



*report*

10. Jahrgang | Ausgabe 2015

# INHALT

## Battery LabFactory Braunschweig (BLB)

Forschungseinrichtung für die Batterieproduktion eingeweiht .....	4
Laserschneiden von Batteriefolien .....	30
Reaktive Binder für innovative Lithium-Ionen-Batterien .....	34

## Faser- und Werkstoffverbunde

Quasistatische Prüfung von gefügten Sandwichstrukturen .....	38
--	----

## Festigkeit und Bauteilverhalten

Abschätzung und Bewertung von Eigenspannungen in Stahlgroßstrukturen .....	14
--	----

## Kleben und mechanisches Fügen

Kleben von Sensorik an Fundamenten von Offshore-Windkraftanlagen .....	6
Haftklebstoffproduktion mittels UV-LED-Technologie .....	17
Verkürzte Alterungsanalysen von Klebstoffen durch thermooxidative Messmethoden ...	24
Neues volumetrisches Messverfahren zur Messung von Dehnungen in Klebstoffen .....	41

## Leichtmetallzentrum Soltau (LMZS)

Anwendungsnahe Forschung für den Aluminium-Druckguss .....	27
--	----

## Open Hybrid Labfactory (OHLF)

Wissenschaft und Wirtschaft auf Augenhöhe .....	10
---	----

## Strahltechnik

Innovative Pulverdosisierung zur Erstellung selektiver Korrosionsschutzschichten auf Laserstrahlschweißnähten .....	20
---	----

## Veranstaltungen

2. Forum Fügetechnik .....	43
36. Assistentenseminar Füge- und Schweißtechnik .....	44
NFF-Fussball-Cup »Mobilität ist rund«! .....	45

## Auszeichnungen

8 neue Dokortitel .....	46
Fachkonferenz AB2015 Porto – Bester Vortrag – Bestes Poster .....	48
LehrLEO – Studentischer Lehrpreis an der TU Braunschweig .....	50

Neuzugänge .....	51
------------------	----

# EDITORIAL



Liebe Leserin, lieber Leser,

die diesjährige Ausgabe des *report* kann auf eine inzwischen fast bedeutsame Vergangenheit zurückblicken, denn mittlerweile sind 10 Jahre vergangen, seit wir die Freunde der Fügetechnik mit Informationen zur aktuellen Forschung, aber auch mit etwas Klatsch und Tratsch aus dem Institut versorgen. Im August 2005 startete nämlich das Projekt „*report*“, damals noch als 6-seitiges Faltblatt\*. Unglaublich wie die Zeit vergeht.....

Die heutige Ausgabe umfasst mehr als 50 Seiten. Dies liegt einerseits in dem doch rasanten Wachstum des Instituts begründet, andererseits sind einige Aktivitäten wie die Battery LabFactory Braunschweig (BLB), die Open Hybrid LabFactory (OHLF) und das Leichtmetallzentrum Soltau (LMZS) neu hinzugekommen. Den aktuellen Stand dieser Zentren finden Sie in der vorliegenden Ausgabe beschrieben. Ehrlicherweise muss aber auch gesagt werden, dass unser letzter *report* jetzt schon ein paar Tage zurückliegt, so dass natürlich auch ein großes Mitteilungsbedürfnis besteht. In den dargestellten Zentren liegt die große Chance, an der vordersten Front der Forschung zu arbeiten und dies – was das Ganze noch spannender macht – im Schulterschluss mit der Industrie. In diesem Zusammenhang von meiner Seite auch kurz der Dank an alle, die dies möglich gemacht haben. Ich freue mich auf viele kreative und ertragreiche Kooperationen in unseren Zentren.

Andererseits birgt diese Vielfalt auch Risiken. Zum einen muss der doch erhebliche Invest refinanziert werden und dies in durchaus stürmischen Zeiten. Zum anderen verfügt das Institut somit, da wir ja auch noch eine durchaus erfolgreiche Außenstelle in Aachen betreiben, dann über vier Standorte, was sowohl organisatorisch als auch logistisch beherrscht werden muss. Wir haben aber ein tolles Team, das sich diesen Herausforderungen stellt und freundschaftlich mit viel Enthusiasmus die Dinge auf den Weg bringt. Deshalb nochmals ein Dank – an alle Mitarbeiter! Mit Euch/Ihnen ist die Arbeit nicht nur erfolgreich, sondern macht auch Spaß.

Ihnen wünsche ich viel Freude beim Lesen.  
Bleiben Sie uns gewogen!

\* diese sowie alle anderen vorangegangenen Ausgaben stehen zum Download bereit unter <http://www.ifs.tu-braunschweig.de/institut/ifs-report/>

# Forschungseinrichtung für die Batterieproduktion eingeweiht



Bild 1 (v. l.):  
Prof. Jürgen Hesselbach,  
Prof. Dr.-Ing. Arno Kwade,  
Frau Dr. Gabriele Heinen-  
Kljajić

Foto:  
Christian Bierwagen/NFF

Es ist vollbracht: Am 24. Juni 2015 wurde die Battery LabFactory Braunschweig (BLB) feierlich eröffnet. Die neue Forschungsinfrastruktur wurde im Rahmen eines Festaktes mit über hundert geladenen Gästen gewürdigt.

Hochkarätige Gäste, die mit ihren Grußworten die Bedeutung dieser Forschungseinrichtung hervorhoben, waren die niedersächsische Ministerin für Wissenschaft und Kultur Dr. Gabriele Heinen-Kljajić, der Präsident der TU Braunschweig Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Jürgen Hesselbach, der wissenschaftliche Leiter der BLB Prof. Dr.-Ing. Arno Kwade (Bild 1) und der Vorstandsvorsitzende des Kompetenznetzwerks Lithium-Ionen-Batterien (KLiB) Dr. Steffen Haber.

Den beteiligten sieben Instituten der TU Braunschweig – zu denen auch das Institut für Füge- und Schweißtechnik (ifs) gehört – und der PTB in Braunschweig stehen auf einer Fläche von rund 1.000 m<sup>2</sup> Labore und Anlagen zur Verfügung, deren Herzstück ein Trockenraum mit einer Fläche von 160 m<sup>2</sup> ist. Hier können die für die Produktion von Batteriezellen erforderlichen optimalen Bedingungen, wie beispielsweise geringste Luftfeuchtigkeit bei einem Taupunkt von bis zu –60 °C, gewährleistet werden.

Die BLB ermöglicht innovative Forschung für Batterien der Zukunft, beispielsweise für die Elektromobilität, aber auch für stationäre Batterien. Ziele sind die Erhöhung der Sicherheit, Lebensdauer, Effizienz, Kapazität pro Masse bzw. Volumen, die Verringerung der Produktionskosten, ein optimales Batteriemangement und eine zuverlässige Bewertung von Alterungsvorgängen und Messgrößen. Neben Lithium-Ionen-Batterien werden auch Fertigungsprozesse für neue Zelltypen, wie Solid-State-Batterien oder Lithium-Schwefel-Batterien, erforscht.

Die Battery LabFactory Braunschweig bietet den gut 50 beteiligten Forschern die derzeit in Deutschland einzigartige Möglichkeit, sämtliche Prozessschritte zur Herstellung von Batteriezellen in einem fertigungsnahen Maßstab vollständig in einem Technikum abzubilden. Bild 2 zeigt anhand eines schematischen Grundrisses der BLB, wie die einzelnen Prozessschritte sinnvoll angeordnet sind, um einen vollständigen Kreislauf des Batterielebenszyklus untersuchen zu können.

Das *ifs* bildet in der BLB alle Trenn- und Fügeverfahren ab, die erforderlich sind, um Batteriezellen zu fertigen.

sowie eine langsamere Alterung bei erhöhter Zuverlässigkeit zu erreichen. Nähere Informationen dazu können dem Beitrag auf Seite 34 entnommen werden.

Im Bereich der Konfektionierung, d. h. des Zuschnitts der Elektrodenfolien, wird der Einfluss von Laserstrahlschneidprozessen mit Kurzpulsfaserlasern auf die Performance und die Eigenschaften der Batteriezellen untersucht. Für die Zellfertigung werden u. a. Prozesse zur elektrischen Kontaktierung und strukturellen Verbindung von Batteriezellen, z. B. dem Zellverschluss, entwickelt, qualifiziert und optimiert. Verfahren zur mechanischen und elektrischen Verbindung der Batteriezellen zu Modulen und Batterien runden das Spektrum der Aktivitäten des *ifs* ab.

Der Wertschöpfungskreislauf in der BLB umfasst aber nicht nur die Verarbeitung der Ausgangsmaterialien bis hin zu funktionsfähigen Batteriezellen und Modulen, sondern schließt auch ein prozessbegleitendes Monitoring, Fragen der Metrologie und Rückführbarkeit von Eigenschaften der Zellen auf Standards, die Simulation von Ladungs-, Transportvorgängen und kompletten Batteriesystemen sowie das Recycling der Batterien ein (Bild 3).

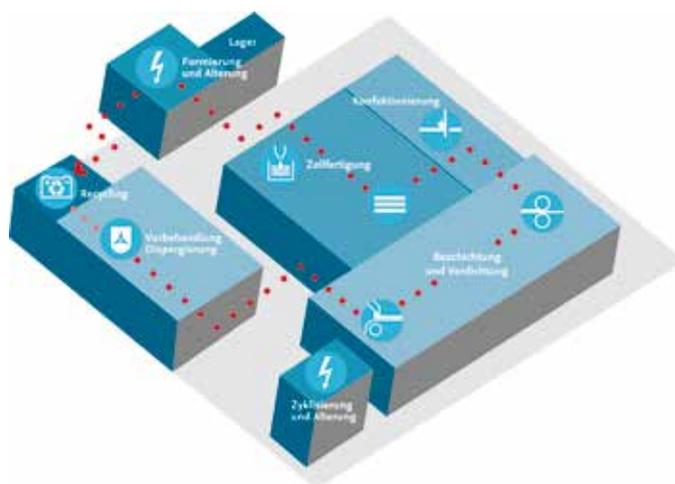


Bild 2: Das *ifs* befasst sich innerhalb der BLB vorrangig mit Forschungsfragen zur Vorbehandlung und Binderentwicklung, Konfektionierung durch Laserstrahlschneiden und Zellfertigung, einschließlich Kontaktierung.



Bild 3: Die BLB untersucht die gesamte Wertschöpfungskette und bildet somit den Lebenszyklus einer Batterie ab.

Ein Forschungsschwerpunkt ist die Entwicklung neuartiger Binder für die Beschichtung der Elektrodenfolien mit den Zielen, durch den Einsatz von umweltfreundlicheren, leistungs- und anpassungsfähigeren Bindern ein breiteres Prozessfenster, höhere Flexibilität in der Verarbeitung und hinsichtlich der Einsatzbedingungen

Ansprechpartner für weitere Informationen:  
Dipl.-Ing. Mario Wagner  
[mario.wagner@tu-braunschweig.de](mailto:mario.wagner@tu-braunschweig.de)

# Kleben von Sensorik an Fundamenten von Offshore-Windkraftanlagen

Kleben als Füge-technik in der Sensorik-Montage ist in vielen Bereichen seit langem Stand der Technik. So werden flache Dehnungsmessstreifen häufig auf die relevanten Bereiche von zu untersuchenden oder zu überwachen- den Bauteilen geklebt, um den lokalen Dehnungszustand der Bauteil-Oberfläche unmittelbar zu erfassen und bei bekannten Materialien und elastischem Materialverhalten den Spannungszustand zu ermitteln. Klebungen hierfür härten strukturell fest aus und werden möglichst dünn ausgeführt. Organische Klebstoffe oder anorganische Kitten können auch zusätzlich zu anderen Montagetekniken wie Schrauben oder Nieten eingesetzt werden, um eine bessere Ankopplung von Sensoren an Bauteile zu erzielen als dies durch die punktuelle Montage häufig möglich ist. Dabei steht eine Schichtbildung mit möglichst homogenen Eigenschaften zur Wärme- oder Schall-Übertragung oder Erfassung weiterer physikalischer Eigenschaften im Vordergrund. In solchen Fällen gerät die Tragwirkung der Klebung selbst in den Hintergrund.

In einem inzwischen abgeschlossenen Forschungsvorhaben des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig (IGB-TUBS) ergab sich die Herausforderung, die komplette Messtechnik (Sensoren, Kabel, Kabelkanäle und autonome Messwerterfassung) an großformatige Fundamente (Monopfähle aus Stahl mit 60 m Länge und 6 m Durchmesser) für Offshore Windenergieanlagen zu montieren und dabei keine thermischen oder mechanischen Eingriffe in diese schon frühzeitig zertifizierten Großstrukturen vorzunehmen. Anschweißen oder Bohren und Anschrauben von Befestigungspunkten hätten die Notwendigkeit einer Neuzertifizierung der Großstrukturen bedeutet, was weder zeitlich noch finanziell realisierbar war. Daher wurden Gespräche zur ausschließlichen Montage aller Bestandteile durch Kleben im Raumtemperaturbereich mit dem Institut für Füge- und Schweißtechnik (ifs) der TU Braunschweig geführt. Nach Betrachtung der physikalischen und organisatorischen Randbedingungen wurde gemeinsam ein Konzept zu einer Baustellenklebung von Sensorik und sämtlichem Zubehör in den liegenden Monopfählen im Hafenterminal in Cuxhaven erarbeitet und vorbereitende Prüfungen an sämtlichen zu klebenden Materialien am ifs durchgeführt. Das Konzept umfasste im Wesentlichen zwei Klebstoff-Klassen, eine für das strukturelle Kleben der Sensoren an die Pfahlwände und eine für die elastische Klebbettung sämtlicher anderer Komponenten.

## **Forschungsvorhaben 'triad' begleitet Aufbau Offshore-Windpark Amrumbank West**

Der Offshore-Windpark Amrumbank West liegt nahe der Unterwasser-Hochspannungsführung zum Deutsch-Dänischen Windpark DanTysk und befindet sich etwa 35 Kilometer nördlich von Helgoland und zirka 37 Kilometer westlich von Amrum [1]. Im Park werden 80 Großwindkraftanlagen der 3,6 MW-Klasse installiert. Die Monopfahl-Fundamente wurden je nach Standort mit 52 bis 63 m Länge ausgeführt und binden nach dem Einrammen ca. 30 m tief in den Sandboden der Nordsee ein. Sie erhalten an der Oberseite ein gelb lackiertes Zwischenstück (Transition Piece), das mit Signal- und Bootsanlageeinrichtungen und einem Kleinkran ausgestattet ist und die eigentliche Windkraftanlage mit Turm, Generator und Rotor (120 m Durchmesser) aufnimmt. Das Einrammen der Groß-Monopfähle mit einem Stückgewicht zwischen 510 und 600 t wird von einem Spezialschiff aus durchgeführt, das sich mit sechs Stelzen auf dem Meeresboden abstützt und für die Baumaßnahmen vollständig aus dem Wasser hebt.

Die Monopfähle sind beidseitig offene Rohre mit einem zylindrischen und einem konischen oberen Teil. Sie bestehen aus dickwandigem Baustahl mittlerer Festigkeit mit variierenden Wandstärken. Die Monopfähle werden aus Dickblechen hergestellt, die in Mehrwalzen-Biegeanlagen zu kompletten Ringsegmenten mit ca. 6 m Durchmesser gebogen werden. Etwa 20 solcher Segmente werden schweißtechnisch in Mehrlagentechnik zu einem Monopfahl zusammengefügt. Die schweißtechnischen Arbeiten dürfen nur von zertifizierten Betrieben durchgeführt werden, die den kontrollierten Wärmehaushalt in den dicken Schweißfugen beherrschen und die werkstofftechnisch günstige Gefügeausbildung für die erfolgreiche Zertifizierung im Offshore-Bereich nachweisen können.

Bei der Errichtung der Gründungen für Offshore-Windenergieanlagen mittels Schlagrammung werden Hydroschall ins Wasser sowie Vibrationen in Form von seismischen Wellen in den umgebenden Boden abgestrahlt. Zum Schutz der Meeresfauna müssen dabei Grenzwerte des Hydroschalls eingehalten werden, die im Fall der großen Monopfähle von bis zu 600 t deutlich überschritten würden. Als Schallschutztechniken wurden daher beim Windpark Amrumbank West eine Kombination aus doppeltem großen Blasenschleier und Hydroschalldämpfern eingesetzt. Neben der Untersuchung der Wirksamkeit und Wechselwirkungen der Schallminderungssysteme hinsichtlich Hydroschall- und Vibrationsphänomenen war es Ziel des Forschungsvorhabens 'triad', das Verständnis für die hydroschall- und vibrationserzeugenden Mechanismen beim Rammen von Offshore-Pfählen zu verbessern [2]. Dazu sollten auch drei der Monopfähle selbst mit umfassender Messtechnik ausgerüstet werden, um die Effekte in der Großstruktur während der Schlagrammung autonom zu erfassen.

#### **Klebtechnik als Montagelösung zur Instrumentierung für vollständig zertifizierte Monopfähle**

Kleben als Fügeverfahren in einer Offshore-Anwendung ist unter sorgfältiger Berücksichtigung der spezifischen Randbedingungen grundsätzlich möglich. Verschiedene Klebstoffhersteller verfügen in bestimmten Produktgruppen über eine große Erfahrung in der Formulierung von Polymeren, die äußerst seewasserbeständig und auch hoch UV-beständig vernetzen. Kleben gilt als wärmearmes Fügeverfahren, im einfachsten Falle härten organische Klebstoffe chemisch bei Raumtemperatur aus. Die Verarbeitung solcher Klebstoffe erfordert jedoch einen sinnvollen Temperaturbereich der Umgebungstemperatur. So sind sowohl tiefe Temperaturen (z. B.

niedriger als 5 - 10 °C) als auch erhöhte Temperaturen (z. B. > 25 °C) zu vermeiden, die aufgrund der damit einhergehenden beschleunigten Härtungswirkung die Verarbeitungszeiten einschränken. Mit der Umgebungstemperatur stellt sich auch häufig ein orts- und jahreszeitlich bedingtes typisches Luftfeuchte-Spektrum ein, auf das verschiedene Klebstoff-Klassen ebenfalls teils empfindlich reagieren.

Für die Baustellenmontage auf dem Festland wurden daher umfangreiche Maßnahmen ergriffen, um die günstige Verarbeitung der Klebstoffe auch unter ungünstigen Witterungsbedingungen zu gewährleisten. Bild 1 zeigt die Maßnahmen zur Temperaturkontrolle am ersten Monopfahl, der mit der vollständig geklebten Messtechnik ausgerüstet wurde. Die Applikation sollte planmäßig schon im Februar 2014 durchgeführt werden, entsprechend wurden die offenen Pfahlenden mit maßgeschneiderten Planen verschlossen und eine Warmluftheizung für den Innenraum installiert. Durch diese Maßnahme konnten die Klebungen, welche sich ausschließlich im Inneren des Monopfahls befinden, ohne Witterungsbeeinflussung ausgeführt werden. Diese Maßnahmen alleine hätten jedoch die dickwandige Stahlstruktur bei einem Kälteeinbruch nicht zuverlässig vor dem Auskühlen bewahren können. Daher wurde zusätzlich eine geregelte Induktionsheizung linienförmig von außen an den Bereichen mit Magneten montiert, an denen innen die Klebungen von Sensoren, Kabeln und Kabelkanälen verlaufen. Die Kombination aus den gewählten Techniken gewährleistete über den gesamten Zeitraum aus Oberflächenvorbereitung, Applikation der Klebstoffe und Aushärtung ein gleichbleibendes Temperaturfenster und damit eine zuverlässige Vernetzung der Klebstoffe.



