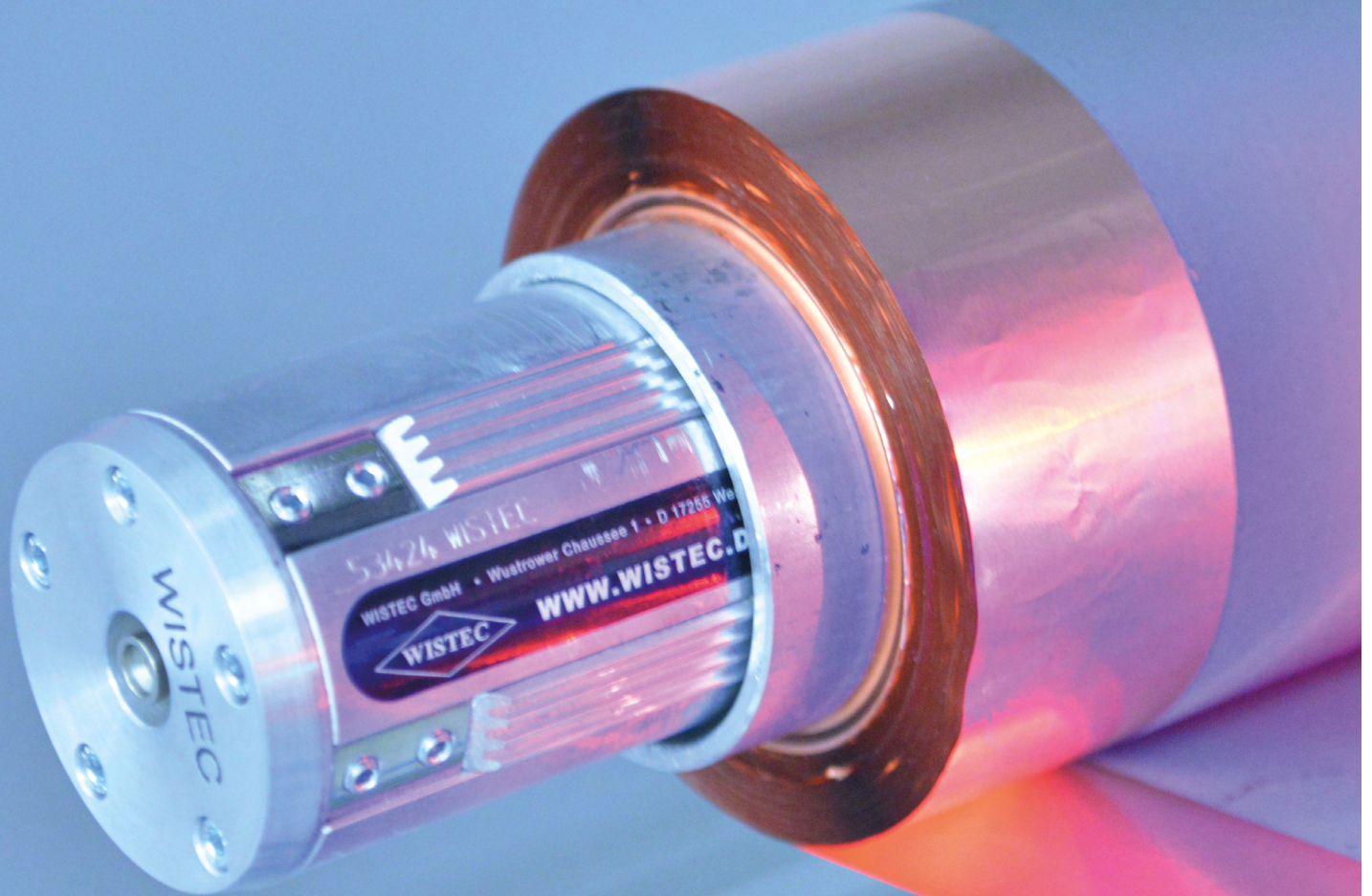




Technische  
Universität  
Braunschweig

Institut für Füge- und  
Schweißtechnik

*ifs*



# report

12. Jahrgang | Ausgabe 2020

# INHALT

<b>Leichtmetall-Druckguss</b>	
Zukunftslabor Produktion .....	4
<b>Kleben und mechanisches Fügen</b>	
Fadenzug von Klebstoffen verstehen und vermeiden.....	8
Schnellkleben von Holz-Beton-Verbänden mit beheizter Klebfuge - SpeedTeCCn.....	13
EcoQuality - Die Qualität von Klebungen von Anfang an im Fokus haben.....	18
<b>Faserverbund und Elektromobilität</b>	
ifs im ProZell-Cluster.....	22
<b>Schweiß- und Strahltechnik</b>	
Elektronenstrahlschweißen von Kupfer-Hairpins für die E-Mobilität.....	28
<b>Werkstoffverbunde und Grenzschichten</b>	
OrganoFalz – Auf dem Weg zum neuen Fügeverfahren.....	33
ACTion.....	34
Vor-Ort-Besuch in Japan im Rahmen der Internationalisierungsinitiative.....	36
<b>Sonderbeitrag</b>	
Arbeiten am Institut in Zeiten von SARS-CoV-2 .....	38
Laborarbeit im Livestream.....	40
<b>Neuzugänge</b> .....	41
<b>Auszeichnungen</b>	
Dokortitel im Jahr 2020 .....	42
Anerkennungen .....	43

# EDITORIAL



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

ein ereignisreiches Jahr geht vorüber und wir wollen Ihnen wieder einmal zeigen, was bei uns am Institut so passiert ist. Es war natürlich auch ein besonders Jahr. Eigentlich wollte ich ja nicht über Covid schreiben, es lässt sich aber wohl nicht umgehen, da die Pandemie natürlich auch unser Tun in erheblichem Maße geprägt hat. Dies gilt natürlich, wie bei allen, für den persönlichen Bereich, aber bei uns im Besonderen auch bezüglich der dienstlichen Abläufe, der Durchführung unserer Forschung und der angebotenen Lehre. Bezüglich der dienstlichen Abläufe war der praktisch vollständige Entfall von Dienstreisen und hiermit verbunden natürlich auch die Teilnahme an Kongressen und Ähnlichem wohl die offensichtlichste Einschränkung. Der Verzicht auf den wissenschaftlichen Austausch in einer internationalen Gemeinschaft, die häufig auch von Freundschaften geprägt ist, hat sicher am meisten weh getan. Zur Aufrechterhaltung des Betriebs haben wir teilweise im Home Office gearbeitet, teilweise die Arbeit in Schichten eingeteilt. Ich habe den Eindruck, dass das sehr gut funktioniert hat und dass die wissenschaftliche Arbeit hierunter nicht über die Maßen gelitten hat. Das Home Office war natürlich sehr gut geeignet, um neue Forschungsanträge zu schreiben, was hoffentlich unsere wissenschaftliche Arbeit in Zukunft zusätzlich befeuert. Die Lehre fand praktisch ausschließlich digital statt. Das hört sich erst einmal furchtbar an, muss aber aus meiner Erfahrung in dieser Zeit heraus durchaus differenziert betrachtet werden. Sicherlich ist die Teilnahme an einer Vorlesung im Hörsaal und das ganze Drumherum wertvoll und vor allem für Erstsemester besonders wichtig, eine digitale Veranstaltung bietet aber auch hervorragende Möglichkeiten, die vordergründig nicht sofort ersichtlich sind. Einerseits, ganz klar, kann jeder es hören wann er/sie es möchte. Man kann also nach einem anstrengenden Abend auch einmal länger schlafen! Das ist meines Erachtens aber eher zweitrangig. Ein besonderer Aspekt war die intensive Kommunikation mit den Studierenden im Chat, die wohl erst dadurch möglich wurde, dass Hemmschwellen, wie sie eine Fragestellung im Hörsaal „coram publico“ darstellt, entfallen. Ein weiterer Vorteil war die intensivere Erklärmöglichkeit unter Nutzung einer Vielzahl von Experimenten, die durch die fortgeschrittene Kameratechnik ermöglicht wurde. Jetzt habe ich doch eigentlich nur von Covid gesprochen, habe Ihnen aber somit einen hoffentlich interessanten Einblick in unser Alltagsleben 2020 geben können. Die wirklich wichtigen Inhalte – auch unabhängig von Covid – erwarten Sie im weiteren report.

Bleiben Sie gesund und uns gewogen

*Klaus Delys*





Bildnachweis: Zentrum für digitale Innovationen Niedersachsen

# Zukunftslabor Produktion

Vernetzung, Modellierung und Optimierung in der industriellen Produktion

Eine umfangreiche Vernetzung und Erzeugung eines digitalen Abbildes von Produktionsprozessen im Zusammenhang mit der Industrie 4.0 kann die industrielle Wertschöpfung für die Unternehmen einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil liefern. Im Rahmen des Projektes „Zukunftslabor Produktion“ soll der gesamte Produktionsprozess eines Druckguss-Bauteils durch intensivere Prozessüberwachung, algorithmische Auswertung, Bildung der „digitalen Zwillinge“, Vernetzung dieser sowie selbständige Korrektur der Betriebsparameter optimiert werden.

### Motivation

Fahrzeuge, Lebensmittel, Kleidungsstücke, all diese Produkte durchlaufen bei ihrer Herstellung einen umfangreichen Produktionsprozess. Die Produktionsbranche mit über 18.000 Industrieunternehmen spielt eine wichtige Rolle in der niedersächsischen Wirtschaft. Weltweit agierende Unternehmen in der Automobilindustrie, Elektrotechnik, Medizin-, Luftfahrt- und Raumfahrttechnik sowie viele mittelständische und kleine Unternehmen produzieren Ihr Handelsgut in Niedersachsen. So unterschiedlich die Produkte dieser Unternehmen auch sind, eins haben sie gemeinsam: Sie stehen alle stetig unter hohem Wettbewerbsdruck auf dem globalen Markt. Die Lebenszyklen eines Produktes bzw. einer Innovation verkürzen sich, wobei die Komplexität der Produktionsprozesse weiter steigt. Insbesondere der Preis, die Qualität und die Individualität der Produkte bei immer höheren Sicherheitsstandards spielen eine wichtige Rolle. Um sich einen Vorsprung im nationalen und internationalen Wettbewerb zu schaffen bzw. beizubehalten, bedarf es einer kontinuierlichen Steigerung der Effizienz bei der Herstellung von Produkten. Digitalisierung der Produktion im Zusammenhang mit der Industrie 4.0 bietet aktuell diese Möglichkeit. Ein hoher Automatisierungs- und Vernetzungsgrad produktionsrelevanter Prozesse, Definition der Schnittstellen

mit einer gemeinsamen Datenplattform sowie die prozessinternen und prozessübergreifenden Ansätze des maschinellen Lernens bilden hierbei die Grundlage.

Diese Ansätze sollen anhand des gesamten Druckgießprozesses im Rahmen von dem Projekt „Zukunftslabor Produktion“ untersucht werden. An der Durchführung dieses Forschungsvorhabens beteiligen sich Wissenschaftler folgender niedersächsischer Hochschulinrichtungen:

- Hochschule Emden/Leer, Fachbereich Technik
- Hochschule Hannover, Fakultät I – Elektro- und Informationstechnik
- Leibniz Universität Hannover, Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen
- Leibniz Universität Hannover, Institut für Verteilte Systeme
- Leuphana Universität Lüneburg, Institut für Produkt- und Prozessinnovation
- OFFIS – Institut für Informatik
- Technische Universität Braunschweig, Institut für Füge- und Schweißtechnik

Als Koordinationsstelle für das Zukunftslabor Produktion dient das Zentrum für digitale Innovationen Niedersachsen (ZDIN).

Neben dem Zukunftslabor Produktion betreut das ZDIN weitere Zukunftslabore im Bereich der Agrarwissenschaft, Energietechnik, Gesellschaft & Arbeit, Gesundheitswesen und Mobilität.

### Digitalisierung im Druckgießprozess:

Die Herausforderungen und Potenziale der Digitalisierung in der industriellen Fertigung zeigen sich besonders deutlich in der Druckgussbranche. Das Druckgießen stellt ein industrielles Gießverfahren mit Dauerformen zur Herstellung von optimierten Leichtmetallbauteilen, wo auch die dünnwandigen Strukturbauteile aus Aluminium hinzugehören, mit hoher Funktionsintegration in mittleren bis großen Serien dar. Der Anteil von Kosten für die Konstruktion und Fertigung des Druckgießwerkzeugs bezogen auf die Produktionskosten eines druckgegossenen Fertigteils betragen aktuell ca. 5 % bis 10 % [HE15]. Dieser Prozess ist jedoch für mehr als 90% der Profitabilität und Qualität der Produkte zuständig [LORo8]. Daraus lässt sich ableiten, dass die Herstellung eines Druckgießwerkzeugs maßgeblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und technologische Leistungsfähigkeit des Druckgießprozesses aufweist. Durch eine enge Verknüpfung der Werkzeugherstellung und des Druckgießprozesses kann die Ausschussquote, der energetische Aufwand im Gießbetrieb und die unerwünschten Iterationsschleifen bei der Inbetriebnahme des Druckgießwerkzeugs deutlich reduziert werden. Dies wird über Schließung von digitaler Prozessketten mithilfe von gemeinsamen Datenplattformen und Vernetzung von cyber-physischen Systemen ermöglicht. Abbildung 1 visualisiert die Vernetzung der einzelnen Ebenen im gesamten Druckgießprozess.

Als cyber-physisches System (CPS) wird ein Verbund aus informatischen sowie softwaretechnischen Komponenten mit elektronischen und mechanischen Teilen bezeichnet, die über eine Dateninfrastruktur intern miteinander agieren. Kontinuierliche (Weiter-)Entwicklung und Implementierung von CPS ermöglicht im Zusammenhang mit Industrie 4.0 und konkret im gesamten Druckgießprozess eine Verbesserung der Interaktion und Kommunikation zwischen Mensch, Produktionsmaschine und Endprodukt. Als Basis für die prozessinterne und prozessübergreifende Vernetzung der einzelnen Produktionsebenen dient eine gemeinsame Datenplattform. Dies Bedarf eines Kommunikationskonzeptes mit internen und externen Schnittstellen zwischen den einzelnen Produktionsprotagonisten und einer Definition von Zugriffsrechten, um datenschutzkonform zu agieren. Erfassung produktionsrelevanter Daten und Bereitstellung dieser auf einer gemeinsamen Datenplattform bildet die Basis für Auswertungen. Beruhend darauf werden massendatenbasierte Prognosen vorgenommen, wodurch sich in fertigungstechnischen Regelkreisen adaptive und selbstlernende Systeme realisieren lassen mit dem Ziel eine hochflexible Fertigung mit bestmöglicher Bauteilqualität unter geringstem Aufwand zu erzeugen. Angestrebt wird das „Plug & Produce“- Konzept und ein echtzeitfähiges Datenübertragungssystem.

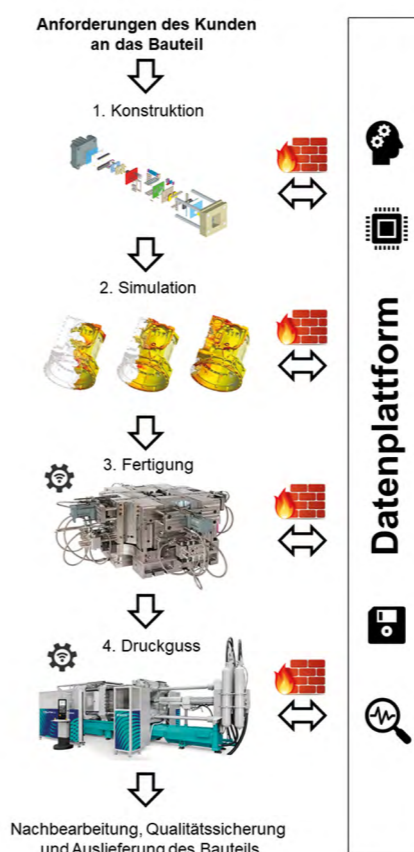


Abbildung 1: Vernetzung der einzelnen Herstellungsebenen im Druckgießprozess [MAGMASOFT, Bühler Group, Oskar Frech GmbH + Co.KG]



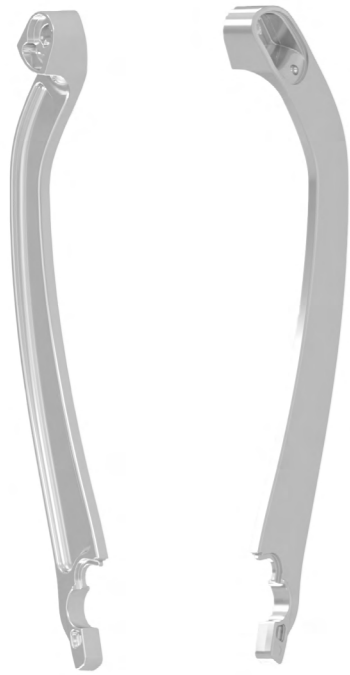


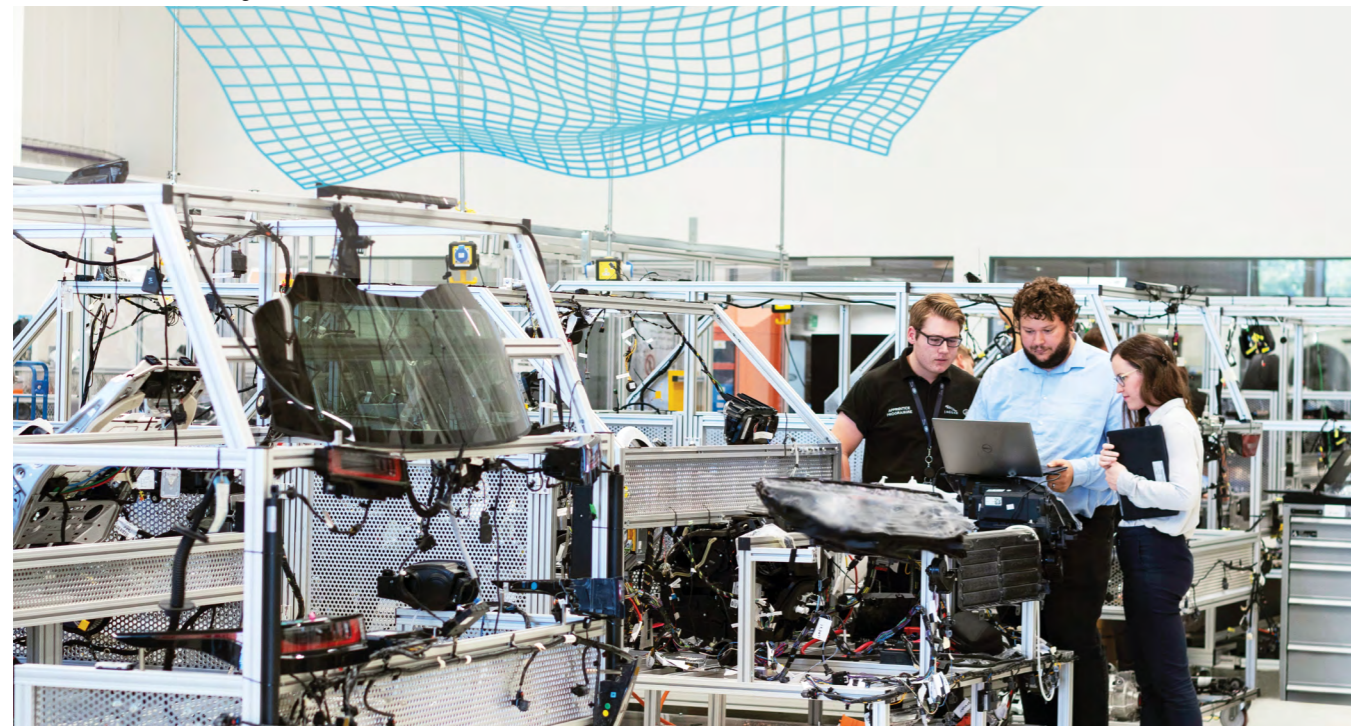
Abbildung 2: Sitzesstisch-Träger aus der Passagier-Luftfahrt als Druckgussbauteil für das Projekt "Zukunftslabor Produktion"

### Vorgehensweise im Zukunftslabor Produktion

Um dieses Forschungsvorhaben zu realisieren, wird seitens des Institutes für Füge- und Schweißtechnik ein bereits industriell produzierendes Druckgussbauteil als Demonstrator gewählt, das hohe Anforderungen an Bauteileigenschaften stellt. Dieses Vorgehen bietet sowohl die Nähe der Forschung an die Industrie als auch eine hervorragende Vergleichbarkeit der Bauteileigenschaften aus einem konventionellen Herstellungsprozess. Für diesen Zweck fällt die Entscheidung auf einen Sitzesstisch-Träger aus der Passagier-Luftfahrt (siehe Abbildung 2).

An dieses Bauteil werden bei der industriellen Fertigung hohe Anforderungen gestellt, insbesondere auf die mechanischen Eigenschaften (Festigkeit) und Oberflächeneigenschaften (Optik). Zudem besteht ein Potenzial zur Senkung der Ausschussquote, die aktuell bei ca. 6 % (bezogen auf den gesamten Herstellungsprozess) liegt. Um eine Druckgussform (Formwerkzeug) für das Bauteil in einer CAD-Software entwerfen zu können, wird ein externes Konzept zur Messung zusätzlicher produktionsrelevanter Parameter im Druckgießprozess entwickelt. Hierbei sollen 3 Multitiefen-Temperatursensoren, 8 Piezo-Kraftsensoren, 2 Drucksensoren und ein Sensorblock für die Messungen an der Abluft in das Formwerkzeug integriert werden. Die Erfassung der Temperatur mithilfe von Multitiefen-Temperatursensoren geschieht ausgehend von der Bauteiloberfläche auf der beweglichen Formhälfte in Richtung der Auswerferplatte in der Tiefe von 1,5 mm, 2,45 mm, 3,8 mm und 5,4 mm. Dies ermöglicht eine Messung der Temperatur sowohl am Bauteil (Erstarrungsverhalten) als auch in der Form (Temperaturhaushalt der Form). Mithilfe von Piezo-Kraftsensoren können Kräfte der einzelnen Auswerfer erfasst werden. Über die Messung der Auswerferkraft kann auf die Verspannung des Bauteils in der beweglichen Formhälfte und notwendige Anzahl an Auswerfer zurückgeschlossen werden. Die Druckmessung im Hydraulikzylinder der Auswerferereinheit soll auf beiden Seiten des Zylinderkolbens stattfinden. Auf diese Weise lässt sich die gesamte Auswerferkraft erfassen.

