für Forschungszwecke zur Verfügung, Bild 4.

Im Rahmen dieser Unterstützung konnten bis heute 25 öffentlich geförderte Projekte und neun Promotionen erfolgreich abgeschlossen werden. Die Arbeiten begannen mit einer allgemeinen Untersuchung der Schweißbeignung von Aluminium-Druckguss. Dabei wurden sowohl Schmelz-, Strahl- und Pressschweißverfahren betrachtet. Ein Schwerpunkt lag auf dem Gasgehalt der Druckguss-Bauteile. Insbesondere der Wasserstoff, der in flüssigem Aluminium sehr gut und in festem Aluminium so gut wie unlöslich ist, war Schwerpunkt der Untersuchungen. Erste Versuche zeigten, dass bei einer Erwärmung der Bauteile, diese sich aufblähten. Bei den Untersuchungen wurde auch festgestellt, dass die begleitenden Legierungselemente für den Aluminium-Druckguss zu Hybridbildung neigen und den Wasserstoff dadurch im Werkstoff binden. Bei Temperaturen, wie sie beim Schweißen auftreten, werden diese dann wieder freigesetzt und führen zu erhöhter Porosität in den Schweißnähten.

In den nächsten Vorhaben wurden dann das Punkt- und Elektronenstrahlschweißen untersucht. Da als Hauptquelle für den beim Schweißprozess freiwerdenden Wasserstoff die beim Druckgießen verwendeten Trennstoffe detektiert wurden, folgte eine eingehende Untersuchung der verwendeten Trennstoffe, um die Schweißbeignung zu verbessern. Gleichzeitig sollte dadurch die Wärmebehandelbarkeit der Druckguss-Bauteile ermöglicht werden.

Durch eine enge Zusammenarbeit mit der technischen Chemie konnten die einzelnen Komponenten der Trennstoffe bestimmt werden. Es zeigte sich, dass durch eine gezielte Auswahl der Trennstoffzusammensetzung die Gasaufnahme während des Gießprozesses deutlich verringert werden konnte. Parallel dazu erfolgten Untersuchungen zum Schmelzschweißen von Aluminium-

Druckguss sowie verschiedener Naht-Geometrien und -Lagen. Aber auch weitere Fügeverfahren wie Rührreißschweißen und Clinchen wurden untersucht und qualifiziert. In umfangreichen Untersuchungen konnten die Fertigungsschritte zur Herstellung von klebegeeignetem Aluminium-Druckguss beurteilt und optimiert werden.

In der industriellen Praxis verschleßen die Formen für den Druckguss relativ schnell und müssen üblicherweise nach ca. 100.000 Abgüssen oder früher erneuert werden. Es erfolgten daher Untersuchungen zu den Verschleißmechanismen und zur Standzeitoptimierung der Druckgießformen. Ein wesentlicher Grund für den Verschleiß der Formen sind die Temperaturwechselzyklen bei jedem Abguss. Um diese Belastung der Formen zu verringern, erfolgten sowohl Untersuchungen zur Optimierung der Wärmeleitung der Temperiersysteme als auch der Applikation der Trennstoffe. Dafür wurden auch erstmalig einzeln ansteuerbare Düsen für den Trennstoffauftrag verwendet. Es folgten Untersuchungen zu den Ausformkräften der gegossenen Bauteile und der lokalen Wärmebehandlung der Werkzeuge.

Da das Druckgießen ein sehr energieintensives Verfahren ist, erfolgten neben Untersuchungen zur Optimierung des Energieeinsatzes beim Druckgießen auch umfangreiche Arbeiten zur Gestaltung ressourceneffizienter Prozessketten im Druckguss. Fortführend zu diesen Untersuchungen ist aktuell ein Projekt zur Verringerung des CO<sub>2</sub>-Abdrucks im Druckgießprozess mit Sekundär-Aluminium in Vorbereitung. Hierbei soll auch der Einsatz von Wasserstoff als Energieträger beim Schmelzen von Aluminium untersucht werden.

Ein weiterer aktueller Schwerpunkt der Forschungstätigkeit des LMZS ist die Digitalisierung des Gießprozesses. Ziel dieser Tätigkeiten ist es, mit Einsatz von Sensorik und künstlicher Intelligenz



Bild 3: Bühler H-400 SC Druckgießanlage (links) und ehemaliges Gebäude der Druckgießerei Langer Kamp (rechts)  
(Bildnachweis: jfs | TU Braunschweig)



Bild 4: Aktuelle Gießanlage im Leichtmetallzentrum Soltau (Bildnachweis: jfs | TU Braunschweig)

die Qualität der produzierten Teile zu verbessern und den Ausschuss zu minimieren. Hinzu kommen diverse bilaterale Vorhaben. Bei der Herbstsitzung im Oktober 2021 konnte die Fördergemeinschaft auf 35 Jahre zurückblicken. Basierend auf den Ergebnissen der Arbeitsgruppe und der Fördergemeinschaft konnten neue Produktbereiche für den Druckguss etabliert und die Wettbewerbsfähigkeit der Produkte verbessert werden. Durch die derzeit laufenden sowie beantragten Vorhaben wird erwartet, dass die Umweltbelastung durch den Druckgießprozess weiter verringert und die Einsatzbereiche von Druckgussbauteilen erweitert werden wird.

Autor:  
Dr.-Ing. Norbert Hoffmann

Ansprechpartner:  
norbert.hoffmann@tu-braunschweig.de

# Vorhersage der mechanisch-technologischen Eigenschaften von Aluminium-Druckguss Bauteilen

Im Hinblick auf hohe Produktions- und Materialeffizienz sind Druckgussverfahren sehr gut geeignet für die Massenproduktion von Bauteilen mit hoher geometrischer Komplexität. Im Automobilsektor beispielsweise steigt die Nachfrage nach leichten Bauteilen, die eine gute Materialfestigkeit und -qualität aufweisen, stark an. Dies gilt insbesondere für Bauteile wie z.B. Motorblöcke, E-Motoren und Batterie-Kästen, die hohen thermischen Belastungen ausgesetzt sind. Die Qualität der gegossenen Komponenten hängt von verschiedenen Prozess- und thermophysikalischen Parametern ab. In letzter Zeit wurden viele Anstrengungen unternommen, um fortschrittliche Sensortechnologien in den Druckgießprozess zu integrieren. Neben einem besseren Verständnis des Prozessverhaltens ermöglicht die fortschrittliche Sensortechnik auch die Überwachung und Steuerung des Prozesses.

## Projektziele

Der Ausgangspunkt dieser Arbeit ist, dass die Gefügestruktur und die lokalen Materialeigenschaften durch die Erstarrung und die lokale Abkühlungsgeschwindigkeit beeinflusst werden. Derzeit gibt es jedoch nur unzureichende Kenntnisse über die lokale Abkühlungsgeschwindigkeit und die entsprechenden Festigkeitseigenschaften der Werkstoffe. Der wesentliche Einflußfaktor für die lokale Abkühlgeschwindigkeit ist der Wärmeübergangskoeffizient (HTC - Heat Transfer Coefficient). In der Regel wird er bei Simulationen als lokal konstant betrachtet. In der Realität ändert er sich jedoch während der Erstarrung insbesondere durch sich verändernde Kontaktbedingung.

Ziel dieser Arbeiten ist die Entwicklung von Möglichkeiten zur verbesserten Modellierung der Gießprozesse im Hinblick auf höhere Bauteilfestigkeit, Auslegung des Gießsystems und Qualitätsüberwachung. Ausgehend von den lokalen Abkühlraten, die auf dem transienten Wärmeübergangskoeffizienten basieren, werden die lokalen Eigenschaften des Gussbauteils vorhergesagt. Eine Zusammenfassung der Projektinhalte ist in Bild 1 dargestellt.

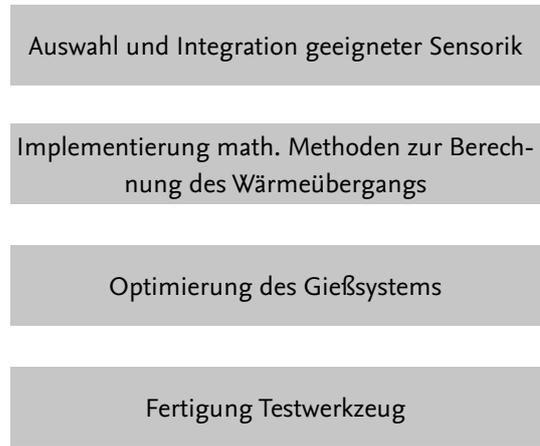
**Instrumentierung und HTC-Berechnung**

Neben der Simulation zur Optimierung des Gießsystems ist die Instrumentierung des Werkzeugs mit In-Cavity-Sensoren die Kernaufgabe in diesem Projekt. Die Kenntnis des Temperatur-Zeit-Verlaufs der Schmelze und des Werkzeugs dient der inversen Berechnung des instationären Wärmeübergangskoeffizienten, der für die Durchführung einer realitätsnahen Simulation notwendig ist. Hier führte die Auswahl der benötigten und geeigneten Sensoren zur Entwicklung des in Bild 1 dargestellten Messkonzeptes. In dem entwickelten Sensorblock befinden sich drei Sensoren:

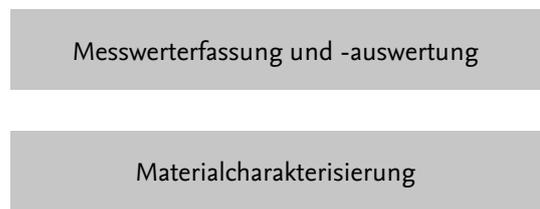
- Induktiver Wegsensor zur Messung der Spaltbildung zwischen Gussteil und Form in Echtzeit.
- Pyrometer mit zusätzlichen Saphirlinsen zur Messung der Grenzflächentemperatur der Schmelze.
- Multi-Tiefen-Temperatursensor (MDTS) - der Sensor wurde im Institut entwickelt, hergestellt und kalibriert. Er enthält vier Thermoelemente vom Typ K, um die Temperatur im Inneren des Werkzeugs in verschiedenen Tiefen zu messen.

Die Messwerte werden mit einer National Instruments Plattform cRIO-9035 mit den entsprechenden Eingangsmodulen und einem programmierten Messskript erfasst. Aus den erfassten Temperaturprofilen der Schmelze und der Matrice wurde der transiente Wärmeübergangskoeffizient mit Hilfe eines Matlab-Skripts auf der Grundlage einer inversen numerischen Methode (nicht lineare sequenzielle Funktionsspezifikationsmethode) ermittelt.

**Entwicklung Werkzeugkonzept**



**Fertigung und Inbetriebnahme Realwerkzeug**



**Testwerkzeug zur Untersuchung des Werkstoffverhaltens**

**Verbessertes Modell zur Prognose lokaler Werkstoffeigenschaften**

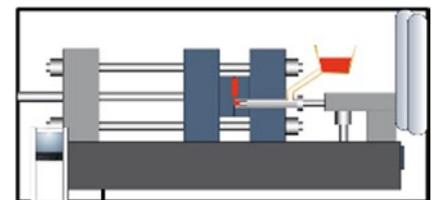
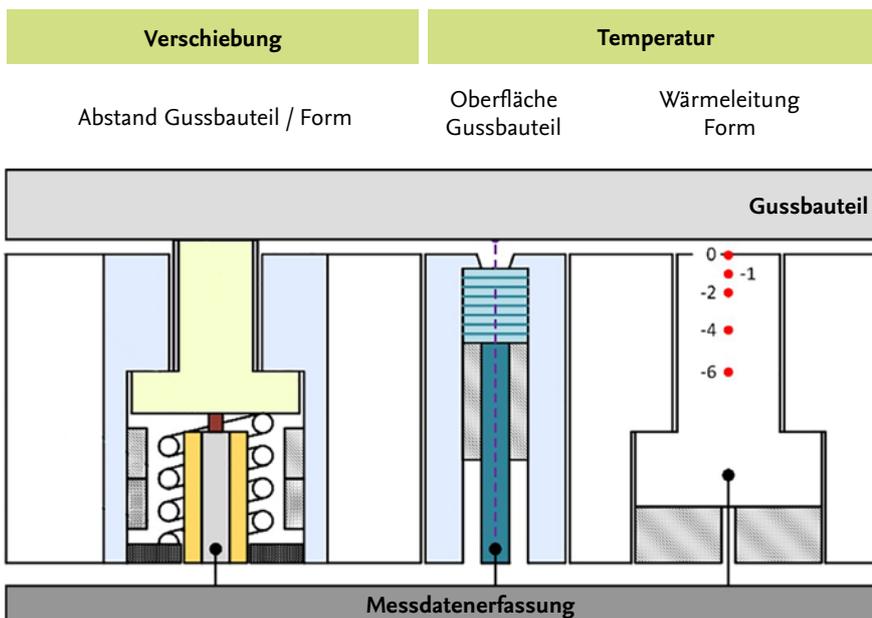


Bild 1: Projektinhalte und entwickelte Messtechnik zur Erfassung von Werkzeug- und Bauteiltemperaturen sowie -verschiebungen

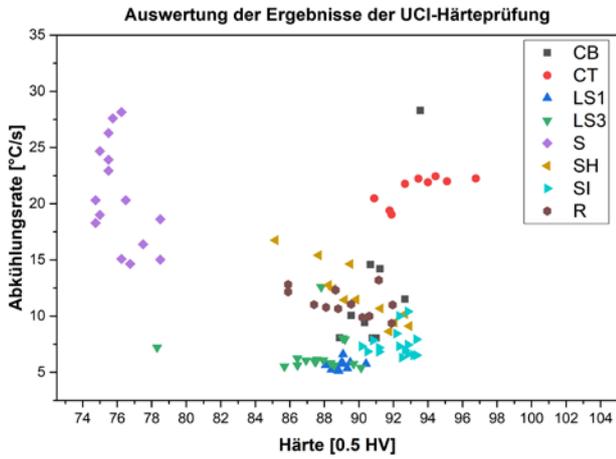


Bild 2: Untersuchung an einem Kurbelgehäuse-Modell

Um die Funktionalität und die Plausibilität des Einsatzes der Sensoren sowie die Qualität der erfassten Signale und des berechneten Wärmeübergangskoeffizienten zu validieren, wurde der entwickelte Versuchsaufbau in die institutseigene Druckgießanlage (Bühler SC D/53) integriert.

### Gießsimulation „Gehäusebauteil“

Da das Hauptziel die Nutzung des entwickelten Ansatzes für industrielle Anwendungen ist, wurde ein CAD-Simulationsmodell eines Kurbelgehäuses vom Projektpartner Volkswagen Kassel zur Verfügung gestellt, ebenso wie gegossene Bauteile für Untersuchungen (Härte, Zugprüfung, CT, metallographische Untersuchungen). Untersucht wurden Proben der Zylinderwand (CB und CT), des Hauptlagers (LS1 und LS3), der Verschraubung (S, SH und SI) und der Außenteile (R).

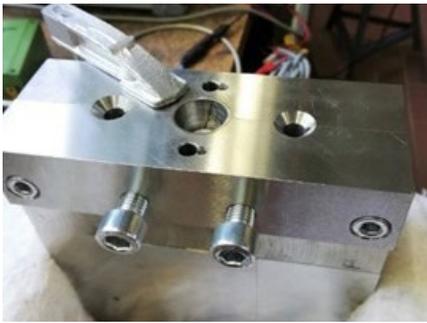


Bild 3: Instrumentiertes Testwerkzeug

Die Ergebnisse der Gießsimulation mit einem konstanten Wärmeübergangskoeffizienten und der gemessenen Härte (Bild 2) zeigen keinen direkten Zusammenhang zwischen Abkühlungsrate und Härte. In einzelnen Bereichen des Gussbauteils konnten jedoch jeweils unterschiedliche Korrelationen zwischen Härte und Abkühlungsrate beobachtet werden. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, erreichbare Abkühlraten für unterschiedliche konstruktive Formrandbedingungen (Geometrie und Lage der Temperierung, Formwerkstoff) und Bauteilwanddicken zu berechnen; zunächst unter der Annahme konstanter, prozessabhängiger HTC's. Ebenso sollen realistische konstruktive Randbedingungen identifiziert werden, die in das vorgesehene Druckgießwerkzeug integriert werden können. Die Arbeit wird durch eine Korrelationsanalyse zwischen allen Untersuchungsergebnissen ergänzt. Einerseits soll ein Beziehungsmodell zwischen der Abkühlgeschwindigkeit, der Anfangstemperatur der Form und der Dicke des Gussteils definiert werden. Zum anderen soll ein beschreibendes Modell für die Variation der lokalen Materialfestigkeit in Abhängigkeit von der lokalen Abkühlgeschwindigkeit erstellt werden. Die Validierung des Modells wird anschließend anhand der Simulationsergebnisse für das Kurbelgehäuse erfolgen.

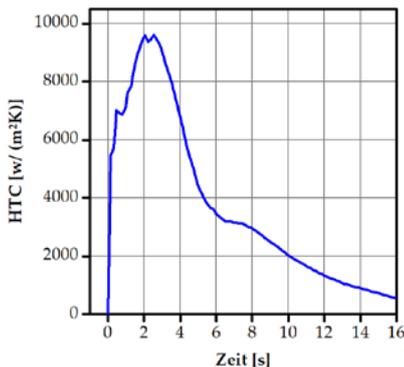
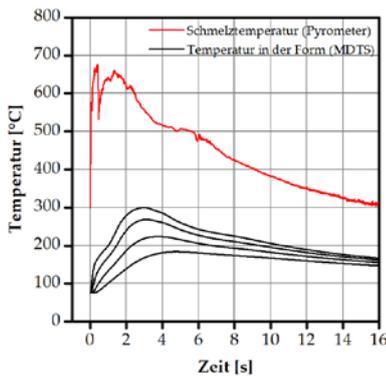


Bild 4: Gemessener und berechneter HTC für eine 12 mm dicke Platte, Vorwärmtemperatur 75 °C

### Erste Ergebnisse mit dem Testwerkzeug

#### 1. Datenerfassung für die HTC-Berechnung

Wiederholte Messungen mit dem Testwerkzeug zeigen ein reproduzierbares Messsignal mit den Sensoren, die die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten ermöglichen. Der Wärmeübergangskoeffizient wurde für drei verschiedene Plattendicken (6, 12 und 25 mm) bei jeweils drei verschiedenen Vorwärmtemperaturen des Werkzeugs (25, 50 und 75 °C) berechnet. Bild 4 (unten) zeigt die gemessenen und berechneten Werte für eine 12 mm dicke Platte bei einer Vorwärmtemperatur von 75 °C.

#### 2. Simulation und Ermittlung der Abkühlgeschwindigkeit

Das CAD-Modell des Testwerkzeugs wurde in der FEM-Simulationsumgebung ANSYS implementiert. Der invers berechnete Wärmeübergangskoeffizient wurde ebenso wie die Konvektion von der Gussform zu den umgebenden Bereichen sowie die während der Experimente verwendeten Gegebenheiten als Randbedingungen implementiert. Virtuelle Kontrollpunkte zur Aufzeichnung der Temperatur konnten in verschiedenen Tiefen innerhalb der Gussform platziert werden. Aus den Temperaturkurven ergab sich die durchschnittliche Abkühlgeschwindigkeit ( $\Delta\text{Temperatur}/\Delta\text{Zeit}$ ) für das Intervall Liquidus-Solidus. Bild 5 zeigt ein Beispiel für die Verteilung der Abkühlungsrate innerhalb der Gussform.

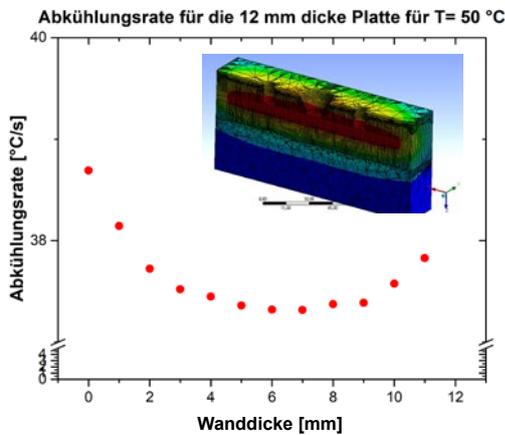


Bild 5: Simulation und berechnete Abkühlgeschwindigkeit für die 12 mm Platte

### 3. Untersuchung des Werkstoffgefüges

An metallographischen Schliffen der gegossenen Bauteile wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Die Analyse der Gefügebilder mit der Bildanalysesoftware „ImageJ“ ermöglichte die Charakterisierung der durchschnittlichen Größe der  $\alpha$ -Al-Phasen (AGS). Eine polynomiale Regression zweiter Ordnung für die Daten beschreibt das Verhalten der durchschnittlichen Korngröße und die lokale Härte. Die Ergebnisse sind in Bild 6 für die 6 mm Platte, gegossen mit verschiedenen Vorwärmtemperaturen dargestellt.

#### Modulare Druckgießform

Für weitere Untersuchungen wurde eine modulare, instrumentierte Druckgießform konstruiert und gefertigt. Die Form enthält sechs Kavitäten für Probekörper verschiedener Dicken (3, 6 und 12 mm). Die Konstruktion basierte auf optimierten Berechnungen für zwei unterschiedliche Angusskonzepte anhand eines parametrisierten CAD-Modells (ca. 3.000 Berechnungen), gefolgt von einer Optimierung des Anschnitt-Systems und der Ermittlung der jeweils optimalen Werte für die bestmögliche Formfüllung. Das Werkzeug besteht aus zwei symmetrischen Seiten, wobei die Kavitäten einer Seite mit den beschriebenen 3 Sensoren zur Erfassung der Messungen ausgestattet ist und die zweite Seite für die Materialcharakterisierung verwendet wird. Das Werkzeug wurde angefertigt und soll jetzt bemustert werden.

Für die geplanten Gießserien werden Abgüsse bei unterschiedlichen Temperaturen des Werkzeugs erfolgen. Das mit den gewonnenen Daten zu erzeugende mathematische Modell soll eine große Bandbreite der Abkühlgeschwindigkeit in Bezug auf die lokale Materialfestigkeit beschreiben.

Das Materialverhalten des Gussteils umfasst die Untersuchung der metallographischen und mechanisch-technologischen Eigenschaften mittels Zugversuch, Mikroporositätsprüfung und Härteprüfung. Ebenso wird das Mikrogefüge und die Ausbildung der Pha-

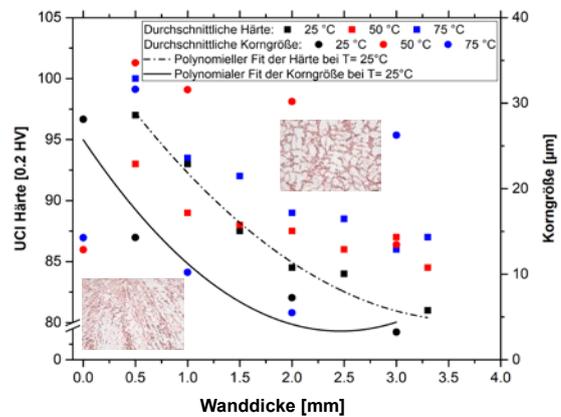


Bild 6: Gefügestruktur-Untersuchungen der 6 mm Platte

sen in metallographischen Schliffen bestimmt. Als Hilfsmittel wird die Bildverarbeitungssoftware „ImageJ“ verwendet, um die Korngröße und den SDAS (sekundärer Dendritenarm Abstand) auf der Grundlage der Auswertung von mikroskopischen Bildern, die bei verschiedenen Wandstärken aufgenommen wurden, zu messen.