Bild 1: Umfangreiche Maßnahmen zur Schaffung kontrollierter Umweltbedingungen am Monopfahl; maßgeschneiderte Planen zum Verschluss der Pfahlenden und Warmluftheizung für innen (links), Induktionsheizung zur Temperierung der Pfahlwände im Klebbereich außen (rechts) | alle Bilder IGB-TUBS

Das Thema Sauberkeit im Bereich der Klebstellen ist eine besonders große Herausforderung bei einer stark korrodierten Stahloberfläche und den Arbeiten hauptsächlich in der Sohle einer liegenden Rohrstruktur. Als Oberflächenvorbereitung auf dem stark korrodierten Stahl wurden grobkörnige Fächerschleifscheiben zum Vorsäubern und feinere Scheiben zum Blankschleifen genutzt. Die blanke Stahloberfläche wurde kurz vor dem Kleben mit einem Lappen, getränkt mit Isopropanol, gereinigt und nach dem Ablüften mit einem zum Klebstoff passenden Primer beschichtet. Die Oberflächenvorbehandlung auf dem Epoxidharz-Coating unterhalb des Pfahlkopfes im Bereich der Wasserwechselzone beschränkte sich auf das Reinigen mit Isopropanol ohne Anschleifen, da diese Beschichtung ebenfalls zertifiziert ist und nicht beschädigt werden durfte.

#### Geeignete Klebtechnik für den Rammprozess

Hier wurde auch die strukturmechanisch kritischste Klebung ausgeführt, siehe Bild 2. Für die verhältnismäßig hohe Masse der zu befestigenden Struktur (Gesamtmasse 66 kg für Messbox und geklebte Befestigungsplatte) wurde eine etwa 1 qm große Klebfläche vorgesehen, die als Dickschichtklebung mit ca. 5 mm Dicke ausgeführt wurde. Dazu wurde der Klebstoff innerhalb der zulässigen Verarbeitungszeit von ca. 30 Minuten flach pyramidenförmig auf der Stahlplatte appliziert, anschließend wurde die Platte gewendet und möglichst blasenfrei auf die geprimerte Pfahlwand angegedrückt.

Die Einzelmasse der zu klebenden Ausrüstung hat in diesem speziellen Fall der Schlagrammung der Großstruktur eine besonders große Bedeutung, da aus Untersuchungen von gerammten kleineren Pfählen die Größenordnung einer Momentanbeschleunigung

von etwa 800 g (800-fache Erdbeschleunigung) bekannt war. Ohne eine Dämpfungswirkung der Klebschicht würden auch alle angeklebten Einzelmassen durch solche enormen Beschleunigungen extrem hohe Haltekräfte erfordern. Daher war für die großen und schweren Bestandteile der anzuklebenden Ausrüstung eine dicke, elastische Klebschicht mit großer mechanischer Dämpfungswirkung notwendig. Die Wahl fiel auf einen durch Feuchte vernetzenden Polyurethan-Klebstoff, der zusätzlich mit einer Booster-Komponente als 2-komponentiges Material aus Doppelkartuschen mit Statikmischrohren verarbeitet werden konnte. Diese Klebstoffwahl stellte sicher, dass auch dicke Klebschichten mit geometrisch großer Ausdehnung (z. B. Lagerplatte mit 1 qm) zuverlässig innerhalb weniger Tage durchhärten. Solche Klebstoffe erzielen jedoch nur eine geringe quasi-statische Festigkeit in der Größenordnung von etwa 1 N/mm<sup>2</sup>. Die dynamische Festigkeit liegt jedoch um ein Vielfaches höher, wie Voruntersuchungen ergaben, und der gewählte Klebstoff zeigte auch ein sehr niedriges Risswachstum und damit eine hohe Schadenstoleranz (Bild 2).

Die Wahl einer gut mechanisch dämmenden Dickschichtklebung, in die möglichst stark aufgelöste Strukturen größerer Masse eingebettet wurden (z. B. segmentierte Kabelkanäle überlappend an den Stößen geklebt) bestätigte sich einerseits in den permanent aufgezeichneten Messwerten während des Rammens und abschließend in Form des erfolgreichen Bergens der Messbox nach dem Einrammen der ausgerüsteten Monopfähle, siehe Bild 3.

Im ersten Monopfahl wurden Beschleunigungen von über 1000 g gemessen, die weiteren beiden Monopfähle erhielten Sensoren mit größerem Messbereich und zeichneten bis zu 1200 g auf.



Bild 2: Klebmontage einer Lagerplatte an die beschichtete Wand eines Monopfahls (links) und vollständig angeschlossene Messbox zur autonomen Aufzeichnung der Sensor-Signale während des Pfahl-Rammvorgangs (rechts)

Nach Abschluss der Klebmontagearbeiten und dem erfolgreichen Einrammen aller drei ausgerüsteten Monopfähle kann die erstmalig vollständige Klebmontage von Sensorik und Zubehör wie Kabelsträngen, Schutzeinrichtungen und Messwerterfassungs-Computern als eine zuverlässige Alternative zu herkömmlichen Füge-techniken wie Schweißen oder Bohren und Schrauben herausgestellt werden. Speziell der vollständig zertifizierte Pfahl kann nachträglich ohne Beeinflussung der technologischen und versicherungsrechtlichen Aspekte mit jeder erforderlichen Messtechnik ausgerüstet werden, die sogar dem vollständigen Rammprozess mit Momentanbeschleunigungen von über 1000 g und bis über 6000 Schlägen standhält.

#### Danksagung

Die hier vorgestellten Montage-Aspekte wurden durch die hervorragende interdisziplinäre Zusammenarbeit von Mitarbeitern aus zwei Instituten der TU Braunschweig ermöglicht und im Rahmen eines Forschungsvorhabens vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert.

Das Vorhaben „Evaluierung von zwei gemeinsam eingesetzten Schallminderungsmaßnahmen (HSD und BBC) bei den Monopile-Gründungen im OWP Amrumbank West – Untersuchung der Schallkoppelungen zwischen Pfahl, Boden und Wasser – „triad“ (FKZ 0325681) wurde über den Projektträger Jülich (PTJ) koordiniert. Als Kooperationspartner im Forschungsvorhaben wurden die Messungen von der E.ON Kraftwerke GmbH und E.ON Climate & Renewables ermöglicht. Besonderer Dank gilt hier den Mitarbeitern in Hamburg und insbesondere der Bauleitung in Cuxhaven für die hervorragende Unterstützung.

#### Autoren:

Dipl.-Ing. Gregor Wisner  
Dipl.-Chem. Elisabeth Stammen

#### Ansprechpartner am ifs:

[g.wisner@tu-braunschweig.de](mailto:g.wisner@tu-braunschweig.de)



Bild 3: Unmittelbar nach dem Einrammen eines 60 m langen Monopfahls wird nach Abheben des Hammers der Blick auf die angeklebte Lagerplatte mit elastisch aufgehängter Messbox frei

#### Weiterführende Literatur:

- [1] Selinger: Factsheet Offshore-Windpark Amrumbank West, E.on Climate & Renewables, 2011, 14 Seiten
- [2] Kuhn et al.: „Dynamic measurements of pile deflections as a source of underwater sound emissions during impact driving of offshore pile foundations“, Proceedings 43rd Internoise, Melbourne, Australia, 2014
- [3] Sychla et al.: „Messwerterfassung ohne thermische und spanende Eingriffe in die Struktur gerammter Offshore-Pfähle“, IGB-Pfahlsymposium 2015, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig - Heft 99, 2015, S. 95 – 114

# Wissenschaft und Wirtschaft auf Augenhöhe



Foto: NFF/Christian Bierwagen

Seit der letzten Berichterstattung im *ifs* report (Ausgabe 1, 2014) wurden wichtige Meilensteine auf dem Weg zur Realisierung der Open Hybrid LabFactory als Forschungscampus für wirtschaftlichen und multifunktionalen Leichtbau erreicht. Der Forschungsstandort Wolfsburg wird durch die gemeinschaftliche Niederlassung der TU Braunschweig, der Industrie und der Fraunhofer-Gesellschaft weiter ausgebaut und verstärkt die Forschungsregion Braunschweig/Wolfsburg.

#### **Initiative Forschungscampus und Open Hybrid LabFactory e.V.**

Nachdem im April vergangenen Jahres die Vor-Ort-Begutachtung der Open Hybrid LabFactory mit Besichtigung der im MobileLifeCampus (MLC) in direkter Nachbarschaft zum Baufeld eingerichteten Projekt- und Laborflächen stattfand (Lage s. Bild 2) und im Juni die Vorstellung im Rahmen der Jurysitzung erfolgreich absolviert wurde, erfolgte die Genehmigung der 1. Haupthase durch die Jury der BMBF-Forschungscampus-Projekte. Die Zeit zwischen der Vorphase und der ersten Hauptphase erstreckte sich von März bis Dezember 2014.



Bild 2: Visueller Eindruck der entstehenden Open Hybrid LabFactory neben dem MLC

In diesem Zeitraum wurden bei der Genehmigung durch das BMBF erteilte Auflagen erfüllt und der Forschungscampus strukturell und inhaltlich weiterentwickelt. Entsprechend der Jury-Auflagen sind dem Verein alle beteiligten Projektpartner als Voll- oder Projektmitglied beigetreten. Der Verein hat derzeit 10 Vollmitglieder (zuletzt um die Fraunhofer-Gesellschaft erweitert) und 16 Projektmitglieder.

Die in den Vorhaben der Vorphase begonnenen Forschungsarbeiten wurden gemäß der definierten Forschungsbedarfe weitergeführt, ergänzt und im Rahmen der zukünftigen Hauptphasen-Projekte formuliert. Zusätzlich sind diese um ein viertes Forschungsprojekt, das die Großserienherstellung von Halbzeugen für kraftflussgerecht faserverstärkte Kunststoffbauteile mit thermoplastischer Matrix adressiert, erweitert worden.

Die vier BMBF-Hauptphasenprojekte sind:

- **ProVorPlus** – Funktionsintegrierte Prozesstechnologie zur Vorkonfektionierung und Bauteilherstellung von FVK-Metall-Hybriden
- **MultiMaK2** – Entwicklung von Design- und Bewertungstools für nutzungsgerechte, ökologisch optimierte Multi-Material-KFZ-Bauteilkonzepte in der Großserie
- **TROPHY2** – Thermoplastische, rollgeformte Profile in Hybridbauweise
- **KonText** – Kontinuierliche kraftflussgerechte Textiltechnologien für Leichtbaustrukturen in Großserie

Diese konnten mit Ausnahme von TROPHY2 gleichzeitig zum 01.01.2015 beginnen. Das Projekt TROPHY2, welches gegenüber den anderen Projekten eine Laufzeit von nur drei Jahren besitzt, startete am 01.06.2015. Inzwischen laufen damit alle vier Hauptphasenprojekte, und während des ersten Halbjahres 2015 konnten bereits erste Arbeitspakete erledigt und Forschungsergebnisse erzielt werden.

Die Fraunhofer-Gesellschaft wird in der Open Hybrid LabFactory ein eigenes Projektzentrum errichten, welches strukturell durch die Vollmitgliedschaft und inhaltlich die komplementären Forschungsschwerpunkte in die Open Hybrid LabFactory integriert ist. Dies wurde am 22.04.2015 mit der Unterzeichnung einer gemeinsamen Vereinbarung erneut bekräftigt. Unterzeichner waren: Das Land Niedersachsen, vertreten durch den Ministerpräsidenten Stephan Weil und die Ministerin für Wissenschaft und Kultur Frau Dr. Heinen-Kljajić, dem Vorstandsvorsitzenden der Volkswagen AG, Professor Martin Winterkorn, dem Präsidenten der Fraunhofer-Gesellschaft, Professor Reimund Neugebauer, dem Vorsitzenden des OHLF e.V. Beirats, dem Präsidenten der Technischen Universität Braunschweig, Professor Jürgen Hesselbach, und dem Ersten Vorsitzenden des Vereins der Forschungsfabrik „Open Hybrid LabFactory“, Professor Klaus Dilger, (Foto linke Seite, Vereinbarung zur Kooperation von Land, TU BS, OHLF e.V., VW und FhG).

Das Engagement in Form eines Projektzentrums stellt innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft ein einzigartiges Organisationsmodell der interdisziplinären Zusammenarbeit dar. Dieses Modell wurde mit dem Ziel gewählt, die Kompetenzen im Bereich des ressourcenschonenden und kostengünstigen Leichtbaus mehrerer Fraunhofer-Institute an einem gemeinsamen Standort zu bündeln.

#### Der Neubau der Open Hybrid LabFactory

Nachdem im April 2014 die Gebäudeinvestition von rund 30 Mio. EUR in der Aufsichtsratsitzung der Wolfsburg AG, welche die Funktion des Bauherrn übernimmt, genehmigt wurde, hat die Stadt Wolfsburg im November 2014 einen Baukostenzuschuss in Höhe von 6 Mio. EUR zugesagt. Im weiteren Verlauf des Jahres 2014 erfolgte die Beauftragung sämtlicher Leistungsphasen im Bau- und Bauplanungsablauf. Das Programming, die Grundlagenermittlung (Leistungsphase 1) und die Vorplanung (Leistungsphase 2) erfolgten durch das Architekturbüro *Henn Architekten*. Die darauffolgenden Leistungsphasen werden von *IC-L Ingenieur Consulting Langenhagen* als Generalplaner betreut.



Bild 3: Spatenstich für die Open Hybrid LabFactory in Wolfsburg | Foto: Wolfsburg AG

Der Bauantrag wurde im Oktober 2014 eingereicht, woraufhin im Dezember eine erste Teilbaugenehmigung für den Erdbau erteilt werden konnte. Der Auftakt für das Kompetenz- und Forschungszentrum für wirtschaftlichen Leichtbau wurde am 11.12.2014 mit dem Spatenstich (Bild 3) als Festakt markiert.

In diesem Rahmen wies Niedersachsens Wirtschaftsminister Olaf Lies auf die Bedeutung der Open Hybrid LabFactory für den Wirtschaftsstandort Niedersachsen hin: „Das Kompetenz- und Forschungszentrum ist ein wichtiger Beitrag für die künftige Wettbewerbsfähigkeit des Automobilstandortes Niedersachsen. Wenn in einer globalisierten Automobilwirtschaft die deutsche Industrie Produktionsstandorte überall auf der Welt errichtet, müssen wir dafür sorgen, dass Know-how und damit auch Arbeitsplätze gerade in Niedersachsen geschaffen werden. Die Open Hybrid LabFactory ist ein Power House für den Automotive Cluster in der Metropolregion Hannover – Braunschweig – Göttingen – Wolfsburg.“ Nachdem zu Beginn des Jahres 2015 die Erdbauarbeiten abgeschlossen wurden, entstanden im Frühjahr das Fundament und das Kellergeschoss in Beton. Die Dimensionen des später über 14 m hohen Technikums und der umschließenden Räumlichkeiten für Labore und eingehauste Technikumsbereiche im Erdgeschoss sowie Büroflächen für 200 Mitarbeiter in den drei Obergeschossen lassen sich erahnen.

Mit der Grundsteinlegung am 21.05.2015 wurde der Baubeginn feierlich eröffnet (Bild 4). In diesem Rahmen erklärte Thomas Schmall, Markenvorstand Volkswagen für den Geschäftsbereich Komponente: „Hightech-Leichtbau ist eine wesentliche Zukunftstechnologie der Automobilindustrie. Mit leichteren Fahrzeugen erreichen wir unsere Nachhaltigkeitsziele und bieten gleichzeitig den Kunden verbrauchsarme Fahrzeuge, die großen Fahrspaß bieten. Die industrielle Verarbeitung innovativer und leichter Werkstoffe hat für Volkswagen höchste Bedeutung.“

Prof. Werner Neubauer, Beiratsvorsitzender des Open Hybrid LabFactory e.V., prognostizierte: „Der Leichtbaucampus trägt dazu bei, dass sich die ursprüngliche Arbeiterstadt Wolfsburg jetzt von einer Angestelltenstadt hin zu einer Wissenschaftsstadt entwickeln wird.“



Bild 4: Grundsteinlegung der Open Hybrid LabFactory | Foto: NFF/Christian Bierwagen

Die Grundsteinlegung wurde thematisch stark auf das Konzept Leichtbau ausgerichtet und enthielt viele „luftig-leichte“ Elemente, von den verwendeten Bimssteinen bis hin zum Abschluss mit einem Meer aus Luftballons am Himmel. Detaillierte Eindrücke von der Veranstaltung und vom Baufortschritt zu diesem Zeitpunkt bietet unser im Bild verlinkter Kurzfilm.

Der nächste Meilenstein der Gebäudeentstehung war dann kurz darauf das Richtfest, das bereits am 25.06.2015 von der Wolfsburg AG als Bauherr ausgerichtet werden konnte. Zu diesem Zeitpunkt



Bild 5: Grundsteinlegung der Open Hybrid LabFactory und Kurzfilm <https://youtu.be/coXIG7ZcOgU>



Bild 6: Richtfest der Open Hybrid Labfactory: (v.l.) Julius von Ingelheim, Sprecher des Vorstands der Wolfsburg AG, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Hesselbach, Präsident der Technischen Universität Braunschweig, Thomas Krause, Vorstand der Wolfsburg AG, Klaus Mohrs, Oberbürgermeister der Stadt Wolfsburg, Roland Stöckigt, Geschäftsführer der Volkswagen Immobilien GmbH, Dr.-Ing. e.h. Udo-Willi Kögler, Sprecher Gründungsvorstand des Niedersächsischen Forschungszentrums für Fahrzeugtechnik (NFF), Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger, 1. Vorsitzender des Open Hybrid LabFactory e.V., und Polier Klaus Schneider, Köster Bau

Foto: Wolfsburg AG

hatte das Gebäude in Teilbereichen schon seine endgültige Geschosshöhe erreicht, da in den verschiedenen Teilen versetzt gearbeitet wurde, so sagte Thomas Krause, Vorstand der Wolfsburg AG. Endgültig wetterdicht sollte das Gebäude zur Zeit des Richtfestes nach Terminplan Ende August/Anfang September sein. Auch dieser Meilenstein wurde im September auf der Baustelle erreicht. In der kalten Jahreszeit kann dadurch mit dem umfangreichen Innenausbau begonnen werden.

Ab Mitte Januar 2016 wird das Technikum fertiggestellt, so dass der Einbringung und Montage der Anlagen und Laborausstattung nichts im Wege steht. Den Anfang machen die beiden Großpressen für Hybridbauteile, eine 2500 t Hybridpresse der Fa. Siempelkamp sowie eine 3600 t Hybrid-Spritzgusspresse der Fa. Engel. Diese beiden Großanlagen stellen u. a. zusammen mit einer Textil-Multi-axialgelegemaschine den Kern der Forschungsthematik dar und ermöglichen die Entwicklung von großserienfähigen Prozessrouten

zur wirtschaftlichen Herstellung von Hybridbauteilen in der Werkstoffkombination von Faser, Kunststoff und Metall. Hierbei wird die gesamte Prozessroute, beginnend mit dem textilen Halbzeug über die Werkstoffkombination im Preforming bis zum konsolidierten Hybridbauteil, abgebildet.

Nach dem Anschluss und der Inbetriebnahme aller Anlagen sowie der technischen Gebäudeausrüstung ist die Fertigstellung und Übergabe des Gebäudes zum 30.06.2016 im Terminplan festgeschrieben. Ab diesem Zeitpunkt beginnt der Forschungsbetrieb für Werkstoffe und Produktionstechnologien für den wirtschaftlichen Leichtbau der Zukunft am Standort Wolfsburg.

Autoren:

Dipl.-Ing. Markus Mannig

Dr.-Ing. Stefan Kreling

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

# Abschätzung und Bewertung von Eigenspannungen in Stahl-großstrukturen

Die Schwingfestigkeitsbewertung geschweißter Stahlkonstruktionen ist nach wie vor mit Problemen behaftet. Eine Ursache hierfür liegt in der Unsicherheit der Auswirkungen der durch den Schweißprozess verursachten Eigenspannungen und Verformungen. Zwar versucht man, diese in der Vormontage durch spezielle Schweißverfahren zu reduzieren, spätestens bei der Montage der Bauteile und Sektionen werden aber durch herkömmliche Schweißverfahren und vorhandene Bauteilimperfectionen hohe Verformungen und Eigenspannungen eingebracht. Diese können sich negativ auf die Festigkeitseigenschaften auswirken und durch nachträgliche Richtarbeiten hohe Kosten verursachen. Weiterhin wird der Einfluss von schweißbedingten Eigenspannungen auf die Schwingfestigkeit bei ihrer Bewertung meist konservativ durch Reduktion ertragbarer Spannungen berücksichtigt. Der Bedarf der Kenntnis über den vorliegenden Eigenspannungszustand ist folglich groß.