Bildnachweis: Zentrum für digitale Innovationen Niedersachsen



Mithilfe eines individuell gestalteten Sensorblockes sollen unterschiedliche Parameter bei der Luft, die aus der Form durch Unterdruck entzogen wird, untersucht werden. Voraussichtlich sollen dabei Parameter wie die Luftfeuchtigkeit, die Luftstrommengen und der Sauerstoffgehalt erfasst werden, die nach aktuellem Stand der Technik Einfluss auf die Bauteil- und Prozesseigenschaften haben können. Zusätzlich existiert eine Messtechnik in der gesamten Druckgießanlage, die bestimmte Parameter erfasst. Diese sind:

- Geschwindigkeit, Position und Druck vom Gießkolben
- Druck im Hydrauliksystem
- Schließkraft der Druckgussmaschine
- Schmelzetemperatur im Tiegel
- Dosierdruck, Dosierzeit und Dosiergewicht
- Niederdruck beim Befüllen und Halten der Schmelze in der Dosierkammer
- Fluid- und Luftdruck im Trennstoffsystem
- Aufgetragenes Volumen von Formtrennstoff
- Dosierung Kolbenschmierstoff
- Volumenstrom sowie Fluid-Temperatur Vor- und Rücklauf Temperierung

Unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen für den Entwurf wird ein Formwerkzeug konstruiert und in einer Simulationssoftware für den Druckgießprozess untersucht. Bereits bei der Konstruktion und Simulation des Formwerkzeuges entstehen prozessrelevante Daten, die auf der gemeinsamen Datenplattform abgelegt bzw. zur Verfügung gestellt werden. Zudem wird ein Konzept des Druckgießwerkzeuges angewendet, das sogenannte Leichtbau-Druckgießwerkzeug, was sich durch deutlich geringere Masse von herkömmlichen massiven Druckgießwerkzeugen unterscheidet und voraussichtlich bessere Regelung des Temperaturhaushaltes im Druckgießprozess liefern soll. Die Fertigung des Formwerkzeuges wird vom Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Leibniz Universität Hannover durchgeführt. Die gewonnenen Daten aus der Werkzeugfertigung (Daten aus dem Fräsprozess) sollen ebenfalls auf der gemeinsamen Datenplattform bereitgestellt werden und in die Auswertung mit einfließen. Nach der Montage des Formwerkzeuges auf der Druckgussanlage und Einstellung des Druckgießprozesses wird eine umfangreiche Sensitivitätsstudie durchgeführt. Es werden Gießserien durchgeführt und die Eigenschaften der Bauteile umfassend analysiert. Die Analyse der Bauteileigenschaften soll als Referenz für den digital erfassten Prozess dienen. In den jeweiligen Druckgießserien werden Fehler im Druckgießprozess durch Umstellung unterschiedlicher produktionsrelevanter Parameter provoziert und damit die Datenbasis für das Machine-Learning bzw. Deep-Learning geschaffen. Eine algorithmische Auswertung der Daten ist sowohl prozessintern als auch prozessübergreifend vorgesehen. Durch die umfangreiche Auswertung der Daten sollen „digitale Zwillinge“ der Prozesse erzeugt werden. Diese „digitalen Zwillinge“ ermöglichen das Verhalten oder die Eigenschaften von „realen Zwillingen“ präzise zu beschreiben. Durch die Vernetzung der „digitalen Zwillinge“ aus unterschiedlichen Prozessen, in diesem Zusammenhang der Fertigung von Druckgießwerkzeug und des Druckgießprozesses, soll eine gegenseitige Optimierung einzelner Prozesse bezogen auf den Gesamtprozess ermöglicht werden, was in der industriellen Wertschöpfung für die Unternehmen einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil liefern kann.

### Danksagung:

Das Forschungsvorhaben „Zukunftslabor Produktion“ wird über das Ministerium für Wissenschaft und Kultur unter Fördernummer ZN3489 im Niedersächsischen Vorab der VolkswagenStiftung gefördert und durch das Zentrum für digitale Innovationen (ZDIN) betreut. Die Autoren bedanken sich für die Förderung und Koordination sowie die Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern und den mitwirkenden Unternehmen.

### Autor:

Slava Pachandrin, M.Sc.  
Dr.-Ing. Sebastian Müller

### Kontakt:

s.pachandrin@tu-bs.de  
sebastian.mueller@tu-bs.de

### Quellen:

[HE15] Heid, R. H. G.: Vergleichende Untersuchung verschiedener Warmarbeitsstähle unter seriennahen Bedingungen im Aluminiumdruckguss, Dr.-Ing. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2015  
[LOR08] Lorenz, A.: Analyse des Laserstrahlabtragens für den wirtschaftlichen Einsatz im Werkzeug- und Formenbau. Dr.-Ing. Dissertation, Techn. Univ. Hamburg-Harburg, 2008



# Fadenzug von Klebstoffen verstehen und vermeiden

Hochviskose Klebstoffe neigen bei der industriellen Applikation zum Fadenzug, Abbildung 1. Ursächlich hierfür sind die Fließeigenschaften dieser Klebstoffe. Der Fadenzug führt zum Einsatz von Reinigungsgeräten, zur Verschmutzung von Bauteilen oder zur Verschleppung von Klebstoff. Folgen sind erhöhter Verbrauch des Klebstoffs, anfallender Sondermüll, Nacharbeiten, Reinigung und Umweltbelastung. Materialwissenschaftliche Methoden zur Charakterisierung der Fadenzugneigung von Klebstoffen waren bisher in ihrer Prognosekraft eingeschränkt. Maschinenbauliche Maßnahmen zur Verringerung der Fadenzugneigung wurden bisher nicht systematisch untersucht.

Im IGF Projekt „Fadenfrei“ wurden daher die Ursachen von Fadenzug bei der industriellen Verarbeitung hochviskoser Klebstoffe evaluiert und daraus Möglichkeiten zur Prognose und Vermeidung des Fadenzugs erarbeitet.

Dabei wurde von der Arbeitshypothese ausgegangen, dass der Fadenzug eine rheologische Materialantwort auf ein spezifisches, berechenbares Dehn-, Scher- und Temperaturfeld des applizierten Freistrahls ist und durch eine aktive Beeinflussung dieses Feldes drastisch reduziert werden kann. Dieser methodische Ansatz geht weit über die bisherigen Versuche zur Beschreibung des Fadenzugs hinaus. Entsprechend wurde zunächst das rheologische Materialverhalten unter Scher- und Dehnströmung von Klebstoffen mit starker und schwacher Fadenzugneigung gemessen, das transiente Strömungsfeld bei der Entstehung des Fadens simuliert und die physikalischen Ursachen für den Fadenzug abgeleitet. Parallel wurden maschinenbauliche Methoden zur Reduktion des

Fadenzugs experimentell untersucht und ihre Fähigkeit zur Beeinflussung des Strömungsfelds qualitativ und quantitativ bewertet.

In Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss (PA) wurden zehn einkomponentige, hochviskose, temperatur- bzw. feuchtigkeitsvernetzende industrielle Klebstoffe mit geringer bis sehr großer Fadenzugneigung selektiert. Ergänzend wurden für den Erkenntnisgewinn Experimente mit Hilfe einer gezielten Variation von Harz-Basis und Füllstoffen an 20 Musterklebstoffen mit abgestuften rheologischen Verhalten durchgeführt. Für die industriellen Klebstoffe wurden zwei unterschiedliche Versuchstände für die „Rheologie und Simulation“ (IFAM) und die „aktive Fadentrennung“ (ifs) für Dosierversuche aufgebaut. Die Versuchstände basierten auf den in der jeweiligen Forschungseinrichtung verfügbaren Komponenten und wurden noch durch die Dosieranlagenkomponenten des PA erweitert. Beide Versuchstände wurden aus Eurokartuschen versorgt und besaßen eine hinreichende Nähe zur industriellen Applikation.

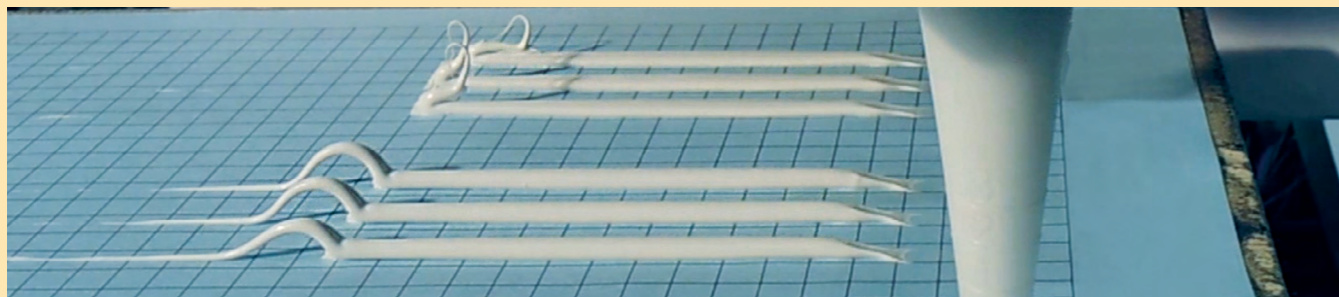


Abbildung 1: Klebstoffapplikation mit Fadenzug und Verschleppung

## Materialwissenschaftliche Ergebnisse

Am Fraunhofer IFAM wurden die Wirkzusammenhänge zum Fadenzug erforscht. Betrachtet wurde die Fadenzugneigung von mittel- bis hochviskosen Klebstoffen mit unterschiedlichen Eigenschaften und von verschiedenen Herstellern. Es wurden insgesamt 10 Klebstoffe verschiedener Hersteller in die Untersuchungen einbezogen. Zunächst wurden Versuche zur Fadenbildung an kommerziellen Dosiersystemen durchgeführt. Die breite Auswahl der Klebstoffe erlaubte nicht, dass alle Systeme mit der gleichen Applikationsanlage verarbeitet werden konnten. Bei der notwendigen Nutzung unterschiedlicher Dosiersysteme und unterschiedlicher Prozessparameter konnten Unterschiede in der Fadenlänge daher nicht unmittelbar mit Materialeigenschaften korreliert werden, da sie aus Prozesseinflüssen herrühren könnten. Zur rein materialwissenschaftlichen Charakterisierung der Fadenzugneigung mussten daher vereinfachende, auf unterschiedliche Klebstoffe anwendbare, experimentellen Methoden genutzt werden. Um einen grundlegenden Erkenntnisgewinn zu erarbeiten, wurden aus diesem Grund neben den industriellen Klebstoffen auch Musterklebstoffe in die Untersuchungen aufgenommen. Diese Musterklebstoffe waren so formuliert, dass sich die Formulierungen möglichst nur in einzelnen rheologischen Eigenschaften und in der Fadenzugneigung unterscheiden. Die Musterklebstoffe waren auf Basis von Epoxiden formuliert und mit den Füllstoffen Kaolin und Siliziumdioxid modifiziert. Die Charakterisierung der industriellen und Musterklebstoffe erfolgte durch verschiedene Versuche der oszillierenden und kontinuierlichen Scherrheologie am Dehnrheometer, am Kapillarrheometer und mit der Wilhelmy-Platten-Methode. Zur einheitlichen messtechnischen Quantifizierung der Fadenzugneigung wurde ein einfach durchzuführender Abzugsversuch konzipiert. Die Messung der Fadenzugneigung erfolgte an einem speziellen Aufbau auf Basis einer Universalprüfmaschine vom Typ TA-XT (Texturanalyser), bei der die Fadenzugneigung eines Klebstoffs aus der Fadenlänge  $L$  als maximale Hencky-Dehnung (wahre Dehnung berechnet als Logarithmus der relativen Dehnung bei Fadenabriss:

$H_{max} = \log(L_{max}/L_0)$  bestimmt wurde.

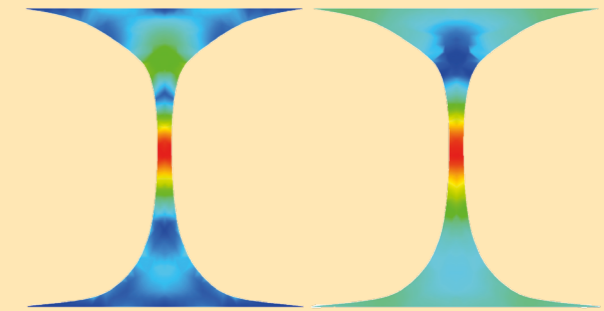


Abbildung 2: Scher- und Dehnraten in der Simulation des Abzugsversuchs für eine Kaolinsuspension, exemplarisch bei  $v = 5$  mm/s. links: Scherraten 0 (blau) bis 263 s<sup>-1</sup> (rot), rechts: Dehnraten -55 (blau) bis 146 s<sup>-1</sup> (rot). Quelle: Fraunhofer IFAM

Aus dem Vergleich von rheologischen Größen und maximaler Hencky-Dehnung wurde gefolgert, dass die Fadenzugneigung von verschiedenen Parametern abhängt:

- Je höher die Abzugsgeschwindigkeit  $v$ , desto größer ist die Fadenzugneigung
- Je höher die Scherviskosität  $\eta$ , desto größer ist die Fadenzugneigung
- Je kleiner der Fließindex, desto geringer ist die Fadenzugneigung
- Je niedriger der Oberflächenspannungswert, desto höher ist die Fadenzugneigung

Der Abzugsversuch ließ sich durch Strömungssimulationen beschreiben. Das dafür verwendete Programm Ansys Polyflow bot eine erweiterte Auswahl von Materialmodellen, u.a. viskoelastische Materialmodelle. Darüber hinaus ließen sich mit der Arbitrary Lagrangian-Eulerian Methode freie, sich geometrisch ändernde Oberflächen simulieren, wie sie bei der Einschnürung und beim Ziehen der Klebstofffäden auftraten. Die Simulationen des Abzugsversuchs, Bild 2, zeigte, dass im Zentrum der Einschnürung beim Fadenzug eine Mischung aus Dehnströmung und Scherströmung vorlag.



Dieses Ergebnis war zunächst überraschend, da der Abzugsversuch eine uniaxiale Dehnung vorgibt. Das Einschnüren des Fadens bewirkte aber eine Strömungsgeschwindigkeit des Klebstoffs senkrecht zur Abzugsrichtung und damit eine Scherung des Materials.

Anders als erwartet konnte daher eine maßgebliche Abhängigkeit der Dehnviskosität eines Klebstoffes an der Fadenzugneigung nicht bestätigt werden. Aus den Erkenntnissen der Simulation sowie den Erkenntnissen der rheologischen Messungen an den Basisklebstoffen wurde eine Formel entwickelt, welche die Fadenzugneigung von Klebstoffen anhand von materialwissenschaftlichen Messgrößen vorhersagt:

$$\text{He } \epsilon, \max = n \sin(\delta) \ln\left(\frac{v \eta}{\sigma}\right) + \text{He } \epsilon, 0$$

Es wurde eine Messvorschrift dokumentiert, mit der die Parameter der Formel bestimmt werden können. Die Parameter beinhalten rheologische Kenngrößen zu Viskosität, Fließindex, elastischer Eigenschaften, die Abzugsgeschwindigkeit und die Oberflächenspannung. Die Messvorschrift wurde anhand einiger Industrieklebstoffe des PA verifiziert und zeigte einen guten Vergleich mit den Messungen der Hencky-Dehnung im Abzugsversuch. Die Prognose der Fadenzugneigung durch übliche rheologische Kennwerte erlaubt den Klebstoffherstellern dadurch, die Fadenzugneigung ihre Produkte durch Änderung der Klebstoffformulierung gezielt zu reduzieren.

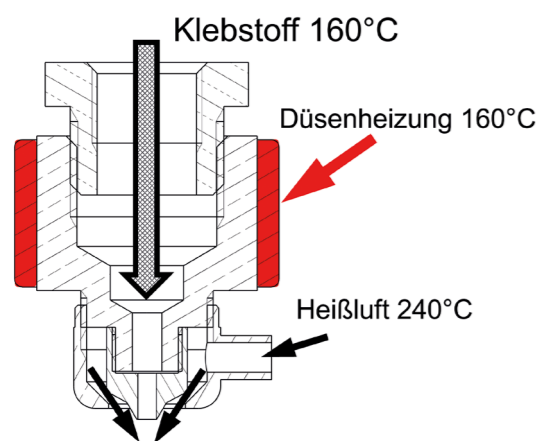


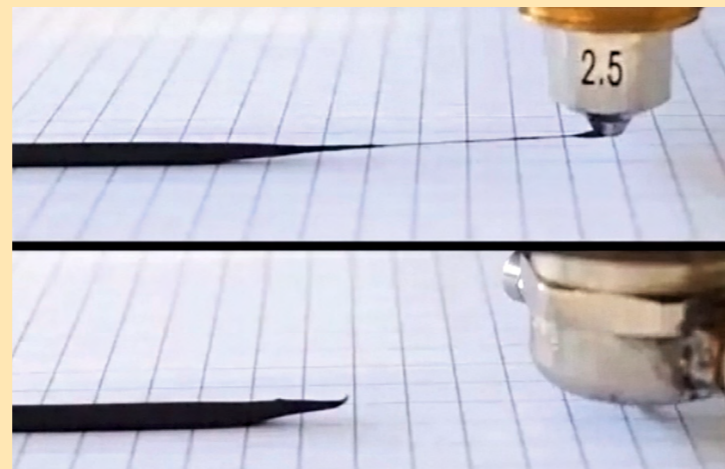
Abbildung 3: Applikationsdüse mit Heißluft, Vergleich ohne- und mit Heißluft an Butylen

### Maschinenbauliche Ergebnisse

Am ifs wurde die Applikation der Versuchsklebstoffe mit bestehenden Düsenkonzepten anwendungsnah untersucht und kategorisiert. Dazu wurde ein modulares Applikationssystem mit flexiblen Baugruppen, die zum Beispiel einen Kartuschenwechsel möglich machen oder an unterschiedliche Gebinde anpassbar sind, mit einer steuerbaren Dosiergeschwindigkeit, einer flexiblen Dosierung und möglicher Druckentlastung der Kartuschen konzipiert. Der Einsatz unterschiedlichster Applikationsdüsen sowie die Möglichkeit des Kalt- und Warmauftrages war grundlegende Basis der Entwicklung. Die Untersuchung der industriellen Klebstoffsysteme erfolgte darüber hinaus auch mit bereits am Markt etablierten maschinenbaulichen Maßnahmen zur Vermeidung von Verschmutzungen an Dosierdüsen, wie den sogenannten Snuff-Back-Ventilen.

Im Projekt wurden dann vorwettbewerblich neue Ansätze für einen gesteuerten und kontrollierten Fadenabriss entwickelt, gefertigt und erprobt, die jeweils ein anderes Prinzip zur Fadentrennung nutzen. Dabei wurden folgende Mechanismen verfolgt:

- Durch die Einbringung von Druckluft um eine Dosierdüse herum wird gezielt eine hohe Scherrate eingebracht, die eine Viskositätsniedrigung und damit ein Abreißen des Klebstoffadens bewirkt.



- Mit Hilfe eines induktiv aufheizbaren Rings in der Düse wird der Klebstoff kurzfristig stark erwärmt und die Viskosität dadurch reduziert.
- Mit der Anbringung einer Ultraschall-Sonotrode in der Düse wird eine gezielte Scherung in den Klebstoff eingebracht und die Viskosität reduziert.
- Das Abtrennen mit Ultraschallmessern bzw. das Drehen der Düse wird zur mechanischen Fadentrennung an Versuchsdüsen erprobt.
- Mit flüssigem Stickstoff wird der Klebstoff kurzfristig und punktuell stark abgekühlt, um unterhalb des Glasübergangsbereiches einen Spröbruch des Klebstoffs zu erwirken.

Zunächst wurden die Prinzipien einzeln an verschiedenen Klebstoffen untersucht und bewertet.

- Beim Trennen durch einen kurzen Druckluftstoß am Applikationsende wird der austretende Klebstoff von der Düsen Spitze abgetrennt und auf dem Fügeteil abgelegt. Der entwickelte Düsenaufsatz, als Prototyp generativ gefertigt, kann bei Kartuschen-Kunststoffdüsen verwendet werden.
- Mit Hilfe der induktiv heizbaren Düsen Spitze wird der Klebstoff bei Applikationsende kurzfristig stark erwärmt. Der Fadenzug des erwärmten Klebstoffs ist dadurch kleiner. Die Düsen Spitze aus Eisen speichert die Wärme jedoch so stark, so dass bei der nachfolgenden Applikation noch warmer Klebstoff austritt und das Auftragsbild dadurch nicht zufriedenstellend ist. Die richtige Steuerung der Induktionsenergie ist schwierig; eine zu geringe Erwärmung zeigt kaum Effekt, zu viel Hitze schädigt den Klebstoff.
- Einkoppelter Leistungsltraschall in der Düse verändert die Klebstoffrheologie. Dadurch reduziert sich der Fadenzug und der Klebstoff trennt sich gut von der Düsen Spitze. Der Effekt im Klebstoff ist nach Abschalten des Ultraschalls sofort reversibel, so dass bei der darauffolgenden Applikation kein negativer Effekt erkennbar ist. Der Versuch einer gezielten Ansteuerung der Resonanzfrequenz in der Düsen Spitze ließ sich jedoch nicht realisieren, vermutlich aufgrund der Verschraubungen und Dichtungen in der Spitze.