In weiteren Schritten wird die Erstarrung des Gussteils mit Hilfe eines FEM-Modells simuliert, um die Spaltbildung zwischen dem Gussteil und der Oberfläche der Druckgießform abzuschätzen und mit den Messungen der Wegsensoren während der Gießserie zu vergleichen.

#### Zusammenfassung und Ausblick

Mit den Versuchen konnte die Funktionsfähigkeit und die Stabilität der Messeinrichtung nachgewiesen werden. Aus den gemessenen Werten wurde ein geeigneter Ansatz zur Charakterisierung der lokalen Materialfestigkeit der Gussteile abgeleitet.

Als nächster Schritt wird das instrumentierte Druckguss-Werkzeug bemustert und Gießserien unter verschiedenen Bedingungen und Parametern gefertigt. Aus den Messwerten wird im Weiteren ein Vorhersagemodell für die mechanisch-technologischen Eigenschaften eines Bauteiles aus Aluminium-Druckguss entwickelt.

Autorin & Abbildungen:

Yosra Kouki, M.Sc.

Ansprechpartner:

norbert.hoffmann@tu-braunschweig.de

# Bauen und Sanieren mit Holz-Sandwich-Verbindungen

Bei der Gestaltung und der Konstruktion von Gebäuden wird üblicherweise eine lange Lebensdauer angestrebt. Um diese zu erreichen, müssen auch die verwendeten Baustoffe Anforderungen im Sinne von Eignung, Alterungsbeständigkeit und Qualität erfüllen. Selbst bei guter Konstruktion und geeigneter Baustoffwahl werden mit fortschreitendem Alter der Gebäude Sanierungsarbeiten fällig, um deren Nutzbarkeit und Wohnkomfort zu erhalten. Oft sind nur vereinzelte Bereiche des Gebäudes nicht mehr zeitgemäß oder werden durch langsame Prozesse wie die Zersetzung durch Wasseraufnahme, Holzverfall, Carbonatisierung des Betons oder Korrosion beschädigt. Auch bei einer veralteten oder beschädigten Wärmedämmung kann sich eine energetische Sanierung lohnen. Von den mehr als 38 Millionen Wohneinheiten Deutschlands sind etwa 9 Millionen Altbauten, welche vor 1949 erbaut wurden [1]. Der Anteil der Wohngebäude mit schlechtester Leistung, also energetischen Effizienzklassen G und H, beträgt in Deutschland 31 % und verursacht die Hälfte der Treibhausgasemissionen aus Wohngebäuden [2]. Besonders die Gebäude mit schlechten Effizienzklassen haben gute Voraussetzungen, um eine zukunftssichere Sanierung wirtschaftlich umzusetzen und so den Energieverbrauch um durchschnittlich rund 80 % zu senken [2]. Eine Sanierung der Fassade in Kombination mit einer Zwischendecken-Sanierung kann somit die Energieeffizienz betroffener Altbauten erhöhen und deren Wohnkomfort steigern. Im Rahmen der Projekte „Decken-Systemmodule“ (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., FKZ: 22007817) und „GreenFront“ (Hybride Materialien Hymat1, FKZ WPHY100381413) wird an verschiedenen Sandwichverbindungen erforscht, wie die Sanierung von Altgebäuden oder Neubauten durch den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen umweltfreundlich und nachhaltig gestaltet werden kann.

[1] Diefenbach, Nikolaus (Institut Wohnen und Umwelt): Basisdaten für Hochrechnungen mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU: Neufassung Oktober 2013

[2] Mellwig, Peter (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH): Gebäude mit der schlechtesten Leistung (Worst performing Buildings) - Klimaschutzpotential der unsanierten Gebäude in Deutschland: Berlin, Heidelberg, 2021

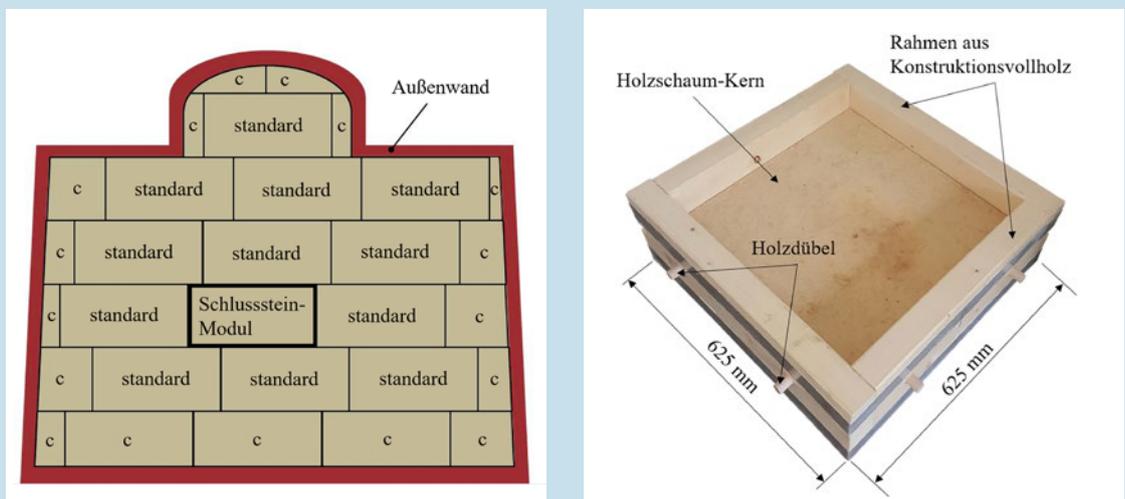


Bild 1: Beispielhafter Grundriss einer Zwischendecke aus mosaikartig, seitlich verbundenen Modulen. Randmodule sind mit „c“ gekennzeichnet (customized), Module einheitlicher Abmessungen mit „standard“ (links) und Aufbau eines Moduls für die Zwischendecken-Sanierung (rechts)

### Decken-Systemmodule

Viele der Altbauten Europas haben massive Außenwände aus beständigem Ziegel- oder Kalksandstein. Für die Zwischendecke wurden früher leichte Materialien wie Holz verbaut oder Stahlprofile in Kombination mit Holzwerkstoffen, falls die Decke hohe Lasten tragen musste oder besonders große Räume überspannen sollte. Eine Holzbalken- oder Stahlträgerdecke wird durch waagerechte Tragbalken gestützt, welche auf die vorgesehenen Auflager in der Außenwand eingelassen werden. Während der jahrzehntelangen Nutzung der Gebäude verschlechtert sich die Beschaffenheit der Zwischendecke schneller als die der Außenwände. Dies äußert sich durch eine hohe Nachgiebigkeit der Tragbalken, einer schlechten Trittschalldämmung und der typischen Hellhörigkeit von Altbauten, sodass eine Sanierung der Zwischendecke nötig sein kann. Viele der auf dem Markt befindlichen Konzepte basieren auf unterstützenden und versteifenden Maßnahmen der bereits existierenden Deckenkonstruktion mithilfe von etlichen Holzbalken und Brettern. Eine Sanierung kann aber auch durch Beschädigungen am Außenputz der Fassade nötig sein. Wasser kann in die Außenwand eindringen und zu Fäulnisschäden an den Tragbalken führen. Bei besonders schwerem Befall müssen die betroffenen Tragbalken vollständig ersetzt werden. Typischerweise sind diese in die Außenwand eingelassen oder führen sogar durch sie hindurch, sodass sie etwas länger als der Raum sind. In diesem Fall müsste die Mauer durchstoßen werden und der betroffene Tragbalken durch das Loch in der Außenwand geschoben werden. Je nach Konstruktion und Raumgeometrie der betroffenen Gebäude ist der Austausch der langen Tragbalken eine große Herausforderung bis hin zu einem unmöglichen Unterfangen.

Ein modulares Konzept zur Sanierung von Zwischendecken in Altbauten soll dieses Problem lösen: Die alte Zwischendecke wird entfernt und durch Module ersetzt, welche mosaikartig, seitlich

miteinander gefügt werden und so einen tragfähigen Verbund ergeben. Die Sanierung der Zwischendecke sollte die gesamte Grundriss-Spannweite umfassen, um zusätzliche Stützen zu vermeiden und bei entsprechender Auslegung sogar völlig freitragend zu sein. Der Großteil der verbauten Module hat einheitliche geometrische Abmessungen die so gewählt sind, dass sie problemlos durch Türen und Treppenhäuser transportiert werden können. Da die Grundrisse von Altbauten aber oft von einer rechteckigen Form abweichen oder bei deren Entwurf die Nutzung von Kachelöfen oder Kaminen berücksichtigt wurden, müssen die Randmodule individuell an den Raum angepasst werden (Bild 1). Bei diesem Konzept werden die Randmodule in der Außenwand verankert und fungieren als Halterung für nachfolgende Module und übertragen die Last der Zwischendecke in das Mauerwerk. Der Bau der restlichen Zwischendecke wird mit einheitlich großen Modulen fortgesetzt. Das zuletzt eingesetzte Modul entspricht dem Schlussstein und vervollständigt die sanierte Zwischendecke.

In Bild 2 ist der Aufbau eines Moduls gezeigt: Für den Rahmen werden Balken aus Konstruktionsvollholz verbaut, welche fest miteinander verschraubt sind. An die Ober- und Unterseite des Moduls werden Grobspanplatten (OSB/3) mittels Schmalrückenklammern befestigt, sodass sich eine biege- und schubfeste Konstruktion ergibt. Als Wärme- und Schalldämmung haben die Module einen Kern aus einem ökologisch-nachhaltigen Holzschaum, welcher am Fraunhofer-Institut für Holzforschung (WKL) in Braunschweig entwickelt wurde. Der Holzschaum ist sehr gut recycelbar und weist gute schall- und wärmeisolierende Eigenschaften auf, welche denen von Dämmstoffen aus Mineralwolle oder Polymerschaum ähnlich sind. Die hohe Schallabsorption des Holzschaums ermöglicht es, die Module gleichzeitig als Akustikplatten einzusetzen, sodass der Raumklang und Wohnkomfort verbessert wird.

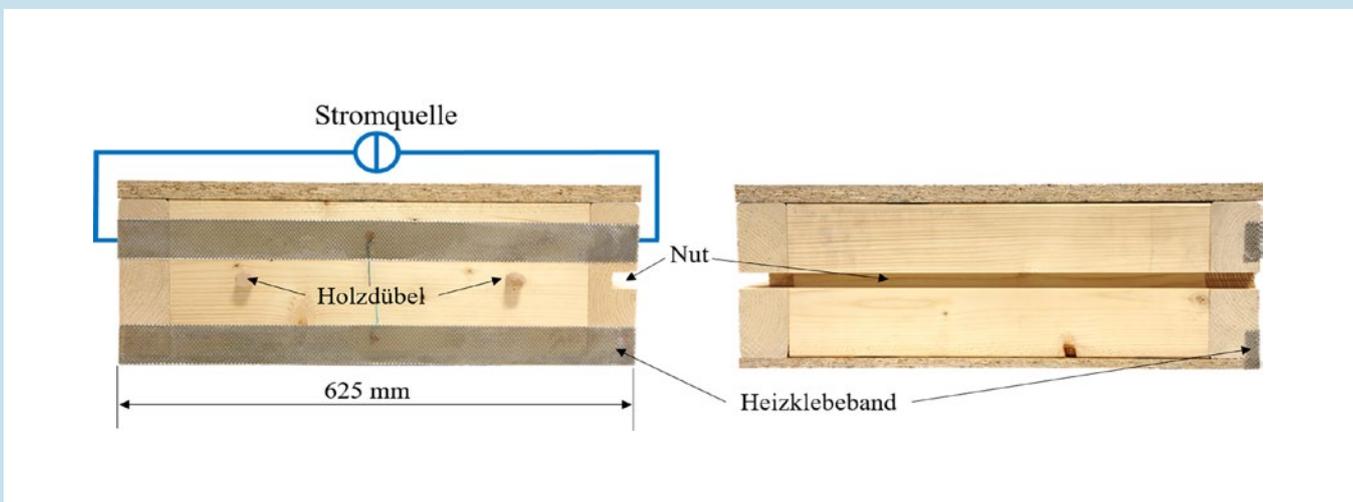


Bild 2: Sicht auf die Seite eines Moduls für die Zwischendecken-Sanierung mit den relevanten Bestandteilen zum Herstellen der Verbindung

Besonders die Ausführung als freitragende Zwischendecke stellt die Fügetechnik vor eine besondere Herausforderung. Die Verbindungen müssen hohen Biege- sowie Scherbelastungen standhalten und den baulichen Sicherheitsansprüchen gerecht werden. Auch im Brandfall muss die modulare Zwischendecke dem Feuer so lange widerstehen, wie es bei traditionellen Deckenkonstruktionen gefordert wird. Um die Module biegesteif und sicher zu verbinden, wird eine Kombination aus einer mechanischen Holzfügtechnik und Kleben eingesetzt. Als mechanische Fügetechnik wird eine traditionelle Nut-Feder-Verbindung verwendet. Die Ausführung mit einer durchgehenden Nut ermöglicht ein seitliches Einschieben in bereits installierte Module und erleichtert die Positionierung für die anschließende Klebung (Bild 2). Die Klebung erhöht durch ihre flächige Verbindung die Biegesteifigkeit und wird mit neuartigen Heizklebebändern umgesetzt, welche am ifs entwickelt wurden.

Die Heizklebebänder bestehen aus einem flexiblen Streckmetallgitter, welches als Trägersubstrat für den verwendeten Schmelzklebstoff dient. Der Klebstoff liegt zunächst pulverförmig vor und wird unterhalb seiner Reaktionstemperatur auf das Streckmetallgitter geschmolzen, sodass es nach dem Abkühlen vollständig von Klebstoff ummantelt ist. In dieser Form wird das Heizklebeband auf das Modul vormontiert und kann durch Anlegen eines elektrischen Stroms bis zur Reaktionstemperatur des Klebstoffs erwärmt werden, sodass dieser schmilzt, die Oberfläche des Modulrahmens benetzt und vernetzt. Nach einer kurzen Haltezeit wird der elektrische Strom abgeschaltet, wodurch der Klebstoff abkühlt und sich verfestigt. Mithilfe einer mobilen Stromquelle kann die Klebung schnell und einfach auf der Baustelle durchgeführt werden und sorgt für einen raschen Baufortschritt, da das nächste Modul direkt nach dem Abkühlen montiert werden kann. Ebenso schnell ermöglicht die Verwendung des Schmelzklebstoffs den Rückbau

der Module am Ende der Gebäudenutzung, indem das Heizklebeband mittels einer Stromquelle abermals bis zur Erweichungstemperatur des Klebstoffs erhitzt wird und die Klebung löst. Durch eine faserverstärkte Betonplatte, welche auf das Modul gegossen oder geklebt wird, kann die Trittschalldämmung und Biegesteifigkeit zusätzlich verbessert werden.

### GreenFront

Die Wärmedämmung von Außenwänden kann sowohl mit Innenausbauplatten als auch mit Gebäudefassadepplatten erfolgen. Diese sind üblicherweise als Sandwichverbund mit einem Kern aus Mineralwolle oder Polymerschäumen ausgeführt. Die verwendeten Polymerschäume (PUR, XPS) haben zwar gute Eigenschaften in Bezug auf Wärmedämmung, Witterungsbeständigkeit und Festigkeit, werden aber durch petrochemische Prozesse aus fossilen Rohstoffen gewonnen. Im Rahmen des Projekts „GreenFront“ wird ein Sandwichelement aus nachhaltigen Rohstoffen marktfähig gemacht, welches gemeinsam mit dem WKI entwickelt wurde, um die o. g. Dämmplatten als ressourcenschonende Alternative zu substituieren.

Der Aufbau eines Sandwichelements wird in Bild 3 gezeigt: Der Kern besteht aus einem Holzschäum, welcher aus regional verfügbaren Holzarten und Holzresten, ohne die Zugabe eines Binders aus fossilen Rohstoffen, hergestellt wird. Die Deckplatten bestehen aus druckfestem Feinbeton, welcher mit Bewehrungstextilien aus Glas- oder Carbonfasern verstärkt ist und durch die so gewonnene Zugfestigkeit als dünne Schicht umgesetzt werden kann. Durch diese Materialkombination ergibt sich ein Sandwichelement mit einem geringen Bauteilgewicht, geringer Wärmeleitfähigkeit, hoher Schallabsorption und guter mechanischer Festigkeit.



Bild 3: Sandwichelement (300x300x74 mm<sup>3</sup>) mit 2K-PUR-geklebten Deckplatten (5 mm dicker Textilbeton) für die Dämmung der Außenwand. Rechts: vergrößerte Darstellung des Holzschauams mit seinem faserartigen Aufbau

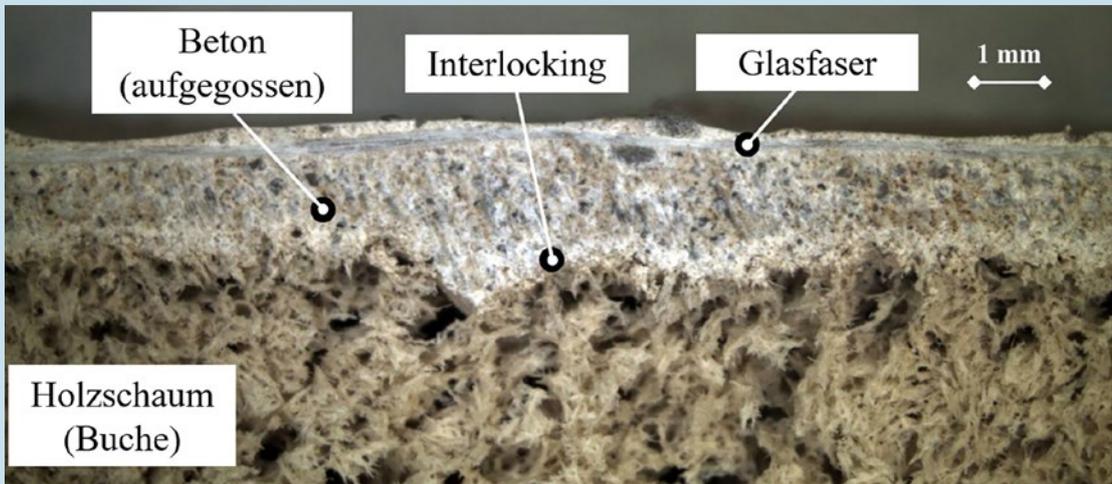


Bild 4: Querschnitt durch die Verbindung zwischen einer aufgegossenen Deckplatte und dem Holzschaum (ohne Klebstoff)

Die Deckplatten können mit Bauklebstoffen auf den Holzschaum geklebt werden oder als Frischbeton direkt auf diesen gegossen werden, sodass der Feinbeton in die Hohlräume des Holzschlams fließt und sich beim Aushärten durch Formschlüsse mit ihm verhakt (Interlocking). In Bild 4 wird die Verbindung zwischen Deckplatte und Holzschaum im Querschnitt gezeigt. Durch den Verzicht auf Klebstoffe beim direkten Aufgießen der Deckplatte besteht das Sandwichelement nur noch aus zwei Komponenten und kann am Ende seiner Nutzungsdauer sehr gut recycelt werden.

Damit die klebstofflose Verbindung zuverlässig gelingt und die nötige Festigkeit erzielt wird, müssen geeignete Feuchtegehalte der Fügepartner identifiziert werden: Wenn flüssiger Frischbeton auf trockenem Holzschaum gegossen wird, kann dieser dem Beton Wasser entziehen, sodass der Beton nicht vollständig aushärtet. Der Holzschaum kann aber auch zu viel Restfeuchte aufweisen, sodass zwar der Beton aushärtet, aber der Holzschaum an Festigkeit verliert oder von Schimmel befallen wird. Um die Herstellung der Sandwichelemente zu optimieren, forscht das ifs zusammen mit den Projektpartnern an einer geeigneten Rezeptur für den Textilbeton und entwickelt die bisherige Fertigung weiter, indem die Feuchtegehalte von Beton und Holzschaum ideal aufeinander abgestimmt werden.

Damit die Sandwichelemente marktfähig werden, muss die bisherige Herstellung im Labormaßstab zu einer kosteneffizienten und produktionssicheren Ferti-

gung weiterentwickelt werden, sodass technische Dimensionen als Plattenware oder 3D-Fertigteile angeboten werden können. Besonders die Entwicklung einer semi-kontinuierlichen Fertigungsanlage für den Holzschaum stellt dabei eine große Herausforderung dar, birgt aber auch ein hohes wirtschaftliches Potential.

#### Danksagung

Das Forschungsvorhaben „Decken-Systemmodule“ FKZ: 22007817 der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. wurde vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Das Forschungsvorhaben „GreenFront“ wurde im Rahmen des Förderprogramms "Hybride Materialien Hy-mat1" vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, FKZ WPHY100381413) gefördert.

Autor & Abbildungen:  
Tobias Hilse, M.Sc.

Ansprechpartner:  
t.hilse@tu-braunschweig.de  
e.stammen@tu-braunschweig.de

# Elektronenstrahlschweißen von Duplex-Stahl mit Nickelbasiszusatzwerkstoff ohne Wärmenachbehandlung

## Motivation

Duplex-Stähle verfügen über ein zweiphasiges Gefüge, welches im Idealfall ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Ferrit und Austenit aufweist. Hierbei werden die Eigenschaften von den beiden Phasen derart kombiniert, dass sowohl gute mechanisch-technologische Eigenschaften, als auch eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit zeitgleich vorliegen. Aufgrund dessen werden solche Legierungen häufig in der Chemie- sowie Erdöl- und Gasindustrie eingesetzt. Des Weiteren werden Duplex-Stähle an Orten verwendet, an denen Bauteile, wie beispielsweise im Schiffbau, einer korrosiven Umgebung ausgesetzt sind. Der diesem Bericht zugrundeliegende 2205 Standard-Duplex-Stahl (1.4462) weist einen guten Kompromiss zwischen Korrosionsbeständigkeit und Beschaffungskosten auf, weshalb er die gebräuchlichste Duplex-Stahlvariante in der Industrie darstellt. Aus diesem Werkstoff werden häufig dickwandige Bauteile hergestellt, die mithilfe des Elektronenstrahls (EB) prozesssicher und wirtschaftlich geschweißt werden können. Jedoch bestehen dabei nicht nur Vorteile, sondern es entstehen neue Herausforderungen, die sowohl auf die beim Elektronenstrahlschweißen auftretende schnelle Abkühlung, als auch auf die durch Vakuum initiierte Stickstoffeffusion zurückzuführen sind. Aufgrund dessen stellt sich

weder ein im Grundwerkstoff bereits vorhandenes, günstiges Austenit-Ferrit-Verhältnis ein, noch können infolgedessen die erwünschten mechanisch-technologischen Eigenschaften garantiert werden. Wie in Bild 1 (rechts) ersichtlich ist, stellt sich ein Gefüge ein, das etwa 85-90 % Ferrit (dunkel verfärbt) und entsprechend maximal 10-15 % Austenit (weißlich verfärbt) enthält, was zum kompletten Verlust der Zähigkeit sowie der Korrosionsbeständigkeit führt, falls keine weiteren Maßnahmen getroffen werden.