Gleichzeitig stößt die zerstörungsfreie experimentelle Eigenspannungsbestimmung an großmaßstäblichen Bauteilen an praktische Grenzen. Ursächlich sind zum einen technische Oberflächen (Korrosion oder Korrosionsschutzanstriche), und zum anderen ist die Zugänglichkeit zu den kritischen Stellen oft nicht gegeben.

Zur Abschätzung der Verzüge und Eigenspannungen bieten moderne numerische Berechnungsverfahren ein großes Potenzial. Im Allgemeinen wird die Simulation der Wärmeeinbringung durch den Schweißprozess mit anschließender Strukturbeziehung unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Werkstoffeigenschaften durchgeführt. Wegen der ausgeprägten Nichtlinearitäten ist die numerische Berechnung aufwändig und bislang bestenfalls für Probekörper im Labormaßstab in der Praxis eingeführt. Die notwendige transiente dreidimensionale Berechnung großer Strukturen scheiterte bislang an der sehr aufwändigen Modellierung sowie langen Berechnungszeiten, selbst unter

Verwendung entsprechend leistungsfähiger Hardware. Aus diesem Grund wird bereits seit den Anfängen der Schweißsimulation an vereinfachten Berechnungsmodellen gearbeitet. Da diese jedoch zum Teil die Genauigkeit der Ergebnisse reduzieren und zudem modellabhängig unterschiedliche Ergebnisse liefern, bestehen hierbei große Unsicherheiten. Die Forderung nach einer praxisorientierten Anwendung solcher Modelle ist jedoch noch immer präsent.

Im Rahmen eines AiF-geförderten Gemeinschaftsvorhabens des ifs und des Instituts für Konstruktion und Festigkeit von Schiffen der Technischen Universität Hamburg-Harburg wird gemeinsam mit industrieller Beteiligung eine Methodik zur Abschätzung und Bewertung von Eigenspannungen an Montagestößen entwickelt. Neben der experimentellen Bestimmung des Eigenspannungseinflusses auf die Schwingfestigkeit sowie des Eigenspannungsabbaus im Schwingversuch erfolgte der Abgleich numerisch simulierter Schweißspannungen u. a. mit Eigenspannungsabschätzungen durch vereinfachende Schrumpfkraftmodelle. Die Untersuchungen erfolgten an Bauteilen in zwei Maßstäben (1:1 und 1:2) zur Bewertung der Skalierbarkeit von Laboruntersuchungen. Das skalierte Bauteil im Maßstab 1:2 ist in Bild 1 dargestellt.

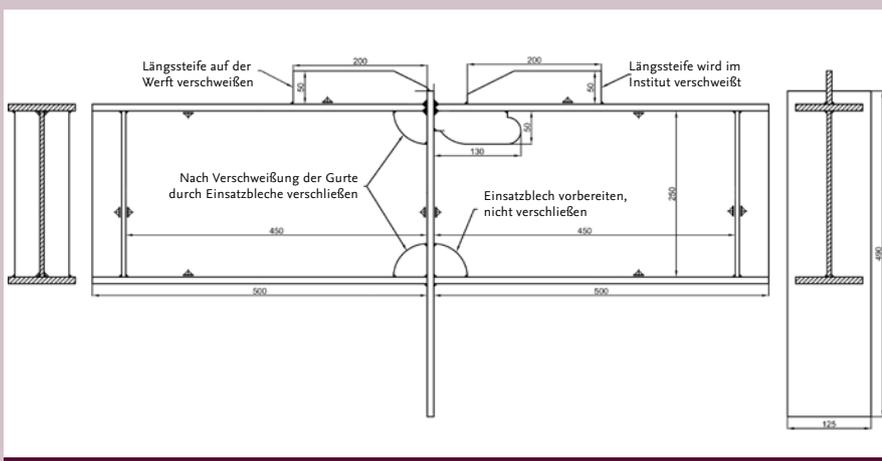


Bild 1: Abmessungen des skalierten Bauteils (Maßstab 1:2) [mm]

Bei der Bauteilgeometrie handelt es sich um eine Anlehnung an schiffbauliche Rahmenkonstruktionen großer Blechdicken, die den messtechnischen Gegebenheiten im Labor angepasst wurden. Die Bauteile sind damit deutlich größer und komplexer als übliche Laborproben und gerade noch manipulierbar innerhalb der Forschungseinrichtungen.

### Numerische Simulation

Für die genaue Berechnung lokaler Eigenstressungen sowie der hohen Temperatur- und Spannungsgradienten beim Schweißen bedarf es dreidimensionaler Modelle mit einer relativ feinen Diskretisierung. Daraus ergibt sich ein direkter Zusammenhang zwischen Modellgröße, Freiheitsgraden und folglich auch Rechenzeiten.

Im Rahmen des hier beschriebenen Vorhabens wurden dreidimensionale transiente Eigenstressungsberechnungen an Modellen im originalen sowie im skalierten Maßstab durchgeführt. Das numerische Modell des skalierten Bauteils ist in Bild 2 dargestellt. Es erfolgte lediglich die Berechnung des Montagestoßes sowie der aufgeschweißten Längssteife. Die berechneten Schweißnähte sind in der Abbildung rot gekennzeichnet. Vorangegangene Fertigungsschritte, also die Herstellung der einzelnen Komponenten, wurden numerisch nicht berücksichtigt.

Zur Modellvalidierung wurden die Schweißversuche messtechnisch begleitet. Neben der Messung der Temperaturfelder wurden metallographische Untersuchungen sowie

röntgenografische Eigenstressungsmessungen durchgeführt. Nach iterativer Kalibrierung der Ersatzwärmequellen wurden die berechneten Temperaturfelder mit den gemessenen Temperaturverläufen beim Schweißen an zwei vergleichbaren Messorten im Versuch und numerischen Modell verglichen (Bild 4). Ein weiteres Kriterium zur Modellvalidierung ist die berechnete Geometrie der Schmelzbäder. Der Vergleich zwischen berechneten und metallographisch bestimmten Schmelzbadgeometrien ist am Beispiel des mehrlagigen Kreuzstoßes in Bild 3 dargestellt. Nach feststellbarer Übereinstimmung der Temperaturfelder und Übereinstimmung der Schmelzbadgeometrien wurden strukturmechanische Berechnungen der Schweiß-eigenstressungen durchgeführt und den Messergebnissen gegenübergestellt (Bild 5). Obgleich die Verläufe zwischen den anrisskritischen Stellen, den Nahtübergängen der aufgeschweißten Längssteife und dem Kreuzstoß Abweichungen im Verlauf aufweisen, kann von einem guten Ergebnis gesprochen werden. Zum einen, weil es sich bei der Herstellung der Komponenten sowie beim Montagestoß um manuelle Schweißungen handelte, die naturgemäß nicht exakt reproduzierbare Schweißnahtqualitäten aufweisen. Zum anderen wurde der Herstellungsprozess bis zum Montagestoß numerisch nicht berücksichtigt.

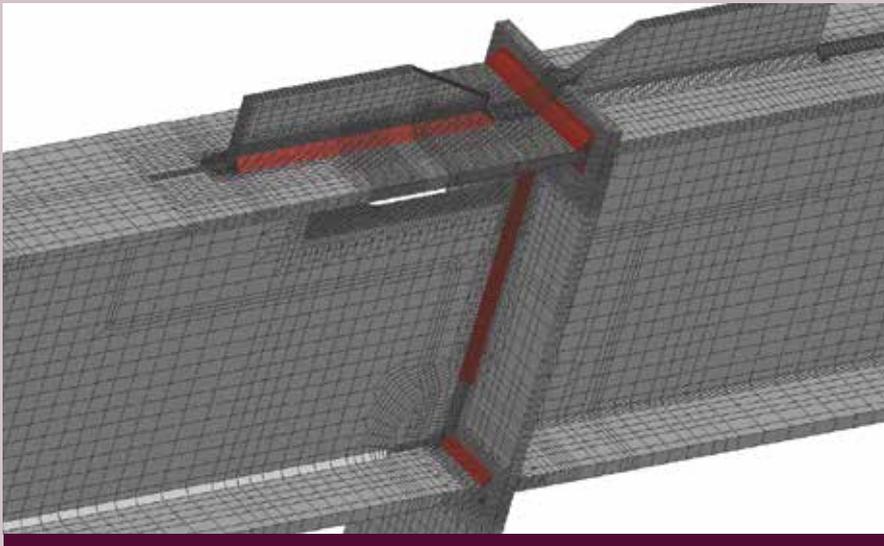


Bild 2: Numerisches Modell des skalierten Bauteils. Die berechneten Schweißnähte des Montagestoßes sind rot dargestellt

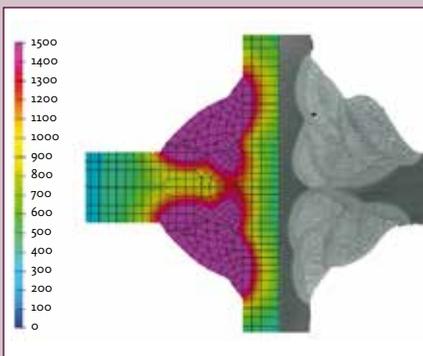


Bild 3: Exemplarischer Vergleich eines metallographischen Querschliffes mit berechneten Temperaturfeldern und Schmelzbadgeometrie am Beispiel des Kreuzstoßes [°C]

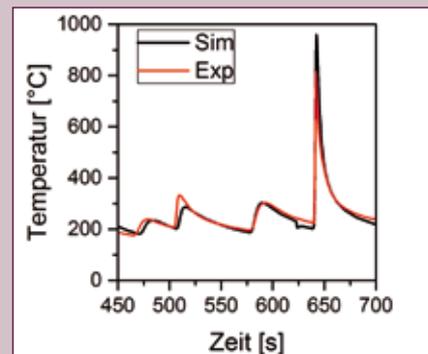


Bild 4: Exemplarischer Vergleich von gemessenen und berechneten Temperaturfeldern an vergleichbaren Positionen im Versuch und numerischen Modell

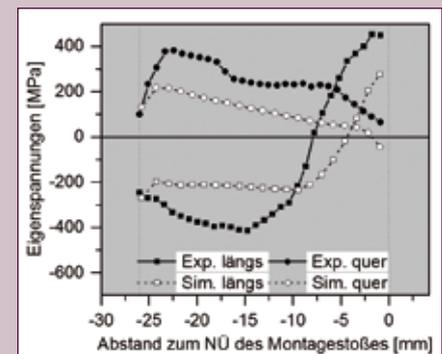


Bild 5: Darstellung gemessener und berechneter Eigenstressungsverläufe auf einer Messlinie zwischen den Nahtübergängen der aufgeschweißten Längssteife ( $x = -27$  mm) und dem Kreuzstoß ( $x = 0$  mm)

Mögliche Eigenspannungen aus dem Reinigungsstrahlen sowie der Einfluss der Schweißarbeiten bei der Komponentenherstellung auf den finalen Eigenspannungszustand bleiben daher verborgen.

### Zur Skalierbarkeit der Ergebnisse

Die ursprüngliche Idee, Eigenspannungen am skalierten Bauteil zwecks Rechenzeitreduzierung zu berechnen und auf andere Maßstäbe zu skalieren, wurde, basierend auf den Erkenntnissen der messtechnisch bestimmten Eigenspannungsverläufe an Bauteilen in beiden untersuchten Maßstäben, nicht weiterverfolgt.

Bild 6 zeigt die gemessenen Eigenspannungsverläufe in Quer- und Längsrichtung an Bauteilen beider Maßstäbe. Gemessen wurde jeweils in Trägerlängsrichtung zwischen dem Nahtübergang des Kreuzstoßes sowie der aufgeschweißten Längssteife. Abweichungen in den Bereichen zwischen den jeweiligen Übergängen sind auf unterschiedliche Ausgangszustände zurückzuführen. Vorausgegangene Eigenspannungsmessungen an Blechen im Lieferzustand

zeigten abweichende Druckeigenspannungsniveaus aus dem Reinigungsstrahlprozess in Höhe der hier dargestellten Abweichungen. Die Ergebnisse am Nahtübergang des mehrlagigen Kreuzstoßes zeigen eine sehr gute Übereinstimmung beider Probenmaßstäbe. Allerdings wurden im Bereich der Längssteifenumschweißung große Abweichungen vorgefunden. Eine Ursache hierfür ist die veränderte Schweißnahtgeometrie infolge variierender Blechdicken der aufgeschweißten Längssteifen (Bild 7).

Während am skalierten Bauteil die Umschweißung im Kreisbogen mit hohen Schweißgeschwindigkeiten erfolgen muss, verändert sich diese Umschweißung mit zunehmender Blechdicke und den reduzierten Schweißgeschwindigkeiten und ist schließlich mit einer kurzen Kehlnaht vergleichbar. Das spiegelt sich auch im Eigenspannungsverlauf wider, dessen hohe Zugeigenspannungen in diesem Bereich Charakteristiken einer Kehlnahtverbindung aufweisen, wohingegen die hohe Schweißgeschwindigkeit und die damit verbundenen geringen Abkühlzeiten an der skalierten

Längssteife zu einer Austenitumwandlung bei niedrigen Temperaturen und schließlich zu Druckeigenspannungen am Nahtübergang führen.

### Danksagung

Das IGF-Vorhaben 17652 N der FOSTA-Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert und durch den DVS Fachausschuss FA | 2 „Anwendungsnahe Schweißsimulation“ fachlich betreut. Die Autoren bedanken sich ausdrücklich bei den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses. Besonderer Dank gilt der Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG sowie der Meyer Werft GmbH & Co. KG für die Herstellung und Zurverfügungstellung der Versuchskörper.



Die Bearbeitung des Vorhabens erfolgt in Zusammenarbeit mit Herrn N. Friedrich und Prof. Fricke aus dem Institut für Konstruktion und Festigkeit von Schiffen der Technischen Universität Hamburg-Harburg.

Autoren:

Jakob Klassen | Jonas Hensel  
Dr.-Ing. Thomas Nitschke-Pagel

Ansprechpartner:

[j.klassen@tu-braunschweig.de](mailto:j.klassen@tu-braunschweig.de)

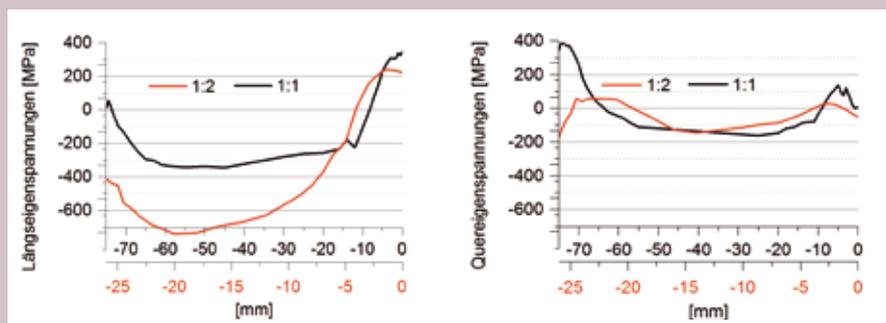


Bild 6: Gegenüberstellung gemessener Eigenspannungsverläufe an Montagestößen beider Maßstäbe. (rot: Verläufe im Maßstab 1:2; schwarz: Verläufe im Maßstab 1:1; jeweils auf einer Messlinie zwischen den Nahtübergängen der aufgeschweißten Längssteife (-x) und dem Kreuzstoß (x=0mm))

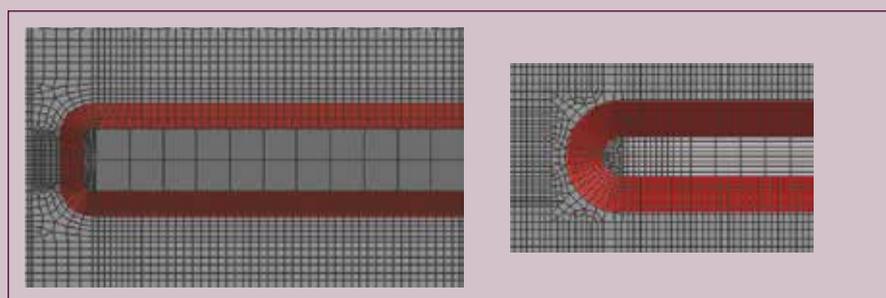


Bild 7: Schweißnahtdetail Umschweißung der aufgeschweißten Längssteife im Originalmaßstab (links) sowie am skalierten Modell (rechts)

# Haftklebstoffproduktion mittels UV-LED-Technologie

Klebebänder und Haftklebstoffe sind von besonderer technologischer, ökologischer und volkswirtschaftlicher Bedeutung. Übliche Haftklebstoffe bieten im Gegensatz zu herkömmlichen, viskos zu verarbeitenden Klebstoffen direkt nach dem Fügen eine ausreichende Anfangsfestigkeit, die eine sofortige Weiterverarbeitung und zum Teil auch den sofortigen Gebrauch der gefügten Bauteile ermöglicht. Da Mischen und Klebstoffapplikation durch den Anwender üblicherweise entfallen, ist der Prozess ausgesprochen robust und fehlertolerant. Positiv zu erwähnen ist ebenfalls, dass eine Gefährdung von Mensch und Umwelt durch Lösemittel, austretenden Klebstoff etc. keine Rolle spielt. Aufgrund dieser Vorteile haben Haftklebstoffe derzeit einen Marktwert von ca. 15 Milliarden Euro weltweit und ca. 1,2 Milliarden Euro europaweit.

Die ersten bekannten haftklebrigen Produkte basierten auf Kautschuken, welche mit Haftharzen klebrig gemacht wurden. Die viskose Beschichtung und Verarbeitung dieser gummielastischen Systeme auf geeigneten Trägerfolien wurde durch den massiven Einsatz organischer Lösemittel, wie aliphatischer und aromatischer Kohlenwasserstoffe, ermöglicht.

Wegen erheblicher Beschränkungen hinsichtlich der mechanischen und thermischen Eigenschaften entwickelte die moderne Chemie Haftklebstoffe auf Basis alternativer Rohstoffe. Vor allem Acrylate sind wegen der vergleichsweise einfachen Möglichkeit, die Produkteigenschaften durch Wahl der verwendeten Monomere einzustellen, besonders geeignet. Man spricht hier auch von *tailored-polymers*, also auf die Anwendung zugeschnittenen Polymeren. Auch diese Produkte wurden und werden vor allem unter Verwendung von Lösemitteln hergestellt.

Die moderne Fertigung haftklebriger Produkte setzt als Alternative zur Lösemittelpolymerisation mehr und mehr auf über Bestrahlung mit UV-Licht polymerisierende und vernetzende Rohstoffe. Dabei spielen vor allem der geringe Energiebedarf und die Vermeidung

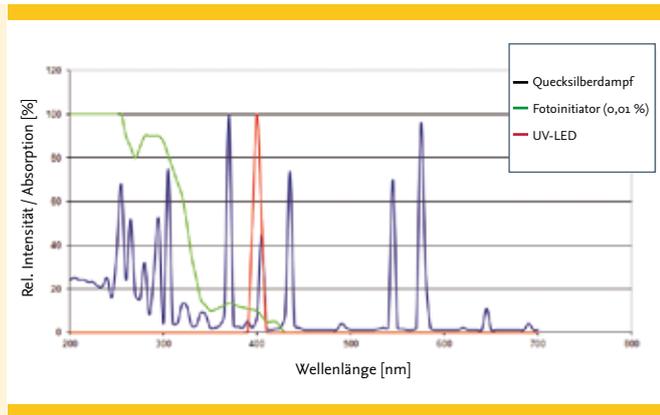
von Lösemittelabfällen eine entscheidende Rolle. Dadurch zählen UV-Haftklebstoffe mit zu den umweltfreundlichsten Produkten überhaupt.

Als konventionelle Lichtquelle werden oft Quecksilberdampflampen zur Erzeugung der UV-Strahlen verwendet, die ein breitbandiges Spektrum von Strahlung emittieren. Die außerhalb des Absorptionsspektrums der Fotoinitiatoren emittierte Strahlung bleibt ungenutzt. Vor allem der sichtbare und infrarote Anteil der erzeugten Strahlung trägt bislang nicht zur Erzeugung reaktiver Spezies bei.