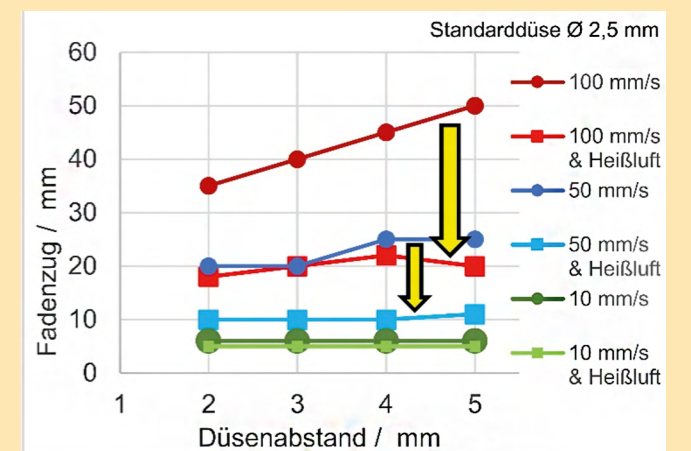


Abbildung 4. Applikation von Polyurethan bei Raumtemperatur. Gezeigt sind unterschiedliche Düsenabstände vom Bauteil, Applikationsgeschwindigkeiten und der Einfluss des neuen Düsenkonzepts. Die Temperatur der Heißluft beträgt 100°C.

- Durch schnelles Abkühlen der Düsen Spitze sollte der Klebstoff aufgrund der Temperaturen unterhalb des Glasüberganges verspröden. Bei den Versuchen wurde der Klebstoff mit flüssigem Stickstoff bis auf minus 100°C abgekühlt, d.h. mindestens 40 Kelvin unterhalb des Glasübergangs. Die Weiterbewegung der Düse führte jedoch zu keinem Spröbruch im Klebstoff, sondern es wurde Klebstoff aus der bereits applizierten Raupe nachgezogen, bis der sich bildende Faden dann trennte.
- Durch Rotation der Applikationsdüse sollte der Klebstoff sich am Rand der Düse besser trennen. Stattdessen gab es dort eine Einschnürung und der Faden war eher länger.

Auf der Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurden im weiteren Projektverlauf die Konzepte „Druckluft“ und „Rheologieänderung“ kombiniert und zu einer neuen Versuchsdüse weiterentwickelt. Beim finalen Düsenkonzept strömt heiße Luft kontinuierlich durch eine doppelwandige Düse um die austretende Klebstoffraupe. Mit Hilfe dieser Düse konnten auch bei aktuell im industriellen Einsatz stark fadenziehenden Butylen eine gute Fadentrennung erzielt werden, Bild 3. Die Ergebnisse zeigten, dass auch für bei Raumtemperatur zu applizierende MS- und PU-Klebstoffe eine deutliche Verbesserung der Applikationsergebnisse erzielt wurde, Bild 4.



**Zusammenfassung:**

Der Fadenzug bei der Verarbeitung hochviskoser Klebstoffe entsteht nicht durch einen hochdynamischen Effekt beim Schließen des Dosierventils, sondern beim Abzug der Dosierspitze von der Raupe. Im Projekt „Fadenfrei“ wurde hierfür ein Abzugsversuch eingeführt und simuliert. Die Simulationen zeigten Dehn- und Scheranteile der Strömungsgeschwindigkeiten im Zentrum der Fadeneinschnürung. Der Abzugsversuch erlaubte die quantitative Beschreibung der Fadenzugsneigung hochviskoser Klebstoffe. Muster- und industrielle Klebstoffe wurden hinsichtlich ihrer Materialeigenschaften im Projekt charakterisiert. Durch eine abgeleitete Berechnungsformel können jetzt Materialkennwerte und Fadenzugsneigung miteinander korreliert werden. Diese Formel kann daher zukünftig von Klebstoffherstellern genutzt werden, um gezielt Klebstoffe mit geringerer Fadenzugsneigung zu formulieren.

Die Untersuchungen der Fadenzugsneigung an einem speziell entwickelten Laboraufbau mit hinreichender Nähe zur industriellen Applikation ermöglichte eine Korrelation mit den Materialeigenschaften und führte zu dem vorwettbewerblichen Konzept einer fadenzugmindernden Auftragsdüse mittels Heißluft, die jetzt den Anwendern zur Verfügung steht. Neben der dokumentierten Messvorschrift zur Bestimmung des Fadenzugs werden die neuen Erkenntnisse aus diesem Projekt in das geplante DVS Merkblatt „Fadenzug“ einfließen.

**Danksagung**

Das IGF-Vorhaben 19390 N der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

**Ansprechpartner:**

Dr.-Ing. Stephan Koch  
Dipl.-Chem. Elisabeth Stammen  
Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger  
*ifs, TU Braunschweig*

Fabian Julius Fassbender  
Dr. Holger Fricke  
Prof. Dr. Bernd Mayer  
*Fraunhofer IFAM, Bremen*

**Kontakt:**

s.koch@tu-braunschweig.de  
e.stammen@tu-braunschweig.de

## Schnellkleben von Holz-Beton-Verbänden mit beheizter Klebfuge - SpeedTeCC

Holz-Beton-Verbundbauweisen (HBV) kombinieren verschiedene Vorteile der Einzelwerkstoffe in günstiger Weise. Werden Fertigteile aus beiden Werkstoffen eingesetzt, kann der Verbund durch Kleben auf der Baustelle hergestellt werden. Im Anwendungsforschungsprojekt SpeedTeCC wurde eine am ifs entwickelte Schnellklebtechnik mit beheizter Klebfuge für HBV-Elemente untersucht, um den Baufortschritt gegenüber herkömmlichen Füge-techniken beschleunigen zu können.

Holz-Beton-Verbundbauweisen (HBV) unterstützen Trends im Bauwesen zu vermehrtem Leichtbau und Nachhaltigkeit durch den vermehrten Einsatz nachwachsender Rohstoffe. Der Verbund aus Holz und Beton kann in mehrfacher Hinsicht gut optimiert werden, sowohl stofflich, statisch-konstruktiv als auch unter bauphysikalischen Aspekten. Steif gefügte hybride HBV-Bauelemente bieten im Vergleich zu etablierten Stahlbetonelementen in Form von Zwischendecken oder Dachelementen gleichwertige oder verbesserte Eigenschaften (z.B. Schall- und Brandschutz) mit lediglich ca. 50 % der Masse. Die HBV-Kombination ermöglicht damit dem Werkstoff Holz den Einsatz auch im vielgeschossigen Hochbau, was bisher Stahl- und Stahlbeton vorbehalten war. Obwohl schon über 100 Jahre bekannt, erfahren HBV-Systeme erst in jüngerer Zeit wachsende Beachtung bei Architekten und Bauherren. Ein Grund hierfür liegt in den sich erst langsam entwickelnden Zulassungsnormen für diese kombinierte Bauweise. In Europa sollen die bestehenden Normen aus den Einzelwerkstoffbereichen – Holzbau und Betonbau – im EUROCODE 5-3 harmonisiert werden.

Der Verbund aus Holz und Beton kann durch verschiedene Herstellverfahren erreicht werden. Dabei sind die Verfahren mit Frischbeton von denen mit Fertigteilen zu unterscheiden. Bei der Verwendung von Frischbeton auf der Baustelle werden Schalungen und Holzträger häufig mit Nuten (auch Kerven genannt) im Holz versehen, die eine hohe Schubübertragung im HBV-Element garantieren. Die Nachteile dieser HBV-Herstellung liegen beim aufwändigen Schalungsbau vor Ort, langen Abbindezeiten des Betons und dem hohen Feuchteeintrag in die Holzbauteile. Auch das Schwinden des Betons in den Kerven kann den Verbund weniger steif ausfallen lassen, als ursprünglich berechnet.

Die Verwendung von Fertigteilen vermeidet diese Nachteile, Stahlbetonfertigteile können prozesssicher im Werk vorproduziert werden, auch große Holzträger aus Brettschichtholz oder Furnierschichtholz werden im konstruktiven Holzbau durch bauaufsichtlich zugelassene Klebstoffe und Klebverfahren im Werk vorgefertigt. Alle Fertigteile benötigen auf der Baustelle eine geeignete Füge-technik, hier sind lange Schrauben oder das Kleben zu nennen. Lange Schrauben werden in Leerrohre, eingebaut im Winkel von 45° in den Betonplatten, gesteckt und selbstschneidend in den darunter liegenden Holzträger eingeschraubt. Eine Vielzahl von langen Schrauben stellt den Verbund her, die manuelle Verschraubung ist jedoch anstrengend und zeitaufwändig. Der geschraubte Verbund gilt zudem als vergleichsweise weich gegenüber HBV mit Kerven.

Der Verbund der HBV-Fertigteile durch Kleben ist bisher kaum realisiert, obwohl das strukturelle Kleben eine der höchsten Steifigkeiten im Vergleich mit anderen HBV-Herstellverfahren bietet. Fehlende Richtlinien und Normen sowie klimatische Einschränkungen (Temperatur- und Feuchtebereiche) bei der Verarbeitung der kalthärtenden Klebstoffe auf einer Baustelle sind wesentliche Hinderungsgründe.



Im Anwendungsforschungsprojekt SpeedTeCC der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) wurde eine am ifs entwickelte Schnellklebtechnik mit elektrisch beheizter Klebfuge für den Holz-Beton-Verbund aus Fertigteilen untersucht. Auf der Baustelle erlaubt die elektrisch beheizbare Klebfuge das Kleben in einem erweiterten Umgebungstemperaturbereich und erzielt deutlich schneller eine Anfangsfestigkeit des HBV im Vergleich zum Einsatz von konventionell kaltgehärteten Klebstoffen. Abbildung 1 illustriert die Anordnung von beheizbaren Klebebändern zwischen den Fertigteilen aus Holz und Beton in einer Beispiel-Baugruppe als Zwischendecke oder Dachelement.

Im Projekt SpeedTeCC arbeitete das ifs der Technischen Universität Braunschweig mit zwei weiteren Forschungspartnern, dem Fraunhofer-Institut für Holzforschung - Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI) in Braunschweig und dem Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau der Universität Kassel (FHB) zusammen. Am FHB wurden größere HBV-Bauteile geklebt und geprüft sowie Versuche zum Langzeitverhalten der geklebten HBV-Proben durchgeführt. Auch die rechnerische Modellierung zum Versagens- und Kriechverhalten wurde dort weiter entwickelt und mit den Experimenten validiert. Das WKI bearbeitete alle Aspekte der Holzseite und führte Prüfungen im Kurzzeitverhalten von geklebten HBV-Proben durch. Das ifs bearbeitete die fuge- und prozesstechnischen Aspekte der Schnellklebtechnik und führte die Heißklebungen an den Standorten Braunschweig und Kassel bis in den vollen Fertigteilmaßstab durch.

**Beheizte Klebfuge im Bauwesen**

Die beheizte Klebfuge wird durch ein dünnes metallisches Gitter in Form sogenannter Streckmetalle realisiert, dessen Enden mit einer Stromquelle kontaktiert werden. Diese Heizgitter sind in der Klebschicht eingebettet. Die beheizte Klebfuge wurde innerhalb des Projektes in zwei Varianten realisiert. Zum einen konnte ein mit nachvernetzbarem Schmelzklebstoff vorbeschichtetes Klebeband aus einem Anwendungsforschungsprojekt zum reinen Holz-Holz-Kleben genutzt werden. Dieses Halbzeug kann vorproduziert werden und wird einfach auf der Baustelle zwischen die Substrate geklemmt und beheizt. Abbildung 2 zeigt ein vorbeschichtetes Streckgitter, dessen Enden unbeschichtet bleiben, um eine gute elektrische Kontaktierung zu ermöglichen.

In einer zweiten Variante wurden auch konventionell kalthärtende Konstruktionsklebstoffe frisch flüssig verarbeitet und ein unbeschichtetes Streckmetall als Heizgitter in den Klebstoff eingebettet. Diese Methode ermöglicht es, die im Bauwesen schon zugelassenen Klebstoffe für das Schnellkleben von HBV nutzen zu können.

Die Temperaturüberwachung in der Klebfuge erfolgt über dünne Thermoelement-Drähte, die - elektrisch isoliert - auf dem Streckmetall mit eingeklemmt werden. Durch die sehr homogen gleichmäßige Erwärmung der Streckmetalle - bei Einhaltung bestimmter Randbedingungen - sind nur wenige Temperaturfühler erforderlich. Der zeitliche Ablauf einer konduktiven Schnellklebung ist prinzipiell in Abbildung 3 dargestellt. In einer Schnellheizphase wird mit relativ hoher Leistung (hoher Strom bei niedriger Spannung) eine Aufheizung der Klebfuge in der Größenordnung

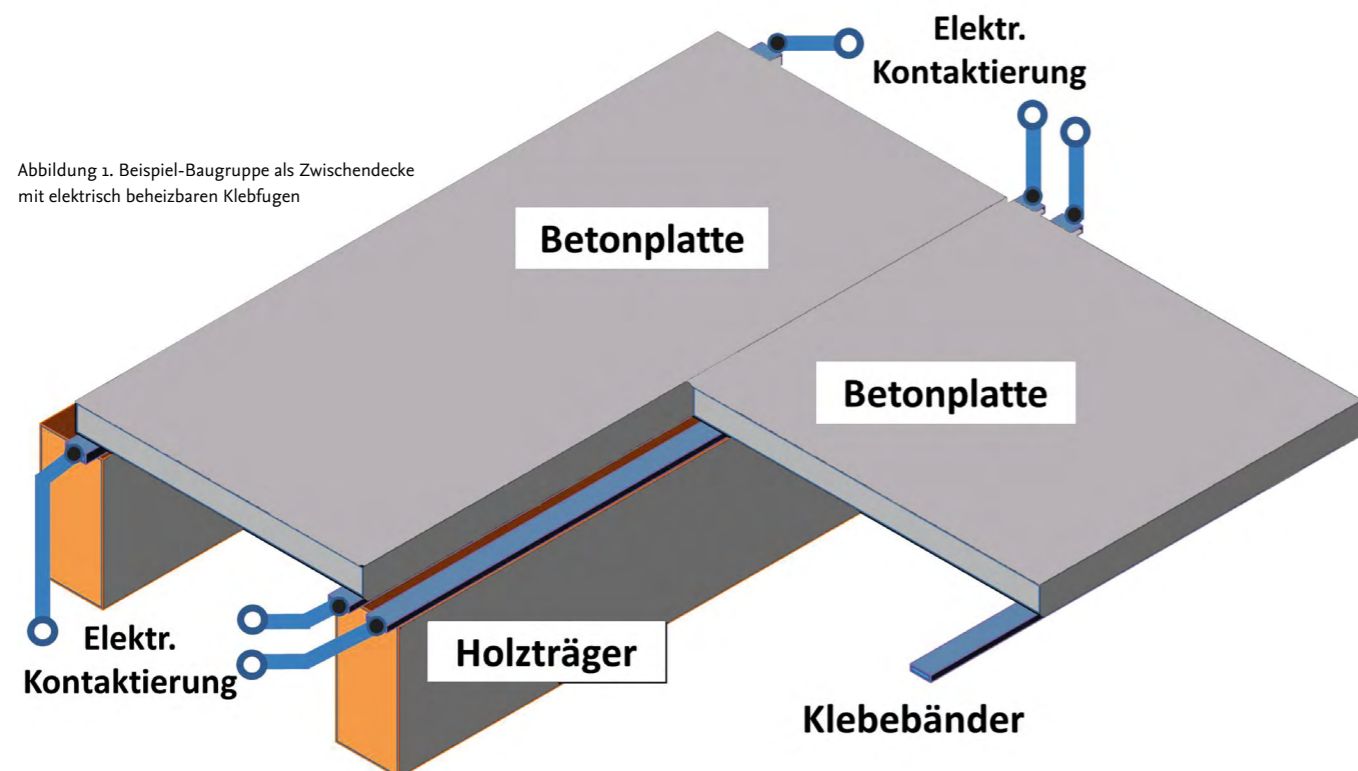


Abbildung 1. Beispiel-Baugruppe als Zwischendecke mit elektrisch beheizbaren Klebfugen

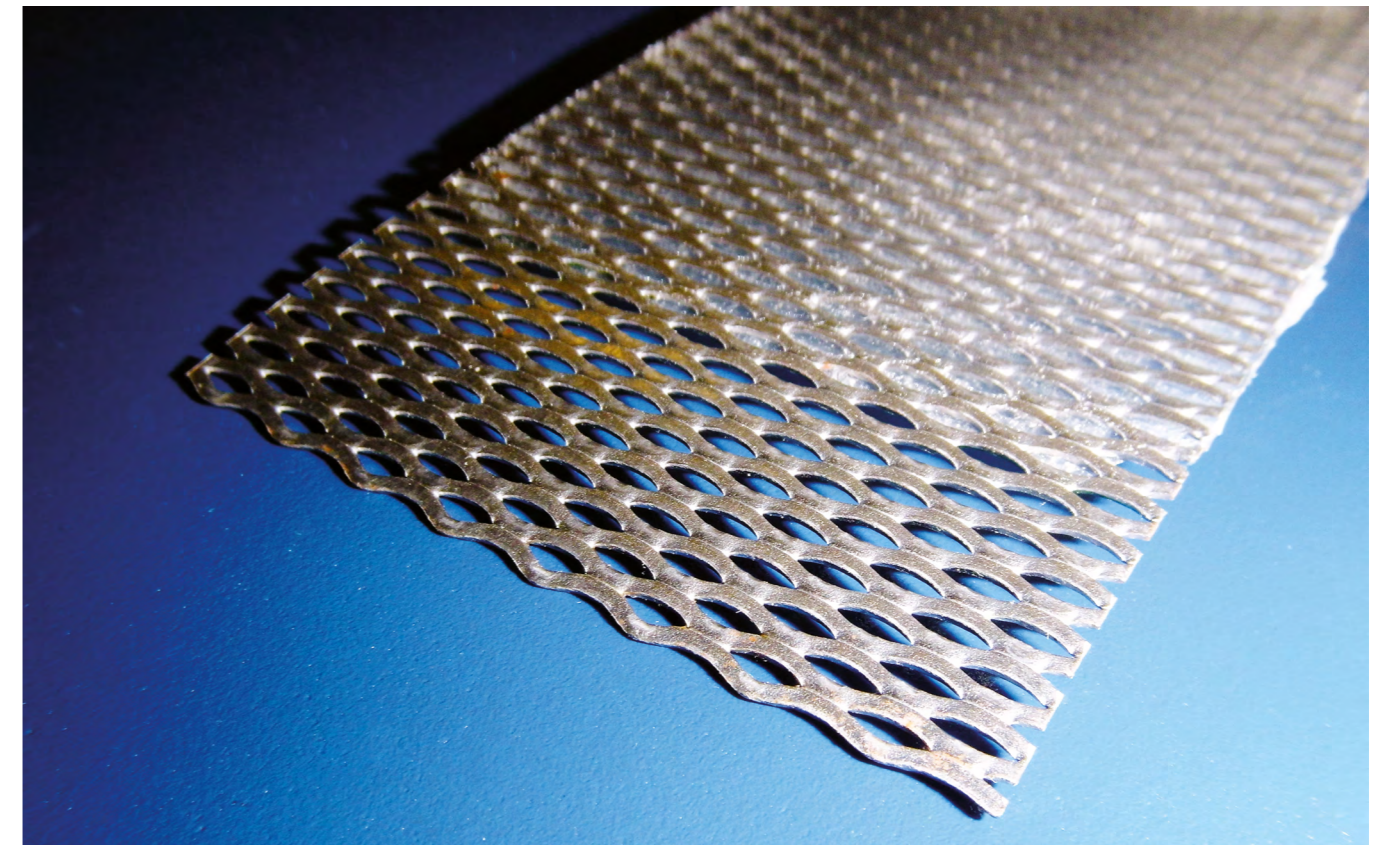


Abbildung 2: Mit Schmelzklebstoff vorbeschichtetes Streckgitter aus Stahl DCo4, Breite 50 mm, Dicke 0,8 mm

von 2 - 5 K/s bis zur Nenn-Heißhärtungstemperatur des Klebstoffs vorgenommen. Dann wird die Heizleistung reduziert, um die Fugentemperatur konstant zu halten. Für eine Haltezeit von 5 - 15 min. (abhängig von Klebstoff und Temperaturniveau) wird die Temperatur gehalten, danach die Stromquelle abgeschaltet. Durch die im Beton gespeicherte Wärme wird die Klebstoffhärtung auch nach Stoppen der Energiezufuhr vorübergehend noch weiter unterstützt.

Durch die direkte konduktive Widerstandserwärmung können prinzipiell alle Stromarten eingesetzt werden: Wechselstrom mit üblicher Netzfrequenz, Gleichstrom oder auch mittelfrequenter Wechselstrom, wie er in der Induktionserwärmung üblich ist. Die metallischen Werkstoffe für die Streckmetallgitter sind keine typischen Heizleiter aus der Elektroerwärmung, sondern Legierungen auf der Basis von kohlenstoffarmen Stählen (z.B. gut umformbare Stähle der DC- oder DX-Reihen) oder Messing mit hohem Zinkanteil (z.B. CuZn37) mit relativ niedrigen spezifischen elektrischen Widerständen im Temperaturbereich zwischen 0 °C und 200 °C.