Ein möglicher Lösungsansatz ist die nach dem Schweißen durchgeführte Wärmebehandlung, mit deren Hilfe die Phasenbilanz in großem Maße verbessert werden kann. Dies stellt jedoch einen zusätzlichen Prozessschritt dar und ist somit mit Mehrkosten verbunden. Eine Alternativlösung ist die Zugabe von Nickelbasis-Zusatzwerkstoff, der die Austenitbildung verstärkt und damit zur Verbesserung der Phasenbilanz beiträgt. Ein drahtförmiger Zusatzwerkstoff kann in einer automatisierten Anlage gesteuert gefördert und infolgedessen als ein industrietauglicher Ansatz in Betracht gezogen werden. Auf diese Weise kann auf eine Wärmenachbehandlung verzichtet und dementsprechend ein großes Einsparpotential genutzt werden.

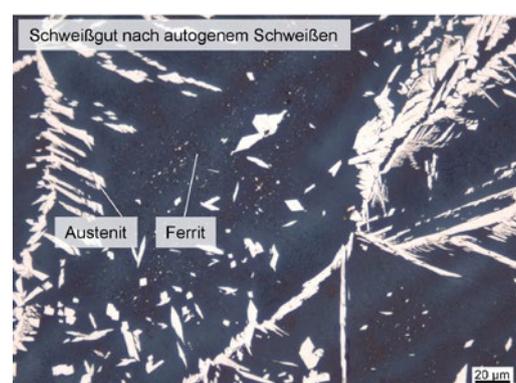
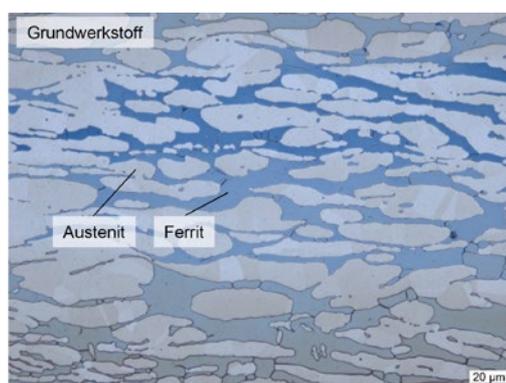


Bild 1: Das Gefüge im Grundwerkstoffzustand (l.) sowie im Schweißgut nach einem ohne Zusatzwerkstoff durchgeführten Schweißvorgang (r.)



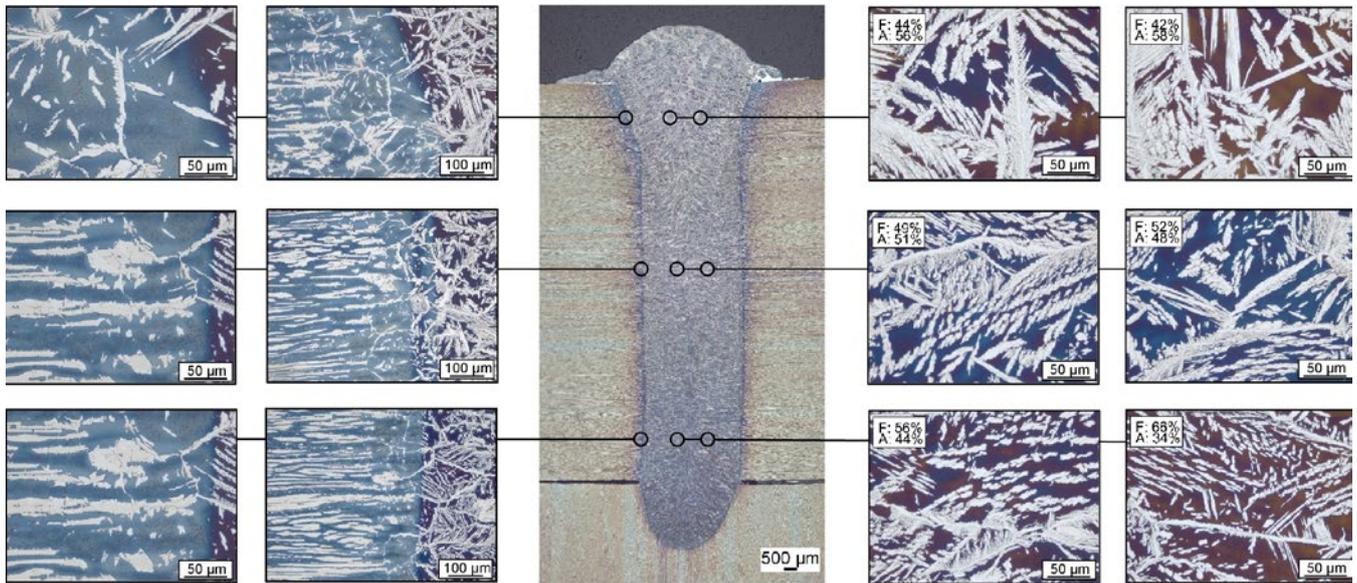


Bild 4: Die Nahtgeometrie und das Gefüge der unterschiedlichen Regionen einer Schweißverbindung

die Nahtwurzel einen um etwa 1 % geringeren Nickelgehalt auf, was sich entsprechend im Gefüge widerspiegelt (siehe Bild 4). Dennoch ist ein Nickelgehalt von 8-8,5 % an der Nahtwurzel wesentlich größer als der im Grundwerkstoff vorhandene Nickelgehalt (5-5,5 %), sodass eine ausreichende Austenitbildung in der Nahtwurzel resultiert.

Des Weiteren erfolgten Kerbschlagbiegeversuche an Charpy-V (10 mm x 10 mm) Prüfkörpern. Bild 6 (links) zeigt die ermittelten Kerbschlagarbeits- sowie die lateralen Ausbreitungswerte bei den geprüften Proben. Hierbei wurden Prüfkörper derart ausgearbeitet, dass eine klare Unterscheidung zwischen dem oberen und dem unteren Bereich des Schweißguts erfolgen kann. Auch die mit Badstütze geschweißten Verbindungen (Gegenstand dieses Berichts) weisen generell eine vergleichsweise hohe Kerbschlagarbeit und entsprechend eine große laterale Ausbreitung auf. Die ermittelten Werte liegen im Bereich von 270-290 J und übertreffen damit deutlich die Anforderungen der branchenüblichen Normen (i.d.R. min. 50 J). Die Struktur des Bruchbildes (siehe Bild 6, rechts) deutet ebenfalls eindeutig auf eine starke Verformung und dementsprechend einen zähen Bruch hin. Der gemessene Nickelgehalt an der Bruchoberfläche beträgt ca. 7,6 wt %, was unter Berücksichtigung der üblichen Messunsicherheit des EDX-Verfahrens darauf hinweist, dass der Rissfortschritt im Schweißgut erfolgte.

Anschließend erfolgte die Untersuchung der Schweißverbindung mittels Querzugversuch. Hierbei wurde festgestellt, dass das Versagen ausschließlich im Grundwerkstoff auftritt, unabhängig davon, welcher Bereich des Schweißguts geprüft wird.

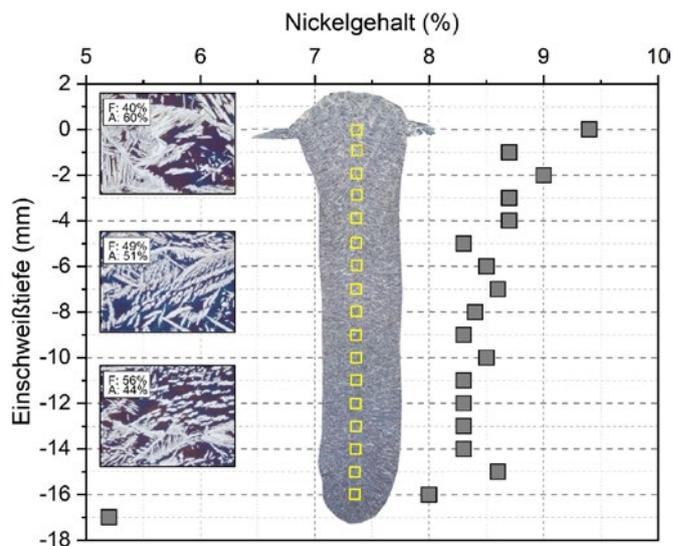


Bild 5: Schweißnahtberraupe und EDX-Messung des Nickelgehalts in Abhängigkeit der Schweißnahttiefe

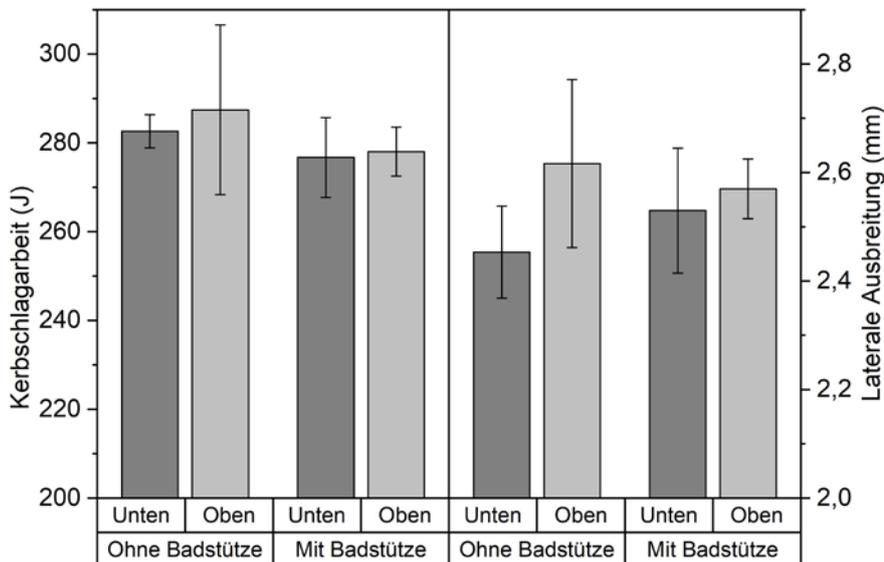


Bild 6: Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche (links) und REM-Aufnahme einer Bruchfläche bei 1000-facher Vergrößerung (rechts)

### Zusammenfassung

Das zugrundeliegende Forschungsvorhaben zeigt, dass das Elektronenstrahlschweißen von Duplex-Stählen ohne Wärmenachbehandlung möglich ist, wenn ein Nickelbasis-Zusatzwerkstoff eingesetzt wird. Basierend auf den erarbeiteten Ergebnissen lassen sich die folgenden Aussagen formulieren:

- Der Einsatz des Nickelbasis-Zusatzwerkstoffs ermöglicht eine Verbesserung in der Austenitbildung und damit die Einstellung eines ausgeglichenen Gefüges (durchschnittlich etwa 50-50 % Austenit und Ferrit).
- Durch die Anwendung der Mehrbadtechnik und der Strahloszillation wurde ein prozesssicherer Schweißvorgang und eine daraus resultierende gute Aufmischung zwischen dem Grund- und Zusatzwerkstoff realisiert. Die Verteilung des Nickels und somit des Austenits weist lediglich kleine Inhomogenitäten auf.
- Dank dem ausgeglichenen Gefüge besitzt das Schweißgut sowohl im oberen, als auch im unteren Nahtbereich eine gute Kerbschlagarbeit.
- Die Zugfestigkeit der Verbindung liegt über der des Grundwerkstoffs. Das Versagen beim Zugversuch trat daher ausschließlich im Grundwerkstoff auf.

### Danksagung

Das IGF-Vorhaben 20.622 N "EB-Nickel" der FOSTA - Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Autor & Abbildungen:  
Tamás Tóth, M.Sc.

Ansprechpartner:  
t.toth@tu-braunschweig.de  
a.hesse@tu-braunschweig.de



Link zur Veröffentlichung  
(Welding in the World)

# Entwicklung innovativer Trocknungstechnologien für die Lithium-Ionen-Batterieproduktion

Infolge der zunehmenden Elektrifizierung des Mobilitätssektors für eine emissionsarme Zukunft steigt der Bedarf an Lithium-Ionen-Batterien (LIB) stetig an. Um dieser steigenden Nachfrage gerecht zu werden, müssen alle Prozessschritte der LIB-Produktion kontinuierlich hinsichtlich Effizienz und Qualität verbessert werden. Hierbei birgt der Trocknungsprozess großes Potential in Bezug auf Kosten- und Energieersparnis. Im Rahmen des Forschungsprojektes Epic untersucht das ifs die Anwendung der konduktiven und induktiven Trocknung von Elektroden für die LIB-Produktion.

## Motivation

Der Prozessschritt der Trocknung von Batterieelektroden stellt einen der energie- und zeitintensivsten Prozessschritte in der Lithium-Ionen-Batterieproduktion dar und bietet daher großes Verbesserungspotenzial hinsichtlich Kosten- und Zeitersparnis. Batterieelektroden werden als lösemittelbasierte Paste, auch Slurry genannt, auf eine metallische Stromableiterfolie abgeschieden. Die Elektroden-slurry einer typischen LIB besteht dabei bis zu 95 % aus Aktivmaterial, welches für die Energiespeicherung in der Batterie verantwortlich ist, einem Leidadditiv zur Steigerung der elektrischen Leitfähigkeit und einem polymeren Binder, um das Aktivmaterial sowohl in sich zusammenzuhalten, als auch eine ausreichende Haftung zwischen Elektroden-schicht und Stromableiterfolie zu gewährleisten. Diese besteht im Fall der Anode aus Kupfer, während die Ableiterfolie der Kathode aus Aluminium besteht. Im Anschluss an den Beschichtungsschritt werden die noch feuchten Elektroden nach aktuellem Stand der Technik in kontinuierlichen Prallstrahl-trocknern konvektiv getrocknet.

Der konvektive Trocknungsprozess ist jedoch hinsichtlich der maximal möglichen Trocknungsrate begrenzt. Eine Steigerung der Trocknungsgeschwindigkeit über

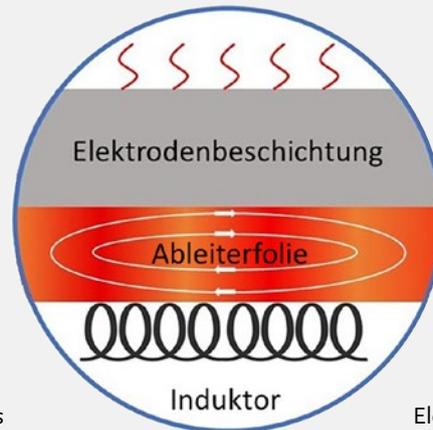
den aktuellen Stand der Technik hinaus führt zu einer Segregation der einzelnen Komponenten der Elektrodenbeschichtung, wodurch sich deren mechanischen und elektrischen Eigenschaften deutlich verschlechtern. So hat beispielsweise eine Ansammlung von Binder an der Elektrodenoberfläche aufgrund einer zu hohen Trocknungsrate eine verminderte Schichthaftung auf der Stromableiterfolie zur Folge. Die Beschränkung des konvektiven Trocknungsschritts auf eine bestimmte Trocknungsrate limitiert somit die Gesamtproduktionsgeschwindigkeit von Batterieelektroden. Die Erforschung alternativer Trocknungstechnologien zur Verringerung der Trocknungszeit bei gleichbleibenden Elektrodeneigenschaften stellt daher eine wichtige Schlüsselkomponente für die Verbesserung der LIB-Produktion dar.

## Induktive und konduktive Trocknung

Im Rahmen des Forschungsprojektes Epic werden die konduktive und induktive Trocknung als alternative Trocknungsmethoden für die Elektrodenproduktion zunächst im Labormaßstab untersucht. Beide Technologien sind dabei in Bezug auf die Batterieherstellung weitestgehend unerforscht und machen sich die elektrische Leitfähigkeit der metallischen Stromableiterfolie zunutze.

Mittels Induktion ist es möglich, elektrisch leitfähige Materialien berührungslos und in kürzester Zeit mithilfe eines, durch einen Induktor erzeugten, elektromagnetischen Wechselfeldes zu erwärmen. Wird die elektrisch leitfähige Ableiterfolie in die Nähe dieses elektromagnetischen Feldes gebracht, wird in dieser eine Spannung induziert. Dies hat wiederum innerhalb der Metallfolie einen Induktionsstrom zur Folge, der aufgrund seiner in sich geschlossenen wirbelförmigen Stromlinien auch als Wirbelstrom bezeichnet wird. Aufgrund des elektrischen Widerstands der Elektrodenfolie wird diese infolge der resultierenden Stromwärme erhitzt. Die entstehende Wärme wird vom metallischen Stromableiter auf die feuchte Elektrodenbeschichtung übertragen und so, anders als bei der konvektiven Trocknung mittels erhitzter Luft, aus dem Material heraus getrocknet. Der Energieeintrag erfolgt demnach direkt und sehr gezielt in die Ableiterfolie, wodurch sich im Vergleich zu konventionellen Trocknungsverfahren deutlich höhere Leistungen übertragen und sich die Erwärmungszeiten enorm beschleunigen lassen. Durch die Verwendung von unterschiedlichen Induktorgeometrien können sowohl punktuelle, als auch komplexere Erwärmungszonen generiert werden, um beispielsweise Spannungen entgegenzuwirken.

Die Untersuchungen des induktiven Aufheizverhaltens von Elektrodenfolien werden an einem dafür eigens konstruierten Prüfstand



im Klebtechnikum des *ifs* durchgeführt (Bild 1). Dieser erlaubt die genaue Positionierung eines oder mehrerer Induktoren direkt unterhalb der eingespannten Elektrodenfolie. Mithilfe einer oberhalb der Elektrodenfolie befestigten Infrarot-Thermokamera werden die Temperaturentwicklung und -verteilung in Abhängigkeit verschiedener induktiver Einflussparameter, wie beispielsweise Pulsweitenmodulation (PWM), Frequenz, Abstand zwischen dem Induktor und der Elektrodenfolie, sowie Induktorgeometrie und -anzahl untersucht. Durch die Thermografie-Aufnahmen lassen sich Rückschlüsse auf den Trocknungsprozess und die Trocknungsgeschwindigkeit ziehen.

Bei der konduktiven Trocknung erfolgt der Energieeintrag wie bei der induktiven Trocknung direkt in die elektrisch leitfähige Elektrodenfolie. Hier wird durch das Anlegen einer elektrischen Spannung ein Strom innerhalb der Ableiterfolie der Elektrode erzeugt und diese so ebenfalls mithilfe der resultierenden Stromwärme erwärmt. So kann die gesamte Elektrodenfläche schnell und effizient getrocknet werden.

Die Untersuchung der konduktiven Trocknung findet in der Battery LabFactory, dem Batterieforschungszentrum der technischen Universität Braunschweig, statt. Hier werden frisch beschichtete Elektrodenfolien auf zwei stromführende Rollen aus Kupfer fixiert,

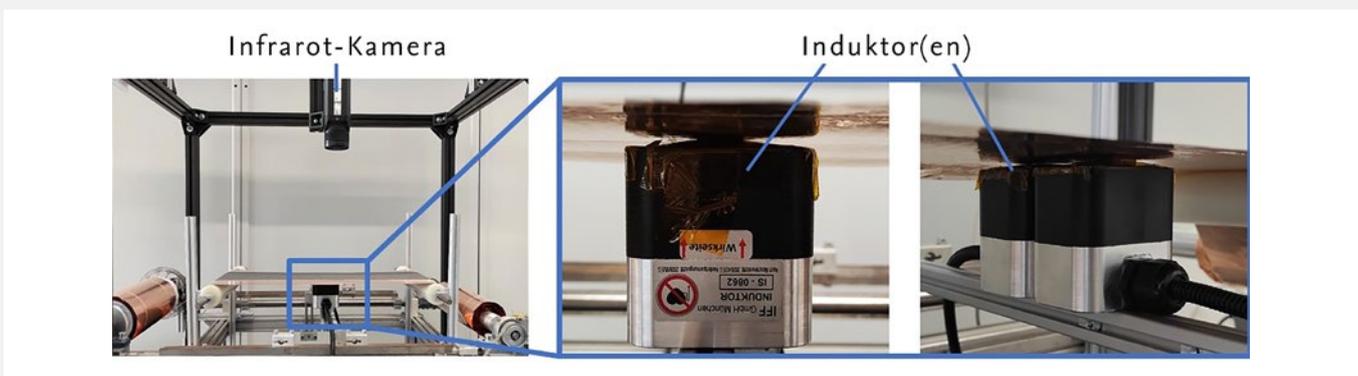


Bild 1: Prüfstand zur Untersuchung der induktiven Trocknung im Labormaßstab

die an einer Gleichstromquelle angeschlossen sind (Bild 2). Der Trocknungsfortschritt wird analog zur induktiven Trocknung mit einer im Prüfstand integrierten Infrarot-Thermokamera bei unterschiedlichen Stromstärken überwacht.

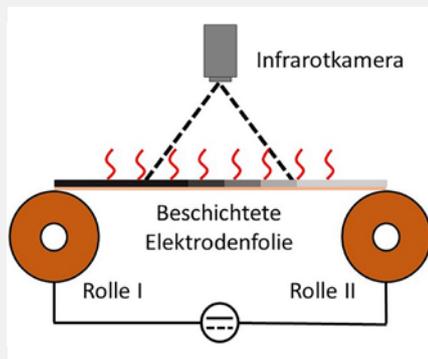


Bild 2: Schematische Darstellung des induktiven Prüfstands

### Erste Ergebnisse

Im Rahmen erster Versuche wurde das induktive Aufheizverhalten von Batterieelektroden charakterisiert. Dazu wurde im Fall der induktiven Erwärmung sowohl die von dem verwendeten Induktor erzeugte Erwärmungszone, sowie der Einfluss der Pulsweitenmodulation (PWM), des Abstands zwischen dem Induktor und der Elektrodenfolie und der Frequenz auf die Temperaturentwicklung innerhalb der Elektrode untersucht. Hier steht vor allem die Erzeu-

gung einer homogenen Temperaturverteilung über die Beschichtungsbreite im Vordergrund, um eine homogene Trocknung innerhalb des erwärmten Bereichs zu gewährleisten. Für den Systemaufbau und zur Untersuchung der Prozess-Eigenschaftsbeziehungen wurden diese ersten Charakterisierungsversuche zunächst an bereits trockenen Anoden durchgeführt.

Die Untersuchungen der generierten Erwärmungszone bei der Verwendung eines einzelnen Blockinduktors ergaben eine inhomogene, gaußartige Temperaturverteilung entlang der Beschichtungsbreite. Die Maximaltemperatur wird punktuell im Induktorzentrum erreicht, nimmt dann in Richtung der Beschichtungsränder rapide ab und ist somit für eine homogene Trocknung über die Beschichtungsbreite ungeeignet. Allerdings konnte durch den Einbau eines weiteren Blockinduktors das erzeugte Temperaturprofil über einen deutlich größeren Beschichtungsbereich homogenisiert werden, der in der momentanen Prüfstandskonfiguration eine Breite von ca. 80 mm umfasst. Um über eine noch größere Beschichtungsbreite eine gleichmäßige Temperaturverteilung zu erzielen, wird für zukünftige Induktionsversuche ein durchgängiger Linieninduktor verwendet.