Leuchtdioden (kurz LED, von engl. *light-emitting diode*, dt. Licht-emittierende Diode) hingegen können z.B. gezielt nur schmale Bereiche des Lichtspektrums emittieren, z.B. im ultravioletten Bereich (sog. UV-LED). Dies bietet die Möglichkeit, das Absorptionsspektrum der Fotoinitiatoren mit dem Emissionsspektrum der LED abzustimmen.

Die Übertragung dieser Lampentechnologie in eine moderne Haftklebstoffproduktion war Zielsetzung des Projektes Haftklebstoffproduktion mittels UV-LED, das im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) mit dem Projektpartner Biolink Gesellschaft für Verbindungstechnologien mbH am *ifs* durchgeführt wurde.

Für die finalen Produkteigenschaften spielt die Interaktion der Absorptionswellenlänge des Fotoinitiators mit dem Emissionsspektrum der verwendeten Lampentechnologie die entscheidende Rolle. Häufig werden in der Industrie Initiatorblends unterschiedlicher Absorptionswellenlängen verwendet, was die Energieeffizienz steigert und gleichzeitig das Aushärteverhalten günstig beeinflusst. Stand der Technik im Bereich der Lampentechnologie sind vor allem quecksilberdampfhaltige Entladungslampen. Diese emittieren UV-Strahlung in einem weiten Bereich, Bild 1. Diese Lampen besitzen keine besonders hohe Energieeffizienz, auch die Produktion und Entsorgung dieser Lampen ist mit einer hohen Umweltbelastung verbunden.



← Bild 1: Vergleich der Emissionsspektren von Quecksilberdampf lampen, eines typischen LED-geeigneten Fotoinitiators sowie des engen Emissionsspektrums einer UV-LED

Heutzutage setzen sich im Laborbetrieb und zur punktuellen Aushärtung mehr und mehr UV-LED durch. Diese zeichnen sich vor allem durch hervorragende Langlebigkeit, kurze Schaltzeiten und eine hohe Effizienz bei der Lichterzeugung aus. Typische UV-LED sind jedoch eher Linienemitter mit einer Bandbreite von etwa 10 nm und eignen sich daher nicht für die Verwendung von Initiatorblends, weshalb der Einsatz derzeit zumeist auf hoch vernetzte strukturelle Klebungen beschränkt bleibt.

Neben der gezielten Ansteuerung der Strahler bieten die LED somit Vorteile bzgl. der erhöhten Lebensdauer, einer kompakten Bauweise mit geringer Wärmeabstrahlung, eines flexiblen Betriebs und einer unproblematischen Entsorgung.

Bei der LED-Technik handelt es sich zwar um eine relativ alte Technik, aber erst in den letzten Jahren wurden die Entwicklungsschritte zur Herstellung von blauen und ultravioletten LED in einem Maße vorangetrieben, dass ein wirtschaftlicher Einsatz zur UV-Vernetzung von Klebstoffen möglich ist. Die typischen Eigenschaften von Quecksilberdampf lampen im Vergleich zu UV-LED zeigt die nachfolgende Tabelle.

Für den Einsatz stehen unterschiedliche LED-Typen zur Verfügung. Die sogenannten HighPower LED haben z. B. eine Leistungsaufnahme von fast 2 W bei einem relativ hohen Preis von bis zu 10 € pro Stück, während die so genannten Low-Power LED Leistungsaufnahmen von 0,1 W (30 mA) und einen Preis weit unterhalb von 10 Eurocent besitzen. Eine relativ enge spektrale Emissionsbreite (max. 15 nm Schwankung) um 400 nm ist dabei für alle Systeme üblich. Eine Reihe möglicher Fotoinitiatoren haben Absorptionsmaxima ebenfalls in diesem Bereich, wobei die Breite ihrer Hauptpeaks mit 30-80 nm signifikant über der Peakbreite der LED liegt.

Um eine Vergleichbarkeit der Lampentechnologie zu evaluieren, wurden im Projekt übliche, acrylatbasierte Haftklebstoffpolymere sowohl mit Quecksilberdampf lampen (als bisheriger Stand der Technik) als auch mit ausgewählten UV-LED vernetzt. Die Zielprodukte lagen dabei von den Eigenschaften her im Bereich von wiederablösbar bis hin zu Produkten mit hohem Wärmestand oder einer guten Haftung auf niederenergetischen Oberflächen. Dabei galt es, zunächst die Eigenschaften, welche mit der herkömmlichen Technologie erzielt werden, mit der UV-LED-Technik nachzuvollziehen. Der Einfluss der in den Formulierungen maßgeblichen Additive wurde ebenfalls untersucht, genauso wie neue Rohstoffe.

	Quecksilberdampf lampen	UV-LED
Emissionsspektrum Wellenlängen	kontinuierliches Spektrum zwischen 200 nm und 450 nm	Schmales Spektrum um einen Hauptpeak z. B. 365 nm, 400 nm, 470 nm
Lebensdauer	1.000-5.000 Stunden	10.000-50.000 Stunden
Konstruktiver Aufbau	groß	kompakt, klein
Entsorgungsprobleme	groß (Quecksilber)	keine
Anschaffungskosten	gering	hoch
Elektrische Effizienz	30 %	5-20 %
Wärmeabstrahlung	hoch	gering
Wartung	einfache Intensitätsmessung durch UV-Messgerät	schwierige Überwachung der einzelnen Lampen
	im Falle eines Wechsels muss nur die einzelne Lampe getauscht werden	Ausfall einer LED führt zum vollständigen Ausfall einer Reihenschaltung
Leistungsregelung	keine Regelung	einzelne Lampen oder Reihenschaltungen sind dimmbar/regelbar
Betrieb	Aufwärmphase notwendig, oft Standby-Modus (15-40 %)	Aufwärmphase nicht notwendig, sofortiges Ein- und Ausschalten möglich

Durch rheologische Messungen können wichtige Kenndaten der Haftklebstoffe ermittelt werden, mit deren Hilfe Klebstoffe bezüglich ihrer Klebstoffeigenschaften unterscheidbar sind. Zur Bestimmung der Viskoelastizität werden die wichtigen Größen  $G''$  (viskoser Modul),  $G'$  (elastischer Modul) und der Phasenwinkel (Verlustfaktor  $\tan \delta = G''/G'$ ) ermittelt. Bei Beobachtung der Reaktion ist der Gelpunkt interessant, da an diesem Punkt der Übergang von einer viskoelastischen Flüssigkeit ( $G'' > G'$ ) zu einem viskoelastischen Festkörper ( $G' > G''$ ) stattfindet.

Als Beispiel ist in Bild 2 der zeitliche Verlauf der rheologischen Kennwerte für das mit Haftharzen modifizierte Acrylatssystem CP 614 dargestellt. Die Vernetzungen wurden mit einem am ifs umgebauten Rheometer ermittelt, das Messungen während der Vernetzung mittels UV-Licht (Quecksilberdampf lampen bzw. UV-LED) ermöglicht.

Die Abbildung zeigt, dass die Verläufe der Module bei einer Vernetzung mittels Quecksilberdampf lampen leicht über denen der UV-LED-Vernetzung liegen. Der Verlustfaktor der UV-LED-Vernetzung hat einen niedrigen Verlauf. Vergleichende Messungen bei dem Projektpartner Biolink zeigen, dass für CP 614 auch gleiche Kennwerte bei verschiedenen Lampentypen erhalten werden

können, wenn leichte Änderungen in den Vernetzungsbedingungen vorliegen. Begründet liegen die Unterschiede vermutlich in den verwendeten unterschiedlichen Quecksilberdampflampen am *ifs* und bei Biolink während der Vernetzung im Rheometer. Dies zeigt, dass bereits geringe Änderungen in der Prozessführung signifikante Unterschiede im Produkt hervorrufen können.

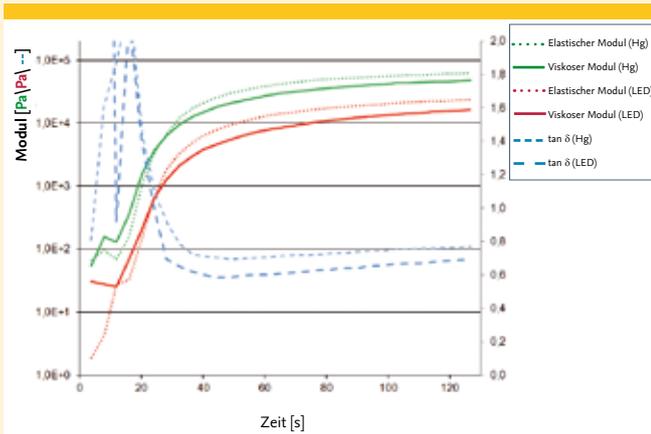


Bild 2: Rheologische Kenndaten der UV-Vernetzung von CP 614 mittels Quecksilberdampflampe (Hg) und UV-LED am *ifs*

Auch die Art des UV-LED-Systems kann Unterschiede in den rheologischen Kenndaten bewirken. Als Beispiel wurde der Klebstoff CP 792 mittels *High-Power LED* (390-400 nm) bzw. *Low-Power LED* (395-410 nm) untersucht (Bild 3). Die Ergebnisse zeigen, dass die Module für die *High-Power LED* einen deutlich niedrigeren Wert erreichen und somit die *Low-Power LED* bei gleicher Strahlungsintensität sowohl eine höhere Kohäsion des Klebstoffes (größere Module) als auch eine höhere Schälfestigkeit (größerer Wert für  $\tan \delta$ ) erzielen kann.

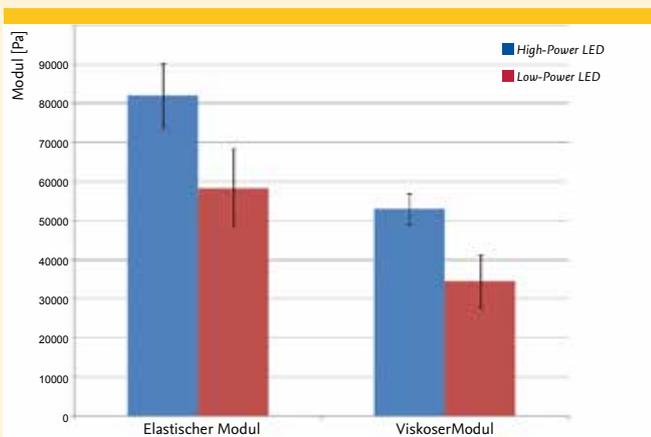


Bild 3: Elastischer und viskoser Modul von CP 792; Vernetzung mittels *High-Power LED Q2* (390-400 nm) bzw. *Low-Power LED SMD* (395-410 nm)

Innerhalb des Projektes wurden zahlreiche weitere Fertigungsaspekte betrachtet. Insgesamt bietet die Aushärtung mittels UV-LED bezüglich der Produktqualität deutliche Vorteile im Vergleich zur herkömmlichen Technik. So können zum Beispiel durch das

Regeln und Steuern der Strahlungsintensität über die Oberflächentemperatur der Klebstoffbahn Hotspots vermieden bzw. Intensitätsschwankungen ausgeglichen werden. Damit wird wiederum eine gleichbleibende Produktqualität sowohl über die Länge als auch über die Breite garantiert. Dies ist bei der herkömmlichen Technik durch natürliche Intensitätsschwankungen und dem Leistungsabfall der Quecksilberdampflampen über die Zeit nicht gegeben. Weiterhin ist der für den Einsatz mit LED favorisierte Fotoinitiator im Vergleich zum bislang eingesetzten, breitbandig absorbierenden Initiator erheblich günstiger. Einsparpotenzial gibt es auch bei der Lampentechnik: Die Leistungsaufnahme der Laborstrahler mit der bisherigen Bestrahlungstechnik liegt bei etwa 1100 Watt. Die entsprechende LED-Bestrahlungstechnik erreicht bei höherer UV-Intensität nur etwa 750 Watt Leistungsaufnahme. Bedingt durch zusätzliche technologische Vorteile, beispielsweise eine bessere Produktqualität und Prozesskontrolle sowie eine einfache Anpassung der Intensität an den Leistungsbedarf, bietet die UV-LED-Technik einen deutlichen Mehrwert.

Neben den technologischen Vorteilen sind darüber hinaus Einsparungen von Rohstoffkosten zu berücksichtigen. Bei einem Großteil der untersuchten Produkte kann der Gehalt an Fotoinitiator durch die neue Technologie reduziert werden. Dies fällt aufgrund des hohen Preises pro Kilogramm stark ins Gewicht, da der Fotoinitiator meist den teuersten Bestandteil der Formulierung darstellt. Die Ergebnisse zeigen, dass für bestimmte Formulierungen der Fotoinitiatoranteil um 50 % gesenkt werden und dabei gleichzeitig auf eine um ca. 50 % kostengünstigere Variante zurückgegriffen werden kann.

Die Projektergebnisse haben die großen Potenziale der neuen Produktionstechnologie gezeigt. Daher ist geplant, bei einer Erweiterung der Beschichtungsanlagen bei Biolink die UV-LED-Technologie einzusetzen. Mit einer eingeführten UV-LED-Technik auf Basis dieses Projektes kann sich Biolink zukünftig hinsichtlich des Herstellungsprozesses von Haftklebbedändern deutlich von den Wettbewerbern abheben.

#### Förderhinweis und Danksagung:

Das Projekt „Haftklebstoffproduktion mittels UV-LED“ (K2012215MF3) wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren bedanken sich hierfür.

Dipl.-Chem. Elisabeth Stammen, *ifs*  
Dr. Marcus Weber und Jan Scheffel, Biolink Gesellschaft für Verbindungstechnologien mbH

Ansprechpartnerin:  
[e.stammen@tu-braunschweig.de](mailto:e.stammen@tu-braunschweig.de)

# Innovative Pulverdosierung zur Erstellung selektiver Korrosionsschutzschichten auf Laserstrahlschweißnähten

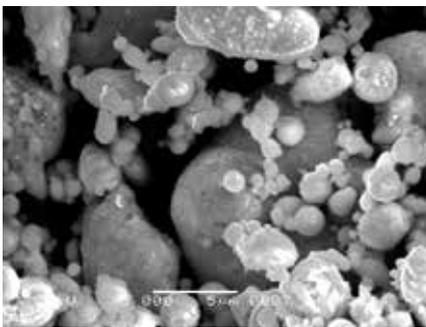


Bild 1: Detailaufnahme Zinkpulver

## Zielsetzung

Der Einsatz von Zinkschichten ist in der industriellen Fertigung als Korrosionsschutzmaßnahme von Stahl- und Stahlblechkonstruktionen weit verbreitet. Bedingt durch die im Vergleich zu Eisen niedrige Schmelz- und Verdampfungstemperatur des Zinks werden

vorbeschichtete Korrosionsschutzschichten auf Zinkbasis bei Anwendung thermischer Fügeverfahren jedoch teilweise oder vollständig verdampft. Infolgedessen treten durch die fehlende Zinkschicht im Bereich der Fugestelle Lackierfehler und verminderte Korrosionsschutzeigenschaften auf, was im Weiteren zu einer Beeinträchtigung des optischen Erscheinungsbildes sowie der Lebensdauer des Bauteils führen kann. Dennoch werden nach dem aktuellen Stand der Technik Nachverzinkungen nur in Ausnahmefällen an Montageschweißnähten wirkungsvoll und wirtschaftlich eingesetzt.

Für die Erstellung selektiver Korrosions- und Verschleißschutzschichten eignen sich insbesondere thermische Spritzverfahren. Unter Praxisbedingungen hat sich für die Nachverzinkung von Montageschweißnähten das Lichtbogendrahtspritzen bewährt. Typische Beschichtungsbreiten bei praxistauglichen Vorschubgeschwindigkeiten liegen dabei ohne

Maskierung oberhalb von 10 mm bei Schichtdicken größer 100 µm. Aufgrund physikalischer Grenzen bei der Tropfenablösung durch den Prozessgasstrom lässt sich diese Technologie nicht für die Beschichtung feiner Nahtgeometrien, wie sie beim Laserstrahlschweißen vorliegen, qualifizieren. Zusätzlich besitzen durch Lichtbogendrahtspritzen erstellte Beschichtungen grobe Partikel im festhaftenden Overspray, die mechanisch nacharbeitet werden müssen, um die Schweißnaht im nächsten Prozessschritt hochwertig lackieren zu können.

Eine weitere bewährte Technologie stellt das Plasmapulverspritzen dar. Aufgrund der hohen Aufschmelzleistungen konventioneller Plasmabrenner (3 – 120 kW) sowie Restriktionen in der Bereitstellung feiner Pulver eignet sich diese Technologie nach dem aktuellen Stand der Technik nur bedingt für die Erzeugung schmaler Beschichtungsspuren. Ein Ansatz zur Minimierung der Beschichtungsgeometrien beim Plasmapulverspritzen besteht daher in der Verwendung von Plasmabrennern mit stark reduzierter Leistung.

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen eines vom Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) geförderten Kooperationsprojektes am ifs in Zusammenarbeit mit der raantec GmbH & Co KG ein an die Nahtbreite von Laserstrahlschweißnähten angepasster Nachverzinkungsprozess entwickelt und qualifiziert. Im Vordergrund standen dabei die Imple-



Bild 1: Zinkpulver mit hohem Feinanteil zur Erstellung selektiver Korrosionsschutzschichten stellt hohe Anforderungen an die Dosier- und Fördertechnik

mentierung eines Sonderplasmaerzeugers mit, gegenüber gängigen Systemen, stark reduzierter Leistung sowie die Bereitstellung feiner Pulver für die Schichterzeugung. Erst durch eine strömungsarme Förderung des Zinkpulvers konnte eine Beeinflussung des Plasmafreistrahls ausgeschlossen werden. Anhand der im Projekt bereitgestellten Dosier- und Fördertechnik sowie in Kombination mit dem neuen Sonderplasmaverfahren lassen sich Beschichtungsergebnisse erzielen, welche in Bezug auf die minimal förderbare Pulvermenge, die Nennleistung des Plasmabrenners sowie die minimal erzielbare Beschichtungsstärke um den Faktor 10 unterhalb der Vergleichstechnologie des konventionellen Plasmapulverspritzens liegen.

### Funktionsweise der Pulverförderung

Für die Erstellung von Nachverzinkungen mit schmalen, dünnen Beschichtungsgeometrien wird die Förderung von Pulvern mit vergleichsweise hohem Feinanteil für den Plasmaspritzprozess benötigt (Bild 1). Dabei hat die Partikelfraktion der bereitzustellenden Pulver direkten Einfluss auf deren Fließfähigkeit und somit auf die Dosier- und Förderbarkeit. Allgemein nimmt die Fließfähigkeit von Pulvern proportional zur Partikelgröße ab, so dass diese unterhalb einer Partikelgröße von  $15\ \mu\text{m}$  mit konventionellen Fördersystemen zum thermischen Spritzen (Lochscheiben-, Schneckendosierer) aufgrund von Konglomeratbildung und Sedimentation nicht prozesssicher zu verarbeiten sind.

Konventionelle Pulverfördersysteme nutzen für den Pulvertransport das Flugförderprinzip, bei dem ein hoher Gasmassenstrom die Pulverpartikel dispergiert und sich die Partikel annähernd als Einzelpartikel bewegen (Bild 2, oben). Dieser Förderzustand stellt sich nur ein, wenn die Strömungsgeschwindigkeit des Fördergases im Verhältnis zur Beladung ausreichend hoch ist. Um den zur Förderung der Pulver notwendigen Gasmassenstrom zu reduzieren und somit die Verwendung eines Sonderplasmaerzeugers zum thermischen Spritzen zu ermöglichen, nutzt das neu entwickelte Fördersystem in Abgrenzung zu konventionellen Fördersystemen die in Bild 2 (Mitte) schematisch dargestellte Dichtstromförderung. Dabei sorgt eine Druckdifferenz zwischen Pulverein- und -austritt für die Pulverförderung. Aufgrund der vergleichsweise hohen Beladung der Förderstrecke in Kombination mit geringen Fließgeschwindigkeiten lassen sich mit diesem Förderprinzip strömungsarme Förderungen über große Förderstrecken sowie die Bereitstellung beschränkt fließfähiger Pulver erreichen.