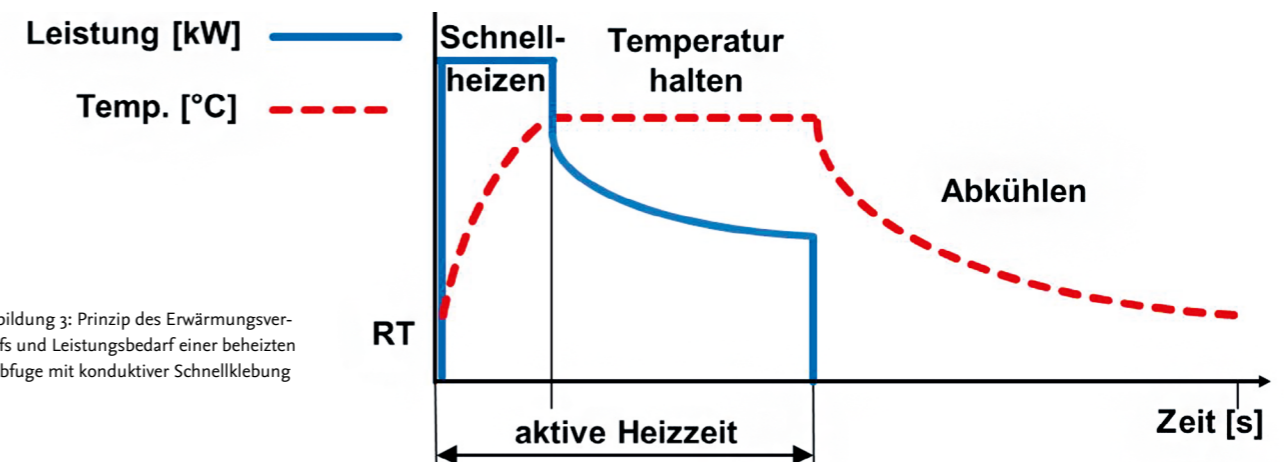


Abbildung 3: Prinzip des Erwärmungsverlaufs und Leistungsbedarf einer beheizten Klebfuge mit konduktiver Schnellklebung





Ablage von Heizbändern für die beheizbare Klebfuge im Holz-Beton-Verbund

Die Randbedingungen für eine hohe Qualität und Festigkeit der heißgehärteten Klebfuge konzentrieren sich hauptsächlich auf gute Kontaktbedingungen (Festkörper- und Flüssigkeitskontakt) und damit auf geometrische Anforderungen an die Fügeteile. Durch die hohe Energiedichte bei der Widerstandserwärmung im Streckmetall und den asymmetrischen Wärmeabfluss in die sehr unterschiedlichen Substrate Holz und Beton stellen mögliche lokal unzureichende Kontaktbedingungen (z.B. Luftspalte aus geometrischen Toleranzen oder hohe Oberflächenrauheit) ungünstige Randbedingungen dar und sogenannte Hotspots können entstehen. Dabei konzentriert sich die Stromdichte auf Bereiche mit starkem Wärmestau und heizt diesen zusätzlich auf. Im Hotspot besteht Verkohlungs- und Brandgefahr für die Holzsubstrate sowie für den Klebstoff. Daher sind in allen Bereichen der Klebfuge möglichst homogene Kontaktbedingungen durch geometrisch ebene Substratoberflächen, einen Mindestanpressdruck (viskositätsabhängig) und ausreichende Klebstofffüllung herzustellen.

Im Projekt SpeedTeCC wurde daher von anfänglich sandgestrahlten rauen Betonoberflächen (in der Literatur häufig zum Kleben empfohlen) auf schalungsglatte Betonoberflächen umgeschwenkt, die frei von Trennmitteln in Holzwerkstoffschalungen hergestellt werden können. Dies erfordert jedoch eine Mindestoberflächenzugfestigkeit des Betons. Im Projekt konnte nachgewiesen werden, dass Normalbeton der Güte C45/55 diese Anforderung erfüllt.

Die Eignung von Konstruktionsklebstoffen für das konduktive Schnellkleben von HBV wurde am Anfang des Projektes in einem zunächst breit angelegten Screening an bis zu 15 Klebstoffen und zwei Holzarten (Fichte und Buche) untersucht. Neben den von Anfang an favorisierten Epoxidharz-Systemen wurden auch Polyurethane und Phenol-Resorzinol Harze (nur kaltgeklebt zum Vergleich) sowie reaktive Schmelzklebstoffe auf unterschiedlicher chemischer Basis betrachtet. Die Schmelzklebstoffe bieten grundsätzlich die Möglichkeit einer Vorbeschichtung auf die Streckmetalle zum Klebeband-Halbzeug.

Das breit angelegte Screening der Klebstoffe wurde an kalt- und heiß geklebten kompakten HBV-Proben mit 270 mm Kleblänge und 25 mm Breite durchgeführt, diese anschließend in schmale Quader geschnitten und jeweils drei Proben in einer Blockscherprüfung nach DIN EN 14080 geprüft. Im Screening konnte die Anzahl der Klebstoffe auf vier reduziert werden, die für umfangreiche Versuchsreihen zur Prüfung der Kurz- und Langzeitbeständigkeit des geklebten HBV auf Fichte und Buche weiter genutzt wurden.

Dies waren ein Phenol-Resorzinol, ein einkomponentiger heißhärtender Epoxidharz aus einer Automobilanwendung und ein Co-Polyamid Schmelzklebstoff (Hotmelt), der bei reinen Holz-Holz-Klebung stets gute Ergebnisse zeigte, sich jedoch in den späteren Beständigkeitsuntersuchungen mit Temperatur- und

Feuchtebeaufschlagung als unbrauchbar erwies. Hier wirkt sich die Betonseite mit einer Reihe von ungünstigen geometrischen und physikalischen Eigenschaften negativ auf die Klebqualität aus.

Ein ursprünglich nur als Referenzklebstoff vorgeschlagener, für den Holzbau bauaufsichtlich zugelassener, zweikomponentiger Epoxidharzklebstoff wurde in den zwei Varianten „Kaltkleben als Referenz“ und „Heißkleben bei 100 °C über 5 min.“ durchgängig in den Versuchsreihen berücksichtigt und stellte sich insgesamt als am besten geeignet für den heiß geklebten HBV heraus.

Nach den Erfahrungen mit kleinen kompakten HBV-Proben wurden auch größere HBV-Träger heiß geklebt, zunächst ein T-Träger mit 1700 mm Kleblänge (50 mm Breite) und zuletzt wurden zwölf  $\pi$ -Träger mit 6150 mm Kleblänge und 150 mm Breite je Schenkel im vollen Fertigteilmassstab geklebt, siehe Abbildung 4.

Als Ergebnis der umfassenden Beständigkeitsuntersuchungen stellte sich die Kombination aus Fichten-Brettschichtholz und Stahlbeton C45/55 mit schalungsglatte Oberfläche, heiß geklebt mit einem 2K-Epoxidharzklebstoff auf eingelegtem Streckmetall als die beste und reproduzierbarste Lösung heraus. Im Projekt konnte die Machbarkeit des geklebten Holz-Beton-Verbundes mit beheizter Fuge unter Baustellenbedingungen nachgewiesen werden. Mit der beschleunigten Aushärtung kann damit der Baufortschritt gegenüber der Kaltaushärtung deutlich beschleunigt werden.

#### Danksagung

Das Vorhaben IGF Nr.19417N wurde durch die Forschungsvereinigung Internationaler Verein für Technische Holzfragen e. V. (IVTH) in Kooperation mit der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS über die AiF Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. begleitet und durch Mittel des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Den genannten Organisationen und den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschuss sei ausdrücklich gedankt.

#### Autor:

Dipl.-Ing. Gregor Wisner

#### Kontakt:

g.wisner@tu-braunschweig.de



Abbildung 4: Konduktive Schnellklebung im vollen Fertigteilmassstab, Kleblänge 6,15 m als simulierte Baustellenklebung



# EcoQuality - Die Qualität von Klebungen von Anfang an im Fokus haben

Das Kleben hat sich in den vergangenen Jahren als eines der bedeutendsten Fügeverfahren etabliert. Allerdings ist die zerstörungsfreie Prüfung von Klebstellen derzeit nur begrenzt möglich. Um den Klebprozess beherrschbar zu machen, ist daher die Anwendung eines Qualitätsmanagementsystems (QMS) unumgänglich. Die Einführung und Nutzung eines maßgeschneiderten QMS ist ein wichtiger Schlüssel zur Steigerung der Akzeptanz der Klebtechnik. Wie ein solches QMS aussehen kann, wurde im Projekt EcoQuality erarbeitet.

Das Kleben hat sich in den vergangenen Jahrzehnten als eines der wichtigsten und vielseitigsten Fügeverfahren etabliert. Dies ist auf die besonderen Eigenschaften dieses Fügeverfahrens zurückzuführen. Neben anderen sind die wesentlichen Vorteile des Klebens das Fügen unterschiedlichster Werkstoffe, die flächige Lasteinleitung sowie die Möglichkeit, wärmeempfindliche Werkstoffe zu fügen.

Diesen Vorteilen des Klebens stehen jedoch auch einige Nachteile gegenüber. Derzeit stehen z.B. keine anerkannten und allgemeingültigen Verfahren zur vollumfänglichen zerstörungsfreien Prüfung von Klebverbindungen zur Verfügung. Dies ist vor allem deshalb von Belang, da es sich beim Kleben nach DIN 2304-1 um einen speziellen Prozess handelt und somit eine direkte Zuordnung zwischen dem Klebergebnis und einzelnen Prozessschritten und -parametern nicht möglich ist.

Zwar konnte im Rahmen zahlreicher Forschungsprojekte gezeigt werden, dass bestimmte Klebfehler mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren nachgewiesen werden können, allerdings hat sich noch keines dieser Verfahren als ausreichend robust und genau zum Nachweis aller Klebfehler

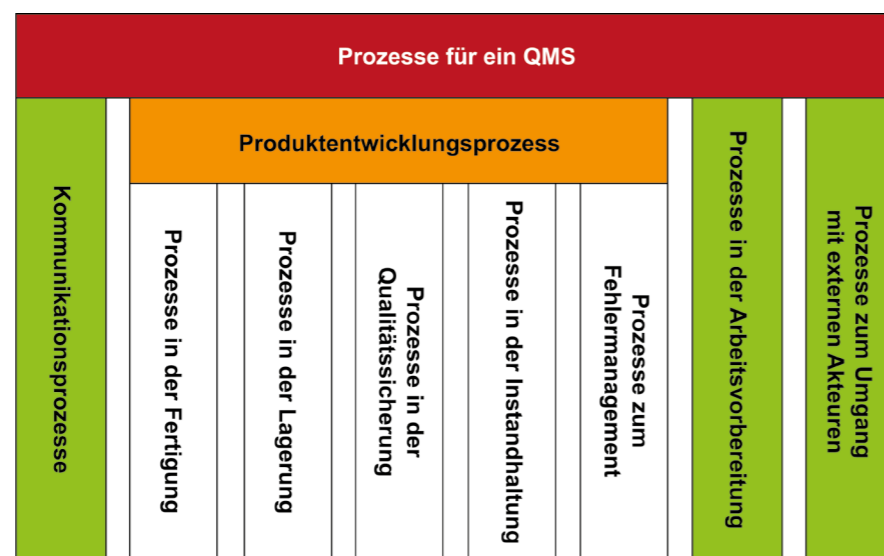


Abbildung 1: Prozesse in Rahmen eines QMS (Abhängigkeiten von der Produktentwicklung)

erwiesen. Insbesondere Adhäsionsfehler wie Kissing Bonds oder Weak Boundary Layer können aufgrund der geringen physikalischen Signatur nicht oder nur mit hohem Aufwand detektiert werden. Aus diesem Grund ist es unumgänglich, ein QMS für die Klebtechnik zu etablieren, um die Integrität der Klebstellen sicherzustellen. Dabei muss vor allem im Hinblick auf die Anwendung bei kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) berücksichtigt werden, dass auf der einen Seite die wirtschaftliche Umsetzbarkeit gewährleistet wird und auf der anderen Seite die Qualität der Klebstellen mit hinreichender Genauigkeit gesichert wird.

Das Ziel des Forschungsvorhabens EcoQuality (IGF 19391N) war daher die Entwicklung eines auf die Klebtechnik zugeschnittenen QMS, eine Methodik zu dessen Einführung sowie zur Identifizierung der prozessbestimmenden Parameter. Dazu wurden im Projekt

Methoden des Qualitätsmanagements mit der Überwachung von Prozessparametern kombiniert, sodass eine wirtschaftlich effiziente Methodik entsteht, die die Sicherung der Qualität von Klebungen erlaubt. Der Nachweis innerhalb des Projektes wurde an realen Prozessen erbracht.

### Grundlage eines QMS für die Klebtechnik

Um ein Qualitätsmanagementsystem für die Klebtechnik umzusetzen, sind elf Schritte zu durchlaufen, die aufeinander aufbauen und deren Ergebnisse iterativ verbessert werden müssen, um die Qualität der Klebung kontinuierlich zu steigern:

1. Entscheidung des Managements zur Einführung eines QMS für die Klebtechnik
2. Ermittlung der Erfordernisse und Erwartungen der Kunden und anderer interessierter Parteien
3. Festlegen der Qualitätspolitik und der Qualitätsziele in der Klebtechnik
4. Bestimmung des Geltungsbereiches und Schnittstellen zwischen den Bereichen
5. Festlegen der Verantwortlichkeiten, um die Qualitätsziele zu erreichen
6. Festlegen der erforderlichen Prozesse, um die Qualitätsziele zu erreichen
7. Festlegen und Bereitstellen der erforderlichen Ressourcen, um die Qualitätsziele zu erreichen
8. Einführen von Methoden und Messungen, um die Wirksamkeit und die Effizienz jedes einzelnen Prozesses zu messen
9. Anwenden der Methoden und Messungen zur Ermittlung der aktuellen Wirksamkeit und Effizienz jedes einzelnen Prozesses
10. Festlegen von Mitteln zur Verhinderung von Fehlern und zur Beseitigung ihrer Ursachen

11. Einführen und Anwenden eines Prozesses zur ständigen Verbesserung des QMS

Die Schritte 1-5 stellen Managementaufgaben dar und es obliegt dem Management, in diesen Schritten die Rahmenbedingungen für das QMS zu schaffen. Im Anschluss müssen im 6. Schritt die konkreten Prozesse und Abläufe definiert werden, die zum Erreichen der Qualitätsziele erforderlich sind. Die erforderlichen Prozesse beschränken sich dabei nicht nur auf die Fertigungsschritte und Prüfmaßnahmen im eigentlichen Fertigungsprozess Kleben, sondern müssen alle den Klebprozess tangierende Unternehmensbereiche (wie z.B. die Lagerung oder die Instandhaltung, die Kommunikation zwischen diesen Bereichen sowie den Umgang mit Kunden, Lieferanten und weiteren externen Akteuren) umfassen. Sie sind unternehmensspezifisch festzulegen. Der Produktentwicklungsprozess (PEP) stellt dabei die Basis dar, da hierin die Grundlagen für die in der Fertigung und im Unternehmen zu etablierenden Prozesse erarbeitet werden. Eine Übersicht über die Bereiche, für die Prozesse definiert werden müssen, gibt die Abbildung 1. Der nächste Schritt besteht in der Definition und Bereitstellung der benötigten Ressourcen (Schritt 7) und, daran anschließend, der Umsetzung der Prozesse (Schritte 8-10). Zuletzt ist es erforderlich, einen Prozess zur kontinuierlichen Verbesserung des QMS zu definieren, durch dessen Anwendung eine kontinuierliche Qualitätsverbesserung erreicht wird.

### 3. Ableitung der Prozesse für das QMS

Um die relevanten Prozesse für ein QMS ableiten zu können, wurde im Projekt eine auf Methoden des allgemeinen Qualitätsmanagements aufbauende Methodik zur Entwicklung von Klebprozessen erarbeitet. Der Ablauf dieser Methodik sowie die eingesetzten Werkzeuge des Qualitätsmanagements sind in Abbildung 2 dargestellt.

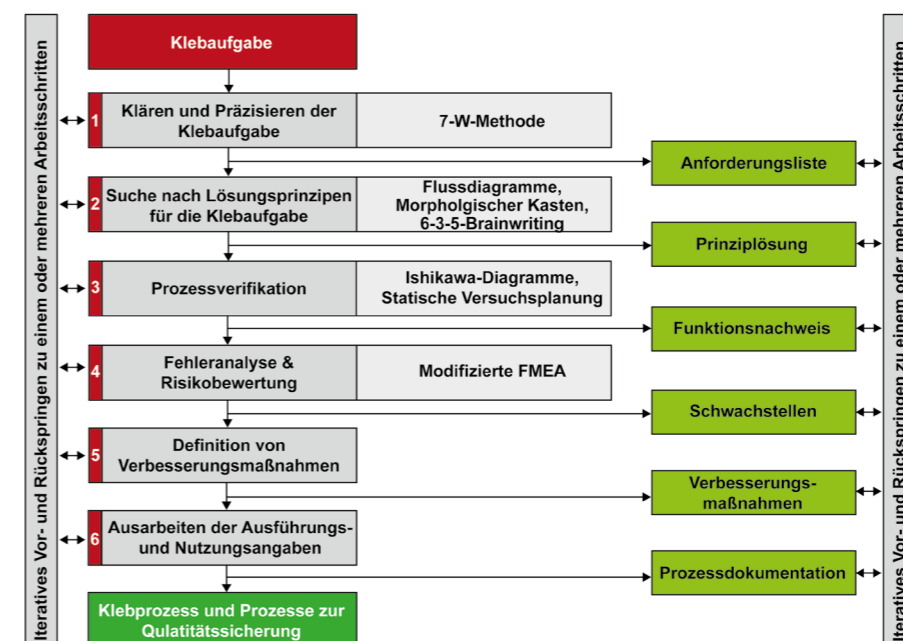


Abbildung 2: Methodik zur Produktentwicklung und Ableitung der Prozesse zur Qualitätssicherung

Am Anfang steht in allen Fällen die Klärung der Klebaufgabe. Das Ziel ist es dabei, grundlegende Fragestellungen zu beantworten und die Klebaufgabe möglichst genau zu beschreiben. Je mehr Informationen dabei gesammelt werden können, desto besser kann der Klebprozess geplant werden. Da die kostspieligsten Fehler bereits in der Planungsphase gemacht werden, ist es von besonderer Bedeutung, hier die Anforderungen und Besonderheiten bereits zu berücksichtigen. Das Ergebnis dieses Schrittes bildet dann die Anforderungsliste. Diese Liste ergibt sich zum Beispiel aus den Anforderungen im Gesamtprojekt, der Arbeitsvorbereitung oder auch durch geänderte Rahmenbedingungen im Betrieb. Die Liste muss immer wieder kritisch überprüft und kontinuierlich angepasst werden. Hierzu wurde im Projekt ein auf der Technik der 7W basierender Fragebogen entwickelt, in dessen Rahmen zunächst die Klebaufgabe definiert, die Fügepartner und normative Anforderungen sowie (soweit bekannt) der Fertigungsablauf erfasst werden. Darauf aufbauend werden dann normative, funktionsbasierte und prozessbasierte Anforderungen abgeleitet. Das Vorgehen ist in Abbildung 3 dargestellt.

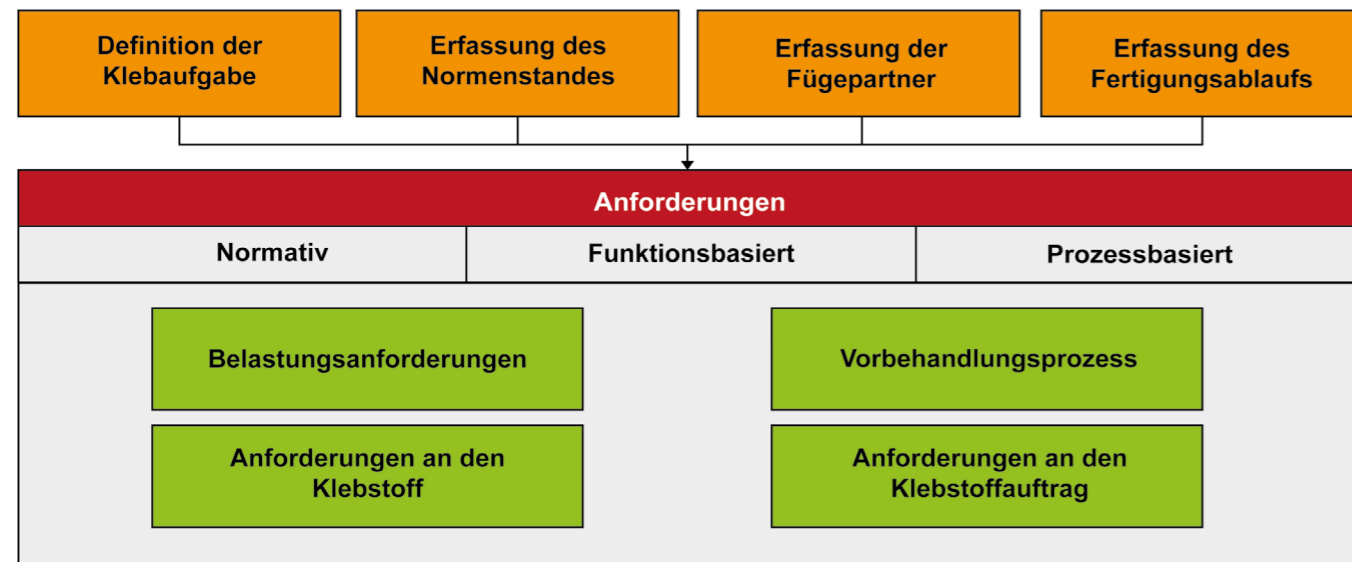


Abbildung 3: Struktur des Fragebogens zur Klärung der Klebaufgabe und Ableitung der Anforderungen auf Basis der 7W-Methode

Sobald die Anforderungen geklärt und erfasst sind, können in einem zweiten Schritt grundsätzliche Lösungsprinzipien entwickelt werden. Ausgangspunkt ist dabei die Auswahl des Klebstoffs, der u.a. auf Basis der auftretenden Belastungen, der Zeitfenster für die Fertigung und unter Berücksichtigung der Fügestellengeometrie ausgewählt wird. Darauf aufbauend werden dann die weiteren Prozessschritte ausgewählt. Um eine für die Anwendung passende und zugleich wirtschaftliche Lösung zu garantieren, ist es dabei empfehlenswert, unterschiedliche Klebsysteme zu betrachten und zu evaluieren. Auf Basis dieser Prinzipienlösungen ist es sinnvoll, Flussdiagramme für alle Komponenten (Fügeteile, Klebstoff,

Hilfsmittel) zu erstellen. Dies hat den Vorteil, dass eine Einbettung der einzelnen Komponenten in den Gesamtherstellungsprozess, soweit dieser bereits bekannt ist, möglich ist, und Zeitintervalle für die einzelnen Prozessschritte berücksichtigt werden können. In diesem Schritt erfolgen auch die vorläufige Festlegung der Klebstoffe, der Oberflächenvorbehandlung, der Applikationstechnik sowie aller sonstigen Schritte des Klebprozesses. Zur Lösungsfindung können morphologische Kästen oder die Methode des 6-3-5-Brainwriting eingesetzt werden. Nun wird der Klebprozess verifiziert. Hierbei ist zu beachten, dass der Klebprozess realitäts- und fertigungsnah abgebildet wird, sodass die Prozessparameterfenster ermittelt werden können. Dazu ist zunächst eine grundlegende Analyse des Klebprozesses notwendig. Der Klebprozess wird in elementare Schritte zerlegt und die Klebparameter identifiziert. Hierzu können für jeden der Prozessschritte Ishikawa-Diagramme genutzt werden, Abbildung 4. Im Anschluss wird überprüft, ob das definierte Klebsystem die Anforderungen erfüllt. Werden Anforderungen nicht erfüllt, so ist der Klebprozess zu ändern, bis diese erfüllt sind. Um den Versuchsaufwand zu reduzieren, kann eine statistische Versuchsplanung herangezogen werden.