Weiterhin konnte ein Einfluss der variierten induktiven Parameter auf die Beschichtungstemperatur festgestellt werden:

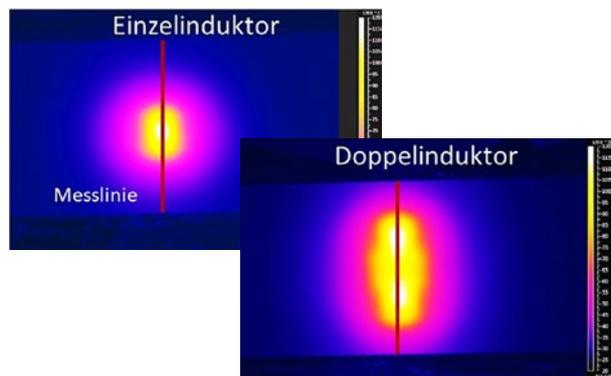
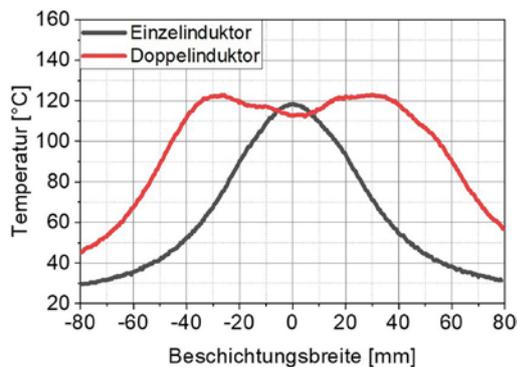


Bild 3: Temperaturprofil über die Beschichtungsbreite einer induktiv erzeugten Erwärmungszone in Einzel- und Doppelinduktorkonfiguration

- Je höher die Pulsweitenmodulation, desto höher ist die erreichte Maximaltemperatur
- Bei einem Abstand zwischen Induktor und Elektrodenfolie von 3 mm wird die höchste Temperatur erreicht
- Bei Vergrößerung oder Verkleinerung des Abstands sinkt die erreichte Maximaltemperatur
- Mit steigender Frequenz nimmt die erreichte Temperatur zu

Da bei einem Abstand von 3 mm die höchsten Temperaturen bei gleichbleibender Pulsweitenmodulation erzielt werden konnten, wurde dieser als Arbeitsabstand für die nachfolgenden Trocknungsversuche gewählt. Außerdem wurde sich auf eine konstante Frequenz von 30 kHz festgelegt, da hier die höchsten Temperaturen bei ebenfalls gleichbleibender PWM erreicht wurden. Zudem haben höhere Frequenzen eine geringere thermische Belastung des verwendeten Induktors zur Folge, sodass für die weiterführenden Versuche ein größerer PWM-Bereich zur Verfügung steht.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden im Anschluss erste induktive Trocknungsversuche an feuchten Anoden bei unterschiedlichen Pulsweitenmodulationen durchgeführt und die zeitliche Entwicklung der Schichttemperatur mittels thermographischer Aufnahmen ermittelt (Bild 4).

Besonders herauszustellen sind hier die Gleichgewichtstemperaturen, die sich nach einer kurzen Aufheizphase für einen definierten

Zeitraum einstellen. Diese sind charakteristisch für den Trocknungsprozess und werden auch als Beharrungstemperatur bezeichnet. Es konnte gezeigt werden, dass sich durch einen induktiven Energieeintrag signifikant höhere Beharrungstemperaturen erzielen lassen als durch die herkömmliche Konvektionstrocknung. Ergebnisse aus Vorgängerprojekten haben weiterhin gezeigt, dass sich die Trocknung ohne negative Beeinflussung der Elektroden Eigenschaften erhöhen lässt, wenn die Beharrungstemperatur erhöht wird. Nachfolgende Untersuchungen der bisher induktiv getrockneten Elektroden hinsichtlich ihrer elektrischen und mechanischen Eigenschaften sind dementsprechend hochinteressant und Gegenstand der noch laufenden Anschlussuntersuchungen.

#### Danksagung

Das Forschungsvorhaben „Epic“ wurde im Rahmen des Kompetenzclusters zur Batteriezellenproduktion „ProZell“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, FKZ 03XP0295B) gefördert.

Autor & Abbildungen:  
Tobias Krüger, M.Sc.

Ansprechpartner:  
tobias.krueger@tu-braunschweig.de

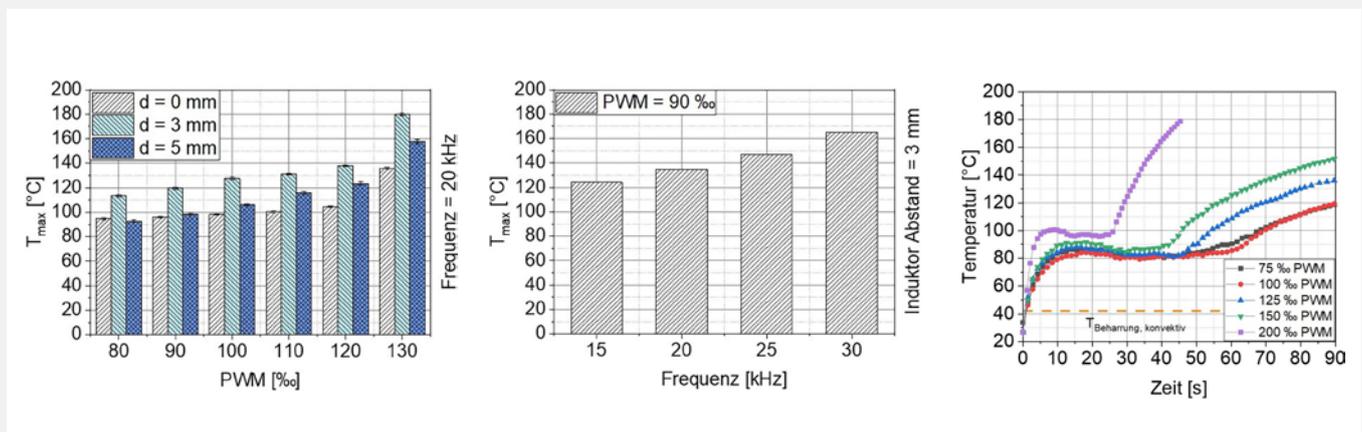


Bild 4: Einfluss der Pulsweitenmodulation, des Abstands zwischen Induktor und Elektrodenfolie und der Frequenz auf die durch Induktion erzeugte Schichttemperatur

# Untersuchung der Einflüsse des Spritzgießprozesses auf die Klebbarkeit von Thermoplasten

In vielen industriellen Anwendungsbereichen wie beispielsweise der Verpackungs-, Konsumgüter-, Spielzeug- und Automobilindustrie werden spritzgegossene Bauteile eingesetzt. Häufig ist es erforderlich, dass diese miteinander oder mit anderen Werkstoffen verbunden werden. Hierfür bietet das Kleben eine gute Möglichkeit, um eine stoffschlüssige und dichte Fügeverbindung herzustellen. Allerdings scheuen viele Anwender den Einsatz von Klebstoffen beim Fügen von Thermoplasten, da mit ihm eine Reihe von Problemen einhergeht. Beispielsweise lassen sich einige Kunststoffe nicht oder nur nach einer aufwändigen Vorbehandlung miteinander kleben. Darüber hinaus können die Klebfestigkeiten innerhalb der Einsatzzeit stark variieren. Ursache hierfür ist häufig die sogenannte Spannungsrissskorrosion, die als wichtigste Ausfallursache für Kunststoffbauteile überhaupt gilt.

## Stand der Technik

Es ist bekannt, dass verschiedene Spritzgießparameter einen Einfluss auf die Eigenspannungen und die Spannungsrissskorrosion von Kunststoffen haben. Gut untersucht ist, dass sich bei spritzgegossenen Kunststoffen ein Eigenspannungsprofil über die Dicke der Probe ausbildet. Meist entstehen am Rand Druckspannungen und in der Mitte Zugspannungen. Die Ausprägung des Eigenspannungsprofils hängt vor allem von der Masse- und der Werkzeugtemperatur ab.

Spannungsrisse in Kunststoffen entstehen in mehreren Schritten. Als erstes muss eine mechanische Spannung bei gleichzeitiger Einwirkung eines Mediums, wie zum Beispiel ein Lösungsmittel oder ein Weichmacher, auf den Kunststoff einwirken. Dadurch entstehen erstmalig Mikrohohlräume, die dann zu Makrohohlräumen anwachsen und schließlich zu sogenannten Crazes werden. Diese sind feine Risse, bei denen beide Seiten noch durch Fibrillen verbunden sind (siehe Bild 1 (a)). Die Crazes wachsen weiter und die Fibrillen reißen bis es zum makroskopischen Sprödbruch kommt (siehe Bild 1 (b)).

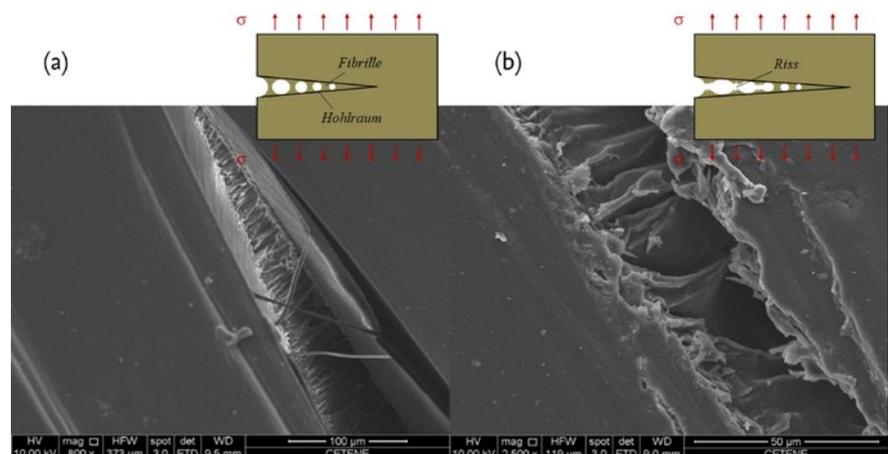


Bild 1: Entstehung von einem Spannungsris in PC Kunststoff: Craze mit Fibrillen (a) und ein fortgeschrittener Riss (b)

In den meisten Untersuchungen zum Einfluss der Eigenspannungen auf den Widerstand gegen Spannungsrisskorrosion (ESCR) wurden die Eigenspannungen gar nicht gemessen, sondern nur ein Vergleich von frischen und getemperten Proben vorgenommen. Das genaue Eigenspannungsprofil der Proben war deshalb nicht bekannt und es konnte nur ein Vergleich von Proben mit und ohne Eigenspannungen vorgenommen werden. So gibt es gegensätzliche Ergebnisse in der Literatur. Es gibt sogar Studien, die gezeigt haben, dass es durch das Tempern bei bestimmten Spritzgießparametern zu Verbesserungen des ESCRs kommt, bei anderen wiederum zur Verschlechterung.

Laut DIN EN ISO 22088 gibt es verschiedene Verfahren, um den ESCR von Kunststoffen zu messen. Hier soll nur kurz auf zwei dieser Verfahren eingegangen werden. In dem ersten Verfahren wird ein Zugversuch in einem ESC-aktiven Medium mit sehr langsamer Zuggeschwindigkeit durchgeführt. Die Streckgrenze ist ein mögliches Maß für den ESCR. Weiterhin kann mit einer Biegeschablone die Probe gebogen werden. Nach dem Benetzen der Probe mit einem ESC-aktiven Medium für eine definierte Zeit wird eine mechanische Messung wie zum Beispiel ein Kerbschlagversuch durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messung sind dann ein Maß für den ESCR. Die Klebbarkeit von Kunststoffen hängt nun in einem gewissen Maß auch vom ESCR des Kunststoffes ab. So enthalten Primer und Klebstoffe Weichmacher oder

andere Lösungsmittel, die Spannungsrisse in dem Kunststoff verursachen können. Dieses Phänomen wurde in der Literatur schon entdeckt, aber noch nicht nähergehend untersucht.

### Problemstellung und Zielsetzung

Das Auftreten der umgebungsbedingten Spannungsrisskorrosion wird sowohl durch den eingesetzten Klebstoff als auch von den Spritzgussprozessparametern selbst maßgeblich beeinflusst. Dennoch ist dieser Zusammenhang bisher kaum untersucht worden. Ebenso findet in den Normen für die Prüfung von Kunststoffen auf umgebungsbedingte Spannungsrisskorrosion und der Analyse von Werkstoffschäden an Thermoplasten durch mediale Beanspruchung keine explizite Betrachtung von Klebstoff als korrosivem Medium statt. In diesem Projekt wurde der Einfluss verschiedener Spritzgießparameter auf die

Spannungsrisskorrosion und die damit einhergehende Klebbarkeit der Spritzgussteile untersucht. Ziel war es herauszufinden, wie über die Prozesskontrolle des Spritzgießens die Klebbarkeit der Kunststoffe verbessert werden kann und so verhindert werden kann, dass die Kunststoff-fügeteile durch den Klebstoff oder den Primer nicht geschädigt werden und so kein Versagen durch Spannungsrisskorrosion auftritt.

### Ergebnisse

Als erstes wurden Proben aus amorphen und teilkristallinen Kunststoffen mit verschiedenen Spritzgießparametern hergestellt und untersucht. Hier soll nur auf die Ergebnisse von dem Kunststoff ABS eingegangen werden. In Abbildung 2 sind die Ergebnisse von den Zugmessungen mit langsamer Dehnrage dargestellt. Es zeigt sich, dass das ESC-aktive Medium die me-



Bild 3: Biegeschablonen, die mit einem 3D-Drucker aus PLA hergestellt wurden zur Ermittlung des ESCR von Klebkomponenten

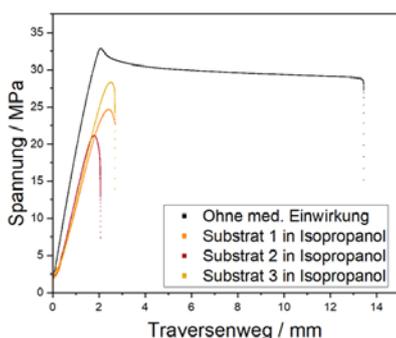


Bild 2: Zugprüfung von unterschiedlich hergestellten ABS-Proben im ESC-aktiven Medium

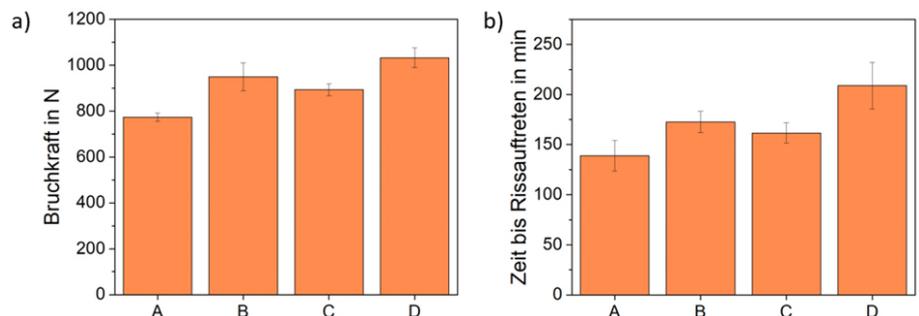


Bild 4: Vergleich der Ergebnisse der ESCR-Prüfverfahren auf ABS-Proben mit langsamer Dehnrage (a) und mit Biegeschablone (b) (A, B, C, D sind Proben, die mit unterschiedlichen Spritzgießparametern hergestellt wurden)

chanischen Eigenschaften verringert und die Spritzgießparameter einen eindeutigen Einfluss auf die Streckgrenze und somit auf den ESCR haben.

Um ein einfacheres Verfahren für die Bestimmung des ESCR zu entwickeln, wurde ein Verfahren mit Hilfe einer Biegeschablone entwickelt. Mit einem 3D-Drucker wurden Biegeschablonen mit einem definierten Radius gedruckt, auf die die Probekörper gespannt wurden. Dadurch wurden definierte Spannungen in die Probekörper eingebracht. Im Weiteren wurden die Probekörper mit einem zähflüssigen Weichmacher bestrichen und die Zeit gemessen, bis die Proben brachen (siehe Bild 3).

Es wurde der ESCR nach der Prüfung mit langsamen Dehnungsraten, der nach Norm definiert ist, mit der neuen Prüfung mit Biegeschablonen verglichen. In Bild 4 sind die Ergebnisse dieses Vergleichs dargestellt. Es zeigt sich, dass die beiden Prüfverfahren die gleichen Ergebnisse liefern. Im nächsten Schritt wurden mittels einer statistischen Versuchsplanung die Zusammenhänge zwischen den Spritzgießparametern und dem ESCR hergestellt. In Bild 5 sind die Ergebnisse dieser Messungen zu sehen. Es ist zu erkennen, dass der ESCR mit der Zeit zwischen Spritzgießen und Messung abnimmt. Die Werkzeugtemperatur und die Temperatur der Schmelze hingegen haben einen positiven Einfluss auf den ESCR. Der Einspritzdruck hat kaum einen Einfluss auf den ESCR.

Außerdem wurden die Eigenspannungen mit dem Layer-Removal-Verfahren der Proben in Dickenrichtung gemessen und mit dem ESCR verglichen. In Bild 6 ist der ESCR gegen die Eigenspannungen in der Mitte der Probe geplottet. Wie zu sehen ist, waren die Eigenspannungen in der Mitte der Probe immer positiv und mit zunehmenden Eigenspannungen nimmt der ESCR ab. Hierbei ist die Tendenz bei den Proben, die eine Woche nach der Herstellung gemessen wurden, wesentlich stärker ausgeprägt als bei den Proben, die später

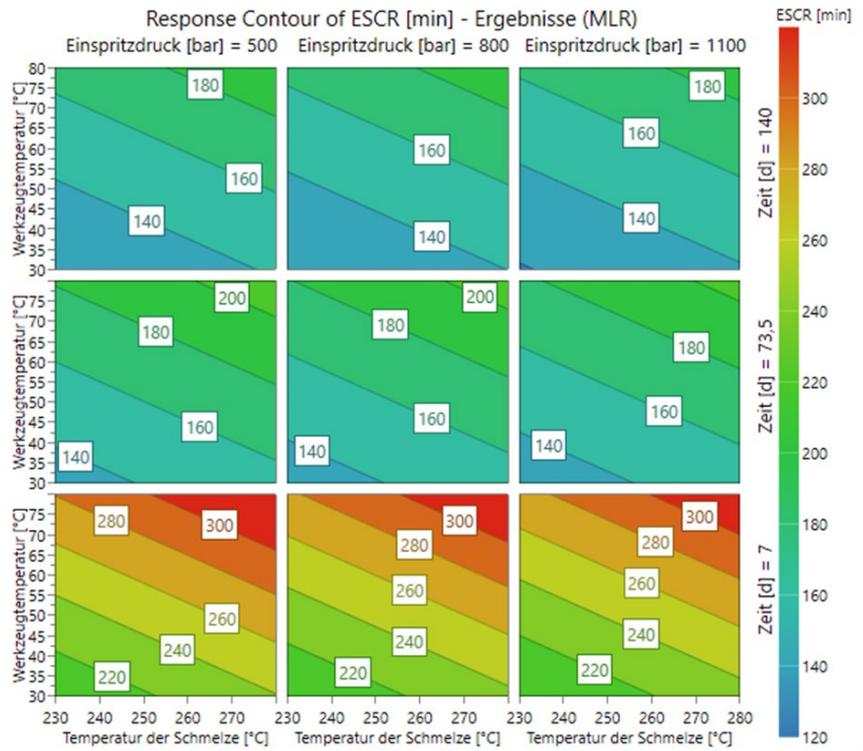


Bild 5: ESCR für ABS in Abhängigkeit von den Spritzgießparametern und der Zeit nach dem Spritzgießen

gemessen wurden sind. Dies zeigt, dass die Zugeigenspannungen in der Mitte der Probe negativ für den ESCR sind, da durch die Spannungen die Rissbildung begünstigt wird.

Weiterhin wurde die Klebbarkeit der Proben untersucht. Leider konnte nicht festgestellt werden, dass der Kunststoff durch den Klebstoff geschädigt wird. Hier war die kohäsive Festigkeit des Klebstoffs zu gering, um ein grenzflächennahes Ausreißen des Fügeteils zu verursachen. Es kam immer zu einem kohäsiven Versagen in der Klebschicht.

Alles in allem konnte eine neue Methode entwickelt werden, um den ESCR von Kunststoffen zu bestimmen und ein Zusammenhang zwischen den Spritzgießparametern, der Eigenspannungen und dem ESCR hergestellt werden.

**Danksagung**

Das IGF-Vorhaben 20.030 N der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS wurde über

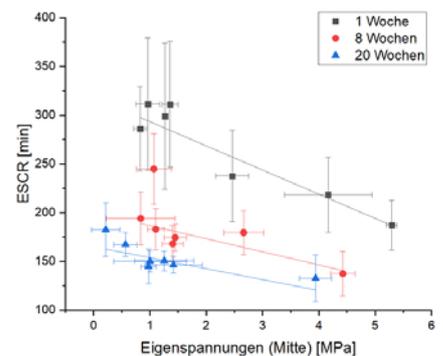


Bild 6: Zusammenhang des ESCRs mit den Eigenspannungen der Probe

die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Autor & Abbildungen:  
Holger Deutges, M.Sc.

Ansprechpartner:  
h.deutges@tu-braunschweig.de

# Design von Klebverbindungen in der additiven Fertigung

Die Additive Fertigung (AF) – auch als 3D-Druck bezeichnet – hat sich mittlerweile aufgrund der großen konstruktiven Freiheiten und stetigen Verbesserungen bei der Fertigungsqualität in der Industrie zur Herstellung von Endprodukten etabliert. Die Designfreiheiten werden allerdings in der Regel durch den verfügbaren Bauraum der Fertigungsanlagen und die daraus resultierende Notwendigkeit zur Bauteiltrennung limitiert. Weitere verfahrensspezifische Einschränkungen, wie orientierungsabhängige Oberflächengüten und mechanische Eigenschaften sowie Nachbehandlungsschritte (z.B. Entfernung von Stützstrukturen), können ebenfalls eine Trennung von Bauteilen erfordern. Die im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren hohen Stückkosten für mittels AF hergestellter Bauteile machen zudem nur dort einen Einsatz sinnvoll, wo die Gestaltungsfreiheit gewinnbringend genutzt werden kann. Daher kommt den für die AF geeigneten Fügetechnologien – wie dem Kleben – eine besondere Bedeutung zu, um neben verfahrensbedingter Bauteiltrennung auch eine gezielte Kombination von additiv und konventionell gefertigten Bauteilen zu ermöglichen. Ein Teil der genutzten technischen Kunststoffe weist ohne zusätzliche Vorbehandlungsmaßnahmen jedoch eine unzureichende Klebeignung auf.

## Zielsetzung

Das Forschungsprojekt IGF 20138 N „Design2Bond“ zielt daher auf die Untersuchung von Maßnahmen zur Verbesserung der Klebeignung von schlecht klebbaren Kunststoffen durch eine gezielte Nutzung der konstruktiven Freiheiten der AF ab. Derzeit fehlen in der Industrie – speziell in KMU – das nötige Wissen über die konstruktiven Möglichkeiten additiver Fertigungsverfahren sowie Erfahrungen im Hinblick auf eine klebgerechte Auslegung mittels AF hergestellter Bauteile.