Die Dosierung und Förderung erfolgen bei dem neu entwickelten System semi-kontinuierlich. Auf einer ersten Dosierstufe werden durch die Einleitung hochfrequenter mechanischer Pulse Sedimentationen im Pulvervorrat gelöst und somit das Pulver in einen reproduzierbaren Zustand gebracht. Ein zusätzlicher pneumatischer Puls fluidisiert das Pulver, so dass sich im Weiteren eine homogene Dispersion mit dem Fördergaspuls einstellen kann.

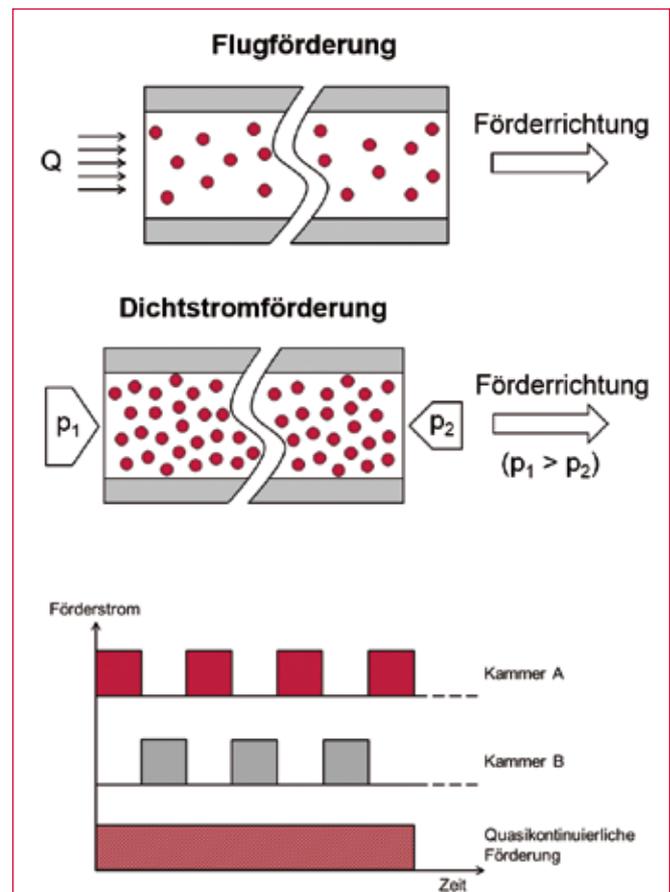


Bild 2: Förderprinzip und Aufbau des neu entwickelten Dosier- und Fördersystems für beschränkt fließfähige Pulver



Das derart mobilisierte Pulver gelangt über eine Membransteu-  
 erung in das Sendegefäß, welches mit einer definierten Pulvermen-  
 ge befüllt wird. Anschließend wird das Sendegefäß geschlossen  
 und mit einem Druckluftpuls beaufschlagt, wodurch das Pulver  
 in die Förderleitung gelangt. Nach vollständiger Entleerung des  
 Sendegefäßes beginnt der Zyklus von neuem. Durch geringe  
 Zykluszeiten sowie die parallele Anordnung zweier Förderkam-  
 mern wird, wie in Bild 2 unten schematisch dargestellt, eine quasi-  
 kontinuierliche Förderung erreicht. In Abhängigkeit von der För-  
 derstreckenlänge lösen sich die Druckpulse auf. Bereits nach einer  
 Förderstrecke von 2 m sind sowohl die Fördergas- als auch die  
 Pulverdosierpulse aufgelöst, so dass ein homogen dispergiertes  
 Pulver-Luft-Gemisch für den Beschichtungsprozess bereitgestellt  
 wird (Bild 3).

Durch den Einsatz des neu entwickelten Dosier- und Fördersys-  
 tems konnte eine strömungsarme Förderung mit Fördergasvolu-  
 mina unterhalb 1 l/min erreicht werden. Eine Beeinflussung des  
 Plasmaprozesses, die zu Instabilitäten des Plasmafreistrahls führt,  
 konnte bei den vorliegenden Fördergasvolumina nicht nachgewie-  
 sen werden. Die Förderrate lässt sich für das in den Untersuchen-  
 gen betrachtete Zinkpulver im Bereich von 0,3 – 3,0 g/min mit  
 einer Abweichung von weniger als 10 % stufenlos regulieren.



Bild 3: Pulveraustritt aus der Förderleitung (Förderstrecke 3 m,  $d_{\text{innen}} = 1,7 \text{ mm}$ )

### Beschichtungsergebnisse

Mit der beschriebenen Kombination aus Pulverförderung und  
 Plasmagenerator ist es unter Variation der Beschichtungsparame-  
 ter sowie einer Optimierung der Plasmabeschichtungsdüsengeo-  
 metrie gelungen, die Beschichtungsbreite der Nachverzinkung an  
 die durch den Laserstrahlschweißprozess sublimierte Zinkschicht-  
 breite von etwa 3 mm anzupassen (Bild 4 oben). Die resultierende  
 Zinkschichtstärke lässt sich über die dem Prozess zugeführte Pul-  
 vermenge steuern und somit an die originäre Zinkschicht anpas-  
 sen. Anhand rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen der Be-  
 schichtungstopographie lassen sich Aussagen bezüglich des  
 Aufschmelzgrades der Pulverpartikel treffen (Bild 4 unten). Durch  
 die geringe Wärmeeinbringung des verwendeten Plasmaerzeugers  
 zeigte sich ein geringer Aufschmelzgrad des Pulvers. Während des

Beschichtens wird kein Nachglühen von Pulverpartikeln beobach-  
 tet. Insbesondere der Feinanteil des Pulvers wurde an- bzw. aufge-  
 schmolzen und sorgt für den Schichtzusammenhalt. Der geringe  
 Aufschmelzgrad führt dabei zu einer mikroporösen Schicht mit ei-  
 ner hohen, wirksamen Oberfläche für den Korrosionsschutz.  
 Durch die geringe Kerntemperatur im Plasmastrahlengang des  
 Sonderplasmaerzeugers ergeben sich für den Beschichtungspro-  
 zess weitere Vorteile bezüglich Aufschmelzgrad und Oxidation der  
 Pulverpartikel. Bei bisher bekannten Plasmabeschichtungssystemen  
 steigt der Pulverauftragswirkungsgrad proportional zur zuge-  
 führten Pulvermenge, da zusätzliches Pulver im Strahlengang den  
 Beschichtungsprozess aktiv kühlt.

Aufgrund der vergleichsweise geringen Prozesstemperaturen zeigt  
 das neue System ein entgegengesetztes Verhalten, so dass die  
 gemessenen Auftragsraten mit sinkender Pulvermenge auf bis zu  
 70% steigen.

Im Anschluss an die Beschichtungsversuche erfolgte an Referenz-  
 mustern die Untersuchung der Korrosionseigenschaften. Hierfür  
 wurden Laserstrahlschweißnähte ohne sowie mit einer Nachverzink-  
 ung in einem an den Wechseltest VDA 233-102 angelehnten Prüf-  
 zyklus ausgelagert und der Korrosionsfortschritt verglichen.

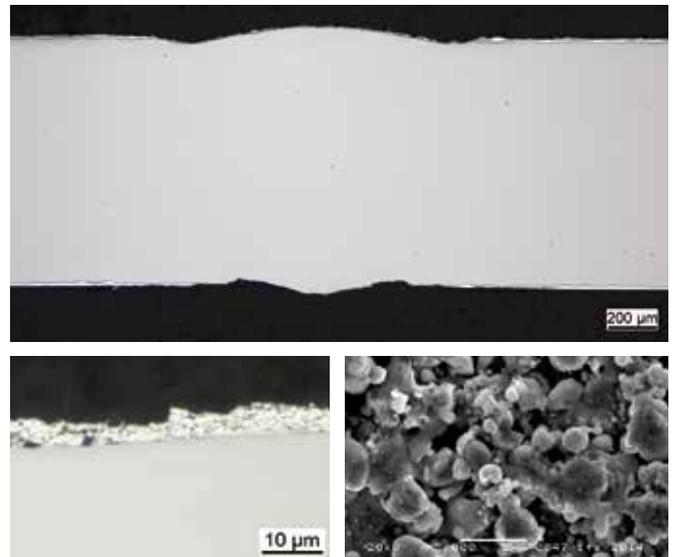


Bild 4: Querschliff einer nachverzinkten Laserstrahlschweißnaht (oben) und REM-  
 Aufnahme der Beschichtungstopographie (unten)

Für die Prüfung wurden die Schweißnähte mit einem Polyurethan-  
 lack bedeckt und dieser orthogonal zur Schweißrichtung bis auf  
 den Grundwerkstoff eingeritzt.

An den Schweißnähten ohne Nachverzinkung wurde im Verlauf  
 der Untersuchungen frühzeitig eine einsetzende Eisenkorrosion,  
 ausgehend vom eingebrachten Ritz, im Bereich der Schweißnaht  
 festgestellt. Wie in Bild 5 dargestellt, zeigte sich bereits nach 312 h

Auslagerungszeit im mit Lack bedeckten Schweißnahtbereich eine Rotrostbelegung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch die Lackschicht ein galvanischer Kontakt zwischen Elektrolyt, Schweißnahtoberfläche und Zinkschicht verhindert und somit die kathodische Schutzwirkung der originären Zinkschicht unterbunden wird. Bei nachverzinkten Schweißnähten zeigte sich im Bereich der eingeritzten Lackschicht ausschließlich Zinkkorrosion. Die Ergebnisse der Korrosionsuntersuchungen zeigen, dass durch den Einsatz einer Nachverzinkung die Eisenkorrosion im Bereich lackierter Laserstrahlschweißnähte unterbunden und somit ein Beitrag zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit von Laserstrahlschweißverbindungen an verzinkten Stahlblechen geleistet werden konnte.



Bild 5: Vergleich des Korrosionsfortschrittes nach 312 h Wechseltest an Laserschweißnähten ohne Nachverzinkung (oben) und mit Nachverzinkung (unten)



### Zusammenfassung

Im Rahmen der Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass durch den Einsatz eines innovativen Pulverdoser- und Fördersystems in Kombination mit einem Sonderplasmaerzeuger thermisch gespritzte Zinkschichten auf die geometrischen Anforderungen von Laserstrahlschweißnähten angepasst werden können. Ausschlaggebend dabei ist die prozesssichere Förderung feiner Zinkpulver für den thermischen Spritzprozess. Im Weiteren konnte der Prozess für eine in-situ Nachverzinkung von Laserstrahlschweißnähten qualifiziert werden. Aufbauend auf den Ergebnissen an Laserstrahlschweißverbindungen ist im weiteren Projektverlauf eine Qualifizierung des neuen Beschichtungsprozesses zur Nachverzinkung von Montageschweißungen mit Metallschutzgas-schweißverfahren geplant. Eine wirkungsvolle Nachverzinkung der Schweißnahtbereiche stellt dabei eine Möglichkeit dar, die Korrosionsbeständigkeit von Stahlerzeugnissen weiter zu erhöhen.

Aus der geringen Aufschmelzleistung des für den Anwendungsfall modifizierten Sonderplasmaerzeugers resultiert eine minimale Oxidation der verwendeten Feinpulver im Strahlengang des Plasmapbrenners. Gegenüber bestehenden Technologien ergibt sich ein materialschonender Prozess, der insbesondere für feine Pulver geeignet ist, die nicht im Strahlengang nachoxidieren dürfen.

Neben dem Einsatz zur Förderung von Pulvern mit hohem Feinanteil für das thermische Spritzen ist das neu entwickelte Pulverdoser- und Fördersystem vor allem für Anwendungen interessant, bei denen Pulver mit wenig Fördergas dispergiert einem Prozess zugeführt werden müssen.

Das Forschungsvorhaben „Qualifizierung eines innovativen Pulverdoseriers für die Herstellung von überlackierfähigen Nachverzinkungen von Schweißnähten in der automatisierten Serienfertigung“ wurde von der AiF im Rahmen des Zentralen Innovationsproramms Mittelstand (ZIM-Kooperationsprojekt) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages gefördert. Für die Förderung und Unterstützung wird an dieser Stelle gedankt. Ebenso danken wir unserem Kooperationspartner raantec GmbH & Co für das aktive Mitwirken bei der Durchführung des Forschungsvorhabens.

Autoren:

Dipl.-Ing. Markus Köhler

Dr.-Ing. Helge Pries

Ansprechpartner:

[markus.koehler@tu-braunschweig.de](mailto:markus.koehler@tu-braunschweig.de)

# Verkürzte Alterungsanalysen von Klebstoffen durch thermo-oxidative Messmethoden

Klebstoffe unterliegen während ihrer Verarbeitung und in der nachfolgenden Anwendung einer starken Beeinflussung durch die Temperatur und Luft als Umgebungsmedium. Das Alterungsverhalten kann sich je nach chemischer Basis dabei stark unterscheiden. Durch eine geeignete Formulierung der Polymere versuchen Klebstoffhersteller dem Alterungsverhalten effektiv entgegenzuwirken.

Bisher erfolgt die Ermittlung der thermo-oxidativen Beständigkeit von Klebstoffen durch zeit- und kostenintensive Prüfungen. Kurzzeitanalysen würden hier die Optimierung von Klebstoffsystemen stark vereinfachen und beschleunigen. Ziel ist es daher, für Anwender von Kleb- und Dichtstoffen sowie deren Entwickler eine einfach durchzuführende und schnelle Methode zu entwickeln, mit der die Beständigkeit von Kleb- und Dichtstoffen gegenüber Temperatur- und Sauerstoffeinwirkung im Dauereinsatz bewertet werden kann. Dabei soll die bisherige, mehrwöchige praxisnahe Prüfung für erste Bewertungen durch ein schnelles, aber vergleichend aussagekräftiges Messverfahren ersetzt werden. Zu diesem Messverfahren gibt es derzeit noch keine systematische Untersuchung, die eine Bewertung von Klebstoffformulierungen zulässt. Diese Lücke soll jetzt geschlossen werden.

Im Allgemeinen kann die thermo-oxidative Stabilität von Kleb- und Dichtstoffen durch die Zugabe von Alterungsschutzmitteln verbessert werden. Diese Antioxidantien und Hitzestabilisatoren schützen während der Herstellung, Anwendung und im täglichen Anwendungsfall vor den Einflüssen von Sauerstoff und Wärme. Die Wirksamkeit einer Formulierung kann dann meist nur durch langwierige Alterungsprüfungen erfolgen. Dabei gilt es zu beachten, dass der Rückgang der mechanischen und physikalischen Eigenschaften ent-

weder sofort bei Exposition oder aber erst nach einer Induktionsphase, was der häufigere Fall ist, erfolgen kann. Eine Vorhersage von Zeitraum und Anwendungstemperatur aus zeitraffenden Alterungsversuchen hat sich bislang häufig als problematisch erwiesen. Daher müssen Klebstoffhersteller und Anwender bei der Bewertung von Systemen vielfach auf Erfahrungswerte und phänomenologische Erscheinungen zurückgreifen, um die zum Einsatz kommenden Systeme zu bewerten. Systematische Untersuchungen liegen oft nicht vor, so dass vielfach Ursache und Wirkung von Formulierungs- und Einsatzparametern nicht direkt korreliert werden können.

Derzeit finden Ofenalterungen in Wärmeschränken bei Prüfzeiten von bis zu mehreren 1000 Stunden statt, um den Praxisfall zu simulieren. Die Methode der OIT (Oxidation-Induction-Time) bzw. OOT (Oxidation-Onset-Temperature), d. h. DSC-Messungen unter definierter Sauerstoffatmosphäre, bietet die Möglichkeit, Kleb- und Dichtstoffe hinsichtlich ihrer Temperaturstabilität beurteilen zu können. Mit der DSC (Differential Scanning Calorimetry) werden kalorimetrisch Enthalpieänderungen gemessen. Dabei werden Probe und Referenzprobe in einem abgeschlossenen Ofen nach einem vorgegebenen Temperaturprogramm aufgeheizt oder abgekühlt.

Bei der OOT-Messung wird die Probe dynamisch in einer DSC mit einer definierten Heizrate erwärmt (Bild 1). Die Probe wird von Beginn an einer Sauerstoffatmosphäre ausgesetzt. Die einsetzende Oxidation ist als exotherme Reaktion erkennbar, die im Thermogramm von der Grundlinie abweicht. Der Vorteil dieser Methode ist der geringe Zeitaufwand für die Probenpräparation und Versuchsdurchführung. Nachteilig kann die geringere Empfindlichkeit bei steigenden Temperaturen sein. Die OOT erlaubt eine Anwendung bei fast allen Polymersystemen. Die Probe wird unter Inertgasbedingung auf eine definierte Temperatur erwärmt, die entweder oberhalb oder unterhalb der Schmelztemperatur liegt. Nach einer kurzen Gleichgewichtseinstellung wird das Schutzgas auf eine Sauerstoff- oder Luftatmosphäre gewechselt und die Temperatur isotherm gehalten (Bild 2). Nach einiger Zeit tritt die exotherme Oxidation ein. Aus der OIT-Messung lässt sich somit eine Aussage über die Oxidations-Induktions-Zeit treffen. Diese Methode ist allgemein empfindlicher als die OOT-Methode. Ferner ist eine differenzierte Aussage über Unterschiede in der Stabilisatorwirksamkeit möglich. Bislang fehlen allerdings systematische Untersuchungen, die eine Beurteilung der Messergebnisse ermöglichen.

Am *ifs* wurden daher systematische Untersuchungen durchgeführt, um die Aussagekraft von OIT- und OOT-Messungen für Klebstoffsysteme und ihre Formulierungsvarianten zu untersuchen und diese mit Ofenalterungen zu vergleichen. Hierzu wurden unterschiedliche Klebstoffsysteme (Acrylate, Silicon, Epoxide, PU-Schmelzklebstoffe) untersucht, die unterschiedlich stabilisiert wurden. Aufgrund der komplexen Chemie der Klebstoffe und der dadurch gleichzeitig ablaufenden Vielzahl an Abbaureaktionen zeigten sich die OIT-Messungen als nicht geeignet, da keine definierte OIT gemessen werden konnte. Nur in wenigen Fällen, wie z. B. bei 2K-Acrylaten, konnten die OIT-Messungen ausgewertet werden. OOT-Messungen können hingegen auf alle Klebstoffsysteme angewendet werden, und die Oxidations-Onset-Temperatur kann reproduzierbar bestimmt werden.

Aus diesen OOT-Messungen können zum einen direkt Informationen über die Wirksamkeit von unterschiedlichen Stabilisatoren in einer Klebstoffmatrix erhalten und somit geeignete Stabilisatoren für ein Klebstoffsystem in kurzer Zeit identifiziert werden. In Bild 3 sind OOT-Messungen eines PSA mit unterschiedlichen Stabilisatoren dargestellt.