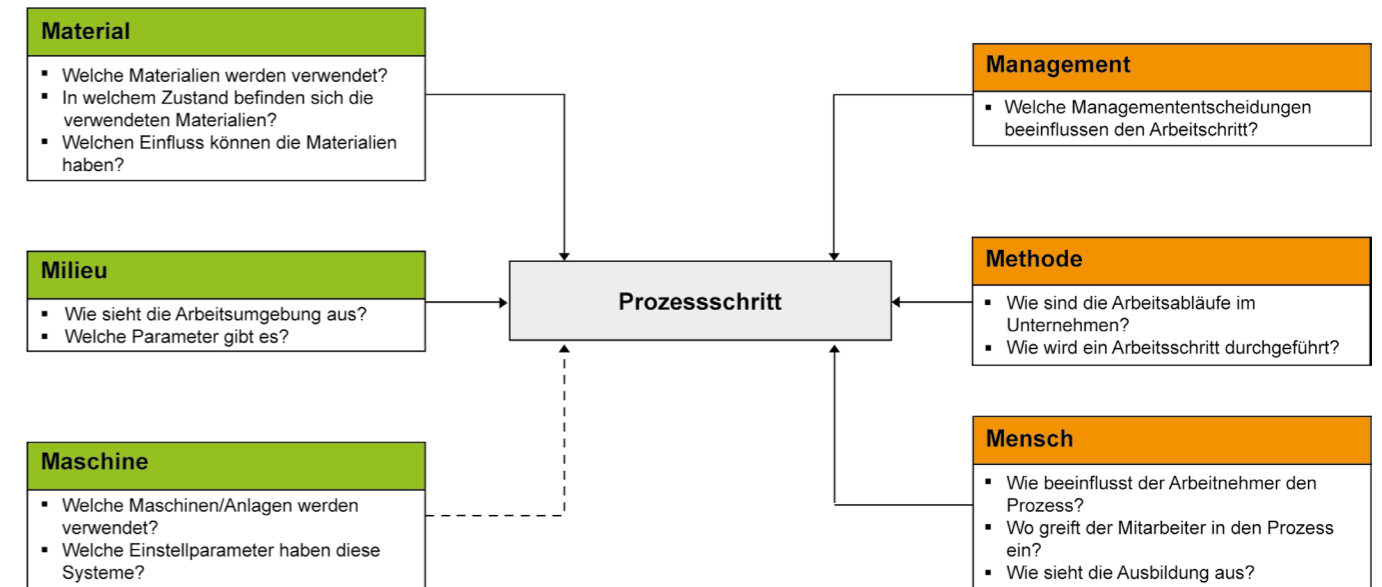


Abbildung 4: Fragestellungen zu den Prozessschritten auf Basis eines Ishikawa-Diagramms

#### Zusammenfassung und Schlussbemerkung

Im Rahmen des durchgeführten Projektes wurden Methoden des Qualitätsmanagements bezüglich ihrer grundlegenden Eignung zum Einsatz in der Klebtechnik untersucht. Dazu wurden zwei industriell eingesetzte Klebprozesse aus dem projektbegleitenden Ausschuss vorgeschlagen und in verschiedenen Varianten in leicht modifizierter Form an der Forschungseinrichtung im Labormaßstab umgesetzt. Auf Basis der Erkenntnisse wurde eine Methodik zur Einführung des Klebtechnik-gerechten QMS abgeleitet, das auf den als zielführend identifizierten Einzelmethoden basiert. Im Zentrum steht dabei die Produktentwicklung, da hier das größte Potential zur Fehlervermeidung besteht. Durch eine konsequente Prozessanalyse ist es möglich, kritische Prozessschritte und Prozessparameter zu identifizieren und auf dieser Basis Prozesse abzuleiten, die im Rahmen des QMS die Sicherung der Klebstellenqualität ermöglichen. Die zentralen Ergebnisse des Projektes lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Eine allgemeine Methodik und Vorgehensweise zur Einführung eines QMS für die Klebtechnik wurde abgeleitet und in Form eines Leitfadens zusammengestellt, der vor allem den KMU als Hilfestellung dienen kann, ein QMS wirtschaftlich einzuführen.
- Ein auf Methoden und Werkzeugen des Qualitätsmanagements basierendes Vorgehen zur Identifizierung der prozessrelevanten Parameter und deren Auswirkungen wurde erarbeitet.
- Es wurde über den derzeitigen Stand der Technik, der im Wesentlichen auf die Anwendung einer klassischen FMEA abzielt, hinaus, ein alternativer Ansatz zur Bestimmung der Risikoparameter erarbeitet, der eine Risikobewertung und damit eine fundierte Risikoanalyse ermöglicht.

#### Danksagung

Das IGF-Vorhaben 19391 N der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

#### Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Malte Mund  
Dipl.-Chem. Elisabeth Stammen

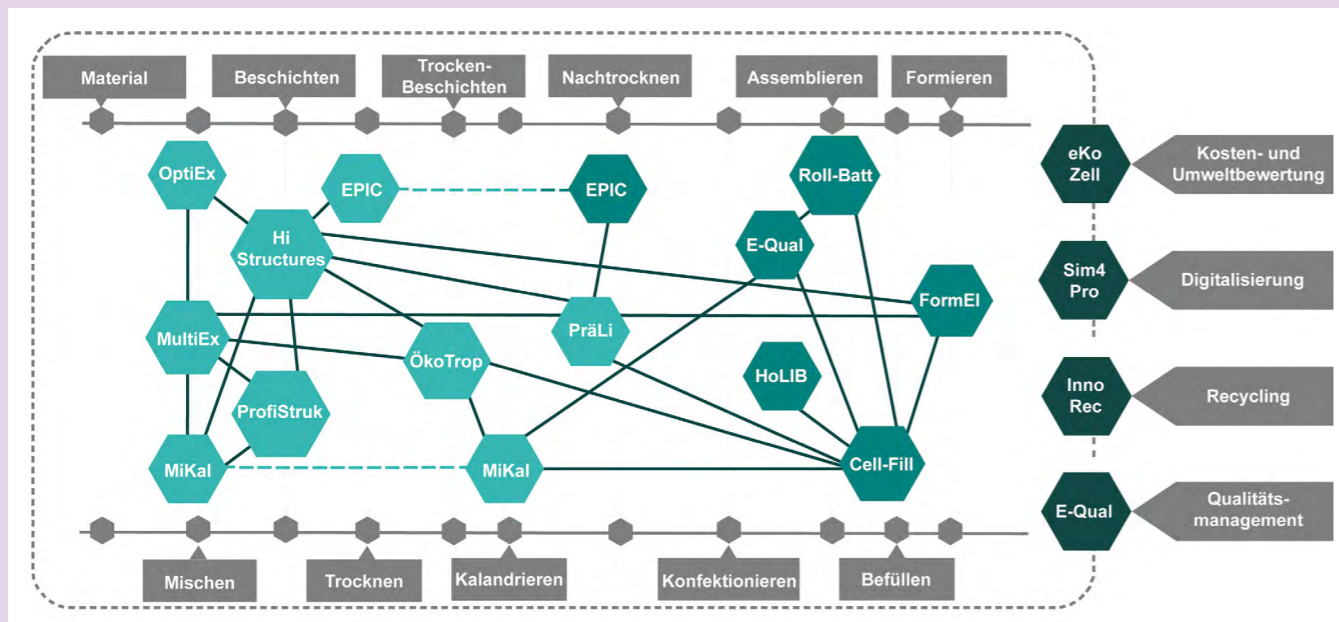
#### Kontakt:

m.mund@tu-braunschweig.de  
e.stammen@tu-braunschweig.de



# ifs im ProZell-Cluster

In insgesamt 15 Forschungsprojekten in ProZell-Cluster werden Themenschwerpunkte rund um die Batteriezellproduktionsprozessierung erforscht. Die Projekte werden in enger Kooperation und auch übergreifend zwischen den Forschungsinstitutionen erarbeitet. Begleitet wird dieses Cluster durch einen Managementkreis, der sich aus Vertretern der zellherstellenden Industrie zusammensetzt.



Vernetzung der 15 ProZell-Projekte (Bild: Laura Jess)

In insgesamt 15 Forschungsprojekten im ProZell-Cluster werden Themenschwerpunkte rund um die Batteriezellproduktion erforscht. Die Projekte werden in enger Kooperation und auch übergreifend zwischen den Forschungsinstitutionen erarbeitet. Begleitet wird dieses Cluster durch einen Managementkreis, der sich aus Vertretern der zellherstellenden Industrie zusammensetzt. Das ProZell-Cluster selbst ist eins der vier Bausteine des BMBF-Dachkonzeptes „Forschungsfabrik Batterie“ und gliedert sich in die innovationsgetriebenen Teilbereiche der Materialkonzepte, Zellkonzepte und Produktionskonzepte ein.

Das ifs ist an insgesamt fünf Clusterprojekten beteiligt und erforscht Themenbereiche zu den Prozessschritten Trocknen, Beschichten und Konfektionieren. Dabei werden im Wesentlichen die Forschungsfragen zu trennenden Prozessen und deren Prozessmaterialwechselwirkungen beleuchtet sowie Haftungseigenschaften der Elektrodenbeschichtungen in Kombination mit neuen Prozesstechnologien. Im Folgenden werden diese Projekte kurz vorgestellt und ein Einblick in diese Arbeiten gegeben.

# HoLiB: Hochdurchsatzverfahren in der Fertigung von Lithium-Ionen-Batterien

## Über das Projekt

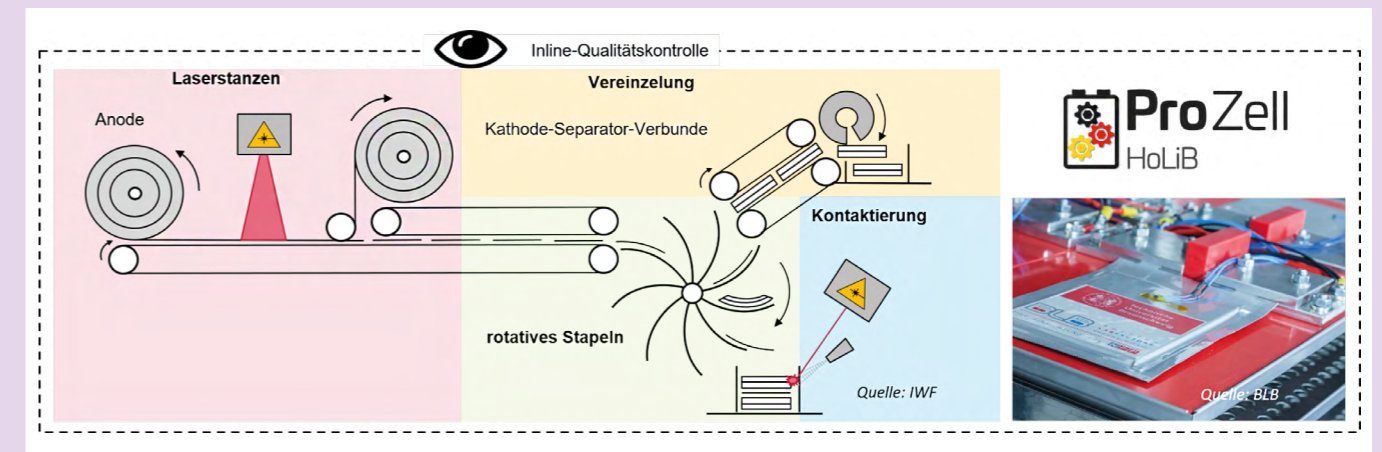
Infolge der zunehmenden Elektrifizierung des Mobilitätssektors mit dem Ziel die Emission klimaschädigender Gase zu reduzieren, wächst auch der Bedarf an Lithium-Ionen-Batterien (LiB), welche eine wesentliche Schlüsselkomponente für die Bereitstellung von Elektrofahrzeugen darstellen. Um dieser stetig steigenden Nachfrage gerecht zu werden, müssen die LiB-Produktionsprozesse kosten- und zeiteffizienter gestaltet und umgesetzt werden. Bei der aktuellen Zellfertigung der LiB bestehen insbesondere Einsparungspotenziale bei der Konfektionierung der Elektroden, dem zeitintensiven Stapeln des Elektrode-Separator-Verbundes und bei der Kontaktierung der einzelnen Anoden- und Kathodenlagen sowie der ganzheitlichen Verkettung der genannten Teilprozesse. Ziel des Projektes ist es daher in dem Projektkonsortium eine Hochdurchsatzproduktion von LiB zu entwickeln, wobei die Teilprozesse Konfektionieren, Stapeln und Kontaktieren optimiert und zeiteffizient miteinander verknüpft werden. Dabei werden nicht-wertschöpfende Prozessschritte, wie beispielsweise Pick-and-Place Prozesse durch eine kontinuierliche automatisierte Verfahrensgestaltung ersetzt. Auf diese Weise sollen die Herstellungszeiten pro Elektrode von der Größenordnung  $>1$  s auf  $<0,2$  s reduziert werden.

Das Institut für Füge- und Schweißtechnik beschäftigt sich in diesem Projekt mit dem Prozessschritt des Ausschneidens der Elektrodenkontur. Hierbei wird das Vereinzeln der Elektroden mittels Laserstrahlung untersucht. Die Nutzung des Lasers bietet wesentliche Vorteile gegenüber einem mechanischen Stanzprozess, wie z. B. kurze Prozesszeit, hohe Schnittkantenqualität sowie einen geringen Werkzeugverschleiß. Eine wesentliche Besonderheit des in dem Projekt zu betrachtenden Laserschneidverfahrens obliegt der Verfahrensgestaltung. Im Gegensatz zum herkömmlichen Laserschneiden, bei dem der Schnitt durch die Bewegung des Laserspots erfolgt, sieht der hier zu entwickelnde laserbasierte Stanzprozess eine simultane Bestrahlung der gesamten Schnittkontur vor. Hierfür wird der Laserstrahl durch ein diffraktives optisches Element (DOE) an die Schnittkontur angepasst, sodass ohne Bewegung des Laserspots die gesamte Kontur gleichzeitig geschnitten wird. Neben der Entwicklung dieser Laserstanze werden in dem Projekt die Potenziale und Grenzen dieser Technologie analysiert und bewertet.

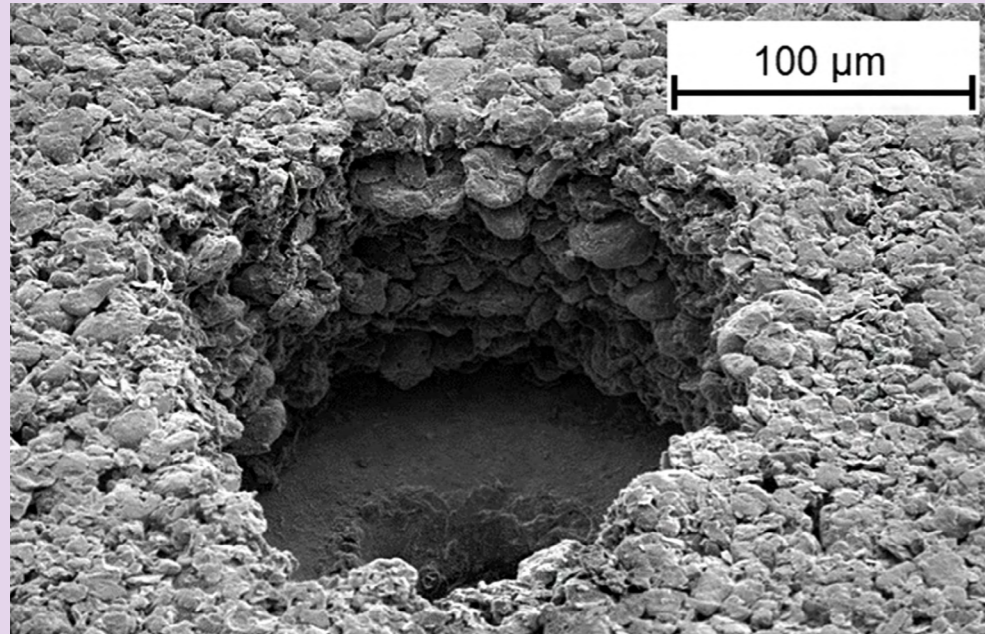
**Ansprechpartner:**  
 Julian Brodhun, M.Sc.

**Kontakt:**  
[j.brodhun@tu-braunschweig.de](mailto:j.brodhun@tu-braunschweig.de)

Darstellung des verketteten Gesamtprozess







REM-Aufnahme einer Strukturierung auf der Batterie-Elektrode (Bild: TU BS)

## HiStructures: Hierarchische Strukturierung hochkapazitiver Elektroden

### Über das Projekt:

Ziel des Projektes "HiStructures" im Cluster ist es, die Leistungsfähigkeit von Lithium-Ionen-Zellen bei gleichzeitiger Einsparung von Material- und Herstellungskosten zu steigern, um die Voraussetzungen für eine großtechnische Batterieproduktion in Deutschland zu schaffen. Im Mittelpunkt des Projektes steht die Verbindung der Expertise verfahrenstechnischer Arbeitsgruppen mit dem fundierten Know-how der Forscher auf dem Gebiet der elektrochemischen und strukturbasierten Simulation und Modellierung von Batterien.

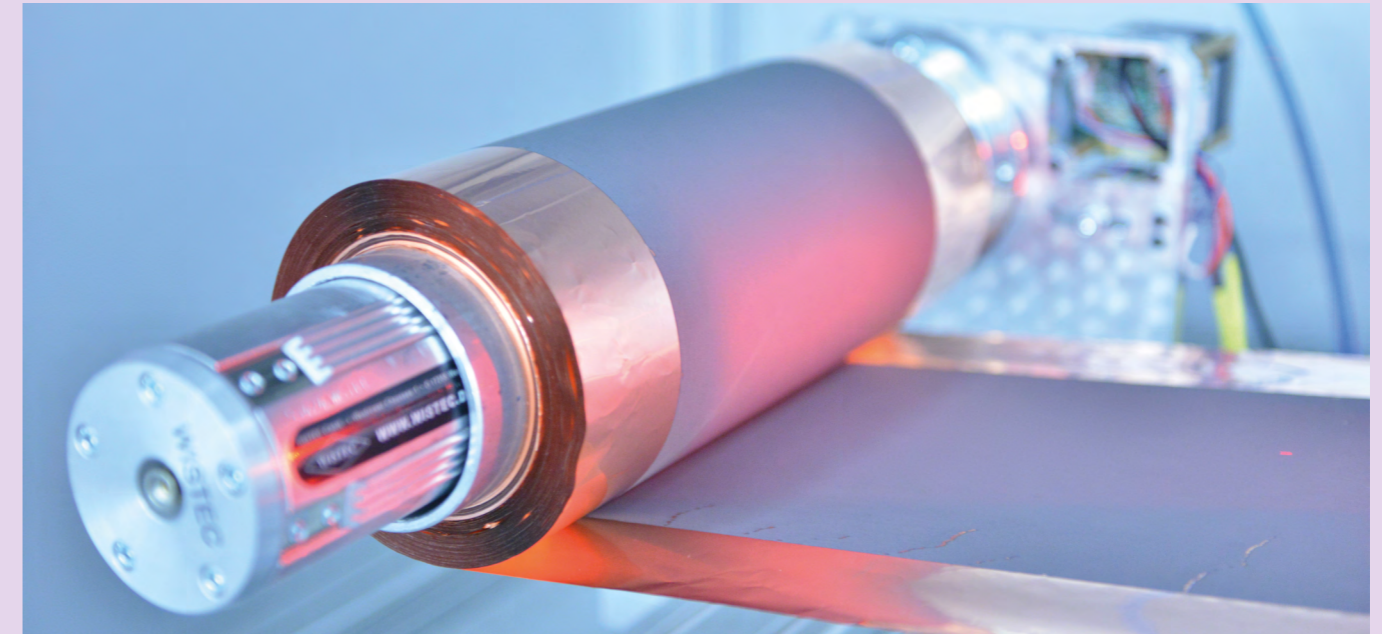
Das Projekt konzentriert sich auf die Entwicklung von Konzepten für die kontinuierliche und kostengünstige Herstellung ultradücker, doppelseitiger Hochenergie-Elektroden. Die größte Herausforderung bei der Herstellung sehr dicker Elektroden besteht darin, eine hohe Homogenität, mechanische Stabilität, gute Haftigenschaften und hohe Elastizität sowie eine entsprechend hohe Standzeit zu erreichen. Darüber hinaus werden bei HiStructures verschiedene prozessbasierte Strukturierungskonzepte und deren Kombination miteinander untersucht (z. B. aktive Materialmischungen, Gradienten-Elektroden, Mehrlagenbeschichtung, Laserstrukturierung). Neben der praktischen Arbeit liegt der Schwerpunkt auf der Kombination von Verfahrenstechnik und Simulation. Im Erfolgsfall wäre es möglich, verbesserte Elektroden

mit einem höheren Produktionsdurchsatz und damit geringeren Kosten herzustellen. Schließlich wird die Weiterentwicklung des Verfahrens bis zum Pilotmaßstab ein umfassendes Verständnis der Prozess-Struktur-Eigenschafts-Beziehungen sowie das notwendige Know-how für die Überführung in die industrielle Produktion liefern.