Für das Verfahren der Materialextrusion (MEX) – auch Fused Deposition Modeling – werden daher folgende Maßnahmen zur Fügezonengestaltung erforscht:

- Formschlüssige Verankerungsstrukturen: Erzeugung oberflächennaher Gitter zur Realisierung hinter-schnittiger Verankerungsstrukturen
- Multi-Material-Bauweisen: Erzeugung einer lokalen Fügefläche aus einem gut klebbaren Kunststoff durch eine Materialkombination

Bei der Multi-Material-Bauweise werden durch die Verarbeitung von mehreren Materialien gradierte Bauteileigenschaften erzeugt, so dass die oberste Schicht (Klebfläche) aus einem gut klebbaren Kunststoff besteht. Dafür wurde hier PETG verwendet (mit Glykol modifiziertes Polyethylenterephthalat).

Es werden einerseits Methoden zur belastungsgerechten Auslegung der Verankerungsstrukturen und Multi-Material-Verbünde untersucht – beispielsweise mittels Dichtegradienten –, um die Klebfestigkeit der Fügeverbindungen gezielt zu steigern (Abbildung 1 a). Dabei sind sowohl Kunststoff-Kunststoff- als auch Kunststoff-Metall-Verbindungen im Fokus. Andererseits werden Möglichkeiten untersucht, die Gestaltungsfreiheit der AF zu nutzen, um eine einfache und reproduzierbare Klebstoffapplikation in der Fügezone sicherzustellen. Hierzu wird die Einbringung von inneren Kanälen zur lokalen Injektion von Klebstoff erforscht (Abbildung 1 c). Aufgrund von fehlenden Prüfnormen für die mechanische Charakterisierung von additiv gefertigten Gitterstrukturen spezifisch für Klebverbindungen werden hierzu geeignete Prüfkörper entwickelt.

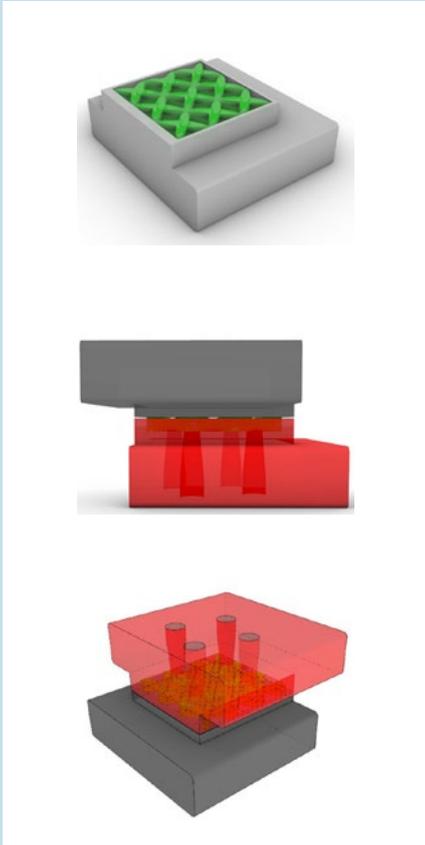


Bild 1: Prüfkörper mit Verankerungsstruktur (a) und Prüfkörper mit Injektionskanälen (b, c)

### Prüfkörpergeometrie

Um die Wirksamkeit der entwickelten Maßnahmen zur Verbesserung der Klebeignung zu untersuchen, wurde eine geeignete Prüfkörpergeometrie entworfen. Die Notwendigkeit ergibt sich aus der Tatsache, dass beim Zugscherversuch mit Fügeteilen aus Kunststoff durch die exzentrisch angreifenden Kräfte große Verformungen mit hohen Spannungsspitzen an den Überlappungsenden entstehen. Hieraus resultieren unerwünschte Fügeiteilbrüche und Schälspannungen in der Klebung. Abbildung 2 zeigt eine solche geklebte Probe in den Spannklemmen der Prüfmaschine und die Verformungen im Bereich der Klebung bei ansteigender Zugbelastung bis hin zum Bruch des Fügeiteils.

Der neu entwickelte Versuchskörper besteht aus zwei 10 mm dicken Blöcken als Fügeteile, verbunden über die Klebfläche von 25 x 25 mm<sup>2</sup>. Dieser Bereich ist 5 mm dick, damit der Versuchskörper während der Prüfung in Profilschienen fixiert werden kann und der Druckbelastung nicht ausweicht. Abbildung 3 zeigt den geklebten

Versuchskörper und die Einspannung in der Prüfmaschine, so dass die Klebung auf Schub belastet wird.

In Abbildung 3 besteht ein Fügeiteil aus sehr gut klebbarem Polymethylmethacrylat (PMMA). Das zweite Fügeiteil wurde aus Polypropylen additiv gefertigt; hierbei wurde eine neu entwickelte hinterschnittige Gitterstruktur im Bereich der Klebfläche integriert. Abbildung 4 zeigt das Fügeiteil und seine Abmessungen.

Ein typisches Bruchbild nach Schubbelastung zeigt Abbildung 5. Der Klebstoff (LOCTITE® HY 4070™) brach kohäsiv in den Bereichen der hinterschnittigen Verklammerung und löste sich ansonsten adhäsiv vom Polypropylen. Wenn das Gitter zu dünn ist, kann zwar mehr Klebstoff die Hohlräume füllen, bei der Prüfung wird dann aber das Gitter zerrissen oder es löst sich komplett vom Polypropylen-Block ab. Hierdurch entstehen geringere Bruchfestigkeiten und große Verformungen. Ist das Gitter zu dick, dringt weniger Klebstoff ein und die Festigkeit nimmt ebenfalls ab.

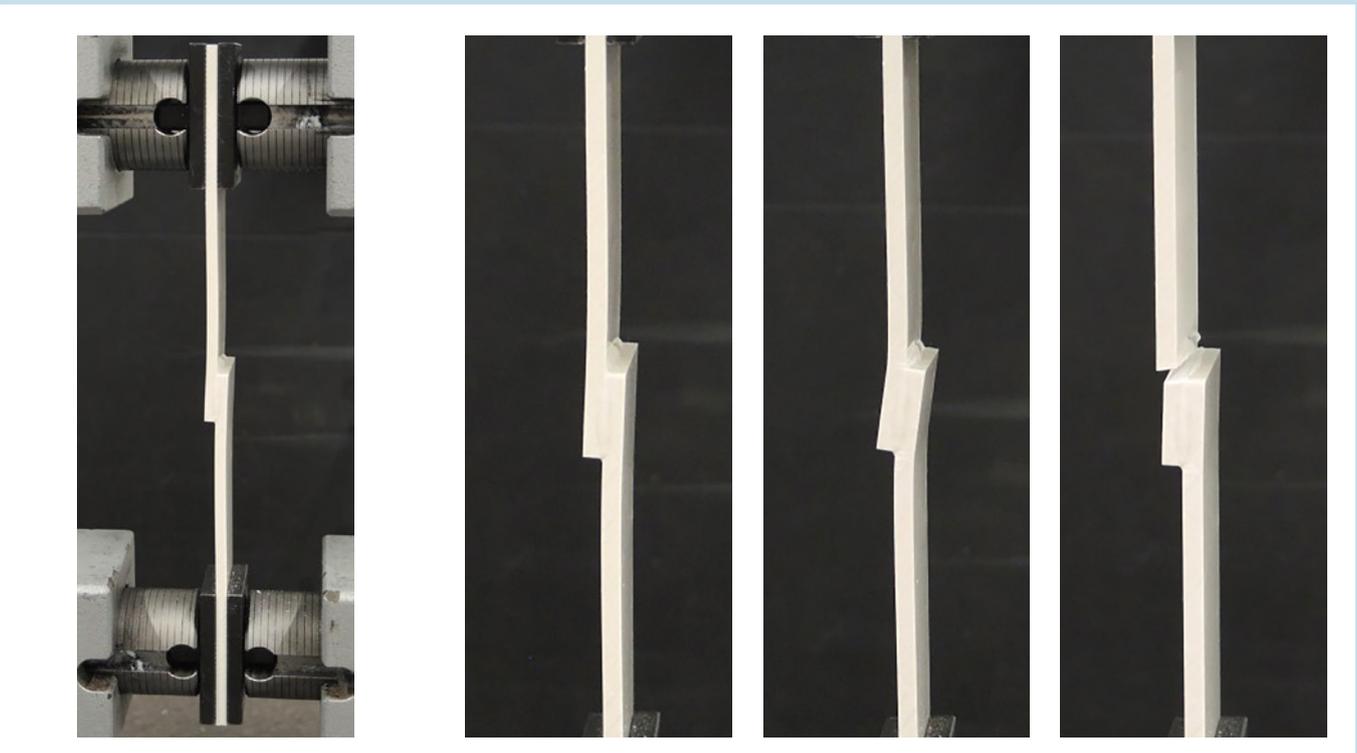


Bild 2: Zugscherversuch (DIN EN 1465) mit Fügeteilen aus 3 mm dickem ABS

### Festigkeiten

Eine Übersicht der erzielten Festigkeitswerte zeigt Abbildung 6. Bei Polypropylen mit glatter Klebfläche werden die niedrigsten Werte erreicht. Der Klebstoff löst sich adhäsiv bzw. die Versuchskörper brechen bereits beim Einsetzen in die Prüfvorrichtung auseinander. Mit der Plasmavorbereitung wird die Klebstoffhaftung verbessert, aber das Versagen bleibt adhäsiv vom Polypropylen. An einer geeigneten hinterschnittigen Gitterstruktur kann sich der Klebstoff hingegen formschlüssig verklammern und bricht kohäsiv.

Bei der Multi-Material-Bauweise besteht die oberste Schicht des PP-Fügeteils aus PETG, so dass die Klebung zwischen PETG und dem PMMA-Fügeteil gut hält. Jetzt löst sich jedoch die Verklammerung zwischen dem PP und PETG, und es kommt auch hier zu Brüchen im PETG.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zeigen, dass die entwickelte Prüfkörpergeometrie sowohl für die Charakterisierung der gitterförmigen Verankerungsstruktur als auch der Klebverbindung und des Multi-Material-Verbunds geeignet ist.

Aus der hohen Gestaltungsfreiheit des additiven Fertigungsprozesses resultiert eine Vielzahl an Möglichkeiten für ein belastungsgerechtes Fügezonendesign im Hinblick auf die Gestaltung der Verankerungsstrukturen. Die Festigkeit der Klebverbindungen hängt hierbei einerseits vom durch den Klebstoff gefüllten hinterschnittigen Volumen ab und wird andererseits durch die Festigkeit des umflossenen Gitters bestimmt. Die Versuchsergebnisse zeigen den entstehenden Designkonflikt zwischen der Erhöhung der Gitterfestigkeit und der Schwächung der Klebverbindung infolge der Erhöhung des Volumenanteils des Gitters. Ähnliche Zielkonflikte entstehen auch bei der Realisierung der formschlüssigen Verbindungen bei der Integration einer lokalen Fügefläche durch die Multi-Material-Bauweise.

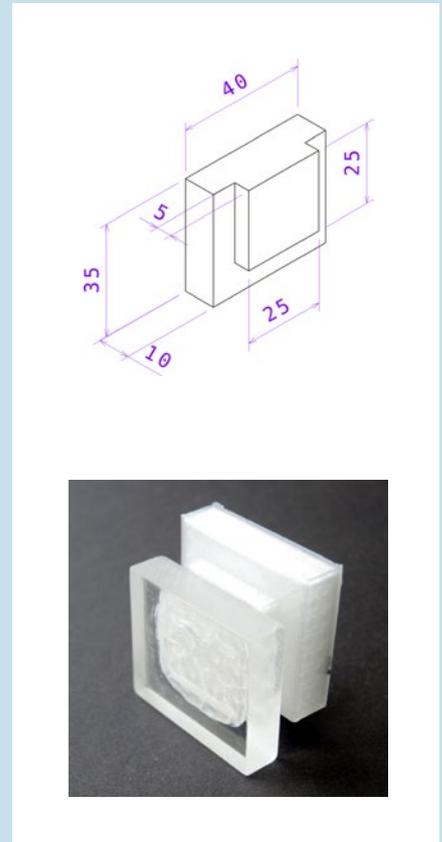


Bild 3: Fügeteil mit hinterschnittiger Gitterstruktur in der Klebfläche und geklebter Versuchskörper

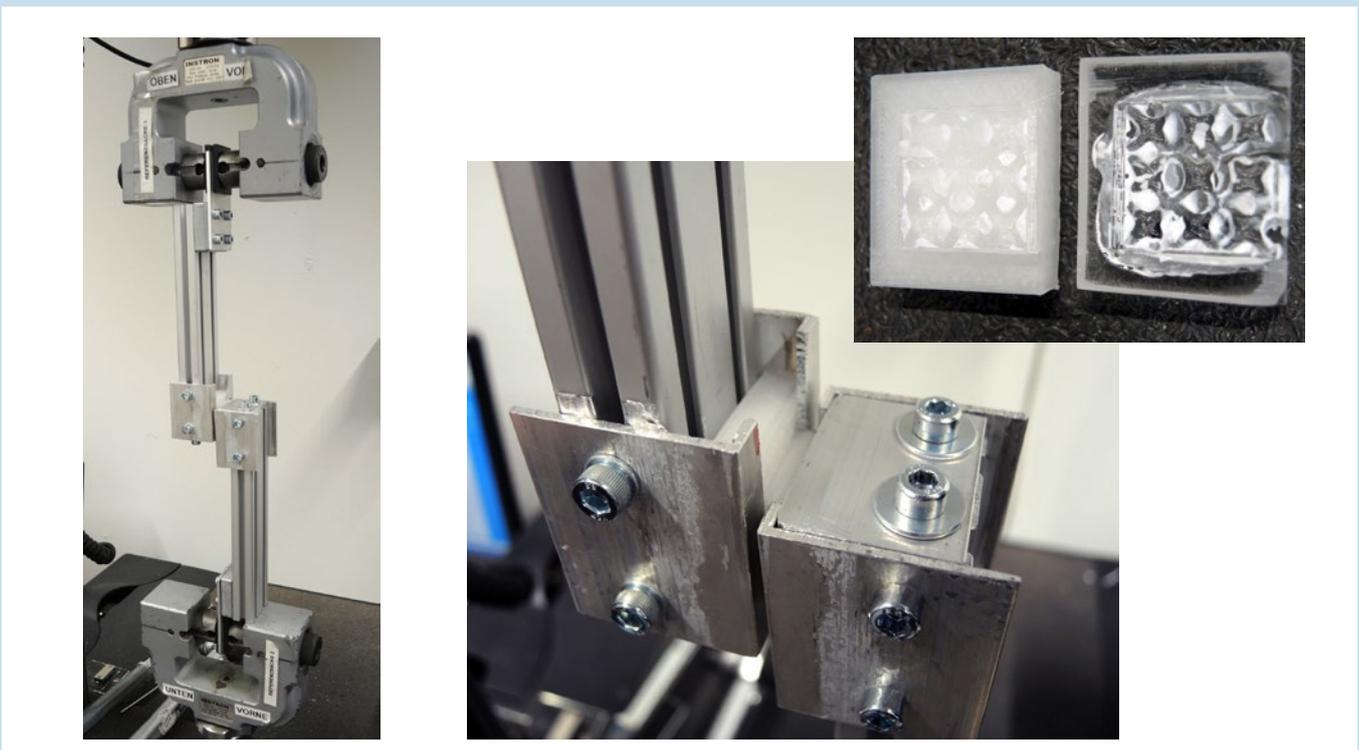


Bild 4: Entwickelte Einspannvorrichtung in der Prüfmaschine und Bruch nach Schubbelastung in den Bereichen der Verklammerung

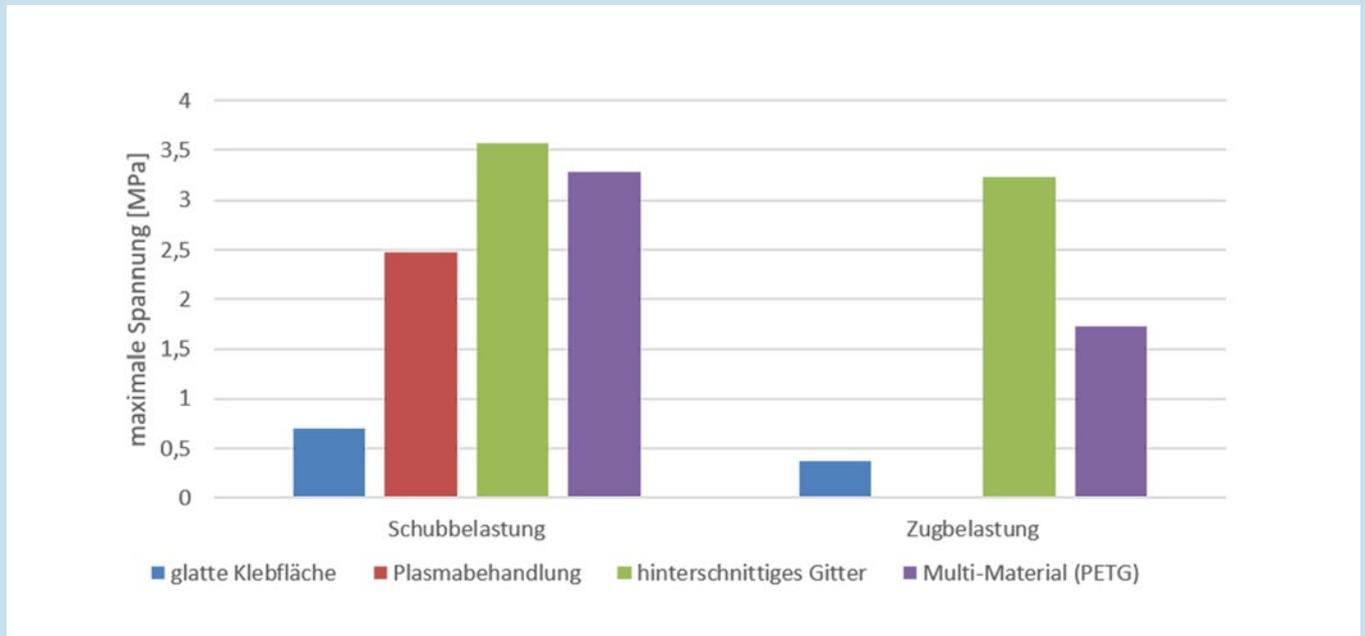


Bild 5: Festigkeitswerte von Polypropylen-Klebung

### Ausblick

Die systematische Aufklärung des Einflusses einzelner Variationen des Gitterdesigns auf die Festigkeit der Klebung, aber auch auf die Festigkeit des Gitters selbst stellen zentrale Arbeitspakete im Rahmen des Projektes dar. Daher liegt der Fokus weiterer Untersuchungen auf den Variationsmöglichkeiten der Verankerungsstrukturen, bspw. durch die Gradierung des Durchmessers der Gitterstäbe, einer lokalen Modifikation der Zellgröße oder der Zellgeometrie durch ein gezieltes Hinzufügen oder Entfernen von einzelnen Stäben.

Die erzielten Projektergebnisse ergänzen und konkretisieren dann das Merkblatt DVS 1401 „Gestaltungsempfehlungen zum Kleben additiv gefertigter Bauteile“ und können direkt von den KMU genutzt werden. Ein direkter Transfer in die Industrie ist damit gewährleistet.

### Danksagung

Das IGF-Vorhaben 20.138 N der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Autor & Abbildungen:

Dr.-Ing. Stephan Koch

Ansprechpartner:

s.koch@tu-braunschweig.de

# MoNoPoLi – Neue Nachwuchsgruppe am *ifs*



Am 1. Februar 2022 startete die Nachwuchsgruppe MoNoPoLi – Moderne und nachhaltige Polymere für Lithium-Ionen-Batterien ihre Forschung. Im Rahmen der Ausschreibung „BattFutur“ fördert das BMBF junge Nachwuchswissenschaftler im Bereich der Batterietechnologie. Auf Grundlage des Rahmenprogramms „Vom Material zur Innovation“ eröffnet sich so die Möglichkeit einer unabhängigen Nachwuchsgruppe innerhalb des *ifs*. Das Vorhaben adressiert die Schwerpunkte zur evolutionären und ressourcenschonenden Weiterentwicklung von Bindermaterialien für Lithium-Batterien.

Batterien und Energiespeicher sind ein bedeutendes gesellschaftliches und wissenschaftliches Forschungsthema der heutigen Zeit, es wird als teilweise Lösung des zu hohen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes gesehen. Lithium-Ionen-Batterien sind dabei aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken und werden in unterschiedlichsten Anwendungen genutzt, sei es in mobilen Kommunikationsgeräten, elektrischer Mobilität oder in der Medizin. Immer herausfordernder werden die Ansprüche an diese Energiespeichersysteme. Die Herstellung und Zusammensetzung einer Lithium-Ionen-Batterie ist komplex und vielfältig. Die Konzeption der Batterie ändert sich ständig, Leistungsdichte und Materialien werden zunehmend verbessert, somit müssen auch die Inaktivkomponenten, wie



der Binder, diesen neuen Systemen angepasst werden. Lange Zeit ist die Binderkomponente als Inaktivmaterial in seiner Weiterentwicklung vernachlässigt worden. Die Evolution dieser Inaktivkomponente generiert über die gesamte Wertschöpfungskette ein Vortreiben dieser Technologie mit Blick auf die zirkuläre Wirtschaft. Halogenhaltige Komponenten werden in Voraussicht auf zukünftige Recyclingtechnologien substituiert. Eine besonders starke Rückkopplung zwischen Material- und Prozesstechnologie spiegelt einen wesentlichen Charakter des Projektes wider.

Die Nachwuchsgruppe MoNoPoLi untersucht die Funktionsweise von Bindermaterialien in der Batterieherstellung über mehrere Skalen hinweg, um diese besser zu verstehen und entsprechend weiterzuentwickeln, für eine nachhaltige und ressourceneffiziente Technologie. Ziel ist es, nachhaltige Materialien für die Batterieprozessierung im Hinblick auf eine ganzheitliche Kreislaufwirtschaft zu entwickeln und zu verbessern. Heute bekannte und eingesetzte Bindermaterialien sind nicht für Nachhaltigkeit, Recycling oder ökologische Verträglichkeit ausgelegt. Daher wird dieses Projekt sowohl neuartige Binder, als auch bestehende Polymerkomponenten näher auf ihre Funktionalitäten hin untersuchen. Es werden fundamental neue Betrachtungsansätze evaluiert. Begleitet

wird dieses Projekt von einem Konsortium aus Industriepaten, die dieses Vorhaben mit ihrem Knowhow begleiten.

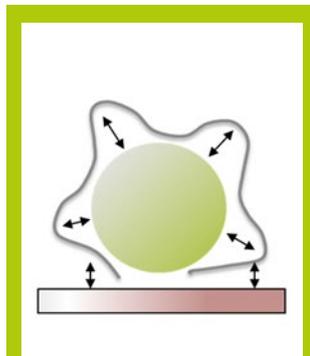
#### **Nachhaltige Bindermaterialien für eine nachhaltige Energiespeichertechnologie der nächsten Generation**

Das Eigenschaftsprofil des Binders wird in den wenigsten Fällen begutachtet oder angepasst, obwohl dieser einen wesentlichen Beitrag zur Performance der Batteriezelle beiträgt. Viele Performance-Probleme und Alterungsvorgänge von Batterien beruhen auf der schwachen internen Elektroden-Verbindung, in der der Binder eine entscheidende Rolle spielt. Binder bilden das vernetzende Bindeglied zwischen Aktivmaterialien und dem Stromsammelner und kreieren so eine eigene Elektrodenbeschichtungsstruktur. Der Aufgabenbereich eines Batteriebinders ist sehr vielfältig und beinhaltet die Adhäsion zum Aktivmaterial, Adhäsion zum Stromsammelner, Flexibilität, Inertheit gegenüber thermischen Belastungen, Beständigkeit gegenüber dem Elektrolyten, eine lange Lebensdauer, ionische Leitfähigkeit uvm. und diese Aufgaben erweitern sich zunehmend mit neu eingesetzten Materialien. Obwohl das Bindersystem nur im geringen Maße in der Batterie vorhanden ist, muss es dennoch viele Anforderungen erfüllen.