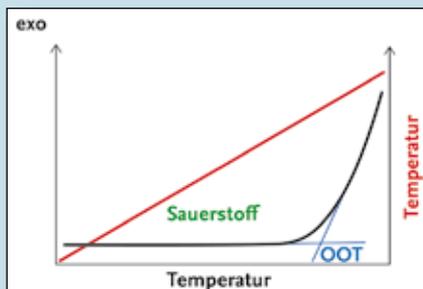


Bild 1: Schematischer Verlauf der OOT-Messmethode

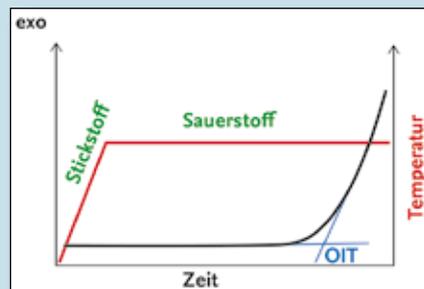


Bild 2: Schematischer Verlauf der OIT-Messmethode

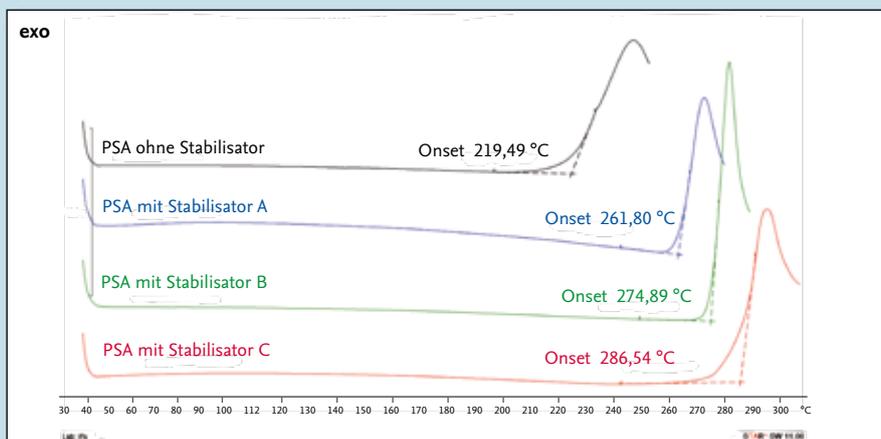


Bild 3: OOT-Messungen von einem PSA mit unterschiedlichen Stabilisatoren

Der Vergleich der Onset-Temperaturen zeigt, dass die eingesetzten Stabilisatoren die thermo-oxidative Beständigkeit des PSA erhöhen. Ferner weist der Stabilisator C die höchste Wirksamkeit auf. Dieses Beispiel zeigt, dass mit einfachen kurzen OOT-Messungen ein erstes Screening erfolgen kann und weitere tiefergehende Untersuchungen zur Ermittlung der Langzeitwirkung des Stabilisators nur mit ausgewählten Systemen notwendig sind. Dadurch reduzieren sich der Arbeitsaufwand und die Arbeitszeit signifikant.

Um die OOT-Ergebnisse mit üblichen Alterungsuntersuchungen vergleichen zu können, wurden Ofenalterungen durchgeführt und die Ergebnisse mit den OOT-Messungen verglichen. Dieses wird am Beispiel eines Silicons, das mit unterschiedlichen Stabilisatoren versehen ist, verdeutlicht. Die OOT-Messungen zeigen deutliche Unterschiede in den thermo-oxidativen Stabilitäten der Silicone (Bild 4).

	OOT bei 10 K/min	bestandene Ofenalterung
Silicon 1 (unstabilisiert)	265 °C	180 °C
Silicon 2 (stabilisiert)	266 °C	200 °C
Silicon 3 (stabilisiert)	363 °C	250 °C

Tabelle 1: Vergleich OOT-Messung und Ofenalterung von Siliconen

toren getroffen und die Zersetzungstemperatur reproduzierbar bestimmt werden können. Somit sind schnelle und kostengünstige OOT-Messungen als aussagekräftige Messverfahren zur Bestimmung der Wirksamkeit von Stabilisatoren einsetzbar. Mit diesem Messverfahren können mit einigen Einschränkungen auch Aussagen über die Langzeitstabilität einiger Klebstoffsysteme getroffen werden.

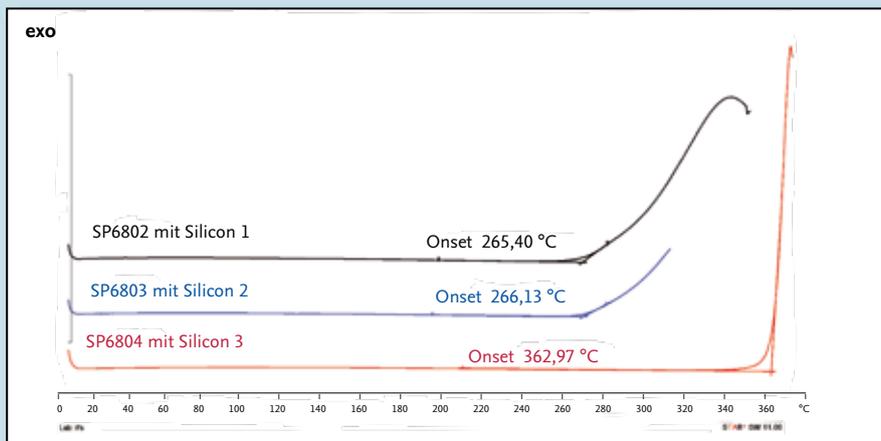


Bild 4: OOT-Messungen von Siliconen mit unterschiedlichen Stabilisatoren

So kann die Onset-Temperatur des Silicons 3 mit einem Stabilisator um 100 °C erhöht werden. Die Ofenalterung wurde mit drei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. In der Tabelle 1 sind die Temperaturen der Ofenalterung für die jeweiligen Silicone eingetragen, bei denen das Silicon keine signifikanten Änderungen in den mechanischen Eigenschaften zeigte, und mit den OOT-Werten verglichen.

Silicon 1 und 2 zeigen kaum Unterschiede in der Ofenalterung, was sich auch in den OOT-Messungen zeigt. Erst Silicon 3 ist deutlich beständiger. Dies bestätigen beide Messmethoden. Die durchgeführten DSC-Untersuchungen verschiedener Klebstoffsysteme zeigen, dass mit einer OOT-Messung Aussagen über die unterschiedliche Wirksamkeit verschiedener Stabilisa-

**Danksagung:**

Das IGF-Vorhaben 17712 N der Forschungsvereinigung DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., Theodor-Heuss-Allee 25, 60486 Frankfurt am Main wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren bedanken sich hierfür.

**Autoren:**

Dr. rer. nat. Frauke Bunzel  
 Dipl.-Chem. Elisabeth Stammen  
 Ansprechpartnerin:  
[f.bunzel@tu-braunschweig.de](mailto:f.bunzel@tu-braunschweig.de)

# Das Leichtmetallzentrum Soltau – Anwendungsnahe Forschung für den Aluminium-Druckguss



Bild 1: Mitarbeiter des Leichtmetallzentrums Soltau während der Arbeit an der Druckgießzelle BÜHLER EVOLUTION B 53D

Der Druckgießprozess ist ein relevantes industrielles Gießverfahren für die wirtschaftliche Fertigung mittlerer bis großer Serien metallischer, gewichtsoptimierter Bauteile mit einer hohen Funktionsintegration. Um den wachsenden Anforderungen hinsichtlich der Bauteilqualität und Energieeffizienz zu genügen, bedarf der Druckgießprozess auch in Zukunft einer kontinuierlichen Weiterentwicklung hinsichtlich der Technologie sowie der Wirtschaftlichkeit. Zahlreiche Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet werden dabei durch das Leichtmetallzentrum Soltau, eine Außenstelle der TU Braunschweig, Institut für Füge- und Schweißtechnik durchgeführt.

Seit 1986 existiert am Institut für Füge- und Schweißtechnik der Technischen Universität Braunschweig eine enge Kooperation mit Partnern aus der Druckgießindustrie: die Fördergemeinschaft Druckgießforschung. Initiator und Gründungsmitglied war seinerzeit das Unternehmen G.A. Röders GmbH & Co. KG.

Das Ziel der Fördergemeinschaft Druckgießforschung ist die konsequente Weiterentwicklung des Druckgießprozesses sowie ein aktiver Meinungs- und Erfahrungsaustausch zwischen den beteiligten Industrieunternehmen.

Im Rahmen dieses Kreises werden Forschungsvorhaben diskutiert, initiiert und auch gemeinsam durchgeführt. Damit existiert eine Plattform, um Erkenntnisse aus der universitären Forschung in die Industrie zu transferieren. Die Technische Universität Braunschweig gehörte damals zu den ersten Universitäten, die aktiv und zielgerichtet im Bereich der Fügetechnologien für Bauteile aus Aluminium-Druckguss geforscht haben. Im Laufe der Zeit haben sich darüber hinaus weitere Forschungsschwerpunkte am Institut etabliert. Als eines der wenigen Institute verfügt das Institut bereits seit Gründungsbeginn über eine eigene Druckgießzelle mit der notwendigen Peripherie, sodass die Forschung stets praxisbezogen und am Gesamtprozess orientiert stattfinden konnte.

### Das Leichtmetallzentrum Soltau (LMZS)

Seit August 2014 ist die Forschungsgießerei in Soltau bei dem Unternehmen G. A. Röders GmbH & Co. KG als Außenstelle der TU Braunschweig industrienah angesiedelt. In Soltau steht dafür seit Ende 2014 ein eigener Hallenbereich in der Gießerei zur Verfügung, der durch das Institut genutzt wird. In einem nächsten Schritt ist der Umzug in eine eigene Halle geplant. Mit dem Leichtmetallzentrum Soltau wurde zusätzlich ein organisatorischer Rahmen geschaffen, der zugleich auch als Wiedererkennungsmerkmal dient. Die Verlagerung der bestehenden Ausrüstung der Forschungsgießerei wurde vor dem Hintergrund durchgeführt, die eigenen Forschungsaktivitäten noch industrienäher durchführen zu können. Gleichzeitig erhalten die wissenschaftlichen Mitarbeiter durch Personal mit umfangreicher Erfahrung Unterstützung bei Wartungs- und Instandsetzungsaufgaben und können sich somit auf ihre Kernaufgaben konzentrieren. Da die G.A. Röders GmbH & Co. KG über einen eigenen Werkzeugbau verfügt, können zukünftig in Absprache mit den wissenschaftlichen Mitarbeitern unter anderem die Werkzeuggpflege und die komplette Instandhaltung übernommen werden. Darüber hinaus stehen in Soltau Büros und Schulungsräume für das wissenschaftliche Personal zur Verfügung. Die Räumlichkeiten können auch für die Durchführung der Lehr- und Ausbildungstätigkeiten genutzt werden.

### Aufgabe und Inhalte des Leichtmetallzentrums

Das Ziel des Leichtmetallzentrums ist die kontinuierliche Weiterentwicklung des Druckgießverfahrens in Hinblick auf Produkt und Prozess durch eine anwendungsnahe Forschung auf diesem Gebiet. Dazu werden sowohl öffentliche als auch bilaterale Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Bereich der Druckgießforschung durchgeführt. Im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten wird eine Forschungsgießerei mit einer Druckgießzelle betrieben, in der fortlaufend Produkte und Prozesse qualifiziert, evaluiert und optimiert werden. Die Aktivitäten finden in Kooperation mit namhaften Unternehmen der Druckgießindustrie statt, mit denen bereits in der Vergangenheit intensiv zusammengearbeitet wurde (Bild 2). Gleichzeitig steht das Leichtmetallzentrum ebenso für bilaterale Forschungsvorhaben zur Verfügung. An dieser Stelle wird Wert darauf gelegt, dass die Ausrüstung und das Perso-

nal des Leichtmetallzentrums der Technischen Universität angegliedert sind. Somit können bilaterale Forschungs- und Entwicklungsprojekte – sofern gewünscht – nach wie vor unter Ausschluss weiterer Parteien ausschließlich durch Mitarbeiter der TU Braunschweig durchgeführt werden.



Bild 2: Kooperationspartner des Leichtmetallzentrums Soltau

Ziel soll es ebenfalls sein, die Forschungsaktivitäten der Gießerei-Industrie mit weiteren Forschungsinitiativen im Raum Niedersachsen zu vernetzen, beispielsweise mit der Open Hybrid LabFactory in Wolfsburg. Bei der Open Hybrid LabFactory handelt es sich um ein derzeit im Bau befindliches Kompetenz- und Forschungszentrum, in dem in öffentlich-privater Partnerschaft industrielle und wissenschaftliche Partner künftig unter einem Dach kooperieren. Die Forschungsinhalte der Open Hybrid LabFactory berücksichtigen die komplette Wertschöpfungskette von der Kohlenstofffaser über den hybriden Fertigungsprozess zur Herstellung funktionaler Leichtbau-Komponenten einschließlich der konzeptionellen Kompetenzen für die Bauteilauslegung bis hin zum Recycling. Eine weitere Aufgabe des Leichtmetallzentrums Soltau ist der Wissenstransfer – sowohl auf der Ebene der universitären Lehre als auch auf der Ebene der beruflichen Weiterbildung. Hier wird in Kooperation mit der VDg-Akademie ein breites Spektrum an Seminaren zur fachlichen Weiterqualifizierung angeboten. In den Veranstaltungen werden sowohl Basiswissen als auch fachspezifische Inhalte vermittelt.

### Forschungsschwerpunkte

Bild 3 zeigt die aktuellen Forschungsschwerpunkte des Leichtmetallzentrums Soltau. Grundsätzlich werden fügetechnische, werkstoffkundliche, verfahrens- und simulationstechnische Fragestellungen aus dem Bereich Aluminium-Druckguss untersucht. Bei der Konzeptionierung und Durchführung von Forschungsvorhaben wird dabei stets darauf Wert gelegt, dass diese praxisnah und am Gesamtprozess orientiert sind und ein Wissenstransfer in die Industrie- und Forschungslandschaft gegeben ist. Bedingt durch die Forschungsausrichtung des Instituts für Füge- und Schweißtechnik der Technischen Universität Braunschweig werden konsequenterweise auch fügetechnische Aspekte im Bereich Aluminium-Druckguss betrachtet. Darüber hinaus wurden zahlreiche Forschungsvorhaben im Bereich der Werkzeugstandzeit von Aluminium-Druckgießformen durchgeführt, sodass sich diese Thematik als weiterer



Bild 3: Forschungsschwerpunkte des Leichtmetallzentrums Soltau

Forschungsschwerpunkt etabliert hat. Forschungstätigkeiten finden ebenfalls auf dem Gebiet der Prozessoptimierung und Steigerung der Energieeffizienz des Druckgießprozesses statt. Bedingt durch stetig zunehmende Anforderungen an die Bauteilqualität und Prozessstabilität sowie unter Berücksichtigung der vorherrschenden energiepolitischen Rahmenbedingungen ist davon auszugehen, dass diese Forschungsschwerpunkte auch zukünftig eine tragende Rolle spielen werden. Die Servicebereiche chemische Analytik und Metallographie sowie eine umfangreiche Materialprüfung werden zumeist für unterschiedliche Forschungsprojekte genutzt, aber auch als eigenständige Dienstleistung angeboten.

#### Tagung des Innovationskreises Automobilzulieferer in Soltau

Im Rahmen des vor fünf Jahren gegründeten Innovationskreises Automobilzulieferer treffen sich betriebliche Fach- und Führungskräfte abseits des Tagesgeschäfts. Die regelmäßigen Treffen des Innovationskreises dienen dem Informations- und Erfahrungsaustausch über technische Entwicklungen, Branchentrends und neue Wege im Innovationsmanagement. Mittlerweile sind hier über 100 Unternehmen vertreten, darunter auch



Bild 4: Prof. Klaus Dilger erläutert die Ziele des Leichtmetallzentrums (links Olaf Lies, rechts Gerd Röders)

zahlreiche renommierte niedersächsische Zulieferunternehmen für Automobilhersteller – unter anderem auch das Unternehmen G. A. Röders. Am 28. Mai 2015 fand das diesjährige Treffen erstmals bei der G. A. Röders GmbH & Co. KG in Soltau statt. Zum fünften „Geburtstag“ des Innovationskreises Automobilzulieferer konnten die Unternehmer mit dem niedersächsischen Wirtschaftsminister Olaf Lies einen prominenten Politiker begrüßen. Auf dem Besuchsprogramm standen hier nicht nur verschiedene Vorträge, sondern auch ein Rundgang durch das Leichtmetallzentrum (Bild 4). Bei dem Treffen referierten unter anderem Professor Ferdinand Dudenhöffer vom Lehrstuhl für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre und Automobilwirtschaft der Universität Duisburg-Essen sowie Professor Klaus Dilger von der Technischen Universität Braunschweig, der unter dem Motto „uni@industrie“ unter anderem das Leichtmetallzentrum vorstellte. Auch Wirtschaftsminister Lies fand lobende Worte für die Zusammenarbeit von Wirtschaft und Wissenschaft: Diese Verzahnung über eine größere räumliche Distanz sei nicht selbstverständlich, das Leichtmetallzentrum eröffne aber wichtige Chancen in der Entwicklung: „Leichter, günstiger und möglichst morgen“ seien die Anforderungen an Produkte im internationalen Wettbewerb, „Eigentlich unmögliche Inhalte“, betonte Lies in Hinblick auf die Anforderungen an die Zuliefererindustrie. Das Leichtmetallzentrum Soltau wird sich diesen Herausforderungen stellen.

Autoren:

Dr.-Ing. Sebastian Müller

Dr.-Ing. Helge Pries

Kontakt:

[sebastian.mueller@tu-braunschweig.de](mailto:sebastian.mueller@tu-braunschweig.de)

Tel.: 0531 391 95526

[www.lmzs.info](http://www.lmzs.info)

# Laserschneiden von Batteriefolien in der Battery LabFactory

## Motivation und Ausgangslage

Vor dem Hintergrund der Vorgabe der Bundesregierung, auf deutschen Straßen bis zum Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge zum Einsatz zu bringen, steht die Automobilindustrie vor zahlreichen Herausforderungen. Die Eigenschaften der Elektrofahrzeuge werden dabei zu einem erheblichen Anteil durch die verwendeten Lithium-Ionen-Batterien bestimmt. Damit Elektrofahrzeuge einen relevanten Marktanteil erreichen, sind hier deutliche Verbesserungen im Bereich der Energiedichte und Lebensdauer bei einer gleichzeitigen Reduktion der Herstellkosten erforderlich.

Aufgrund der hohen Anforderungen an neue Lithium-Ionen-Batterien wird im Rahmen der Battery LabFactory (BLB) die gesamte Produktionskette, von der Herstellung der Elektroden über die Zelle, das Modul bis zur Systemintegration, erforscht (vgl. dazu unseren Artikel im ifs report 9. Jahrgang, Seiten 21-24). Die vorrangigen Ziele bestehen in der Erhöhung von Energiedichte, Qualität und Sicherheit der großformatigen Lithium-Ionen-Batterien, um darüber beispielsweise die Reichweite zukünftiger Elektrofahrzeuge zu erhöhen.



Bild 1: Laserschneiden von Batteriefolien

Im Rahmen der Verbesserung der Prozesskette stellt das Schneiden bzw. Konfektionieren der Elektroden in Hinblick auf die Prozessgeschwindigkeit, die Reproduzierbarkeit sowie die Schneidqualität eine besondere Herausforderung dar. Aufgrund des einfachen Prozessaufbaus sowie der kurzen Prozesszeiten ist das Stanzen von Elektroden derzeit Stand der Technik. Allerdings kann beim Stanzen in Bezug auf die Anforderungen im Elektromobilitätssektor eine qualitativ gleichbleibende und reproduzierbare Schnittkantenqualität, insbesondere eine grat- und delaminationsfreie Schnittkante, nicht sichergestellt werden. Der Grund für die sich verschlechternde Schnittkantenqualität besteht im direkten Kontakt von Stanzwerkzeug und Elektrode während des Produktionsprozesses und dem damit verbundenen Verschleiß des Stanzwerkzeuges. In Hinblick auf die angestrebten Produktionszahlen der BLB von bis zu 50 Elektroden pro Zelle bei einem ungefähren Wochenoutput von 10 Zellen muss das Stanzwerkzeug daher häufig gewechselt werden, woraus höhere Rüstzeiten und Produktionskosten resultieren. Hinzu kommt, dass durch den Werkzeugverschleiß entstehende Schwankungen geringe Einflüsse, z. B. aus der Materialformulierung oder vor- oder nachgelagerten Prozessschritten, überlagern können und somit deren Bewertung erheblich erschweren. Die niedrigere Schnittkantenqualität führt darüber hinaus zu einer verringerten Lebenszeit der Batteriezelle sowie einer verminderten Leitfähigkeit der Elektrode.