Am Institut für Füge- und Schweißtechnik wird insbesondere das Konzept der Laserstrukturierung verfolgt. Im Fokus stehen die Laser-Material-Wechselwirkungen sowie die Auswirkungen unterschiedlicher Strukturparameter auf die elektrochemischen Eigenschaften. Untersucht wird, wie sich die verschiedenen Eigenschaften wie zum Beispiel Schichtdicke, Strukturgröße, Strukturabstand auf die elektrochemischen Eigenschaften auswirken, um diese zu optimieren und gezielt einstellen zu können.

**Ansprechpartner:**  
Maher Kouli, M.Sc.

**Kontakt:**  
m.kouli@tu-braunschweig.de



Anodenrolle im Versuchsaufbau zur konduktiven Trocknung (Bild: Tobias Jansen)

## Epic: Erhöhung der Durchsatzgeschwindigkeit in der Elektrodenproduktion durch ein innovatives Trocknungsmanagement

### Über das Projekt:

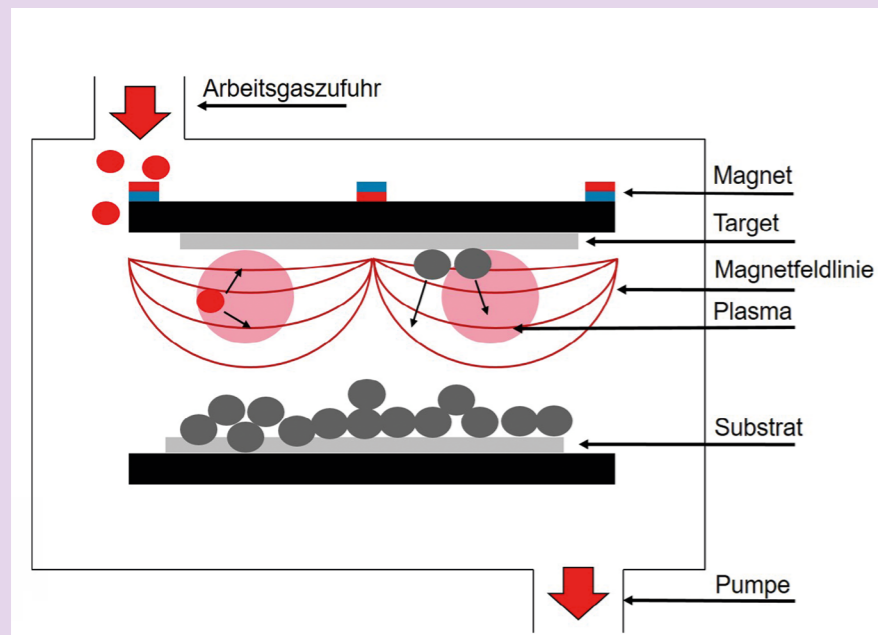
Nach derzeitigem Stand der Technik werden Batterieelektroden in Form von wasser- oder lösemittelbasierter Paste auf einer Stromableiterfolie aufgetragen und in einem kontinuierlichen Prallstrahl Trockner konvektiv getrocknet. Der Trocknungsprozess limitiert dabei die Produktionsgeschwindigkeit, da eine zu hohe Trocknungsrate die Elektrodeneigenschaften verschlechtert. Im Anschluss an die Trocknung werden die Elektroden zunächst kalandriert und dann in einem separaten Prozessschritt nachgetrocknet und anschließend zu Batteriezellen verbaut. Die für die Zelleigenschaften wichtige Restfeuchte hängt dabei von den Randbedingungen im Trockenraum und der Historie der Elektroden entlang der Prozesskette ab. Aktuell werden die einzelnen Prozessschritte getrennt voneinander betrachtet ohne Interaktionen zu berücksichtigen, weswegen Einsparpotentiale und Prozessvereinfachungen zu wenig genutzt werden können. Ziel des Projektes Epic ist die Reduzierung der Produktionskosten von Batterieelektroden durch eine Steigerung der Trocknungsgeschwindigkeit und eine Senkung der Energiekosten bei der Trocknung gegenüber dem aktuellen Stand der Technik. Erreicht wird dies durch die Verwendung innovativer Trocknungstechnologien und eine wissensbasierte Auslegung der Prozessführung bei der Trocknung, eine energetisch und qualitativ bestmöglich realisierte Nachrocknung und ein materialsystemspezifisch angepasstes Feuchtmanagement entlang der Prozesskette.

Als Ausgangspunkt zum Erreichen der Projektziele soll zunächst die Prozessführung der rein konvektiven Trocknung auf Basis eines systematischen Vorgehens energetisch und ökologisch optimiert werden. Darüber hinaus sollen alternative Trocknungsverfahren erforscht und in einen industriell skalierbaren Prozess überführt werden. Die bestmögliche Auslegung der Trocknung, der Nachrocknung und des Feuchtmanagements erfolgt aufbauend auf den Erkenntnissen aus Vorgängerprojekten anhand eines bewertenden Vergleichs unterschiedlicher Prozessrouten unter Berücksichtigung von anforderungsgerechten Qualitätsaspekten und Prozess-Struktur-Eigenschafts-Beziehungen. Darüber hinaus wird betrachtet, wie eine signifikante Minimierung der Kosten und Umweltbelastungen erreicht werden kann, indem der Energieaufwand für den Trockenraum minimiert wird. Dazu werden individuelle Prozess-Kosten-Modelle für die einzelnen Prozessschritte sowie das Gesamtfeuchtmanagement entwickelt und vergleichend bewertet.

**Ansprechpartner:**  
Tobias Krüger, M.Sc.

**Kontakt:**  
tobias.krueger@tu-braunschweig.de





Schematische Darstellung einer PVD-Anlage (Bild: Lars Schmidt)

## PräLi: Prälithiierung von Elektroden

### Über das Projekt:

Um die steigende Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien mit höheren Energiedichten abzudecken, werden Ansätze mit siliziumhaltigem Beschichtungsmaterial als vielversprechendes Aktivmaterial untersucht. Nachteilig an der Verwendung von Silizium ist, dass dieses zu einer reduzierten Lebensdauer, bedingt durch die große Volumenänderung während der Lade- und Entladephase, führt. Dies resultiert in einer erhöhten SEI-Bildung (solid electrolyte interface) und damit einhergehend zu einem höheren irreversiblen Verlust an Lithium. Um diesen Verlust an Lithium zu reduzieren und um den Gebrauch von Silizium nachhaltig zu gestalten, werden verschiedene Prozesstechnologien untersucht, mit der Zielsetzung die verfügbare Menge an Lithium in der Batterie zu erhöhen. Ziel des Projektes ist es, einen umfassenden, kontinuierlichen elektrochemischen Prozess für die Prälithiierung von Elektroden zu etablieren, wodurch der Verbrauch des Lithiums während der Zyklisierung der Zelle kompensiert wird. Vorteilhaft durch diese innovative Prozesstechnik wäre, dass Silizium in größeren Mengen beigemischt werden kann, woraus letztendlich sowohl eine höhere Energiedichte, als auch eine stabilere Lebensdauer resultiert. Innerhalb des Projektes werden verschiedene Prozesstechniken zur Prälithiierung von Elektroden evaluiert. Das ifs

befasst sich mit einem diskontinuierlichen Verfahren, bei welchem eine Dünnschicht- Prälithiierung mittels PVD (physical vapour deposition) als Opfer-Top-Coating auf der Elektrode aufgebracht wird. Dies fungiert dazu, ein Lithium-Reservoir zu generieren, auf welches während des ersten Lade- und Entladezyklus zurückgegriffen werden kann.

### Ansprechpartner:

Lars Oliver Schmidt, M. Sc.

### Kontakt:

lar.schmidt@tu-braunschweig.de

## ProfiStruk: Prozess- und Anlagenentwicklung zur prozessintegrierten Inline-Strukturierung von Lithium-Ionen-Elektroden

### Über das Projekt:

Die Lithium-Ionen-Batterie stellt die Schlüsselkomponente elektrischer Energiespeicher dar. Eine Verbesserung ihrer Eigenschaften, insbesondere die Schnellladefähigkeit sowie die Kapazität der Batterie, sind wichtige Aspekte für eine erhöhte Marktdurchdringung der Elektromobilität. Aus ökologischer und ökonomischer Sicht weisen „dicke“ Elektroden große Vorteile bezüglich der Speicherkapazität auf, da eine Steigerung der Energiedichte begünstigt wird. Allerdings wird hierbei die Schnellladefähigkeit der Batterie gehemmt. Diese Verschlechterung ist auf den Einfluss von kinetischen Verlusten, sogenannte Überspannungen zurückzuführen. Aus diesem Grund befasst sich das Projekt ProfiStruk aus dem ProZell-Cluster mit der Verfahrensentwicklung zur systematischen Strukturierung der Elektrode. Es wird nach technischen Möglichkeiten gesucht, um wirtschaftlich rentable Freiräume in der Elektrode zu schaffen, die als „Schnellwege“ für die Lithium-Ionen dienen und somit die kinetischen Verluste reduzieren.

Im Rahmen des Projektes wird die Laserstrukturierung als Standard-Technik-Prozess eingesetzt, weitere mechanische Verfahren basieren auf gezielten Druckluftstößen oder strukturierten Walzen.

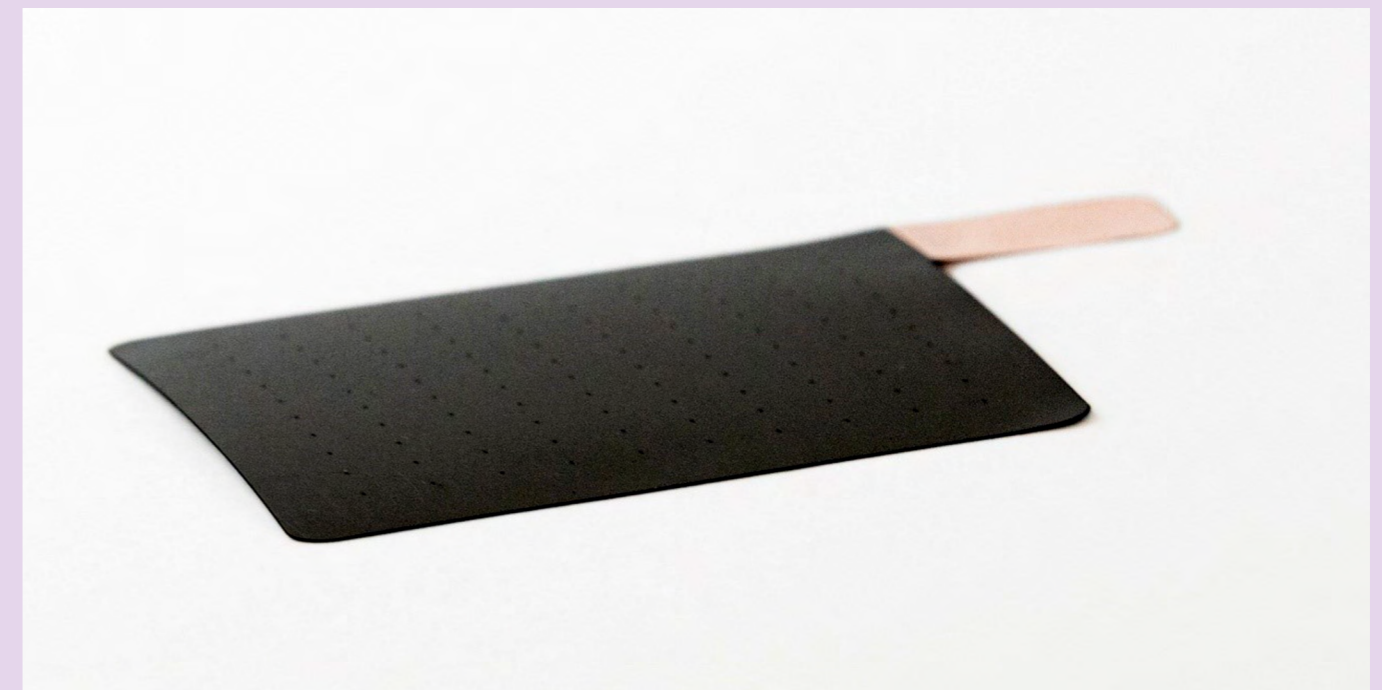
Ziel des ifs ist die Nachbildung von mechanisch erzeugten Strukturen mit Hilfe des Lasers als Referenzsystem, um den Einfluss der thermischen Wechselwirkung beim Laserstrukturieren im Vergleich zu mechanischen Verfahren („kalten Verfahren“) zu bewerten. Hierzu kommen verschiedene Methoden zur Oberflächencharakterisierung sowie elektrochemische Verfahren zum Einsatz.

### Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Kristian Lippky

### Kontakt:

k.lippky@tu-braunschweig.de



Eine durchgehend mithilfe des Lasers strukturierte Anode / Bildnachweis: Technische Universität Braunschweig



## Elektronenstrahlschweißen von Kupfer-Hairpins für die E-Mobilität

Die schnell wachsende Anzahl von Elektrofahrzeugen bringt eine zunehmende Nachfrage hinsichtlich der Kupferkontaktierung mit sich. Um den neuen technischen sowie wirtschaftlichen Anforderungen gerecht zu werden, ist die Weiterentwicklung unterschiedlicher Fügeverfahren von zentraler Bedeutung. Der Einsatz von Elektronenstrahl ermöglicht die flexible Gestaltung von Schweißprozessen, wodurch die filigranen, rechteckigen Kupferdrähte prozesssicher und mit einem hohen Automatisierungsgrad verbunden werden können.

Das Ziel, die Schadstoffemission zu reduzieren sowie die immer strengeren gesetzlichen Vorschriften im Hinblick auf den Flottenverbrauch zu erfüllen, hat die Automobilhersteller vor neue Herausforderungen gestellt. Dies ist zum einen mit der Weiterentwicklung bereits existierender Konstruktionen, zum anderen mit der Einführung neuartiger Konzepte zu erreichen. Hierbei bietet die Elektrifizierung des Antriebsstrangs eine auf der Hand liegende Lösung, mit der ein großer Schritt in Richtung der angestrebten klimaneutralen Mobilität gemacht werden kann. Grundlegend kann ein Antriebsstrang teil- oder vollelektrifiziert werden, allerdings verfügt er in allen Fällen über mindestens einen Elektromotor.

### Stand der Technik

Die Anforderungen der E-Mobilität, die an Elektromotoren gestellt werden, unterscheiden sich maßgeblich von denen, die an herkömmliche Industrieanwendungen gestellt werden. Konventionelle Anwendungen erfordern hierbei Elektromotoren, die in erster Linie eine extrem lange Haltbarkeit aufweisen. Der Bauraum und das Gewicht spielen hingegen eine untergeordnete Rolle. Demgegenüber liegt der Schwerpunkt bei Motoren für die Elektromobilität auf der Effizienz sowie der kompakten Bauweise. Außerdem soll die Konstruktion eine prozesssichere, rückverfolgbare und massentaugliche Fertigung ermöglichen. Aufgrund dessen haben

sich unterschiedliche Lösungen etabliert. Die sogenannte Hairpin-Wickeltechnik, bei der viereckige Kupferdrähte verwendet werden (siehe Abbildung 1), führt zur Erhöhung der Energiedichte im Stator und damit zur Effizienzsteigerung der Gesamtkonstruktion. Dabei ist eine besondere zu erfüllende Aufgabe das Verbinden von Hairpin-Drähten im Parallelstoß, so dass der elektrische Kreis geschlossen wird. Die Qualität von solchen Verbindungen wird von mehreren Faktoren gleichzeitig beeinflusst, wie es in Abbildung 2 verdeutlicht wird.

Bei dem Fügen von Hairpin-Drähten spielt neben den Vorbereitungsschritten die Schweißtechnologie eine entscheidende Rolle. Da sie nicht nur technischen, sondern auch wirtschaftlichen Anforderungen entsprechen soll, sind hierbei die Reproduzierbarkeit, die Effizienz sowie die möglichst kurzen Prozesszeiten die entscheidenden Faktoren. In Hinsicht auf die Schweißqualität stehen das porenarme Schweißgut, sowie ein möglichst spritzerarmer Schweißprozess im Vordergrund. Des Weiteren müssen die Nähte über einen Mindestanbindungsquerschnitt verfügen, um unerwünschte zusätzliche elektrische Widerstände und die daraus resultierende Wärmeentwicklung vermeiden zu können. Grundsätzlich kommen bei solchen Anwendungen zwei Kupfersorten in Frage: das sauerstofffreie Kupfer für elektrische Anwendungen (Cu-OFE), sowie das durch elektrolytische Raffination hergestellte Kupfer (Cu-ETP). Beim Schweißen genannter Werkstoffe bestehen allerdings Herausforderungen, die grundsätzlich auf die thermisch-elektrischen Eigenschaften des Kupfers zurückzuführen sind. Zum einen verfügen beide Legierungen über eine hohe thermische sowie elektrische Leitfähigkeit, was zur rapiden Abkühlung der Schmelzzone führt. In der Folge wird eine große Energiedichte benötigt, um den Werkstoff während des Prozesses in schmelzflüssiger Phase halten zu können. Zum anderen besitzt Kupfer einen hohen Wärmeausdehnungskoeffizient, aus dem sich großer Verzug ergibt. Daher ist eine entsprechende Schweißvorrichtung von essentieller Bedeutung. Das weitere Problem liegt in dem hohen Reflexionsgrad des Kupfers, der im Wellenlängenbereich des CO<sub>2</sub>-Lasers, aber auch der gängigen Festkörperlaserquellen (Yb:YAG und Nd:YAG), besonders ausgeprägt ist. Dies verhindert die schnelle Einkopplung des Laserstrahls ins Material und

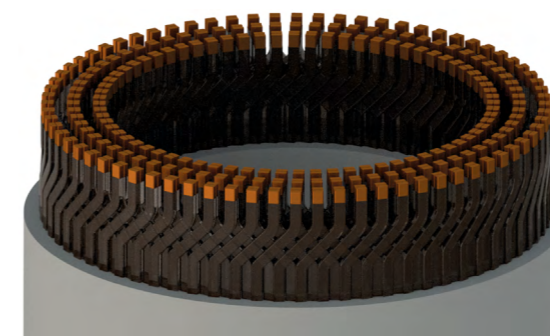


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines mit Hairpin-Wicklung versehenen Stators

dadurch die Realisierung eines schnellen und zeitgleich stabilen Schweißprozesses. Eine weitere Herausforderung besteht in der Porenbildung bei Erstarrung, da die Löslichkeit des Sauerstoffs mit sinkender Temperatur drastisch abnimmt. In Abhängigkeit des Restsauerstoffgehalts besitzen die verschiedenen Kupfersorten unterschiedliche Neigungen zur Porenbildung. Das Cu-OFE verfügt aufgrund des niedrigeren Restsauerstoffgehalts (max. 5 ppm) über eine gute Schweißbarkeit. Demgegenüber ist unter Anwendung von Cu-ETP (max. 400 ppm O<sub>2</sub>) mit einer ausgeprägten Porosität zu rechnen. Grund dafür ist das ursprünglich an den Korngrenzen vorliegende Kupferoxydul, welches beim Schweißen zerfällt. In Folge dessen wird die Schmelze mit Sauerstoff angereichert, was zur Porenbildung bei der Erstarrung führt. Obwohl alle technischen Argumente gegen die Anwendung von Cu-ETP sprechen, wird dieser Werkstoff, aufgrund der guten Leitfähigkeit sowie der geringen Kosten, häufig für elektrische Komponenten eingesetzt.

### Elektronenstrahlschweißen

Um die genannten Herausforderungen lösen zu können, kann das Elektronenstrahlschweißen als ein ideales Verfahren zum Fügen von Kupfer angesehen werden. Als Werkzeug werden hierbei hochbeschleunigte gebündelte Elektronen benutzt, die ihre kinetische Energie beim Auftreffen abgeben, so dass Wärme erzeugt wird. Der Elektronenstrahl zeichnet sich dadurch aus, dass der reflektierte Anteil der einfallenden Strahlung niedrig ist, wodurch auch reflektierende Materialien geschweißt werden können. Ferner besitzt er die Eigenschaft, mittels eines Magnetfelds abgelenkt und fokussiert werden zu können. Dies ermöglicht die hochfrequente Oszillation des Strahls, so dass die Schmelzbaddynamik günstig beeinflusst werden kann. Zum einen dient dies der gezielten Gestaltung der Nahtgeometrie, zum anderen begünstigt es auch die Entgasung, wodurch die Porenbildung reduziert werden kann. Ferner garantiert das technisch i.d.R. notwendige Vakuum die saubere Arbeitsatmosphäre und begünstigt ebenfalls die Entgasung. Der Anspruch an einen stabilen Schweißprozess macht die Kenntnis von Zusammenhängen zwischen Prozessparameter, Werkstoffqualität und Schweißergebnis erforderlich. Dies stellte das übergeordnete Ziel des diesem Bericht zugrundeliegenden

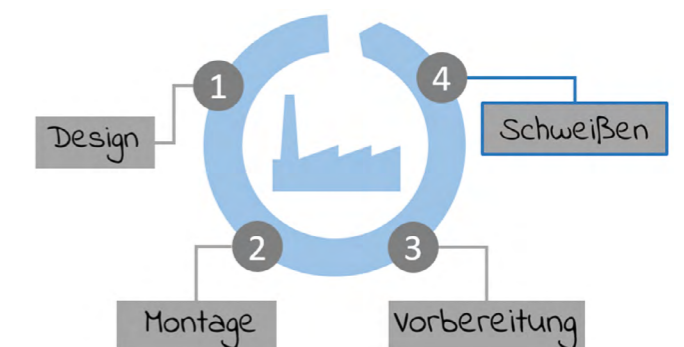


Abbildung 2: Die für die Verbindungsqualität entscheidenden Faktoren



Forschungsvorhabens dar. Die Schweißungen wurden mithilfe der am ifs vorhandenen pro-beam K26-3 Anlage realisiert. Im Rahmen der Untersuchungen wurden für beide Werkstoffe der Strahlstrom, die Strahloszillationsparameter sowie die Fokusslage variiert. Als Schweißstrategie wird hierbei die sogenannte mehrfache Überfahrt der Fuge verfolgt, wobei der oszillierte Strahl entlang der inneren Kante des Schweißstoßes eine alternierende Bewegung ausführt (vgl. Abbildung 3).