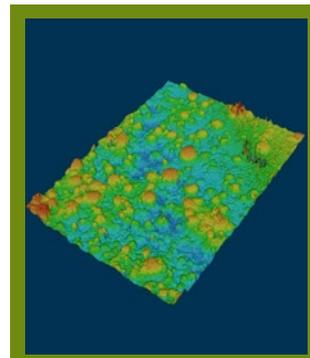
**Arbeitspaket 1:  
Polymerstruktur**

 **BASF**  
We create chemistry



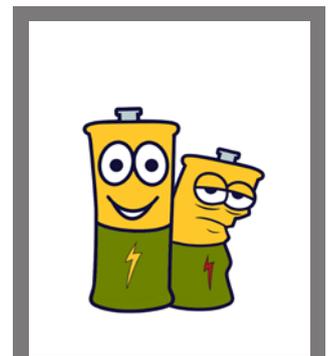
**Arbeitspaket 2:  
Physikalische  
Charakterisierung**

**NETZSCH**



**Arbeitspaket 3:  
Grenzflächenphänomene**

**Zwick / Roell**



**Arbeitspaket 4:  
Lebenszyklus**

**VOLKSWAGEN**  
AKTIENGESELLSCHAFT  


### Die Nachwuchsgruppe MoNoPoLi

Ausschlaggebende Forschungsfragen innerhalb der Nachwuchsgruppe MoNoPoLi, geleitet von Dr. Maja Kandula, sind die chemische Struktur der Binder, die strukturbedingten Wechselwirkungen zwischen den Binderpolymeren und den weiteren Batteriekomponenten, das physikalische Verhalten, die prozessbedingten Einflüsse in der Herstellung und die Veränderung im Betrieb, als auch die Identifizierung der Auswirkungen auf die Zelle. Die chemischen, physikalischen und elektrochemischen Reaktionen der Bindermaterialien stehen im Vordergrund und werden von einem interdisziplinären Team erforscht.

### Danksagung

Das Projektvorhaben dankt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung.

Autorin & Abbildungen:  
Dr. rer. nat. Maja Kandula

Ansprechpartner:  
[m.kandula@tu-braunschweig.de](mailto:m.kandula@tu-braunschweig.de)



### Zur Person

Dr. rer. nat. Maja Kandula ist seit 2016 am Institut für Füge- und Schweißtechnik und leitet seit 2018 die Arbeitsgruppe Faserverbund und Elektromobilität. Nach ihrem Studium der Chemie, promovierte sie am Fraunhofer Institut für Holzforschung zum Thema Ligninbasierte Klebstoffe. Die Förderung der Nachwuchsgruppe eröffnet für Frau Kandula die Möglichkeit, bisherige Forschungsschwerpunkte auf dem Gebiet der biobasierten Bindermaterialien in Batterieanwendungen zu vertiefen und neue Themenfelder zu erschließen.

---

# Qualifizierung thermografischer Verfahren zur Schweißnahtprüfung

Beim Schweißen kann es zu einer Vielzahl von Unregelmäßigkeiten kommen, die die Tragfähigkeit von Schweißverbindungen vermindern. Daher werden zulässige Unregelmäßigkeiten definiert, sodass sichergestellt wird, dass es nicht zum unerwünschten Versagen der geschweißten Strukturen kommt. Um die Integrität der Schweißverbindungen sicherzustellen, werden zerstörungsfreie Prüfverfahren angewandt. Eine alternative Prüftechnik, die sich in den vergangenen Jahren in zahlreichen industriellen Anwendungsfällen etabliert hat, jedoch in der Normung zur Schweißnahtprüfung nicht berücksichtigt wird, ist die aktive Thermografie.

Daher beschäftigt sich das Institut für Füge- und Schweißtechnik im Rahmen des Projektes „QualiTWeld“ mit der Qualifizierung aktiver thermografischer Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Schweißverbindungen. Dabei ist es das Ziel, durch die systematische Betrachtung idealisierter und realer Schweißverbindungen die Verfahrensgrenzen verschiedener Thermografietechniken in Bezug auf die Schweißnahtprüfung zu erfassen und so die Grundlage zur Berücksichtigung der Verfahren der aktiven Thermografie in der Normung zur zerstörungsfreien Prüfung von Schweißverbindungen zu legen. Dabei werden zwei Themenschwerpunkte betrachtet: die Entwicklung und Herstellung der Prüfkörper mit realitätsnahen Unregelmäßigkeiten sowie die Durchführung und Bewertung der thermografischen Messungen.

## **Aktive Thermografie**

Unter dem Begriff der „Aktiven Thermografie“ werden Thermografietechniken zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung zusammengefasst, bei denen durch verschiedene Anregungsquellen Wärme aktiv in das zu prüfende Werkstück eingebracht oder in diesem erzeugt wird. Die resultierenden Wärmeflüsse im Bauteil sind von der Struktur des Bauteils abhängig und werden von Unregelmäßigkeiten im Bauteil beeinflusst. Die Erwärmung des Bauteils wird mit einer Infrarotkamera aufgezeichnet. Durch die Analyse des Erwärmungsverhaltens können weiterführend Rückschlüsse auf die Unregelmäßigkeiten gezogen werden, sofern aufgrund der Unregelmäßigkeiten die Oberflächentemperaturen beeinflusst werden.

Die Bandbreite der eingesetzten Anregungstechniken reicht von optischen Wärmequellen wie Blitzlampen und Lasern über die elektromagnetische Induktion zur Erwärmung der Bauteile bis hin zur Anregung mittels Hochleistungsultraschall. Neben diesen Anregungstechniken, die im Rahmen des Projektes „QualiTWeld“ betrachtet werden, existiert noch eine Vielzahl weiterer Anregungstechniken, die zur Initiierung der Wärmeflüsse im Bauteil genutzt werden. So sind beispielsweise der Einsatz von Peltier-Elementen, eine elektrische Widerstandserwärmung sowie eine konduktive Erwärmung oder Abkühlung möglich. Durch die Wahl der Erwärmungstechnik können unterschiedlichste, an die Prüfaufgabe angepasste Erwärmungsformen erreicht werden. So ist eine punkt-

---

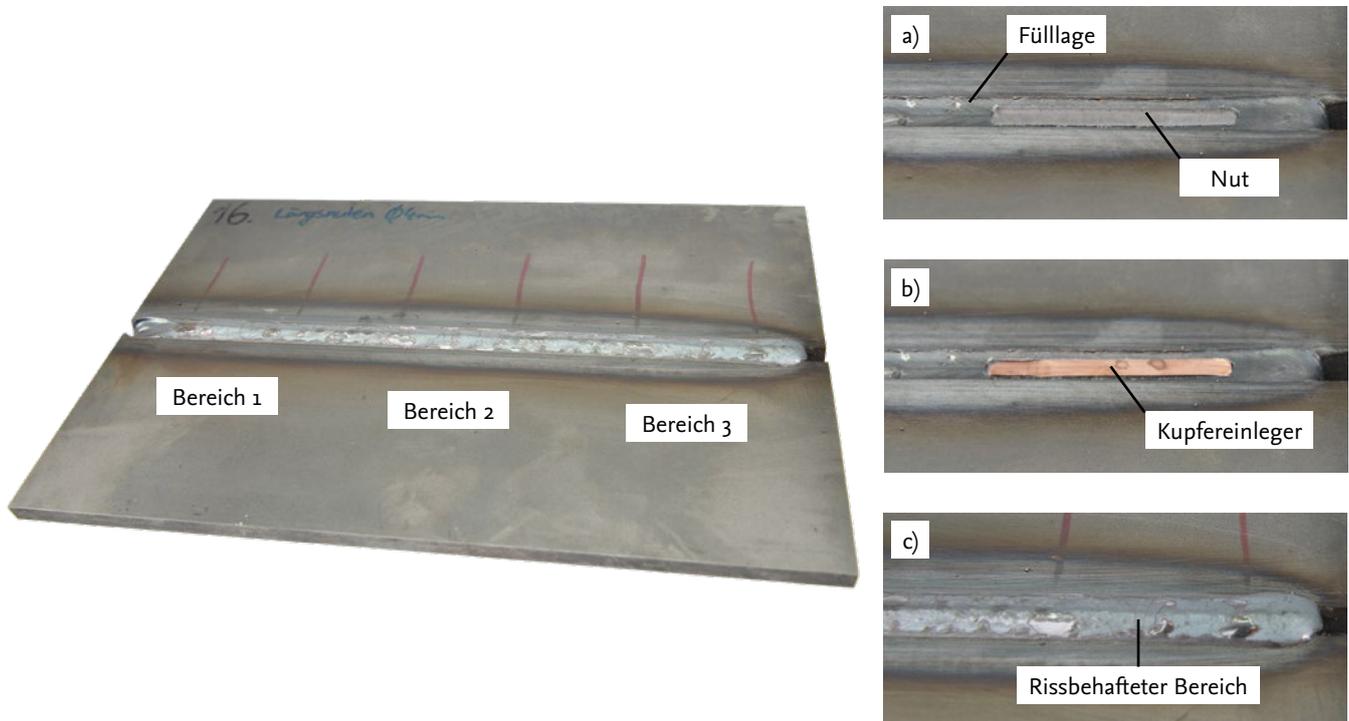


Bild 1: Prüfkörper mit drei rissbehafteten Bereichen zur Bestimmung der Möglichkeiten thermografischer Verfahren; a) Nut in der Füllage zur Fixierung des Kupfers; b) fixierter Kupfereinleger und c) Detailansicht eines rissbehafteten Bereichs

und linienförmige Erwärmung ebenso realisierbar wie flächige Anregung. Einige Techniken sind zudem defektselektiv, das heißt, dass die Anregung direkt mit der Unregelmäßigkeit interagiert, so dass eine Detektion ermöglicht wird.

Aufgrund der vielfältigen und somit an die Prüfaufgabe adaptierbaren Anregungstechniken, der kurzen Prüfzeiten sowie der bildgebenden Natur des Verfahrens haben sich aktive Thermografie-Verfahren in den vergangenen Jahrzehnten als Alternative zu konventionellen zerstörungsfreien Prüfverfahren wie der Farbeindringprüfung (PT), der Ultraschallprüfung (UT) oder aber der röntgenografischen Prüftechniken (RT) in zahlreichen Anwendungen etabliert. So werden optisch angeregten Verfahren insbesondere im Bereich der Prüfung von Bauteilen aus (faserverstärkten) Kunststoffen eingesetzt. Hier sind die Verfahren, die eine flächige Anregung durch Halogenstrahler oder aber Blitzlampen nutzen besonders verbreitet, um innenliegende Unregelmäßigkeiten nachzuweisen. Darüber hinaus ist jedoch auch der Nachweis von Rissen möglich, sofern eine Laseranregung verwendet wird.

Demgegenüber hat sich die induktive angeregte Thermografie für metallische Bauteile etabliert. Der große Vorteil des Verfahrens liegt darin, dass sowohl innenliegende Volumenfehler als auch Oberflächenfehler detektiert werden können. Nachteilig an der induktiven Anregung ist die Beschränkung auf leitfähige Bauteile

und dass es durch die zur Erwärmung genutzten Induktoren zu einer unzureichenden Zugänglichkeit kommen kann.

Die ultraschallangeregte Thermografie ist defektselektiv, da die zur Detektion genutzte Wärme durch Reibungseffekte im Bauteil erzeugt wird. Für dieses Verfahren liegen die Schwerpunkte im Bereich des Nachweises von Rissen in metallischen Bauteilen und in der Klebtechnik im Nachweis von Grenzflächendefekten in der Adhäsionszone. Zudem ist der Nachweis von innenliegenden Unregelmäßigkeiten in Faserverbundwerkstoffen möglich. So können beispielsweise Delaminationen und durch das Ausnutzen von Resonanzeffekten auch innenliegende Unregelmäßigkeiten nachgewiesen werden. Aufgrund der mechanischen Belastungen des Prüfkörpers wird diese Prüftechnik jedoch in der Praxis begrenzt angewandt.

Trotz der prinzipiellen Eignung der thermografischen Verfahren zum Nachweis schweißtypischer Unregelmäßigkeiten, werden diese Verfahren nicht in den Normenwerken zur zerstörungsfreien Prüfung berücksichtigt. Dies ist im Wesentlichen auf fehlende themenspezifische Kenntnisse zur aktiven Thermografie im Umfeld der Schweißnahtprüfung zurückzuführen. Insbesondere die mangelnden Kenntnisse bezüglich der Auflösungsgrenzen der einzelnen Verfahrenstechniken reichen derzeit nicht aus, um eine normative Berücksichtigung zu erlauben. Daher beschäftigt sich das

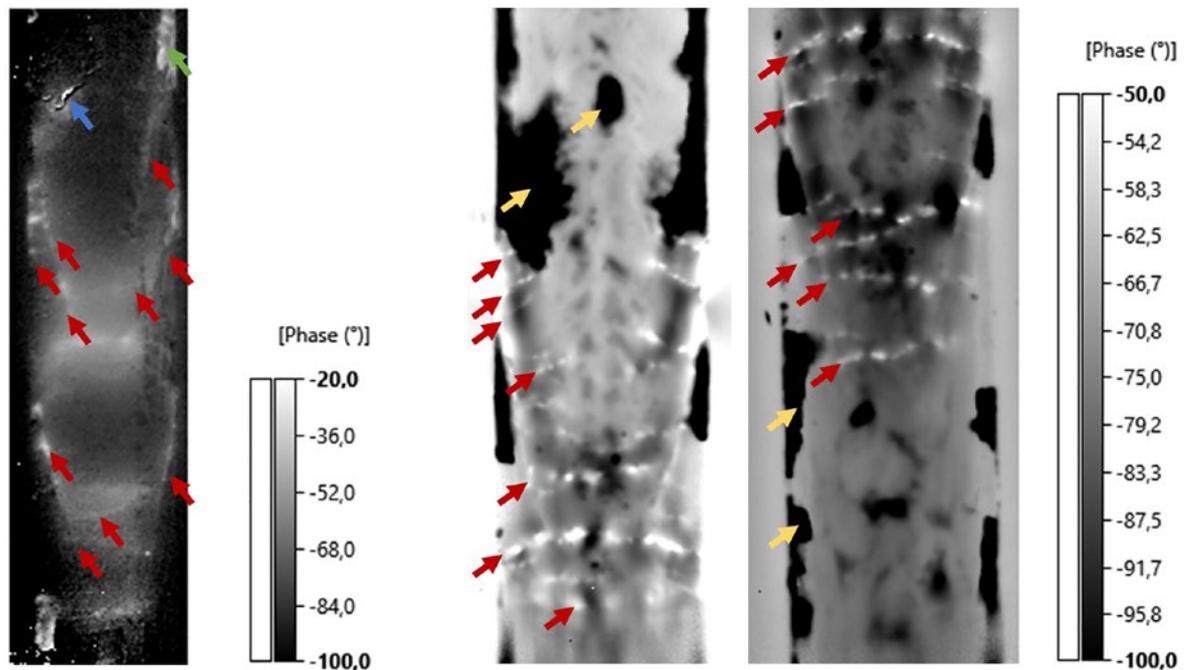


Bild 2: Exemplarische Ergebnisse der Rissprüfung an einer Probe mit rissbehafteten Bereichen mittels der ultraschallangeregten Lockin-Thermografie (links) und mittels der induktiven Puls-Phasen-Thermografie (rechts)

Projekt QualiTWeld mit der Herstellung repräsentativer Prüfkörper mit definierten Unregelmäßigkeiten und der Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen aktiver thermografischer Verfahren zu deren Nachweis.

### Prüfkörperherstellung

Um aktive thermografische Verfahren für die Prüfung von Schweißverbindungen zu qualifizieren, ist es erforderlich die Möglichkeiten und Grenzen der betrachteten Verfahrenstechniken zu erfassen. Die Herausforderung hierbei ist die Herstellung von Prüfkörpern mit definierten, qualitätsrelevanten Schweißnahtunregelmäßigkeiten. Daher liegt einer der Arbeitsschwerpunkte in der Fertigung von realitätsnahen Prüfkörpern. Im Rahmen des Projektes werden hierfür vom ifs Schmelz- und Strahlschweißverfahren sowie die Möglichkeiten der additiven Fertigung betrachtet. So konnten Prüfkörper mit unterschiedlichen innenliegenden Unregelmäßigkeiten als auch solche mit zugänglichen Oberflächeninhomogenitäten erfolgreich hergestellt werden. Dazu ist in Bild 1 ein im Rahmen des Projektes gefertigter Prüfkörper mit einer dreilagigen MAG-Schweißverbindung aus dem Baustahl S235JRC dargestellt, in die durch Zugabe von Kupfer lokale Querrisse eingebracht wurden. Zur Erzeugung rissbehafteter Proben wird das Kupfer auf der Fülllage platziert. Um dabei eine Verdrängung des Kupfers zu verhindern und die rissbehafteten Bereiche definieren zu können, wurden Bohrungen und Nuten in die Fülllage einge-

bracht (vgl. Bild 1a). In diesen Auskerbungen wurde anschließend das Kupfer eingebracht und klebtechnisch fixiert (vgl. Bild 1b). Nach dem Schweißen der Decklage entstehen in den so präparierten Bereichen Risse in der Schweißnaht (vgl. Bild 1c). Durch die Menge und Positionierung des Kupfers kann dabei die Ausprägung und Lage der entstehenden Risse beeinflusst werden. Durch eine entsprechende Anordnung ist es auch möglich, Längsrisse am Übergang zwischen Grundwerkstoff und Schweißnaht zu erzeugen. Allerdings ist es aufgrund der hohen Dynamik des verwendeten MAG-Schweißverfahrens nicht möglich, die detaillierte Ausprägung der entstehenden Risse zu kontrollieren. Um im Rahmen des Projektes dennoch Aussagen bezüglich der Auflösungsgrenzen thermografischer Verfahren ableiten zu können, werden in weiterführenden Arbeiten idealisierte Risse betrachtet, die additiv gefertigt werden oder aber durch eine spezielle Abfolge beim Rührreißschweißen (diese Arbeiten werden vom Fachgebiet Trennende und Fügende Fertigungsverfahren (tff) als Teil des Instituts für Produktionstechnik und Logistik der Universität Kassel durchgeführt) erzeugt werden, da mit diesen Verfahren die geometrische Ausprägung der Risse kontrolliert werden kann.

### Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißproben

Um die Möglichkeiten der thermografischen Verfahren bewerten zu können, werden die hergestellten Prüfkörper unter Nutzung der unterschiedlichen Anregungsquellen geprüft. Im Anschluss

werden die mittels thermografischer Verfahren erzielten Messergebnisse mit den Ergebnissen unter Verwendung der etablierten Verfahren des Röntgens, der Magnetpulverprüfung und der Farbeindringprüfung erzielten Messresultate verglichen. Dabei zeigen die thermografischen Untersuchungen vielversprechende Ergebnisse. Insbesondere im Bereich der Rissprüfung können typische Unregelmäßigkeiten detektiert werden.

Dazu sind in Bild 2 (links) die Ergebnisse einer Messung mit der ultraschallangeregten Lockin-Thermografie dargestellt. Hierbei werden die Anregungsfrequenzen sowie die Leistung der Ultraschallanregung sinusförmig moduliert. Die aufgezeichneten Bildsequenzen werden pixelweise einer diskreten Fourier Transformation (DFT) unterzogen. Dabei wird das zeitdiskrete Messsignal in ein diskretes, periodisches Frequenzspektrum überführt, das auch als Bildbereich bezeichnet wird. Die Auswertung erfolgt dann über die sich dabei ergebenden Phasenlagen. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass sich die Risskonturen als helle Bereiche im Phasenbild ergeben (rote Pfeile). In der Abbildung sind sowohl längs als auch quer zur Sachweißnaht verlaufende Risse erkennbar. Zudem sind Messstörungen nachweisbar, die auf sich bewegende Teilchen auf der Bauteiloberfläche (blauer Pfeil) und stark reflektierende Bereiche (grüner Pfeil) zurückzuführen sind. Beides ist auf die hohe mechanische Belastung der Probe zurückzuführen, die zur Folge hat, dass Schlackereste und Silikatpartikel auf der Oberfläche abgelöst werden und die Messung beeinflussen.

In Bild 2 (rechts) sind die Ergebnisse der induktiven Puls-Phasen-Thermografie der oben aufgeführten Probe dargestellt. Dabei wird ein kurzer Induktionsimpuls zur Erwärmung genutzt, bevor auch hier eine DFT durchgeführt wird. Wie aus den Abbildungen hervorgeht, zeichnen sich in beiden Abbildungen, die die Phasendarstellung der Messsequenzen darstellen, deutliche Rissindikatoren als Abweichungen im Phasenbild ab (rote Pfeile). Auffallend ist, dass vornehmlich Querrisse erkennbar sind, während Längsrisse mit der verwendeten Prüfanordnung nicht dargestellt werden. Neben den Rissindikatoren weisen die Proben Bereiche auf, die in den Bildern schwarz dargestellt sind. Exemplarisch sind einige dieser Bereiche mit einem gelben Pfeil markiert. Hierbei handelt es sich um Silikatreste aus dem im Schweißprozess verwendeten Zusatzwerkstoff. Die Silikatreste verbleiben auf der Schweißraupe und stellen keine relevante Schädigung dar.

Werden die beiden Prüfergebnisse der präsentierten Techniken verglichen, so zeigt sich, dass die Kontrastschärfe im Falle der induktiven Anregung wesentlich ausgeprägter ist. Allerdings werden lediglich die Querrisse kontrastreich dargestellt. Demgegenüber werden durch den Einsatz der Ultraschallanregung auch längs zur Schweißnaht liegende Risse sichtbar gemacht. Diese Unterschiede sind darauf zurückzuführen, dass es sich bei beiden Verfahren um zwei grundsätzlich unterschiedliche Anregungsmethoden handelt. Obwohl beide Verfahren defektselektiv sind, unterscheidet sich die

Art der Wärmeerzeugung als Grundlage der Messung. Während bei der induktiven Anregung die durch das bei der Anregung erzeugte Magnetfeld im Bauteil induzierten Wirbelströme in ihrem Fluss gestört werden, sodass es zu lokalen Temperaturunterschieden kommt, die die Rissdetektion ermöglichen, entsteht bei der ultraschallangeregten Anregung die Wärme durch eine Reibung zwischen den Rissflanken. Dies ist ein viel diffuserer Prozess, woraus sich der Kontrastunterschied ergibt. Vorteilhaft ist jedoch, dass diese Prüftechnik richtungsunabhängig sowohl die Längs- als auch die Querrisse in einer Messung nachweisen kann, wohingegen die induktive Anregung von der Ausrichtung des Magnetfeldes abhängig ist, sodass in der Regel mehrere Messungen notwendig sind, um Risse mit unterschiedlichen Ausrichtungen zu detektieren. Insgesamt zeigt sich jedoch, dass beide Anregungstechniken mit den für zugängliche Oberflächenfehler etablierten Verfahren konkurrieren können.