Im Gegensatz dazu bietet das Laserschneiden von Elektroden den Vorteil eines kontaktlosen und damit verschleißfreien Einzelungsprozesses (Bild 1), so dass Rüstzeiten entfallen und eine dauerhaft gleichbleibende Schnittkantenqualität erzielt wird. Darüber hinaus stellt das Laserschneiden einen flexibleren Prozess dar, da im Gegensatz zum mechanischen Beschnitt nicht für jede Zuschnittgeometrie ein eigenes Werkzeug gefertigt werden muss. So können im Forschungsbetrieb innerhalb der BLB verschiedenste Elektrodengeometrien mit gleichbleibender Qualität konfektioniert werden (Bild 2). Weiterhin ermöglicht der Laserschneidprozess lokal materialangepasste Schnittparameter, so dass der

beschichtete Bereich und das freiliegende Metall im Bereich der Ableiterfahnen mit jeweils bestmöglicher Qualität konfektioniert werden können. Die Herausforderung beim Einsatz des Laserschneidens besteht in der Auswahl geeigneter Parameter. Durch den hohen Energieeintrag in die Elektrode können bei ungünstigen Parametern die Ausbildung einer Wärmeeinflusszone sowie Delaminationen zwischen Metallfolie und Beschichtung auftreten. Das Ziel der aktuellen Forschungsarbeiten besteht darin, eine reproduzierbare Verringerung der Wärmeeinflusszone sowie die Vermeidung von Delaminationen beim Laserschneidprozess zu erreichen. Dabei werden sowohl der mit Aktivmaterial beschichtete Teil als auch die unbeschichteten Ableiterfahnen betrachtet. In weiteren Untersuchungen wird eine eventuelle Kontamination im Schnittkantenbereich durch die während des Abtragsprozesses entstehenden Partikel betrachtet.



Bild 2:  
Lasergeschnittene Anode



Bild 3: Laserschneidanlage in der BLB

#### Aufbau der Laserschneidanlage

Mit dem Ziel der Integration in die automatisierte Produktionskette der Battery LabFactory wurde ein kontaktfreier Laserschneidprozess mit einem gepulsten Faserlaser ausgewählt (Bild 3). Gepulste Laser bieten in einem Schneidprozess den Vorteil einer vergleichsweise geringen thermischen Belastung durch hohe Pulsspitzenenergien trotz vergleichsweise geringer mittlerer Leistung. Zudem wurde ein Scanner mit einem Bearbeitungsfeld von 40 x 40 cm zum Vereinzeln von großflächigen Elektroden ausgewählt. Dieses große Bearbeitungsfeld ist hierbei eine Besonderheit und kann nur durch einen *Focusshifter* im Scanner erreicht werden. In Hinblick auf einen reproduzierbaren und automatisierten Schneidprozess der Elektroden wurden Vakuumvorrichtungen konstruiert. Mit Hilfe des Vakuums werden die von der Rolle abgewickelten Elektroden auf der Vorrichtung positioniert. Der Schneidprozess erfolgt hierbei mit dem Ziel eines von der Vorrichtung unbeein-

flussten Schnittes über einem Schnittkanal. Zudem können während des Schneidprozesses entstehende Partikel direkt abgesaugt werden und verbleiben somit nicht auf den Elektroden. Nach dem Schneidprozess werden die ausgeschnittenen Elektroden mit einem Greifer entnommen und abgelegt. Das restliche Material wird aufgerollt und in einem nachgeschalteten Prozess recycelt.

### Materialien und Laserschneidprozess

Dem klassischen Aufbau einer Batterie entsprechend bestehen auch die im Rahmen der BLB entwickelten Traktionsbatterien aus einer Anode und einer Kathode. Die Anode aus Kupfer ist von beiden Seiten mit einer Mischung aus MCMB (meso-carbon microbeads) und einigen Additiven beschichtet (Bild 4). Bei der Kathode wird reines Aluminium von beiden Seiten mit einer Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Legierung sowie einigen Zusatzstoffen beschichtet.



Bild 4: Positionierung der Anode mit Hilfe der Vakuumvorrichtung

Beim Laserschneidprozess sind neben der Minimierung der Wärmeeinflusszone, die die spätere Kapazität der Batterie beeinflusst, vor allem die Delaminationen durch geeignete Parameterkombinationen zu vermeiden. Die Bewertungskriterien Wärmeeinflusszone (WEZ) und Delaminationsbreite für die Schnittkantenqualität sind in Bild 5 dargestellt.

Als Beispiel für die unbeschichteten Bereiche zur Kontaktierung und zur Handhabung ist in der linken Abbildung die Wärmeeinflusszone (WEZ) beim Kupfer der Anode dargestellt. Die Wärmeeinflusszone sowie Delaminationen bei einer beschichteten Anode sind in der rechten Abbildung zu erkennen.

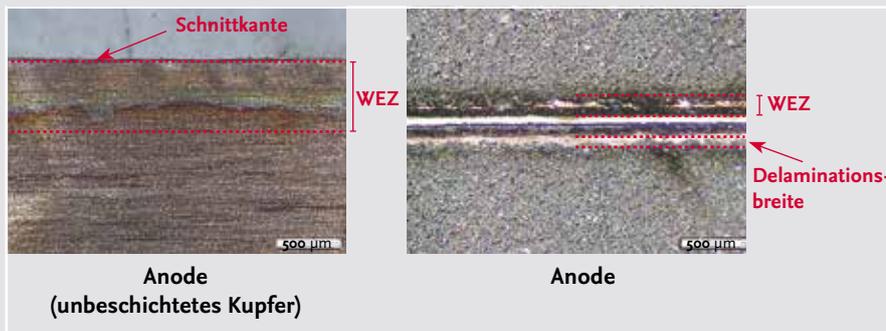


Bild 5: Bewertungskriterien Schnittkantenqualität

### Ausgewählte Ergebnisse

Die ersten Untersuchungen zum Laserschneiden der Anoden- und Kathodenfolien hatten zum Ziel, die Schnittkantenqualität zu verbessern. In einem ersten Schritt wurde dazu der Schneidvorgang in den unbeschichteten Bereichen aus Kupfer (Anode) sowie aus Aluminium (Kathode) untersucht. Aufgrund des Walzprozesses bei der Folienherstellung liegt hier eine Orientierung im Metallsubstrat vor. Daher wurden die Schnittkantenqualitäten in sowie quer zur Rollrichtung in Abhängigkeit von verschiedenen Schneidparametern untersucht. Die Wärmeeinflusszone kann bei unbeschichtetem Kupfer durch höhere Schneidgeschwindigkeiten verringert werden. Bei Aluminium als Trägermaterial ist keine Abhängigkeit der Wärmeeinflusszone von der Schneidgeschwindigkeit zu erkennen. Dieses Verhalten ist mit dem unterschiedlichen Absorptionsverhalten bei der verwendeten Wellenlänge von 1062 nm und den verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten erklärbar.

Ergänzend wurde der Schneidvorgang in den beschichteten Bereichen der Elektroden untersucht, wobei in Abhängigkeit von der Pulsrepetitionsrate bzw. Pulsenergie der Einfluss der eingebrachten Energie auf die Wärmeeinflusszone im Fokus stand. Die Wärmeeinflusszone konnte bei der Kathode und Anode auf unter 50 µm und somit, ausgehend von den Initialparametern, um mehr als 80 % reduziert werden. Zudem konnten die Delaminationen bei der Kathode mit geringen Pulsenergien vermieden werden, wohingegen bei der Anode eine Verringerung auf unter 20 µm realisiert werden konnte. Weiterhin wurde der Einfluss des Pulsüberlappes bei gleichbleibender Energieeinbringung betrachtet. Insbesondere bei der Kathode können die Wärmeeinflusszone und die Delaminationsbreite mit zunehmendem Pulsüberlapp signifikant verringert werden. Ein Schlibbild mit einer delaminationsfreien Schnittkante ist in Bild 6 dargestellt.

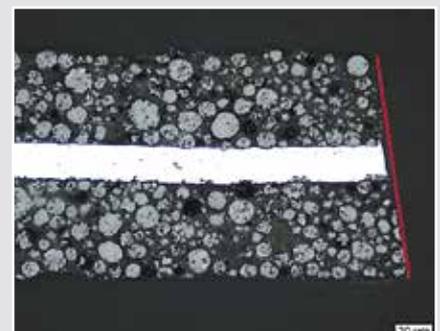


Bild 6: Schlibbild Kathode

### Zusammenfassung und Ausblick

Unter Verwendung eines gepulsten Faserlasers sind reproduzierbare und den Qualitätsanforderungen entsprechende Schneidkantenqualitäten erzielbar. Die Delaminationen und die Wärmeeinflusszone stellen wesentliche Qualitätsparameter für die Schnittkantenqualität dar. Zur Beurteilung dieser Einflussparameter ist ein Bewertungsschema entwickelt worden. Mit Hilfe definierter Laserparameter können die Delaminationen im Bereich der Beschichtungen von Anode und Kathode vermindert werden. Eine signifikante Minimierung der Wärmeeinflusszone wird ebenfalls erreicht.

Im weiteren Verlauf erfolgt die Integration des Rolle-zu-Rolle-Systems in den Laserschneidprozess und die damit verbundene Automatisierung des gesamten Verfahrens (Bild 7).

Zukünftige Untersuchungen beschäftigen sich unter anderem mit dem Einfluss der Pulslänge auf die Schnittkantenqualität und deren Auswirkungen auf die Lebensdauer und die Kapazität der Batterie. Dazu werden derzeit gemeinsame Forschungsprojekte mit den anderen in der Battery LabFactory beteiligten Instituten beantragt, innerhalb derer die komplexen Prozess-Struktur-Eigenschaftswchselwirkungen über alle Produktionsschritte der Herstellungsprozesskette betrachtet werden.

Autoren

M.Sc. Tobias Reincke

Dr.-Ing. Stefan Kreling

Ansprechpartner:

[t.reincke@tu-braunschweig.de](mailto:t.reincke@tu-braunschweig.de)

[tobias.jansen@tu-braunschweig.de](mailto:tobias.jansen@tu-braunschweig.de)



Bild 7: Rolle-zu-Rolle-System

# Reaktive Binder für innovative Lithium-Ionen-Batterien

Die Entwicklung von Batterien für die Elektromobilität stellt die Wissenschaft kontinuierlich vor neue Herausforderungen. Sowohl die Energiedichte als auch die Leistungsdichte der derzeit favorisierten Lithium-Ionen-Batterien sollen weiter erhöht werden, gleichzeitig wird eine längere Lebensdauer bei höheren Zyklenzahlen angestrebt. Zugleich sollen die Kosten dieser Batterien durch den Einsatz preisgünstiger Materialien, aber auch durch vereinfachte Produktionsprozesse deutlich reduziert werden.

Um die Performance von Lithium-Ionen-Batterien zu verbessern, sind mehrere Ansätze denkbar. Ein in seinem Einfluss auf die Zellperformance, Lebensdauer und Prozessierbarkeit häufig unterschätzter Bestandteil von Lithium-Ionen-Zellen ist der für die Beschichtung der Aktivmaterialien erforderliche Binder. Da etablierte Bindersysteme verschiedene Nachteile aufweisen, widmet sich das Institut für Füge- und Schweißtechnik (*ifs*) der Entwicklung und Erforschung alternativer Binder.

Lithium-Ionen-Batteriezellen werden aufgrund ihrer hohen Energiedichte und ihres geringen Gewichts besonders als sekundäre Batteriezellen in tragbaren elektrischen und elektronischen Geräten eingesetzt und dienen in der Elektromobilität als Energiespeicher für Pedelecs, Elektroautos, moderne Elektrorollstühle und Hybridfahrzeuge. In Bild 1 sind der Aufbau und die Funktionsweise einer wiederaufladbaren Lithium-Ionen-Zelle dargestellt. Die beiden Elektroden werden durch einen Separator, eine poröse, ionendurchlässige Membran, voneinander elektrisch isoliert. Zwischen den Elektroden befindet sich ein ionenleitfähiger Elektrolyt, in dem ein dissoziiertes Lithium-Leitsalz enthalten ist. Beim Entladen und Laden bewegen sich Lithium-Ionen zwischen Anode und Kathode hin und her und werden in den jeweiligen Aktivmaterialien eingelagert. Heutige eingesetzte Kathodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien sind Lithium-Metalloxide (LMO), wie  $\text{LiCoO}_2$  und vor allem  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ , die mit-

tels Polyvinylidenfluorid (PVDF) als Binder auf eine als Ableitelektrode eingesetzte Aluminiumfolie aufgetragen werden. Als Anodenmaterial wird üblicherweise Graphit eingesetzt. Neuartige Graphitmaterialien zeichnen sich durch spezielle Morphologien aus, wie z. B. MesoCarbon MicroBeads (MCMB). Als Binder wird auch hier üblicherweise PVDF eingesetzt und das Elektrodenmaterial auf eine Kupferfolie aufgetragen. Der Binder muss eine ausreichende Haftung des Schichtverbundes auf dem Elektrodensubstrat ebenso sicherstellen wie die Integrität der Schicht selbst. Hierbei müssen einerseits mechanische Anforderungen unter den gegebenen, für polymere Verbunde höchst anspruchsvollen, Randbedingungen erfüllt werden, andererseits sind die elektrischen Eigenschaften des Verbundes von besonderer Relevanz.

Für eine gute Verarbeitbarkeit wird das derzeit als Binder typische Polyvinylidenfluorid (PVDF) in N-Methylpyrrolidin-2-on (NMP) gelöst. Nachteile dieses Bindersystems sind der hohe Preis, das gesundheitsgefährdende Lösungsmittel, welches eine aufwändige Verfahrenstechnik bedingt, die geringe Haftung zum Elektrodensubstrat und eine geringe Elastizität, wodurch Delamination und Rissbildung begünstigt werden.

Durch den Einsatz von geeigneten Klebstoffsystemen können Lösungsmittel vermieden und eine Verbesserung der Haftung als auch der Elastizität erreicht

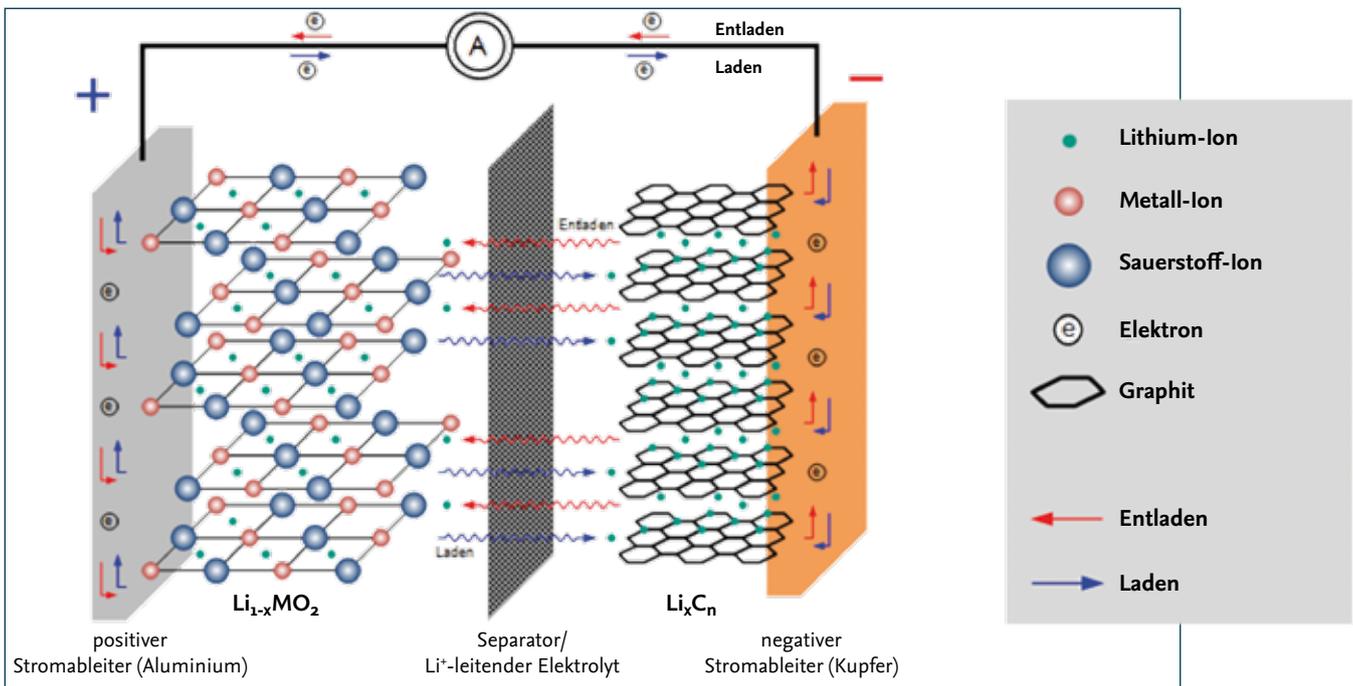


Bild 1: Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie (Quelle: KIT)

werden. Vorteile der Klebstoffe sind die sehr gute Haftung zu unterschiedlichen Substraten und die über die Formulierung in weiten Bereichen einstellbare Elastizität.

Zur Verringerung von gesundheitsgefährdenden Lösungsmitteln wurden daher unterschiedliche Klebstoffsysteme auf Basis von Epoxiden, Siliconen und unterschiedlichen Thermoplasten, wie Acrylaten, mit jeweils verschiedenen Aushärtemechanismen charakterisiert und für den Einsatz als Binder untersucht. Insbesondere Epoxidsysteme zeigten hierbei eine gute Performance. Aufgrund der Möglichkeiten, die Eigenschaften eines Epoxidharzes in gewissen Maßen einzustellen, wurde dieses System genauer untersucht. Für die Versuche wurde ein Epoxid-Klebstoff mit einer sehr niedrigen Viskosität ausgewählt.

Die Lebensdauer einer Lithium-Ionen-Batterie wird durch unterschiedliche Degradationsmechanismen in der Zelle bestimmt. Durch diese Degradationsreaktionen werden die elektrochemischen Eigenschaften der Zelle, wie beispielsweise die verfügbare Kapazität, Energie und Leistung oder die mechanische Integrität der Zelle, verschlechtert. Die Ursachen der Alterung der Zelle sind insbesondere die dynamischen Belastungen beim Laden und Entladen und die dadurch verursachten strukturellen Änderungen. So kommt es beispielsweise durch die Einlagerung von Lithium-Ionen zur Volumenausdehnung des Elektrodenmaterials, aus denen makroskopische Scherkräfte resultieren, wodurch der Kontakt der Partikel im Aktivmaterial untereinander, der Kontakt zwischen dem Aktivmaterial und Binder und ferner der Kontakt des Binders mit der Ableiterfolie verschlechtert wird. Diese Alterungsprozesse setzen damit auch die Elektronenleitfähigkeit stark herab.

Epoxide sind normalerweise spröde Klebstoffe. Um Rissbildung bzw. Delamination zu minimieren, wurde die Elastizität des eingesetzten Epoxidharzes durch Zugabe von Elastifizierern eingestellt. Bild 2 zeigt eine Erhöhung der Dehnung um fast 50 % mit dem Elastifizierer M<sub>1</sub>, wobei die Zugspannung konstant bleibt.

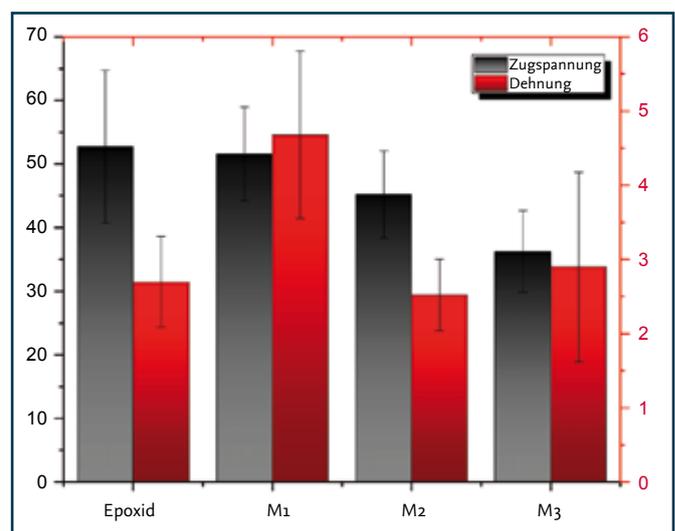


Bild 2: Einstellung der Elastizität von einem Epoxidharz

Es konnten bis zu 80 % LMO bzw. 70 % Graphit ohne Zugabe eines Lösungsmittels in dieses Epoxidharz eingearbeitet werden, um eine auftragbare Mischung zu erhalten. Zugegeben wurde aber ein Verdüner, um den Anteil an Aktivmaterial auf bis zu 80 % zu erhöhen. Um den Anteil an Aktivmaterial weiter zu steigern, wurden unterschiedliche, deutlich weniger problematische Lösungsmittel

wie Aceton, Isopropanol und 2-Butanol teilweise als Mischung mit Wasser eingesetzt. Damit konnte der Anteil des Aktivmaterials auf 90 % erhöht werden. Trotz geringer Mengen an Lösungsmitteln von max. 20 % konnten homogene Beschichtungen erzielt werden (Bild 3). Die Aushärtung des Epoxidharzes erfolgte bei 70 °C.