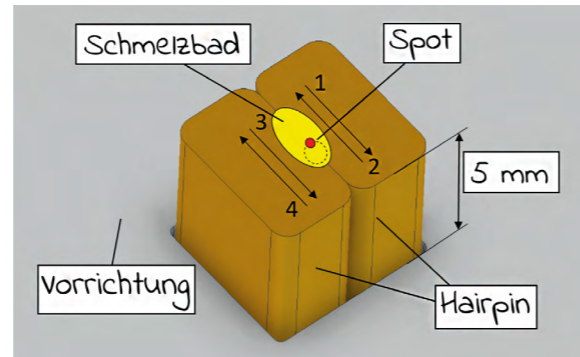


Abbildung 3: Schematische Darstellung der angewendeten Schweißstrategie

Um die Verbindungen in Hinblick auf ihre internen Unregelmäßigkeiten zu charakterisieren, wurden computertomographische Untersuchungen eingesetzt. Zusätzlich erfolgte ein Abgleich mittels metallographischer Prüfungen bei ausgewählten Proben. Die Vorgehensweise wurde in drei wesentliche Abschnitte unterteilt, wie es in Abbildung 4 dargestellt ist. Zuerst wurde der Einfluss von Strahloszillationsparametern mit besonderem Fokus auf die Po-

rosität sowie den Anbindungsquerschnitt ermittelt. Weiterführend erfolgte die gezielte Einstellung der Fokusslage unter Anwendung der zuvor ermittelten Strahloszillationsparameter. Im Anschluss war eine zusätzliche Parameteroptimierung notwendig.

Abbildung 4: Methodische Vorgehensweise der Parameterentwicklung

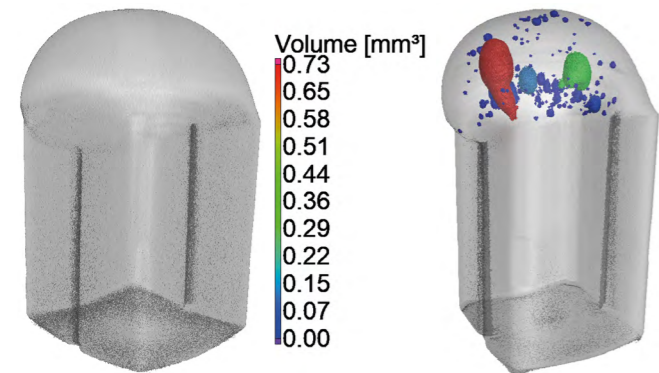


Abbildung 5: CT-Aufnahmen von mit einer ungeeigneten Strahloszillation geschweißten Cu-OFE (links) sowie Cu-ETP (rechts) Hairpins

**Ergebnisse**

Eingangs erfolgte die Auswertung der durch die Untersuchung der Strahloszillationsparameter erworbenen Daten. Hierbei lässt sich der Unterschied zwischen den Werkstoffen erkennen. Abbildung 5 zeigt zwei CT-Aufnahmen von Hairpin-Paaren, die mit einer gleichen Parameterkombination geschweißt wurden, aber über einen unterschiedlichen Restsauerstoffgehalt verfügen. Obwohl sich das Cu-OFE mit einem nicht optimalen Strahloszillationsparameter problemlos schweißen lässt, weist das Schweißgut im Fall von Cu-ETP eine erhöhte Porosität auf. Unter Anwendung verbesserter Strahloszillation lässt sich die Porenbildung beim Cu-ETP reduzieren, wie es in Abbildung 6 verdeutlicht wird. Abbildung 8 verdeutlicht die Verteilung der Porengröße bei den aus Cu-ETP realisierten Verbindungen.

Hierbei zeigt sich, dass eine höhere Oszillationsfrequenz (1000 Hz) unter Einsatz einer Kreisfigur mit einem Durchmesser von 0,4 mm vorteilhaft in Hinsicht auf die Porenbildung ist. Überdies hat sich gezeigt, dass zunehmende Strahlstromwerte ebenfalls in erhöhter Porosität resultieren. Die erwünschte Einschweißtiefe und somit der Anbindungsquerschnitt kann nicht nur mit dem Schweißstrom, sondern auch mit Fokussierung / Defokussierung eingestellt werden, sodass das geschmolzene Werkstoffvolumen nahezu unverändert bleibt. Um Wurzelporosität zu vermeiden, wird i.d.R. eine Überfokussierung angewendet. Dabei wurden im Rahmen der Forschung drei Stufen untersucht: 5 mm, 10 mm sowie 15 mm. Mithilfe der Strahlvermessung wurde die Energie-

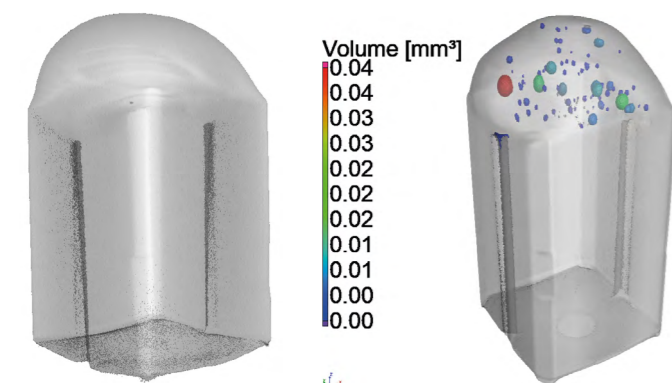


Abbildung 6: CT-Aufnahmen von mit einer geeigneten Strahloszillation geschweißten Cu-OFE (links) sowie Cu-ETP (rechts) Hairpins

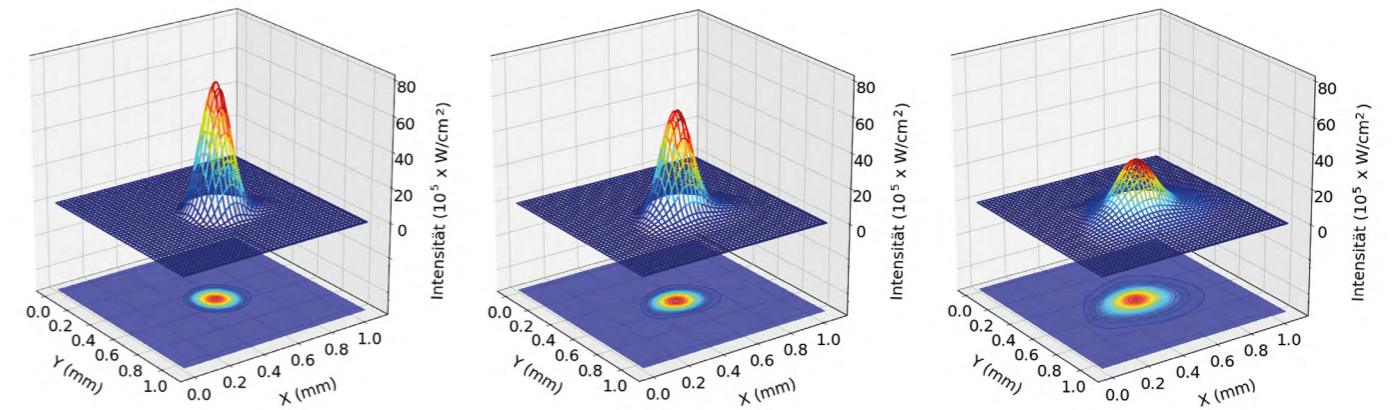


Abbildung 7: Mittels Strahlvermessung erworbene Energieverteilungen bei 5 mm (links), 10 mm (mittig) und 15 mm (rechts) Überfokussierung

verteilung bei den jeweiligen Fokusslagen bestimmt und dreidimensional dargestellt (vgl. Abbildung 7). Wie zu erkennen ist, führt die Erhöhung der Defokussierung zu einer abnehmenden Spitzenintensität und dadurch, mit unveränderter Leistung, zu einem wesentlich größeren Spotdurchmesser. Es hat sich gezeigt, dass eine zunehmende Defokussierung zu reduzierter Porosität führt, da eine breitere und flachere Naht entsteht, was die Entgasung fördert. Dies führte aber zur Abnahme der Einschweißtiefe, wodurch der erwünschte Nahtquerschnitt nicht zu gewährleisten ist. Hierbei weist die Überfokussierung i.H.v. 10 mm einen guten Kompromiss auf, da so sowohl eine vergleichsweise geringe Porosität, als auch ein ausreichender Anbindungsquerschnitt zu erreichen sind.

Im letzten Schritt erfolgte eine kleine Parameteranpassung, nach der 3 Cu-OFE und 5 Cu-ETP Hairpin-Paare geschweißt wurden. Es ist in der Abbildung 8 zu erkennen, dass der Restsauerstoffgehalt, trotz der erfolgreichen Parameteroptimierung, der entscheidende Faktor für die Schweißnahtqualität ist. Enthält der Grundwerkstoff keinen oder nur eine begrenzte Menge Sauerstoff, können Schweißungen praktisch ohne Porosität hergestellt werden. Im Fall von Cu-ETP kann mit angepasster Technologie eine porenarme Naht erzielt werden.

Abbildung 9 verdeutlicht die Verteilung der Porengröße bei den aus Cu-ETP realisierten Verbindungen. Dabei ist zu beobachten, dass die Mehrheit der Poren ein Volumen zwischen  $0,05 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$  und  $0,05 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$  hat. Außerdem weisen sie im Schweißgut eine gleichmäßige Verteilung auf.

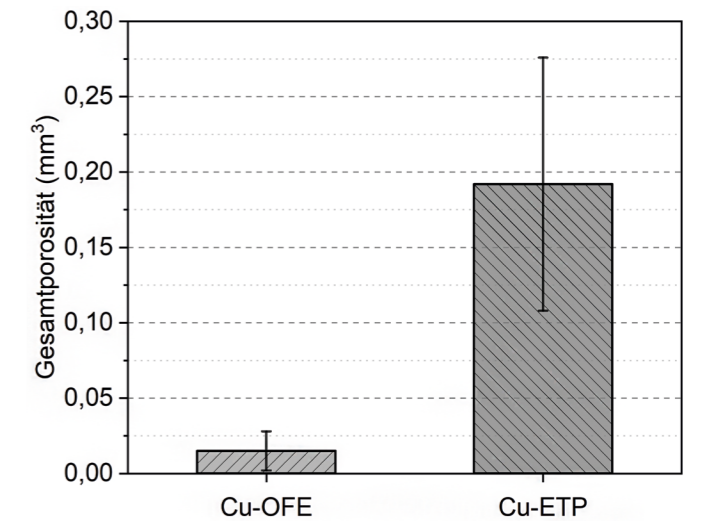


Abbildung 8: Vergleich zur Gesamtporosität bei den mit dem finalen Parametersatz durchgeführten Cu-OFE sowie Cu-ETP Schweißungen

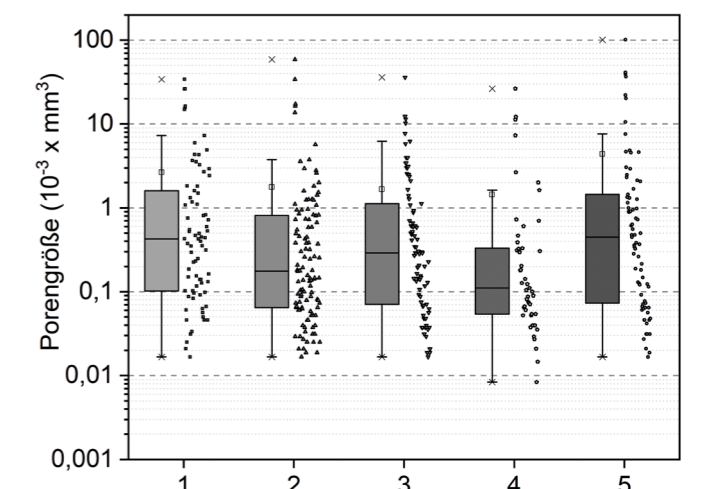


Abbildung 9: Verteilung der Porengrößen im Fall der mit dem finalen Parametersatz durchgeführten Cu-ETP Schweißungen



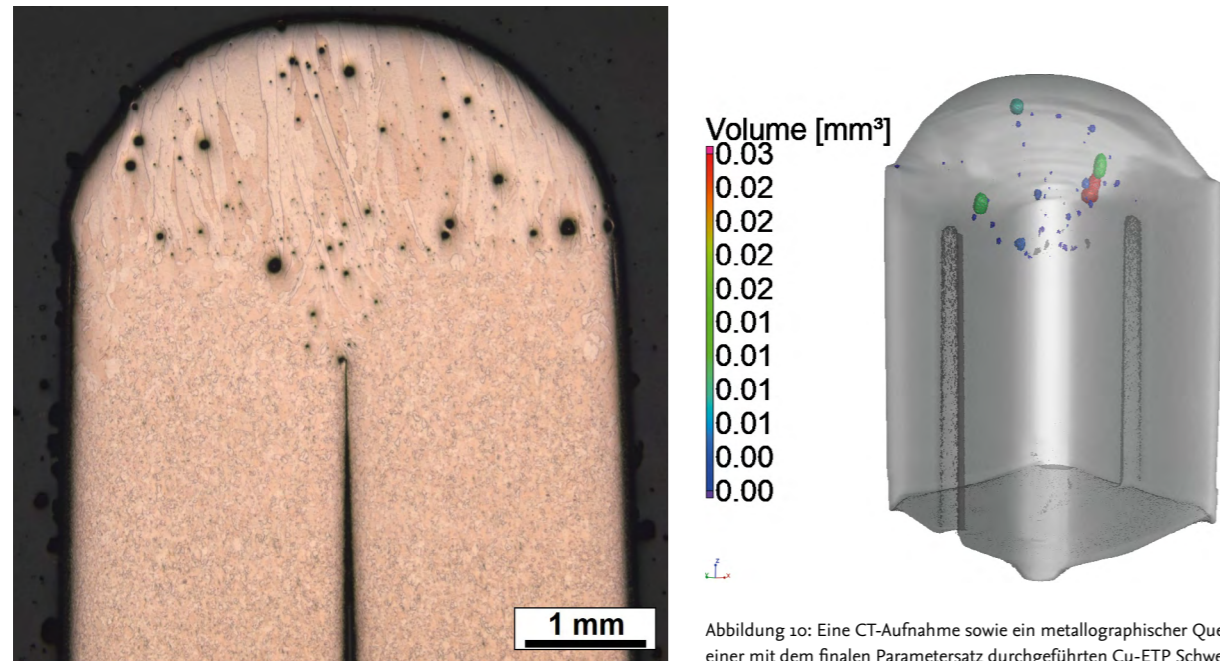


Abbildung 10: Eine CT-Aufnahme sowie ein metallographischer Querschliff von einer mit dem finalen Parametersatz durchgeführten Cu-ETP Schweißung

#### Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden wertvolle Ergebnisse über die schweißtechnische Kontaktierung von Kupferlegierungen erarbeitet. Die Qualität der Verbindungen wird in erster Linie durch den Restsauerstoffgehalt beeinflusst. Daher empfiehlt sich eine entsprechende Materialauswahl. Auf diese Weise kann ein hervorragendes Schweißergebnis mit einem breiten Spektrum von Schweißparametern unter Einhaltung wirtschaftlicher Anforderungen erzielt werden. Im Hinblick auf die Prozesszeiten, kann in der Zukunft die Mehrstrahltechnik als zielführend betrachtet werden, mit der mehrere Hairpin-Paare zeitgleich geschweißt werden können. Dabei ist zu beobachten, dass die Mehrheit der Poren ein Volumen zwischen  $0,05 \times 10^{-3}$  mm und  $0,05 \times 10^{-3}$  mm hat. Außerdem weisen sie im Schweißgut eine gleichmäßige Verteilung auf.

Link zur Veröffentlichung



#### Danksagung

Das Vorhaben wurde durch die Dobeneck-Technologie-Stiftung gefördert.

#### Autor:

Tamás Tóth, M.Sc.  
Dr.-Ing. Jonas Hensel

#### Kontakt:

t.toth@tu-braunschweig.de  
j.hensel@tu-braunschweig.de



Bildnachweis: OHLF/Technische Universität Braunschweig

## OrganoFalz – Auf dem Weg zum neuen Fügeverfahren

Mit der Abteilung Werkstoffverbunde und Grenzschichten ist das Institut für Füge- und Schweißtechnik vollständig in der Infrastruktur der Open Hybrid LabFactory in Wolfsburg integriert.

Falzen ist ein wichtiges Fügeverfahren im Automobilbau, ohne das der moderne Karosseriebau nicht möglich wäre. Hier verbindet es z.B. unter Einsatz von Klebstoff das Innenblech mit dem Außenblech einer Karosserie. Für den hybriden Leichtbau forschen Wissenschaftler\*innen am Institut für Füge- und Schweißtechnik jetzt an einem neuen Fügeverfahren. Im Forschungsprojekt „OrganoFalz“ soll anstelle des Innenblechs ein sog. Organoblech, ein thermoplastischer Kunststoff, der mit einem Glasfasergewebe verstärkt ist, eingesetzt und während des Falzprozesses direkt an das Außenblech gefügt werden. Damit könnte ein Hybridbauteil mit

verbesserten Eigenschaften entstehen, das auf den Klebstoff im Falz verzichtet. Im Projekt wird zudem untersucht, welche Vorteile dieser Verzicht hinsichtlich Produktion, Gewicht und mechanischem Verhalten des gefügten Bauteils bietet.

Das gemeinsam mit Industriepartnern, u.a. Volkswagen, Tata Steel, Bond Laminates und Karl Mayer auf zwei Jahre angelegte Projekt startete am 01.06.2020, anfinanziert durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF).

#### Autor:

Lukas Kaempfer, M.Sc.

#### Kontakt:

ifs@tu-braunschweig.de





## ACTion

Advanced Shaped Sandwich Composites for Mechanical, Thermal and Acoustic Applications (ACTion) - Entwicklung einer Schäumtechnologie für hohe Stückzahlen sowie eines Designwerkzeugs für funktional integrierte Sandwichstrukturen.

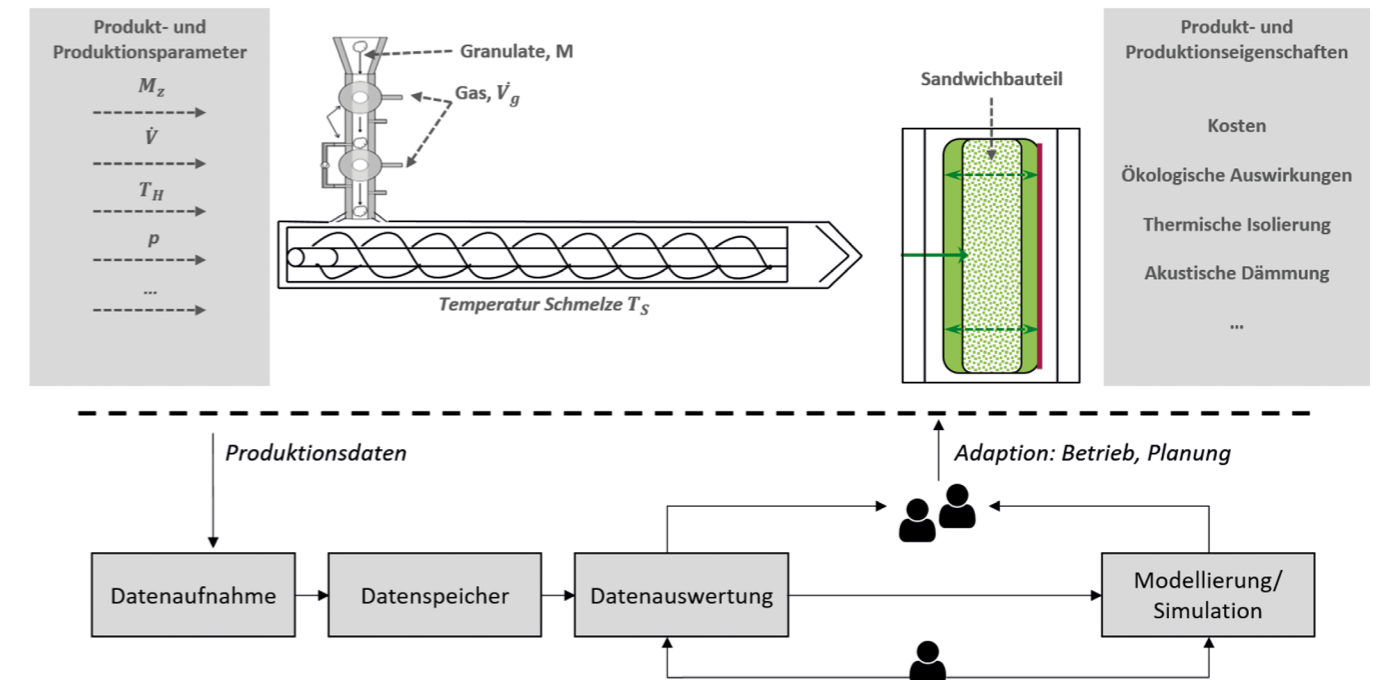
Die Einführung multifunktionaler Leichtbaustrukturen ist eine wichtige Effizienzstrategie in der Automobilindustrie. Eine Reduzierung des Fahrzeuggewichts ermöglicht die Verringerung der Treibhausgasemissionen im Fahrzeug und dient somit als Strategie zur Erreichung gesetzgeberischer Effizienzziele. Im Falle von elektrisch betriebenen Fahrzeugen stellt die Kompensation des Mehrgewichts der Batterien einen weiteren Vorteil dar. Daher ist der Ansatz in diesem Projekt die Prozessgestaltung der Produktion für hohe Stückzahlen von fortschrittlich geformten Sandwich-Verbundwerkstoffen für mechanische, thermische und akustische Anwendungen.