#### Fazit

Aufgrund der bisherigen Projektergebnisse kann geschlossen werden, dass die Möglichkeit zur Detektion von schweißtechnischen Unregelmäßigkeiten prinzipiell gegeben ist. So können sowohl zugängliche Oberflächenunregelmäßigkeiten als auch innenliegende Unregelmäßigkeiten detektiert werden. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die Detektion schweißrelevanter, innenliegender Inhomogenitäten auf oberflächennahe Bereiche beschränkt ist. Darüber hinaus hängt die Detektierbarkeit maßgeblich von der genutzten Anregungsquelle, der Probenform und Geometrie sowie der verwendeten Auswertemethode ab. Um das Ziel des Projektes, die Qualifizierung der aktiven thermografischen Verfahren zur Prüfung von Schweißverbindungen zu erreichen, werden in fortlaufenden Arbeiten die dominierenden Messparameter sowie der Möglichkeiten und Grenzen der betrachteten Prüfverfahren herausgearbeitet. Auf Basis der Messergebnisse werden dann mit Messergebnissen abgesicherte Normenentwürfe erarbeitet, um die Grundlage zu einer langfristigen Etablierung der aktiven thermografischen Verfahren zur Prüfung von Schweißverbindungen zu legen.

#### Danksagung

Die Untersuchungen erfolgen im Rahmen des Projektes "QualiT-Weld" (FKZ: 03TN0003), das im Rahmen des Förderprogramms "WIPANO - Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen" durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert wird. Die Autoren bedanken sich für die Zusammenarbeit mit den Projektpartnern, der edevis GmbH, der SLV Hannover sowie des tff der Universität Kassel.

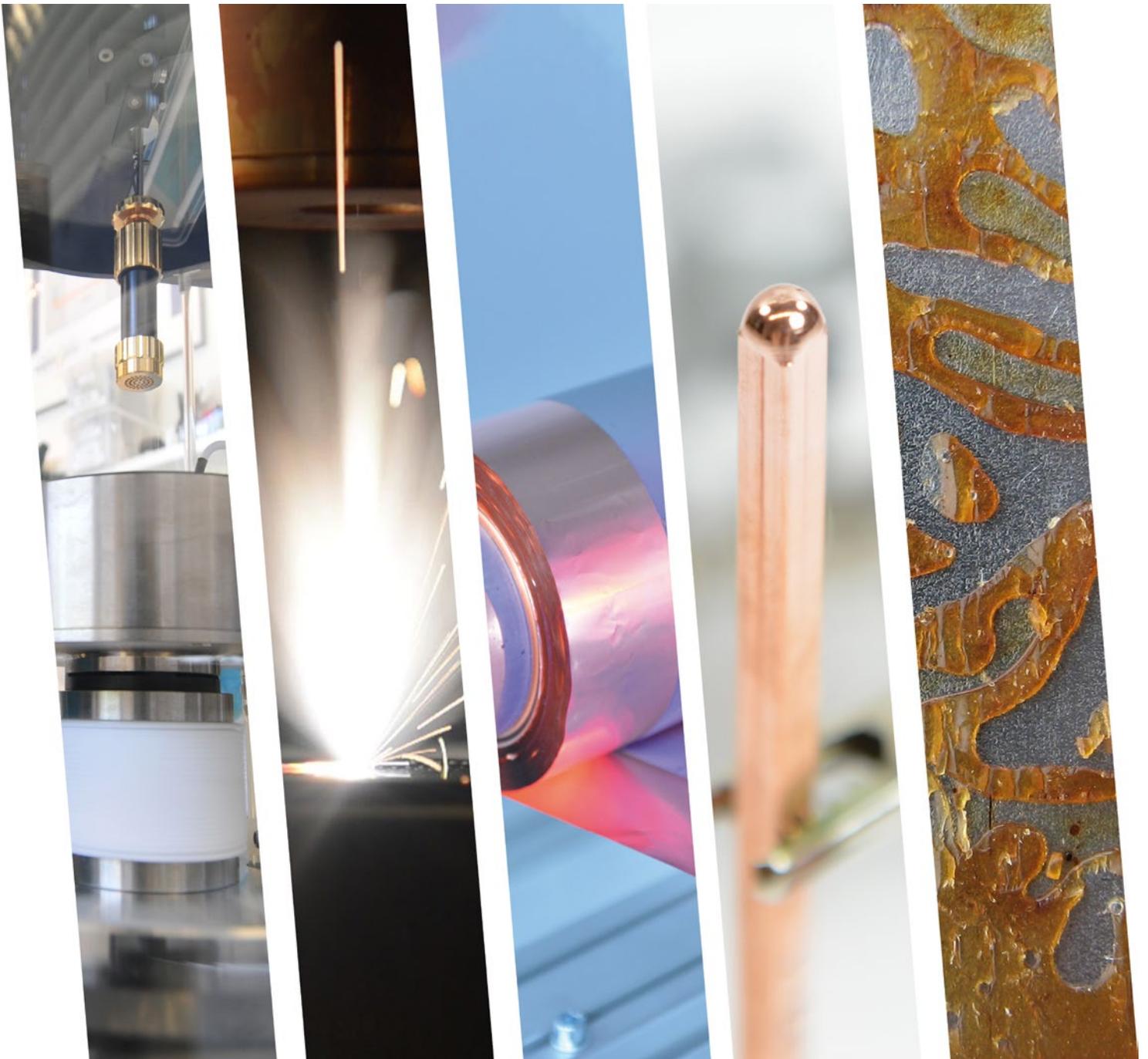
Autor & Abbildungen:

Dipl.-Ing. Malte Mund

Ansprechpartner:

m.mund@tu-braunschweig.de

# Abgeschlossene Forschungsvorhaben



# Thermo-hygro-mechanische Charakterisierung und kontinuumsmechanische Modellierung schnell härtender Polyurethan-Klebstoffe

Eine Studie des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) prognostiziert, dass bis zum Jahr 2035 Fahrzeuge aus einer Vielzahl von Werkstoffen bestehen werden: 20 % herkömmlicher Stahl, 20 % Polymere, 30 % Aluminium und Magnesium. Diese Multimaterialbauweise verlangt nach innovativen Füge-techniken, sodass in vielen Branchen Anstrengungen unternommen werden, Schweiß- oder Hybridverbindungen durch geklebte Verbindungen mit höherwertigen Fügeigenschaften zu ersetzen. Um mit den sehr kurzen Fertigungszyklen zu konkurrieren, müssen die meist langen Fixierzeiten von Klebverbindungen beschleunigt werden. Die schnelle thermische Aushärtung wird häufig als zielführender Ansatz hierzu verfolgt und treibt die Entwicklung von schnell härtenden Klebstoffsystemen voran.

Vor der Freigabe eines neuen Klebstoffs für eine bestimmte Anwendung wird der Klebstoff im Hinblick auf die Anforderungen der Anwendung untersucht und charakterisiert. Da die industriellen Prozessparameter jedoch nicht mit den bekannten messtechnischen Methoden nachgebildet werden können, fehlt es an Wissen darüber, wie man die Grenzen von Aufheizraten, Prozesszeiten und die damit verbundenen Materialeigenschaften untersucht.

Rheologische Messungen lassen ein Monitoring der Viskositäts- und Modulveränderungen zu und ermöglichen somit eine in-situ Bewertung der Aushärtungseigenschaften von Klebstoffen vom unausgehärteten zum ausgehärteten Zustand. Im Rahmen dieses Projekts wurde ein Rheometer mit einem induktiven Heizsystem ausgestattet, um produktionsnahe Temperaturprozesse während einer rheologischen Messung abbilden zu können. Im Fokus standen dabei die hardwareseitige Weiterentwicklung des Messaufbaus, sowie die Anpassung der Auswertungsmethodik an die neuen hochdynamischen Temperaturprozesse. Basierend auf anwendungsnahen Anforderungen wurde das Design des Heizsystems entwickelt. Anschließend erfolgte eine Materialauswahl für den Messaufbau, die Auswahl von Temperaturmesstechnik, sowie die Programmierung einer echtzeitfähigen Temperaturregung zur Einstellung unterschiedlicher induktiver Temperaturverläufe.

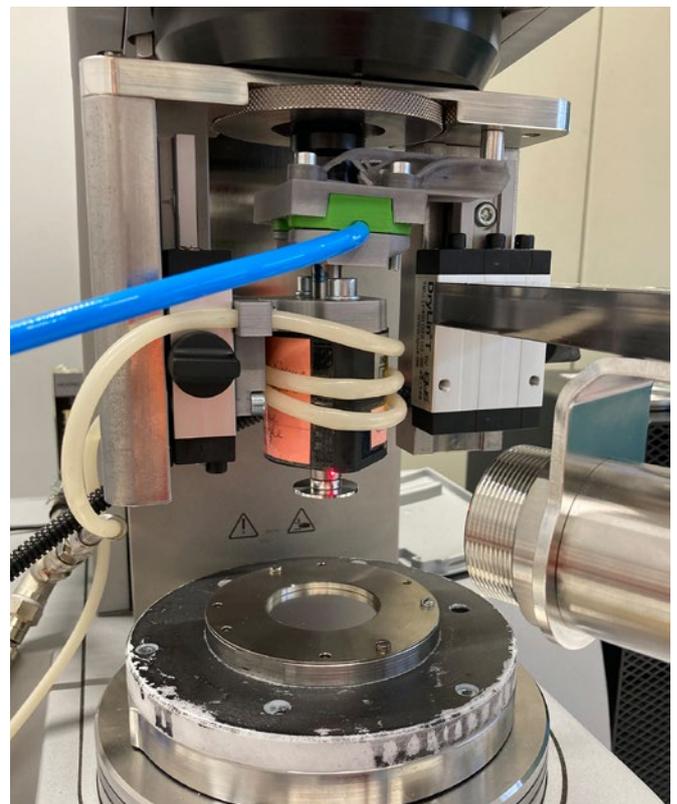
Da die Anforderungen industrieller Temperaturprozesse im grundsätzlichen Widerspruch zu normativen Messvorschriften – dort wird ein Gleichgewichtszustand bei der Durchführung einer rheo-

logischen Messung gefordert – stehen, muss insbesondere die thermische Ausdehnung des Messaufbaus in die Auswertung der Versuchsergebnisse mit einbezogen und kompensiert werden. Darüber hinaus ändert sich der Vernetzungsverlauf in der Probe. Statt einer gleichmäßig fortschreitenden Vernetzung kommt es zu einer Vernetzung vom Wärmeeintragspunkt in den Bulk der Probe.

Im Resultat tragen die gemessenen Eigenschaften zu einer Verbesserung der Simulation von Aushärtungsreaktion bei. Die Simulation der Aushärtungsreaktionen wurde weiterführend durch das Institut für Mechanik der Universität der Bundeswehr umgesetzt.

Autorin & Abbildung:  
Dipl.-Ing. Sarah Glaser

**DFG** Deutsche  
Forschungsgemeinschaft



Rheometer mit Induktionsheizung

# Erweiterung des Verarbeitungsspektrums von laserstrahlgeschweißten Komponenten durch den Einsatz einer Strahlableitung und reduzierten Umgebungsdruck

Moderne Festkörperlaser bieten für Fügeaufgaben im Fahrzeugbau und insbesondere in der Getriebetechnik aufgrund der hohen Strahlqualität, Energieeffizienz, Verfügbarkeit sowie aufgrund der flexibleren Strahlführung zahlreiche Vorteile. Gleichzeitig stellen die hohen Strahlqualitäten und geringen Fokussdurchmesser jedoch höhere Anforderungen an die Fertigungs- und Positioniergenauigkeit der zu fügenden Bauteile. Das übergeordnete Ziel des Forschungsvorhabens bestand daher darin, die Anwendungsgrenzen des Laserstrahlschweißens mit Festkörperlasern durch eine Erhöhung der Prozessstabilität zum Ausgleich fertigungsbedingter Toleranzen für den Einsatz im Getriebebau zu erweitern.

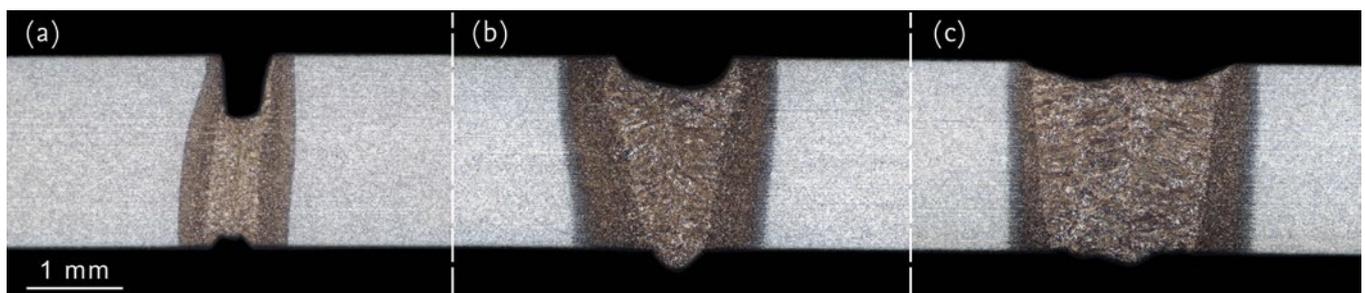
Dem Forschungsvorhaben lag die Arbeitshypothese zugrunde, dass beim Laserstrahlschweißen mit Festkörperlasern die Anwendung einer Strahloszillation in Kombination mit reduziertem Umgebungsdruck zu einer signifikanten Verbesserung der Spaltüberbrückbarkeit bei gleichzeitiger Erzielung hoher Nahtqualitäten führt. Dabei galt es, den optimalen Kompromiss zwischen möglichst hoher Spalt- und Kantenversatzüberbrückung bei gleichzeitig hoher Nahtqualität und Minimierung der Schweißspritzerbildung zu ermitteln. Am Beispiel des Einsatzstahls 16MnCr5 wurde zunächst der Einfluss eines reduzierten Umgebungsdrucks auf die resultierenden Eigenschaften zur Spaltüberbrückbarkeit untersucht. Ferner erfolgte die Evaluierung geeigneter Oszillationsfiguren sowie deren Einfluss auf die Prozessgrenzen hinsichtlich einer Verbesserung der Spaltüberbrückung. Aufbauend auf die grundlegenden Untersuchungen wurden die Auswirkungen der Spaltüberbrückungseigenschaften auf die Verbindungsfestigkeit, die Prozessübertragung auf Axialschweißungen sowie die schweißtechnische Verarbeitung von Vergütungsstahl betrachtet.

Als Haupteinflussgröße auf die Spaltüberbrückung beim Laserstrahlschweißen hat sich die im Prozess resultierende Schweißnahtbreite herausgestellt. Dabei führt ein reduzierter Umgebungsdruck, aufgrund der im Allgemeinen schmalere Nahtgeometrie, einerseits zu einer Abnahme der Spaltüberbrückung. Andererseits bewirkt der reduzierte Umgebungsdruck durch eine Verminderung der Schweißspritzerbildung eine Steigerung der Prozessqualität, insbesondere für die Fertigung von Getriebekomponenten. Für die Erweiterung der Prozessgrenzen zur Überbrückung von Fügespalten empfiehlt sich anhand der Ergebnisse eine Verbreiterung der Schweißnahtgeometrie, so dass mehr Material an den Nahtflanken aufgeschmolzen wird und für eine Spaltfüllung zur Verfügung steht. Dies kann über eine positive Defokussierung des Laserstrahls sowie eine Linienoszillation quer zur Schweißrichtung erreicht werden. Durch die breitere schmelzflüssige Zone bildet sich im Resultat eine niedrigere Decklagenunterwölbung mit flacherem Nahtflankenwinkel aus. Anhand der Ergebnisübertragung auf die schweißtechnische Verarbeitung von Vergütungsstahl zeigte sich darüber hinaus ein positiver Einfluss des reduzierten Umgebungsdrucks auf die schweißinduzierte Rissbildung, der damit zu einer erhöhten Prozesssicherheit zum Laserstrahlschweißen schwer schweißbarer Werkstoffe beiträgt.

Autor & Abbildung:  
Dipl.-Ing. Markus Köhler

FOSTA | Forschungsvereinigung  
Stahlanwendung e. V.

 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz



Durchschweißungen an 2 mm Blechstärke und einem Fügespalt von 0,2 mm mit (a) fokussiertem Strahl, (b) defokussiertem Strahl und (c) Verwendung einer Linienoszillation

# Erhöhung der Sicherheit von Pouchzellen durch Standardisierung des Zellformats und Einbringung von Sicherheitsmechanismen auf Zellebene

Die Lithium-Ionen-Batterie stellt eine Schlüsselkomponente der Elektromobilität dar und der Bedarf an Batterien wird zukünftig weiter steigen. Dabei sollen immer größere Energiemengen effizient auf möglichst geringem Bauraum zur Verfügung gestellt werden. Pouchzellen, die vergleichsweise kompakt konzipiert werden, sind prinzipiell zum Aufbau eines bauraumoptimierten Batteriespeichers geeignet, jedoch bieten Zellhersteller aktuell eine Vielzahl unterschiedlicher Formate an. Des Weiteren erschweren unterschiedliche länderspezifische Zulassungsanforderungen eine einheitliche Batteriekonfiguration über alle Märkte hinweg.

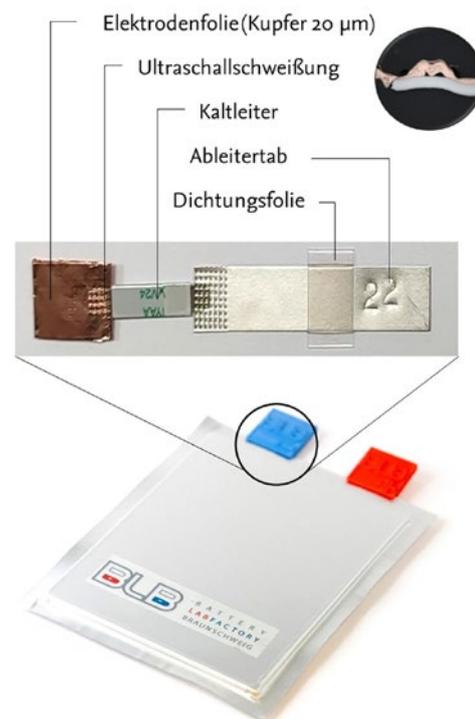
Um diesem Trend entgegenzutreten, zielen die Projektpartner darauf ab, Zellen durch die Entwicklung neuer Komponenten, die Standardisierung von Formaten und die Integration geeigneter Sicherheitsmechanismen in die Pouchzelle zu vereinheitlichen und sicherer zu gestalten. Hierzu verfolgte das Konsortium aus den Mitgliederinstituten der Battery LabFactory Braunschweig zwei parallele Arbeitsstränge. Ausgehend von indifferenten Sicherheitstestprozeduren und verschiedenen Formaten von Pouchzellen wurden sowohl die internationalen Normen im Bereich der Batteriesicherheitstests harmonisiert, als auch die Entwicklung einheitlicher Zellformate vorangetrieben. Dazu wurden die Sicherheitsanforderungen aus dem asiatischen und europäischen Markt zusammengetragen und in Einklang mit den zugehörigen Sicherheitstests gebracht. Als Beispiele für Sicherheitstest können mechanische, elektrische und thermische Versuche herangezogen werden.

Parallel dazu wurden auf Zellebene neue Materialkombinationen untersucht und die Komponentenentwicklung vorangetrieben. Dies beinhaltet sowohl experimentelle Untersuchungen als auch die Marktanalyse kommerzieller Pouchzellen. Ferner wurde die Integration zusätzlicher Sicherheitsmechanismen (z. B. Berstscheiben, Kaltleiter, Stromunterbrecher) untersucht und umgesetzt, um den Sicherheitsstandard von Pouchzellen auf ein vergleichbares Niveau wie das von Rundzellen (z. B. Zellformat 18650) anzuheben.

Am Institut für Füge- und Schweißtechnik wurden sicherheitstechnische Fragestellungen an den zahlreichen Fügstellen adressiert und beantwortet. Hierzu wurden Kupfer- und Aluminiumfolien mittels Ultraschall geschweißt und anschließend mechanisch sowie

elektrisch charakterisiert. Eine weitere Fügezone, die hohe Sicherheitsanforderungen erfüllen muss, ist die Fügestelle zwischen den Aluminiumverbundfolien der Zellohülle. Diese wird mittels eines Impulssiegelverfahrens verschlossen und anhand ihrer mechanischen Performance, sowie deren Dichtheit charakterisiert. Die Einbringung eines Sicherheitselementes (Abbildung oben) in die Zelle und deren Anbindung an Komponenten ist ein weiterer Fokus unserer Arbeiten. Bei Erreichen einer voreingestellten Temperatur führt der Kaltleiter eine reversible Trennung zwischen Elektrode und Ableiter durch, deaktiviert damit die Zelle und schützt sie vor einem Durchgehen (Entzündung als Folge einer Selbstaufheizung). Sobald die Zelltemperatur sich wieder im Betriebsfenster befindet, kann diese wieder im Modul beansprucht werden.

Autor & Abbildung:  
Houssin Wehbe, M.Sc.



Pouchzelle mit potentieller Anordnung des Kaltleiter-Sicherheitselementes

# Mechanisches Verhalten von Silikonklebstoffen in Abhängigkeit der Belastungsdauer (Kurzzeit-, Langzeit- und Schwingbelastung)

Das globale Sicherheitskonzept der ETAG 002 (es handelt sich hierbei um die Leitlinie zur Europäischen Technischen Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen) sieht vor, verschiedene auf die Bemessung Einfluss nehmende Faktoren pauschalisiert durch einen globalen Sicherheitsfaktor zu berücksichtigen. Hierunter fallen auch fertigungsbedingte Inhomogenitäten. Im Rahmen des abgeschlossenen Projektes „NewMechsiko“ wurde der Einfluss verschiedener dieser Inhomogenitäten (unzureichende Durchmischung, Lufteinschlüsse, u.a.) auf das Materialverhalten von zugelassenen Silikonklebstoffen untersucht und auf verschiedenen Zeitskalen betrachtet.

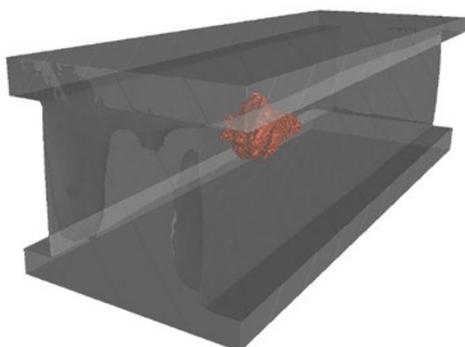
Volumen, Anzahl und Position der in das Klebstoffgefüge eingebrachten Inhomogenitäten wurden mit Hilfe bildgebender Mikro-CT-Aufnahmen vorab genau bestimmt, um so den tatsächlichen Einfluss auf das Werkstoffverhalten bei der zerstörenden Prüfung beurteilen zu können. Die Untersuchungen erfolgten primär auf Basis der sogenannten H-Probe nach ETAG 002; in der gezeigten Abbildung sind solche geprüften Proben mit eingebrachtem Styropor als simulierte „Luft“ dargestellt. In der CT-Aufnahme ist die Lage und das Volumen messbar, und bei der Prüfung kann dann bewertet werden, ob die Inhomogenität Auslöser des Versagens ist.