**Sandwichstrukturen** bieten ein hohes Potenzial zur Gewichtsreduktion bei gleichzeitiger Integration zusätzlicher Funktionen, z.B. im Bereich des thermischen oder akustischen Managements. Dies wird besonders bei Betrachtung des Wandels in der Automobilindustrie in Richtung Elektromobilität wichtig. Sandwichstrukturen werden bereits in großem Umfang eingesetzt, insbesondere in der

Luft- und Raumfahrtindustrie. Allerdings haben die heutigen Strukturen verschiedene Nachteile, wie z.B. Einschränkungen in der Formgebung oder sie sind nur durch arbeitsintensive Fertigungsprozesse anwendbar. Eine Umsetzung in großtechnische Produktionsprozesse findet daher nicht statt. Es müssen demnach innovative Fertigungsverfahren entwickelt werden, die das Potenzial zur wirtschaftlichen Herstellung komplexer, funktional integrierter Sandwichstrukturen aufweisen.

**Im Projekt** wird das von der Volkswagen AG patentierte, modifizierte Spritzgießverfahren KU-FIZZ mit einer aktuellen TRL von 3-4 unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen an die Großserienfertigung in der Automobilindustrie in Richtung eines höheren TRL-Niveaus untersucht. Das Verfahren verwendet eine speziell konstruierte Anlage zur Beaufschlagung des Polymers mit einem Gas unter hohem Druck. Der Prozess der Zellbildung und des Zellwachstums ist äußerst komplex. Um den Schäumprozess für die Großserienfertigung zu qualifizieren und eine Optimierung für mechanische, thermische und akustische Anwendungen abzubilden sind detaillierte experimentelle und numerische Untersuchungen erforderlich. Deshalb werden zwei Spritzgussmaschinen für die Prozessuntersuchung umgebaut, eine zur Herstellung von Laborprobekörpern sowie eine für einen generischen Demonstrator.

Die mechanische, thermische und akustische Leistungsfähigkeit wird auf der Basis experimenteller Daten sowie numerischer



Prozessanalyse im Projekt ACTion // Bildnachweis: Volkswagen AG

Optimierung charakterisiert, während ein datengetriebener Ansatz verfolgt wird, um die Parameter des Herstellungsprozesses zu überwachen und mit den Produkteigenschaften zu verknüpfen. Darüber hinaus wird ein Designwerkzeug für Planung, Konstruktion und Bewertung entwickelt und seine Übertragbarkeit auf andere Anwendungsbereiche, insbesondere auf die Luft- und Raumfahrtindustrie, geprüft.

**Das singapurische Partnerprojekt** konzentriert sich auf den Entwurf und die Herstellung von Freiform-Gitterkernen für Sandwichstrukturen für die Luft- und Raumfahrtindustrie. Damit liefert das Projekt wichtige Erkenntnisse und Daten zur Aufstellung eines übergreifenden Life-Cycle Tools zur Bewertung von Sandwichstrukturen für die Automobil- und Luftfahrtindustrie.

Die Projektergebnisse leisten einen wesentlichen Beitrag zur Etablierung einer kosteneffizienten Methode zur großserienfähigen Produktion von fortschrittlich geformten sandwichbasierten Leichtbaustrukturen. Das vorgeschlagene Verfahren und die betrachteten Varianten innerhalb der für die industrielle Anwendung entwickelten Prozesse ermöglichen eine Gewichtsreduktion von bis zu 20% gegenüber konventionellen Vorgehensweisen. Dies bietet die Möglichkeit, das Gewicht von Bauteilen zu reduzieren.

Das Verfahren zur Herstellung des Demonstrators wird in die technische Infrastruktur der Open Hybrid LabFactory (OHLF) integriert und bietet damit ein hohes Potenzial für die weitere technologische Entwicklung und Nutzung in weiteren Forschungsaktivitäten.

Durch die Partnerstruktur innerhalb des OHLF e.V. und des Partnerclusters in Singapur können sich auch nach Fertigstellung weitere nationale oder internationale Partner an der Fortführung der Technologieentwicklung für Sandwichstrukturen beteiligen. Die entwickelten Endeffektoren und Werkzeuge werden nach Abschluss des Projektes von einzelnen Partnern oder in weiterer Zusammenarbeit weiterentwickelt.

### Projektinformationen

Bundesministerium für Bildung und Forschung

■ Förderungsdauer: 01.01.2020 - 31.12.2022

■ Förderkennzeichen: 03INT711AA

### Projektpartner

■ TU Braunschweig (ifs, IWF, InA)

■ ElringKlinger AG

■ INVENT GmbH

■ iPoint-systems GmbH

■ National University of Singapore

■ Singapore Institute of Manufacturing Technology (SIMTech)

### Autor:

Dipl.-Ing. Markus Mannig

### Kontakt:

m.mannig@tu-braunschweig.de





## Vor-Ort-Besuch in Japan im Rahmen der Internationalisierungsinitiative

Vom 08. bis 15. Dezember 2019 reiste eine Delegation des Instituts für Füge- und Schweißtechnik der Technischen Universität Braunschweig bestehend aus Prof. Dr. rer. nat. Sven Hartwig, Dr.-Ing. Kristian Lippky sowie Christian Gundlach, M. Sc., in die japanische Hauptstadt Tokio. Das Knüpfen neuer internationaler Kontakte im Bereich der Materialherstellung und der Fügetechnik sowie das Kennenlernen der dortigen Kultur bildeten den Rahmen der Reise.

Der Großraum Tokio/Yokohama stellt gemessen an der Einwohnerzahl die größte Metropolregion der Welt dar und bildet damit einen hochentwickelten Wirtschaftsraum, der große Chancen zur Anwendung innovativer Technologien bietet. Der Fokus der Reise lag auf dem Kennenlernen japanischer Unternehmen sowie Forschungseinrichtungen im Bereich der Materialherstellung und der Fügetechnik, wodurch zukünftig gemeinsame Forschungsprojekte initiiert und der Austausch von Forschenden ermöglicht werden sollen. Die ersten Ziele der Reise waren zwei öffentliche Forschungseinrichtungen. Am Tokyo Institute of Technology fand ein Austausch mit Prof. Chiaki Sato statt, der über das Interesse

japanischer Unternehmen an einer Forschungszusammenarbeit mit Deutschland und deren Rahmenbedingungen informierte. Am National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), einer der größten öffentlichen Forschungseinrichtungen Japans, gab es eine Führung durch die Labore am Standort Tsukuba. Weiterhin standen Treffen mit Industrieunternehmen auf der Agenda. Vor-Ort-Termine beim Unternehmen Challenge, das sich als Tochterunternehmen der Mitsubishi Chemicals Group auf die Entwicklung und Herstellung von CFK-Bauteilen für automobilen Kleinserien und Motorsportanwendungen spezialisiert hat,



sowie im Hauptsitz des internationalen Chemiekonzerns Mitsui Chemicals zeigten deren Innovationskraft auf dem Gebiet des Leichtbaus.

Neben den geschäftlichen Terminen blieb auch noch genug Zeit, um die Weltmetropole Tokio auf eigene Faust zu erkunden. Die Geschäftspartner standen dabei hilfreich zur Seite und hatten den ein oder anderen Geheimtipp parat, der bei der Flut an - für den Europäer - kryptischen Schriftzeichen und der schieren Größe der Stadt auch mehr als nötig war. Vom zweithöchsten Bauwerk der Welt, dem Tokyo Skytree, war es von der Aussichtsplattform in 450 Metern Höhe nicht möglich, die Grenzen der Metropolregion zu erahnen. An jeder Ecke gab es köstliche einheimische Spezialitäten, wobei man wegen der Schriftzeichen-Problematik nicht immer genau wusste, was man da gerade eigentlich aß. Kneipen nach bayerischem Vorbild und sogar ein Weihnachtsmarkt ließen ein wenig Heimatgefühl aufkommen. Gegensätze in der Architektur sind an der Tagesordnung. Prachtvolle historische Tempelanlagen stehen umringt von ultramodernen Gebäudekomplexen. Und

nach Einbruch der Dunkelheit vollzieht Tokio eine 180° Wende von größtmöglicher Seriosität hin zu einer schrillen, lauten und vor allem bunten Metropole.

In den kommenden Jahren soll Stück für Stück eine enge Partnerschaft zwischen dem Institut für Füge- und Schweißtechnik der Technischen Universität Braunschweig und dem Industriestandort Japan aufgebaut werden, die Forschern beider Nationen den vereinfachten interkulturellen Wissensaustausch ermöglicht und den innovativen Leichtbau fördert. Die Technische Universität Braunschweig ist Vollmitglied in der Open Hybrid LabFactory. Die Reise fand im Rahmen der Internationalisierungsinitiative statt und wurde aus Mitteln der Exzellenzuniversität finanziert.

**Autor:**  
Christian Gundlach, M.Sc.

**Kontakt:**  
c.gundlach@tu-braunschweig.de



# Arbeiten am Institut in Zeiten von SARS-CoV-2

...Corona ändert einiges.



Sah man sich noch vor März 2020 mit Maske und Sonnenbrille bekleidet beim Betreten eines Geschäftes zurecht dem Vorwurf ausgesetzt, eine unrechtmäßige Entnahme von Barmitteln und/oder Waren zu beabsichtigen, so wurde dies im Laufe der COVID19-Pandemie zu einem vorgesehenen und notwendigen Schutz, der keine weitere Aufmerksamkeit mehr nach sich zieht. Bedingt durch die mit der COVID19-Pandemie verbundenen Präventionsmaßnahmen änderten sich natürlich auch bei uns am Institut zahlreiche Arbeitsabläufe aber auch liebgegewonnene Gewohnheiten.

Wie auch viele andere Unternehmen und öffentliche Einrichtungen gingen wir dazu über, die Besprechungen in den virtuellen Raum zu verlagern. Durch unsere bereits bestehenden Netzwerke und Kontakte führte dies in den meisten Fällen zu einem nahtlosen Übergang in Bezug auf die Kommunikation mit unseren Studierenden und Partnern aus Forschung und Industrie. Hier haben wir schnell auch damit verbundene Vorteile zu schätzen gelernt, wie z. B. kurzfristig(er) ansetzbare Besprechungen mit einer hohen Teilnahmequote, eine höhere Arbeitseffizienz durch den Wegfall der Reisezeit bei Dienstreisen aber auch eine höhere Flexibilität bei der Arbeitsplatzwahl.

Auf der anderen Seite lebt unser Institut natürlich auch von einem Miteinander. War es vorher üblich, gemeinsam Geburtstage, erfolgreiche Promotionsprüfungen aber auch Verabschiedungen zu würdigen und zu feiern, so musste dies durch COVID19 notwendigerweise auch in die virtuelle Welt verlagert werden. So zeigt die mittlere Abbildung links (rechte Seite) den Abschied von unserem Mitarbeiter Lukas Kaempff, der unter Wahrung der zu dem Zeitpunkt geltenden Abstandsregeln und Teilnahmebeschränkungen durch ein Webmeeting via BigBlueButton verabschiedet wurde. Wir alle hätten uns bei ihm und auch vielen anderen Mitarbeitenden einen persönlicheren Abschied gewünscht. So wurde uns zumindest aber eine Verabschiedung und Würdigung der Kolleginnen und Kollegen ermöglicht, bei der auch die Mitarbeitenden am ifs in Braunschweig, an der OHLF in Wolfsburg sowie die sich im Homeoffice befindenden Kolleginnen und Kollegen eingebunden werden konnten.

Wie auch sicherlich viele von Ihnen freuen wir uns natürlich wieder auf ein gemeinsames Miteinander. Sowohl im Rahmen unserer betrieblichen Abläufe als auch im Rahmen von feierlichen Anlässen. Idealerweise haben wir am Ende dieser Pandemie diese als



Abbildungen oben (rechte Seite): Die "normale" Zeit bevor die Pandemie ausgebrochen ist  
 Abbildungen linke Seite: Unsere Mitarbeiter haltens im neuen Erscheinungsbild  
 Abbildung Mitte links (rechte Seite): Die digitale Verabschiedung von Lukas Kaempff  
 Abbildungen Mitte rechts und unten (rechte Seite): Begegnungen finden derzeit nur noch unter strengen Hygieneregeln statt



Chance für Veränderungen und Verbesserungen genutzt. Auf der einen Seite durch eine wiedergewonnene Wertschätzung von persönlichen Kontakten und einem gemeinsamen Miteinander. Auf der anderen Seite aber auch durch rationalere Arbeitsabläufe, beispielsweise durch die Reduktion von Dienstreisen und einer besseren IT-Einbindung bei dem Ergebnisaustausch mit Projektpartnern sowie einer höheren Flexibilität in der Arbeitsgestaltung. Nutzen wir diese Chance.

**Autor:**  
 Dr.-Ing. Sebastian Müller







Bildnachweis: 2018/OHLF e.V.

## Laborarbeit im Livestream

Das besondere Sommersemester 2020: Am Institut für Füge- und Schweißtechnik ersetzen Livestream und Videokonferenz die Laborarbeit der Studierenden vor Ort.

Mit dem Übergang der TU in den Notbetrieb Ende März 2020 war abzusehen, dass Lehre im Sommersemester 2020 weitgehend digital stattfinden würde. Eine neue Erfahrung für uns alle. Bereits vor Corona hatten wir am Institut für Füge- und Schweißtechnik erste Erfahrungen mit der Aufzeichnung und Digitalisierung einzelner Vorlesungen gesammelt. Studierende konnten diese zur Nachbereitung im Stud.IP nutzen. Doch wie sollten Labore, die eine aktive und unmittelbare Beteiligung einer größeren Anzahl von Studierenden voraussetzen, angeboten werden?

Mit dem Wechsel in den eingeschränkten Betrieb Ende Mai erhielten wir wieder die Möglichkeit, Laborveranstaltungen in Präsenz anzubieten. Doch der geltende Hygieneplan, die Anzahl der angemeldeten Studierenden und die Größe der verfügbaren Räumlichkeiten verlangten am Ende nach einem Plan B. Die Lösung heißt für uns daher in diesem Sommersemester: Livestream.

Alle Termine finden über das Webkonferenz-System BigBlueButton statt. Dieses Format ermöglichte gleichzeitig eine Anwesenheitskontrolle. Die Laborinhalte mussten nicht maßgeblich

verändert werden. Dank der mobilen Aufzeichnungstechnik können die praktischen Versuche an der Prüfmaschine abgefilmt werden. Die verkleinerte Gruppengröße ermöglicht ein gutes Betreuungsverhältnis und hilft, individuelle Fragen schnell zu klären.

Die Evaluation der teilnehmenden Studierenden und beteiligten Mitarbeiter\*innen im Nachgang wird zeigen, wie sich die Umstellungen auf die Wahrnehmung des Labors ausgewirkt hat. Ein Dank geht insbesondere an die Projektgruppe Lehre und Medienbildung der TU, die mit zahlreichen Webinaren und digitalen Workshops zum Thema „Online- und ortsunabhängige Lehre“ wichtige Impulse lieferte.

**Autor:**  
Christian Gundlach, M.Sc.

**Kontakt:**  
c.gundlach@tu-braunschweig.de

## Neuzugänge 2020



**Muhammad Anas Athar** ist seit Februar bei der Gruppe Werkstoffverbunde und Grenzschichten mit im Team. Sein Studium hat er in Pakistan und Braunschweig im Studiengang Computational Sciences in Engineering (CSE) mit Schwerpunkt Materialwissenschaften abgeschlossen.



Nach seinem erfolgreichen Studium im Maschinenbau mit Schwerpunkt Produktions- und Systemtechnik an der TU Braunschweig hat **Dan Belke** in der Abteilung Werkstoffverbunde und Grenzschichten im Mai als wissenschaftlicher Mitarbeiter angefangen.



Seit Juli bereichert der Industriemechaniker **Lukas Marx** unser Institut. Damit steht uns nun ein tatkräftiger Kollege für Wartung und Instandhaltung sowie zur Unterstützung der Werkstatt zur Verfügung.



**Slava Pachandrin** ist seit Mitte August 2020 am ifs tätig. Sein Maschinenbaustudium hat er an der Leibniz Universität in Hannover absolviert. Er verstärkt die Abteilung Leichtmetall-Druckguss und bearbeitet das Vorhaben "Zukunftslabor Produktion."



**Tobias Krüger** unterstützt seit Dezember die Gruppe Faserverbund- und Elektromobilität. An der TU Braunschweig studierte er Maschinenbau und war zuvor als wissenschaftliche Hilfskraft tätig.



Seit dem 1. November dürfen wir **Petra Simon** im Sekretariat begrüßen. Sie übernimmt die Aufgaben von Susanne Sommer.



# Dokortitel

## im Jahr 2020

Am 10.07.2020 hat unser Mitarbeiter Changfeng Fan unter dem Vorsitz von Prof. Sven Hartwig die mündliche Prüfung im Rahmen seiner Dissertation mit dem Titel "Corrosion behaviour of oxidised stainless steel and polymer-coated steel studied by electrochemical impedance spectroscopy" absolviert.

Die Arbeit von Herrn Fan wurde dabei durch das China Scholarship Council und die DFG gefördert und wurde durch die Gutachter Prof. Klaus Dilger sowie Prof. Uwe Schröder (Institut für Ökologische und Nachhaltige Chemie der TU Braunschweig) befürwortet. Dazu gratulieren wir Herrn Dr. Fan herzlich! Neu für uns war, dass infolge der COVID19-Pandemie der öffentliche Teil der Prüfung nur virtuell erfolgen konnte. Aber auch diese Herausforderung wurde gut gemeistert. Leider konnten wir nicht - wie sonst üblich - gemeinsam mit Herrn Dr. Fan direkt nach seiner mündlichen Prüfung die erlangte Doktorwürde feiern. Herr Dr. Fan hat uns jedoch im Anschluss an seine mündliche Prüfung ein sehr üppiges Buffet mit vielen Spezialitäten organisiert, von dem wir dann zehren durften. Dafür möchten wir uns noch einmal herzlich bedanken! Dr. Fan verlässt uns nach seiner Promotion und wird in China einer weiteren wissenschaftlichen Tätigkeit nachgehen. Wir wünschen ihm dafür alles Gute!

**Autor:**  
Dr.-Ing. Sebastian Müller



# Anerkennungen

Wir gratulieren herzlichst Dr. Helge Pries! Frau Pries wurde von Herrn Dr. Mittelstädt mit der goldenen DVS-Ehrendnadel ausgezeichnet, welche durch die Landes- und Bezirksverbände an Mitglieder vergeben wird, die sich um den Verband und um die Technik verdient gemacht haben.

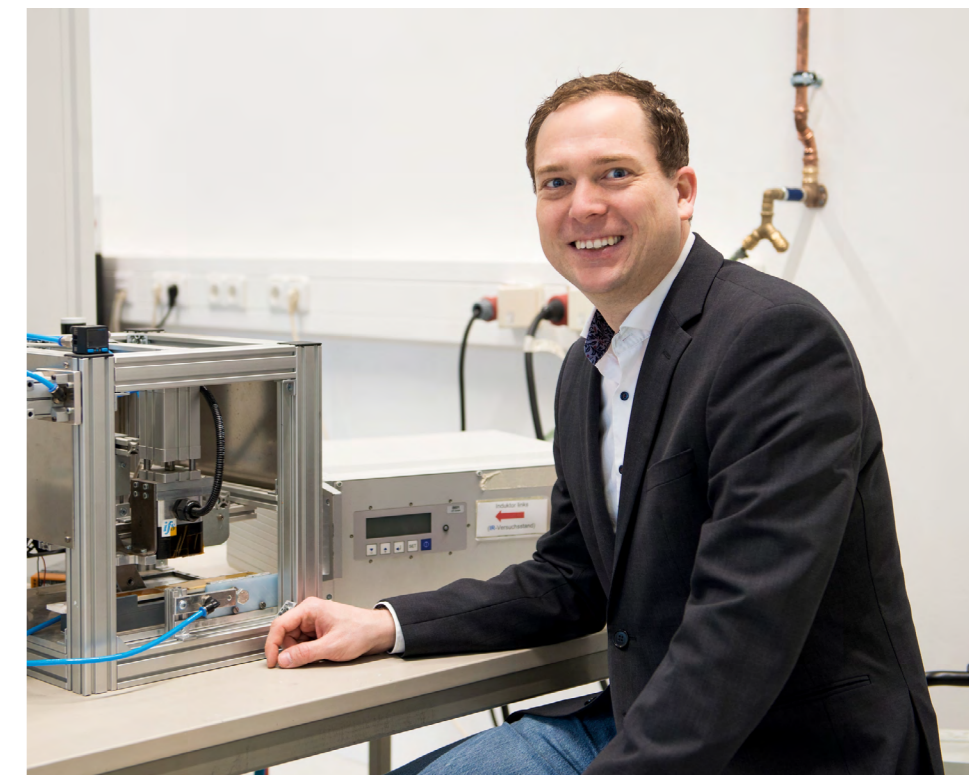
Zudem gratulieren wir ebenso herzlichst Dr. Kristian Lippky zu seiner Auszeichnung mit dem EFB-Projektpreis für das am besten bewertete EFB-Forschungsprojekt des vorangegangenen Jahres. Der EFB-Projektpreis richtet sich dabei an junge Wissenschaftler, die ein entsprechendes EFB-Projekt im Technologiefeld der Blechverarbeitung sowohl wissenschaftlich als auch projekttechnisch in herausragender Weise bearbeitet und abgeschlos-

sen haben. Das Projekt mit dem Namen „Umformthermofügen von Metall & FVK mit isothermen Werkzeugen (IGF-Nr. 19560N/2)“ wurde in Zusammenarbeit mit dem IFUM in Hannover realisiert und bearbeitet. Infolgedessen wurde neben Dr. Kristian Lippky, der für die wesentliche wissenschaftliche Mitarbeit innerhalb des Projektes ausgezeichnet wurde, auch Herr Dipl.-Ing. Moritz Micke vom Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen der Leibniz Universität Hannover mit diesem Preis geehrt. Die Laufzeit des Projektes war vom 01.08.2017 – 31.10.2019.


**Autorin:**  
Janina Willhöft, B.A.



Dr. Helge Pries erhält die Ehrendnadel



Dr. Kristian Lippky ist Gewinner des "EFB-Projektpreises."



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: [jfs@tu-braunschweig.de](mailto:jfs@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: S. Müller  
Grafik: C. Milizia