Über die Projektlaufzeit hinweg wurden allerdings auch ein strukturell geklebtes Brüstungselement bei einem Projektpartner vor Ort sowie typgleiche nachgestellte Brüstungselemente im Labor

gemonitort bzw. quasistatisch und dynamisch untersucht. Auf Basis der erhobenen Daten erfolgte abschließend eine Bewertung der gängigen den Fertigungsprozess begleitenden qualitätssichernden Maßnahmen sowie eine Einschätzung des derzeitigen Sicherheitsniveaus in Bezug auf diese fertigungsbedingten Inhomogenitäten.

Es konnte gezeigt werden, dass die die Fertigung begleitenden Prüfverfahren, z.B. im Hinblick auf die Mischqualität des Klebstoffes, gut zur Qualitätssicherung geeignet sind. Inhomogenitäten, die durch diese Verfahren (noch) nicht auffallen, haben keinen signifikanten Einfluss auf die zu erwartende Festigkeit. Nicht detektierbare moderate Fehlstellen oder Fremdkörper im Klebstoffgefüge haben nach jetzigem Erkenntnisstand ebenfalls nur einen sehr geringen Einfluss, sofern sie sich im Inneren der Fuge befinden. Sie sind auf Basis der durchgeführten Untersuchungen relevant für den Rissverlauf, nicht aber für die Rissinitiierung. Größere Einschlüsse mit einem Defekt-Volumen-Verhältnis ab ca. 2%, nach Lage der Inhomogenität ggf. auch geringer, können hingegen zu einem verfrühten Versagen unter dynamischer Wechselbelastung im Ermüdungsversuch führen. Das Projekt wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Stahlbau und Leichtmetallbau der RWTH Aachen University durchgeführt.

Autorin & Abbildung:  
Dipl.-Chem. Elisabeth Stammen



CT-Aufnahme einer Klebung mit eingebrachtem Styropor (links) und Einrichtung zur Prüfung eines geklebten Brüstungselementes (rechts / Bild: STB, RWTH Aachen University)

# Elektronenstrahlschweißen von Kupfer-Hairpins für die Elektromobilität

Im Rahmen des Vorhabens erfolgte die Untersuchung zum Elektronenstrahlschweißen von rechteckigen Kupferleitern, die im Stator eines Elektromotors zum Einsatz kommen. Der für das Schließen des elektrischen Kreises erforderliche Schweißprozess ist durch die physikalischen Eigenschaften des Kupfers mit wesentlichen Herausforderungen verbunden. Die hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit benötigt einen konzentrierten Wärmeeintrag, sodass ein stabiler Schmelzprozess aufrechterhalten werden kann. Ferner neigt das Kupfer dazu, bei Erstarrung Poren zu bilden, falls Restsauerstoff im Grundwerkstoff vorhanden ist.

Um die bereits benannten Herausforderungen zu adressieren, kann das Elektronenstrahlschweißen als ein für diese Fügeaufgabe prädestiniertes Verfahren in Betracht gezogen werden. Das Verfahren bietet wesentliche Vorteile: die Fügepartner können ohne die beim Laserstrahlschweißen auftretende optische Reflexion, mit hohem Automatisierungsgrad und hervorragender Flexibilität verschweißt werden. Die Studie fokussierte sich im Wesentlichen auf den sauerstofffreien Werkstoff Cu-OFE und das sauerstoffhaltige Material Cu-ETP. Als Schweißstrategie kam eine auf der Ablenkung des Elektronenstrahls beruhende mehrfache Überfahrt der Fügekannte zum Einsatz. Sowohl diese, als auch die überlagerte Strahloszillation wird durch elektromagnetische Felder realisiert, sodass der Schweißprozess im Bruchteil einer Sekunde, ohne die Notwendigkeit mechanischer Achsenbewegungen zu realisieren ist.

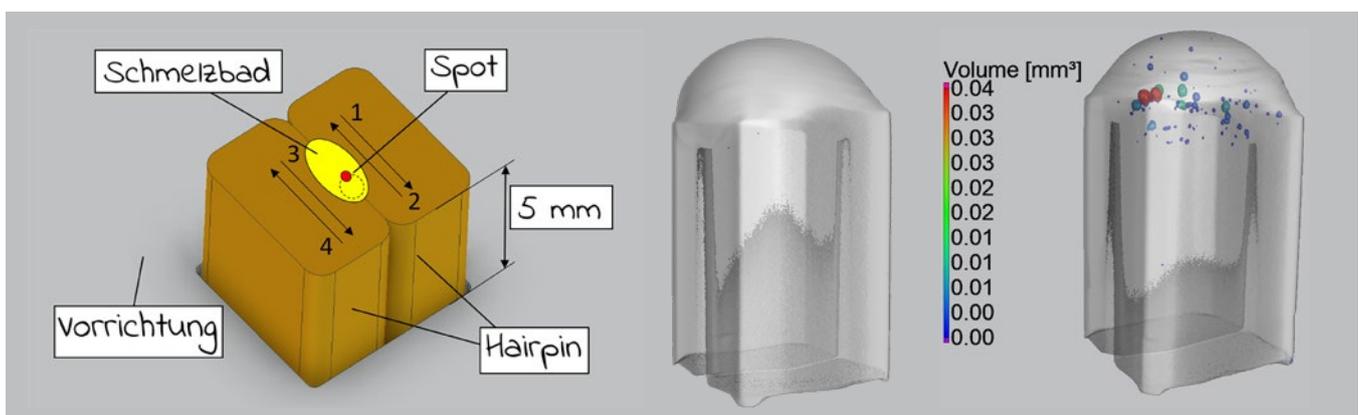
Der Anbindungsquerschnitt der Schweißverbindung wurde durch die Anpassung des Strahlstroms sowie der Schweißgeschwindigkeit derart eingestellt, dass er mindestens 105-110 % des Leiterquerschnitts beträgt. Auf diese Weise lässt sich eine unerwünschte Erhöhung des Widerstands im elektrischen Kreis vermeiden. Hinsichtlich der Porosität wurde festgestellt, dass dafür hauptsächlich der gelöste Sauerstoff verantwortlich ist. Enthält der Grundwerkstoff praktisch keinen Sauerstoff ( $< 5$  ppm), was beim Cu-OFE der Fall ist, können die Hairpins mit einem breiten Spektrum von Parametern geschweißt werden. Unter Verwendung von Cu-ETP war demgegenüber eine Parameteroptimierung erforderlich, mithilfe derer sich die Porosität in großem Maße reduzieren ließ.

Autor & Abbildung:  
Tamás Tóth, M.Sc.

Dobeneck•Technologie•Stiftung



**Link zur Veröffentlichung**  
(Welding in the World)



Die angewendete Schweißstrategie (a) sowie eine geschweißte Cu-OFE (b) und eine Cu-ETP (c) Verbindung



### Konferenz „Advanced Joining Processes (AJP) 2021“ in Sintra bei Lissabon

Auf der zum zweiten Mal stattfindenden Konferenz „Advanced Joining Processes“ vom 21. bis 22. Oktober 2021 wurden dieses Mal insgesamt sechs wissenschaftliche Beiträge vom Institut für Füge- und Schweißtechnik präsentiert. Darunter waren vier Beiträge aus dem Bereich Klebtechnik von Niklas Günther, Jens Philipp, Sarah Glaser und Michael Griese sowie ein Beitrag aus der Open Hybrid LabFactory (OHLF) von Christian Gundlach und ein Beitrag aus der Abteilung Schweiß- und Strahltechnik von Jonas Hensel. Aus den präsentierten Beiträgen werden zudem wissenschaftliche Veröffentlichungen für verschiedene Journals erstellt.

Die Konferenz fand im Hotel Villa Galé in Sintra, circa 30 km nordwestlich von Lissabon statt. Aufgrund der zum Zeitpunkt der Konferenz entspannten Coronalage in Portugal konnte die Konferenz als hybride Veranstaltung durchgeführt werden und einige Teilnehmer vom Institut für Füge- und Schweißtechnik konnten auch persönlich anreisen. Abgeschlossen wurde die Veranstaltung mit einem Galadinner in der Casa dos Penedos.

Im Anschluss an die Konferenz haben die Teilnehmer des Institutes ihren Aufenthalt in der Region verlängert, um die zahlreichen Sehenswürdigkeiten vor Ort bei bestem Wetter zu erkunden: Die pulsierende Stadt Lissabon, Sintra mit seinen zahlreichen Lustgärten, Schlössern und seiner maurischen Festungsanlage sowie den nahegelegenen atlantischen Ozean und den westlichsten Zipfel des europäischen Kontinentes, Cabo da Roca.

Wissenstransfer

<p>Bonding behavior of fusion bonded hybrid joints with press hardened steel and glass mat reinforced thermoplastic on a demonstrator scale <b>(AJP21_133)</b></p> <p>C.Gundlach (Technische Universität Braunschweig, Germany), J Wehmeyer, B-A Behrens, K Dilger, S Hartwig</p>	<p>A novel in-situ computed tomography measurement technique for advanced analytics of adhesive bonds <b>(AJP21_131)</b></p> <p>J.Philipp (Technische Universität Braunschweig, Germany), E Stammen, K Dilger</p>	
<p>In-situ analysis of stress and microstructure evolution during TIG welding of high-alloy steels using energy-dispersive X-ray diffraction <b>(AJP21_106)</b></p> <p>N.Hempel (Technical University of Munich, Germany), T Nitschke-Pagel, M Klaus, C Genzel, K Dilger</p>	<p>A temperature and conversion dependent cohesive zone approach for the calculation of process induced damage in adhesive bondlines of multi-material structures <b>(AJP21_129)</b></p> <p>M.Griese (Technische Universität Braunschweig, Germany), N Günther, E Stammen, K Dilger</p>	
<p>Laser welding of 16MnCr5 butt welds with gap: Resulting weld quality and fatigue strength <b>(AJP21_10)</b></p> <p>J.Hensel (Technische Universität Braunschweig, Germany), M Köhler, K Dilger</p>	<p>Consideration of manufacturing induced adhesive damage in automotive simulations <b>(AJP21_120)</b></p> <p>N.Günther (Technische Universität Braunschweig, Germany), M Griese, E Stammen, K Dilger, E Ince, K Koutalba</p>	
<p>Characterization of adhesive curing reactions using rapid heat rheology</p> <p>Sarah Glaser<sup>1</sup>, Omid Zarmandli<sup>1</sup>, Elisabeth Stammen<sup>1</sup> and Klaus Dilger<sup>1</sup></p>		

Bildnachweis: Michael Griese

### Assistentenseminar der Wissenschaftlichen Gesellschaft Fügetechnik e.V.

Per annum versammelt sich die Wissenschaftliche Gesellschaft Fügetechnik e.V. (WGF) im Rahmen des ‚Assistentenseminar Fügetechnik‘ zu einem mehrtägigen fachlichen Austausch. Es werden Fachvorträge gehört und gehalten, diskutiert sowie der überfachliche Austausch und die Netzwerkbildung der Teilnehmer gefördert. Zu den Teilnehmern gehören die fügetechnischen Institute aus Aachen, Berlin, Braunschweig, Chemnitz, Clausthal, Dresden, Magdeburg und, seit diesem Jahr, München.

Unter Organisation des Instituts für Füge- und Schweißtechnik fand das diesjährige Seminar vom 6.-8.10.2021 im schönen Weserbergland im Landhotel Weserblick statt. Jedes der acht Institute reiste mit einem Professor, einem Oberingenieur/Gruppenleiter und drei wissenschaftlichen Mitarbeitern an. Seitens des ifjs nahmen Professor Klaus Dilger und Jonas Hensel mit Juliana Diniz e Castro, Lorenz Uhlenberg und Johanna Müller teil.

Neben insgesamt 24 spannenden Vorträgen zu Themen der Schweißprozesssimulation, additiver Fertigung und den neuesten Entwicklungen im Bereich des MSG-Schweißens, gehörte traditionell auch ein überfachliches Rahmenprogramm zu dem Seminar, bei dem Teambuilding, Networking und natürlich Spaß im Vordergrund stand. Entsprechend ging es im Anschluss an die Vorträge mit einem Reisebus in den Hochsolling, wo uns das Team vom TreeRock Hochseilgarten in die ordnungsgemäße Nutzung der Kletteranlage einwies. Ein besonderes Highlight war der Partnerparcours, der nur zu zweit und mit einer guten Technik und Absprache zu meistern war. Des Weiteren bestand das Rahmenprogramm aus einer Kegelpartie gefolgt von einem Barbecue im gemütlichen Grillpavillon.

So war das Assistentenseminar der WGF auch in diesem Jahr wieder einmal eine tolle Möglichkeit, sich mit anderen wissenschaftlichen Mitarbeitern auszutauschen, neue Kontakte zu knüpfen und die eigenen Forschungsthemen und Ergebnisse zur Diskussion zu stellen.



Am LWF in Paderborn trafen sich Nachwuchswissenschaftler und deren Betreuer zum fachlichen Diskurs im Rahmen des Doktorandenseminars Klebtechnik



In bester Laune präsentieren sich die Teilnehmer des Assistentenseminars der Wissenschaftlichen Gesellschaft Fügetechnik e.V. vor dem Tagungshotel (Bildnachweis: Detlef von Hofe)

### Doktoranden der Klebtechnik zu Gast in Paderborn

Das jährlich stattfindende Doktorandenseminar Klebtechnik, das finanziell durch die DECHEMA e.V. unterstützt wird, fand in diesem Jahr am LWF in Paderborn statt. Elf Doktoranden von sieben Universitäten und Fraunhofer-Instituten diskutierten an zwei Tagen gemeinsam mit ihren Professoren und Gruppenleitern die Promotionsthemen und präsentierten ihre aktuellen Zwischenergebnisse.

Vom Institut für Füge- und Schweißtechnik beteiligten sich Sarah Glaser mit einem Vortrag zum Thema „Experimentelle Rahmenbedingungen für die in-situ Charakterisierung schneller Aushärtungsreaktionen“ und Güven Çelebi mit einem Vortrag zum Thema „Induktive Schnellvorhärtung reaktionsbeschleunigter Hoch-Tg-Klebstoffe“ am Seminar. Durch die regen Diskussionen erhielten sie wertvolle Impulse für die nächsten Schritte im Rahmen ihrer Arbeiten.

Neben dem fachlichen Austausch kam aber auch der persönliche Kontakt nicht zu kurz. Nach einer Führung über die Geschichte der Nixdorf Computer AG im Heinz Nixdorf MuseumsForum erfolgte zum Ausklang ein geselliges Abendessen im Brauhaus Paderborn.

Nach dieser gelungenen Veranstaltung freuen wir uns, im Jahr 2022 die Professoren und Doktoranden in Braunschweig am ifjs begrüßen zu dürfen!

Autoren:

Michael Griese, Johanna Müller, Güven Çelebi

# 3 neue Dokortitel



Bildnachweis: Markus Köhler

Nach bestandener Prüfung bekam **Vitali Fischer** am 14. Dezember 2020 seinen Doktorhut von Elisabeth Stammen überreicht. Die Prüfung zum Thema „**Simulationsgestützte Entwicklung eines Modells zur Bestimmung der Grenzschichthaftung beim Fused Layer Modeling**“ wurde von den Professoren Klaus Dilger und Thomas Vietor abgenommen.

**Tobias Jansen** verteidigte am 4. November 2021 erfolgreich seine Doktorarbeit mit dem Titel „**Qualitätssicheres Laserschneiden in der Lithium-Ionen-Batterieproduktion**“. Neben Erstprüfer Professor Klaus Dilger komplettierten Professor Carsten Schilde (l.) und Professor Stefan Böhm (r.) die Prüfungskommission.



Bildnachweis: Andrea Schmidt



Bildnachweis: Andrea Schmidt

**Nico Hempel** promovierte am 6. Dezember 2021 mit seiner Dissertation "**Zum Einfluss zyklischer Plastizität auf die Eigenspannungsentstehung beim Schweißen hochlegierter Stähle**". Mit seiner Arbeit überzeugte er die Referenten Professor Klaus Dilger, Professor Christoph Genzel und Doktor Thomas Nitschke-Pagel.

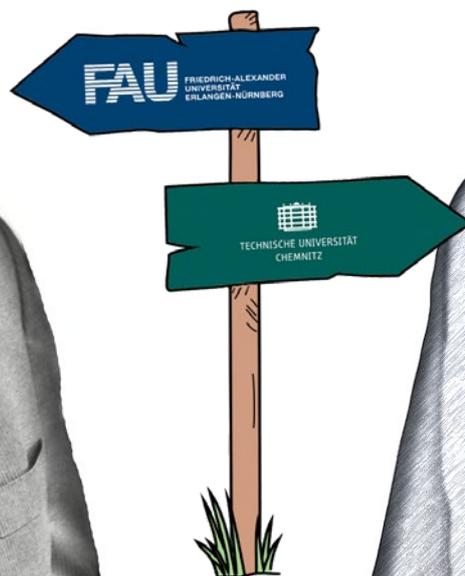
## 2 Berufungen



Dass mit **Sebastian Müller** und **Jonas Hensel** innerhalb eines Jahres gleich zwei Postdoktoranden aus den Reihen des *ifs* eine eigene Professur antraten, stellt fraglos ein Novum dar.

Nach etwas mehr als 12 Jahren Institutszugehörigkeit und eingehenden Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Gießereitechnik mit Schwerpunkten in der Herstellung und fügetechnischen Verarbeitung von Leichtmetall-Druckguss, folgte im Dezember 2020 für Sebastian Müller der Ruf an die Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Dort besetzt er den neu eingerichteten Lehrstuhl für Gießereitechnik (LGT). Angefangen mit einem Laptop auf der grünen Wiese, stand das erste Jahr mit Personal- und Projektaquise, Beschaffungswesen, Vorlesungskonzeptionierung sowie der Bauplanung für die neuen Labor- und Büroräumlichkeiten nicht selten unter dem Motto: „Es gibt für alles ein erstes Mal“.

Genau ein Jahr später folgte im Dezember 2021 für Jonas Hensel der Ruf auf die Professur Schweißtechnik an der Technischen Universität Chemnitz. Nach über 2 Jahren Vakanz tritt er damit die Nachfolge von Peter Mayr an der traditionsreichen Forschungsinstitution an. Während seiner 10-jährigen Tätigkeit am *ifs* bildete die Untersuchung von Schweißprozessen und deren Auswirkung auf die Bauteileigenschaften einen zentralen Forschungsschwerpunkt. In Chemnitz bietet sich nun die Gelegenheit dies zu intensivieren. Neben einer umfangreichen Laborausstattung steht ihm hierfür bereits ein Team aus erfahrenen und motivierten Mitarbeitern zur Verfügung.



# Neu im Team



Seit Januar 2021 verstärkt **Juliana Diniz e Castro** die Arbeitsgruppe Schweiß- und Strahltechnik. Nach ihrem Studium der Bauingenieurs- und Materialwissenschaft am Instituto Militar de Engenharia in Rio de Janeiro untersucht sie am ifs das Betriebsfestigkeitspotential von Brennschnittkanten.



**Tom Werner** ist seit Januar 2021 in der Abteilung Festigkeit und Bauteilverhalten beschäftigt. Neben der Untersuchung des Schwingfestigkeits- und Sprödbbruchverhaltens hoch- und ultrahochfester Stähle betreut er die Vorlesungen „Werkstofftechnologie 1“ und „Materials Science“.



**Lorenz Uhlenberg** war bereits während seines Maschinenbaustudiums als wissenschaftliche Hilfskraft am ifs tätig. Seit Februar 2021 unterstützt er die Arbeitsgruppe Schweiß- und Strahltechnik. Er bewertet die Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen mit Fokus auf der numerischen Validierung.



**Hakon Gruhn** ist seit August 2021 am ifs tätig. Nach seinem Studium des Maschinenbaus mit Schwerpunkt Materialwissenschaften unterstützt er nun die Arbeitsgruppe Faserverbund und Elektromobilität. Zuvor war er mehrere Jahre als wissenschaftliche Hilfskraft tätig.



**Dr.-Ing. Norbert Hoffmann** leitet seit August 2021 den Bereich Leichtmetall-Druckguss. Nach seiner Promotion am ifs ist er 1998 zunächst zu einer größeren Gießerei gewechselt und hat seit 2008 bei einem Tier1 den Bereich Process Engineering EMEA verantwortet. Gleichzeitig hat er von 2003 bis 2020 auf Verbandsebene den Fachausschuss Druckguss geleitet.



**Ayşe Yarangünü** unterstützt seit September 2021 die Arbeitsgruppe Faserverbund- und Elektromobilität als wissenschaftliche Mitarbeiterin. Zuvor studierte sie an der Universität zu Köln Chemie, wo sie auch als wissenschaftliche Hilfskraft tätig war.



Die Buchhaltung des Instituts wird seit Mai 2021 durch **Michaela Perschke** verstärkt. Sie unterstützt bei der Projektabrechnung und bei allgemeinen Rechnungsabläufen.



**Tobias Hilse** ist seit September 2021 als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Klebtechnik und mechanisches Fügen tätig. Er hat sein Studium des allg. Maschinenbaus an der TU Braunschweig absolviert und beschäftigt sich mit der Entwicklung von Sandwichverbunden aus Holzwerkstoffen.



Nach ihrem erfolgreichen Studium am Tokyo Institute of Technology unterstützt **Rio Hiramawa** seit Oktober 2021 die Arbeitsgruppe Werkstoffverbunde und Grenzschichten. Arbeitsschwerpunkte bilden die Oberflächenbehandlung von Aluminiumlegierungen durch Laserstrahlung sowie die Charakterisierung und das Kleben von Hybridmaterialien.



**Morteza Dadkhah** befasst sich seit Dezember 2021 in der Abteilung Festigkeit und Bauteilverhalten mit dem Einfluss von Warmzugversuchen auf die mechanischen Eigenschaften von hochfesten Stählen. Dabei untersucht er schwerpunktmäßig den Verfestigungszustand sowie die Eigenspannungverteilung in Bauteilen und Komponenten.



Seit Februar 2022 ist **Franzisca Baumhof** am *ifs* tätig. Nach ihrem Studium an der Leibniz Universität in Hannover unterstützt sie nun die Gruppe Faserverbund & Elektromobilität. Dort arbeitet sie im Bereich des Recycling Prozesses des Projektes „CircularLIB“.



**Julian Bargfrede** ist seit Februar 2022 am *ifs*. Sein Masterstudium der Sensor- und Automatisierungstechnik beendete er erfolgreich im Oktober 2021 an der Hochschule Hannover. Er unterstützt die Abteilung Leichtmetall-Druckguss und bearbeitet das Vorhaben "Optimierte Produktionsprozesse zur Verringerung des CO<sub>2</sub>-Abdruckes im Druckgießprozess mit Sekundär-Aluminium“.



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](mailto:ifs@tu-braunschweig.de)

[www.tu-braunschweig.de/ifs](http://www.tu-braunschweig.de/ifs)

## **IMPRESSUM**

Herausgeber: Institut für Füge- und Schweißtechnik

Verantwortlich: K. Dilger

Redaktion & Grafik: M. Köhler

Diese sowie vorausgehende Ausgaben stehen digital als Download zur Verfügung:  
<https://www.tu-braunschweig.de/ifs/dokumente/ifs-report>