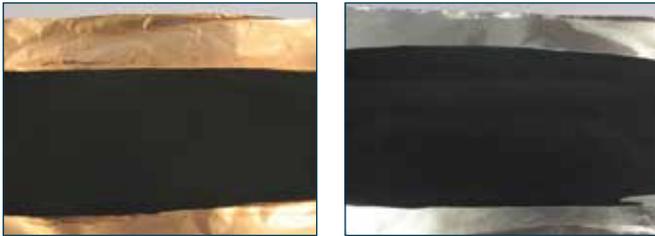


Bild 3: Graphit auf Kupferfolie als Ableiter (links) und LMO auf Aluminiumfolie als Ableiter (rechts)

Die Beschichtungen müssen eine gewisse Porosität aufweisen, damit unter anderem der Elektrolyt die Schicht bis zum Ableiter durchdringen kann und die elektrische Leitfähigkeit gewährleistet. Die LSM-Aufnahmen der hergestellten Elektroden zeigen, dass die Oberflächenbeschaffenheit der Beschichtungen mit Epoxid als Binder ähnlich zu dem Referenzmaterial ist (Bild 4) und die Beschichtungen eine hohe Porosität aufweisen. Die Porosität kann durch die Menge des eingesetzten Lösungsmittels eingestellt werden. Alternativ oder ergänzend ist aber auch der Einsatz von Aufschäumern möglich, um eine optimale Porenbildung zu erreichen.

Ein weiterer Vorteil von Klebstoffsystemen ist die sehr gute Haftung auf dem Elektrodensubstrat, die durch Oberflächenvorbehandlung des Elektrodensubstrats verbessert werden kann. Durch die Verwendung eines Epoxidharzes und durch Oberflächenvorbehandlung mittels Plasma oder Beflammung konnte die Haftung gegenüber der Referenz signifikant verbessert werden (Bild 5). Hierbei konnte mit der Beflammung die beste Haftung sowohl auf Kupfer als auch auf Aluminium erreicht werden. Mit zunehmendem Anteil an Aktivmaterial nimmt die Haftung wie erwartet stark ab.

Zur elektrochemischen Charakterisierung der Beschichtungen wurden mit den hergestellten Elektroden und spezifischen Testzellen der Firma EL-CELL® Versuchszellen gebaut und am Institut für Ökologische und Nachhaltige Chemie (IÖNC) der TU Braunschweig charakterisiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei der Kathode keine Kapazitäten gemessen werden konnten (Tabelle 1). Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass eventuell eine Wechselwirkung des Epoxids mit dem LMO einen Elektronenaustausch verhindert. DMA-Untersuchungen zeigten, dass die Glasübergangstemperatur des Epoxids mit dem Anteil an LMO stark sinkt, so dass daraus gefolgert werden kann, dass das LMO mit dem Epoxidharz reagiert (Bild 6). Hingegen konnte bei der Anode eine reversible Kapazität gemessen werden. Weitere DMA-Messungen zeigen, dass die Glasübergangstemperatur nicht durch das Graphit beeinflusst wird (Bild 7). Prinzipiell funktioniert somit eine Anode mit einem Epoxidbinder.

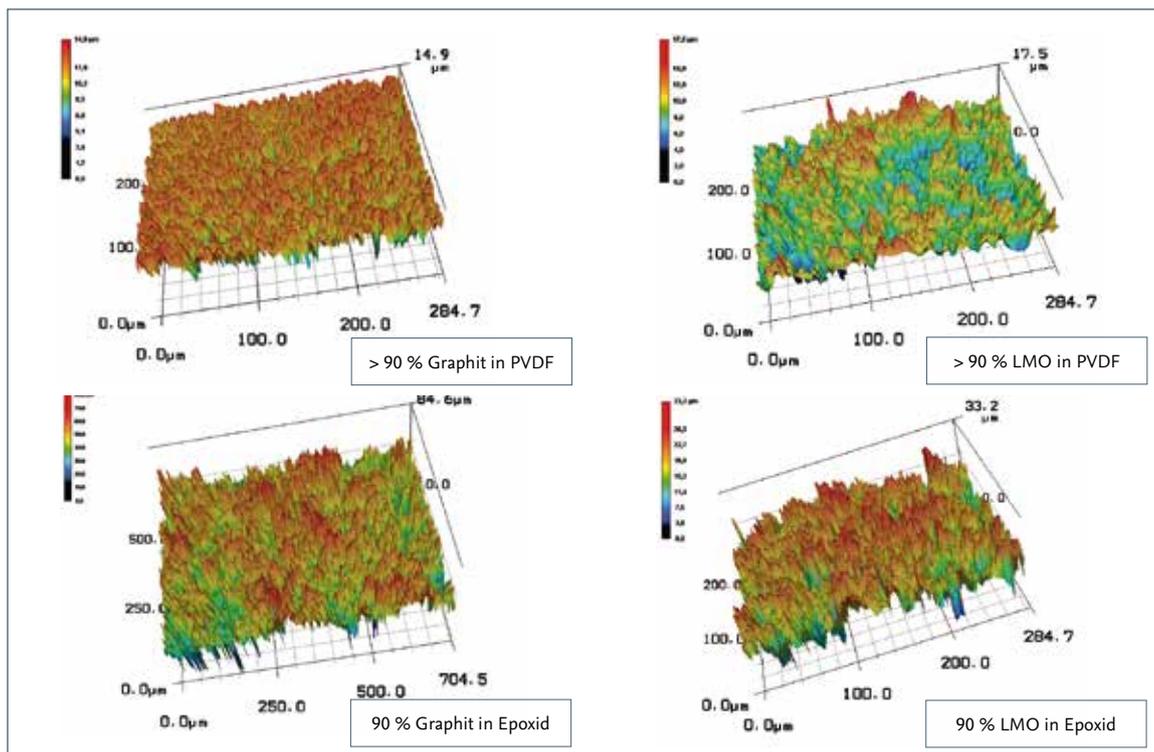


Bild 4: LSM-Aufnahmen von Elektrodenbeschichtungen

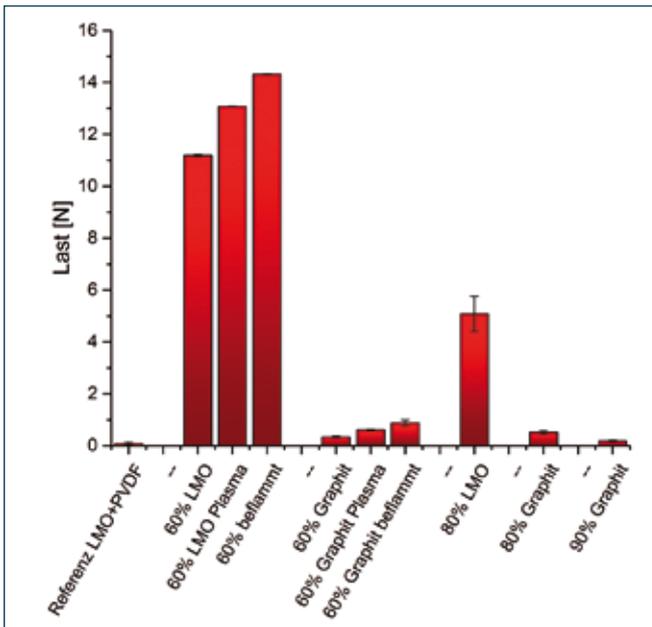


Bild 5: T-Schälprüfung zur Bestimmung der Haftung auf dem Elektrodensubstrat

Tabelle 1: Ergebnisse der elektrochemischen Charakterisierung

	Kathode	Anode
Material	69 % LMO	56 % Graphit
theoretische Kapazität	108 mAh/g	372 mAh/g
Messroutine	2 Zyklen mit 0,1 mA 2 Zyklen mit 0,1 mA 2 Zyklen mit 0,001 mA	2 Zyklen mit 0,1 mA 2 Zyklen mit 0,1 mA 2 Zyklen mit 0,005 mA
Ergebnis	Keine reversible Kapazität	Geringe Kapazität, aber reversibel

Durch die Verwendung eines Klebstoffs als Binder in einer Lithium-Ionen-Batterie kann zum einen die Menge an Lösungsmitteln reduziert werden und zum anderen können laborübliche Lösungsmittel eingesetzt werden. Dies bedeutet ferner eine Verringerung der Produktionskosten aufgrund einer vereinfachten Verfahrenstechnik und eine Reduktion der Umweltbelastung. Die positiven Eigenschaften des hier verwendeten Epoxids, wie hohe Haftung zum Elektrodensubstrat und Elastizität, können die Lebensdauer der Zelle erhöhen, da Rissbildung und Delamination beim Laden und Entladen verringert werden. Ferner ist ein ausgehärteter Epoxid chemisch inert und wird nicht von den im Elektrolyten vorhandenen Lösungsmitteln chemisch angegriffen, so dass sich die Sicherheit der Zelle erhöht.

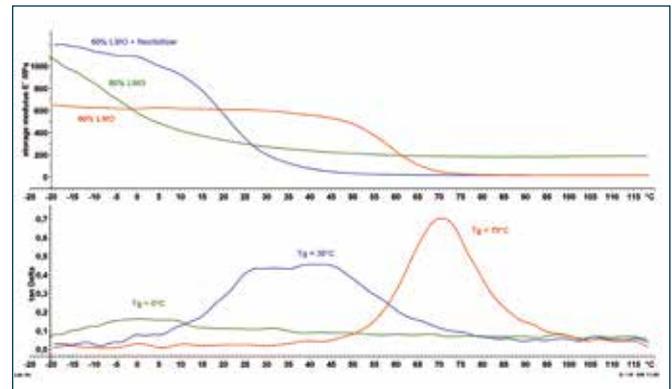


Bild 6: DMA-Kurven von Mischungen mit LMO und Epoxid

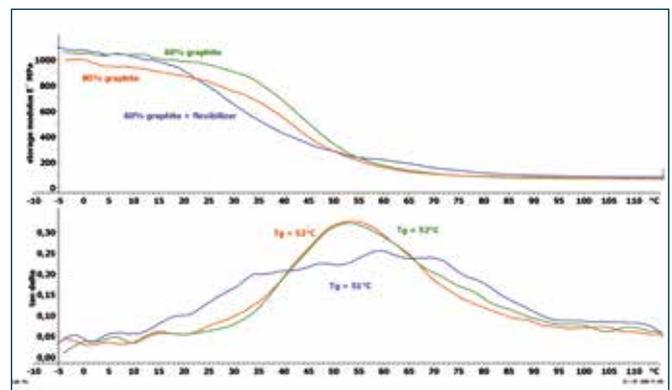


Bild 7: DMA-Kurven von Mischungen aus Graphit mit Epoxid

#### Danksagung:

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des Graduiertenkollegs GEENI durchgeführt. Die Autoren bedanken sich beim MWK Niedersachsen für die Förderung des Projektes GEENI.

Autoren:

Dr. rer. nat. Frauke Bunzel

Dipl.-Ing. Mario Wagner

Ansprechpartnerin:

[f.bunzel@tu-braunschweig.de](mailto:f.bunzel@tu-braunschweig.de)

# Quasistatische Prüfung von gefügten Sandwichstrukturen

## Herausforderung an die Prüf- und Fügetechnik

### Motivation und Ausgangslage

Sandwichstrukturen werden aufgrund ihrer herausragenden mechanischen und akustischen Eigenschaften zunehmend industriell eingesetzt. Diese Strukturen bestehen aus zwei vergleichsweise dünnen Deckschichten und einem Kern geringer Dichte, die stoffschlüssig miteinander verbunden werden. Auf diese Weise lassen sich biegesteife, hoch belastbare Strukturen mit geringem Gewicht erzeugen. Neben den Vorteilen im mechanischen Verhalten ermöglichen diese Strukturen die zusätzliche Integration von Funktionen wie der akustischen oder thermischen Abschirmung. Deckschichten werden überwiegend aus metallischen Werkstoffen und faserverstärkten Kunststoffen gefertigt, bei den Kernwerkstoffen werden hingegen Metall- oder Polymerschäume, Wabenstrukturen oder natürliche Materialien wie Balsaholz eingesetzt. Die Anbindung der Deckschichten an den Kern erfolgt zumeist in einem Klebprozess, aber auch das direkte Schäumen des Kerns zwischen den Deckschichten oder das Auflaminieren der Deckschichten auf einen formgebenden Kern sind möglich. Zur Untersuchung der Anbindung zwischen Kern und Deckschichten existieren zahlreiche genormte Prüfmethode, die von Kopfbis- bis hin zu Schälversuchen reichen und somit eine objektive Bewertung der Anbindung ermöglichen. Aus fuge- und prüftechnischer Sicht stellt neben der Herstellung und Prüfung der Anbindung zwischen dem Kern und den Deckschichten auch die Lasteinleitung und Einbindung der Sandwichelemente in die Gesamtstruktur eine Herausforderung dar.

Das Kleben bietet hier aufgrund der Möglichkeit zur flächigen Krafteinleitung in die gegenüber Punkt- und Linienlasten empfindlichen Strukturen ein hohes Potenzial. Das Projekt „FaSaNorm“ beschäftigte sich mit den Möglichkeiten zur mechanischen, quasistatischen Prüfung gefügter Sandwichstrukturen und der Bewertung der Versuche hinsichtlich ihrer Eignung zur Bestimmung der Klebstellenqualität. Die grundsätzliche Herausforderung bei der Prüfung von gefügten Sandwichstrukturen besteht darin, auf die Fügestelle eine definierte Belastung aufzubringen, ohne ein Versagen der Sandwichstrukturen zu provozieren. Dazu wurden Stumpfstöße, Eckstöße und T-Stöße zwischen Sandwichstrukturen sowohl experimentell als auch mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode in Simulationsrechnungen untersucht. Neben der Entwicklung von Prüfmethode bildete die Ermittlung der Einflüsse der Fügstellengeometrie und der Sandwichmaterialien auf das Tragverhalten einen weiteren Schwerpunkt im Projekt.

### Ausgewählte Ergebnisse

Im Rahmen der Untersuchungen wurde unter anderem die Eignung genormter Biegeversuche zur Beurteilung der Tragfähigkeit von geklebten Stumpfstößen ermittelt. Dazu wurden sowohl monolithische Sandwichstrukturen als auch gefügte Strukturen in unterschiedlichen Konfigurationen gemäß den Vorgaben der DIN 53293 im Vierpunktbiegeversuch sowie in einem an diese Prüfnorm angelehnten Dreipunktbiegeversuch untersucht. Dabei zeigte sich, dass eine objektive Bewertung der Biegefestigkeit geklebter Sandwichstrukturen anhand dieser beiden Versuche nicht möglich ist und es einer Weiter-

entwicklung und Anpassung der Prüfmethode an die Prüfaufgabe bedarf. Aus den Ergebnissen können die Herausforderungen für die Prüftechnik sowie die Fügetechnik abgeleitet werden. Um die Problematik der Versuchsdurchführung und -bewertung zu verdeutlichen, werden im Folgenden die Ergebnisse von drei unterschiedlichen Versuchsreihen dargestellt. Geprüft wurden hier jeweils Referenzproben und gefügte Probekörper mit zwei unterschiedlichen Schaumkernen.

Die Schaumkerne weisen unterschiedliche Dichten auf, woraus abweichende mechanische Eigenschaften (z. B. Druckfestigkeit, Schubsteifigkeit) resultieren. Dabei übertreffen die mechanischen Kennwerte des Schaumkerns 1 die des Schaumkerns 2. Die Fügeverbindung wurde durch ein H-Profil realisiert, in das die Sandwichschelken eingeklebt wurden (vgl. Bild 1).

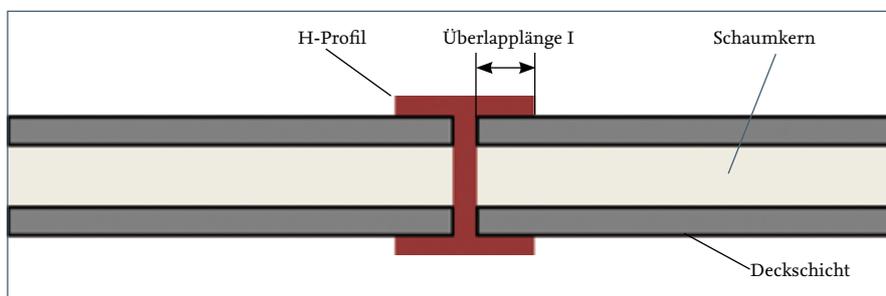


Bild 1: Schematische Darstellung der gefügten Sandwichstrukturen

Bild 2 zeigt die Ergebnisse einer Versuchsreihe zur Vierpunktbiegung. Die Kerndicke der Sandwichelemente beträgt 25 mm und die Überlapplänge 5 mm. Wie zu erwarten, übertrifft die ertragbare maximale Last des Sandwichkerns 1 aufgrund der besseren mechanischen Eigenschaften die ertragbare maximale Last des Sandwichkerns 2 deutlich. Beide monolithischen Referenzproben versagen durch das Eindringen der oberen Krafteinleitung in das Sandwich (engl. *Indentation Failure*, IF).

Im Gegensatz dazu zeigen sich bei den gefügten Sandwichstrukturen zwei unterschiedliche Versagensbilder, dargestellt in Bild 3. Während aus der Prüfung der gefügten Sandwichstrukturen mit dem Schaumkern 1 ein Versagen der Fügestelle resultiert (engl. *Joint Failure*, JF), versagen die gefügten Proben mit dem Schaumkern geringerer Dichte (Schaumkern 2) analog zu den Referenzproben durch das Eindringen der Krafteinleitungen in die Sandwichstruktur. Die maximale ertragbare Last liegt dabei annähernd auf dem Niveau der nicht gefügten Referenzproben mit dem gleichen Schaumkern. Ein Einfluss der Fügestelle auf das Prüfergebnis kann in diesem Versuch somit nicht nachgewiesen werden, da der Schaumkern maßgeblich das Prüfergebnis beeinflusst.

Die Ergebnisse veranschaulichen, dass eine Prüfung zur Bewertung der Fügstellenqualität mittels Vierpunktbiegung nur unter Berücksichtigung des Versagensverhaltens möglich ist. Insbesondere die mechanischen Eigenschaften des Kernwerkstoffs beeinflussen hier die Prüfergebnisse und verhindern eine objektive Bewertung der Fügstellen. Aufgrund der bestehenden Einschränkungen weist der Versuch somit auch keine generelle Eignung zur Prüfung von Fügstellen an Sandwichstrukturen auf.

Die Ergebnisse der Dreipunktbiegung bei gleicher Probenkonfiguration sind in Bild 4 dargestellt. Da die Krafteinleitung lediglich über einen Druckstempel erfolgt, liegen die ertragbaren Maximallasten um ca. 50 % unter denen der Vierpunktbiegung. Auch in diesem Versuchsaufbau versagen die Referenzproben durch das Eindringen der oberen

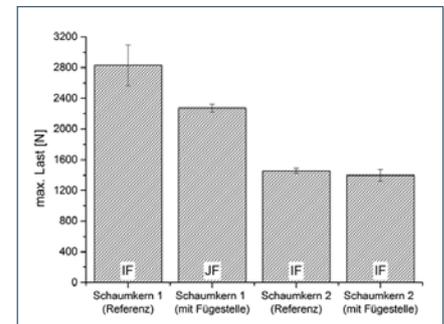


Bild 2: Ergebnisse der Vierpunktbiegeversuche an monolithischen und gefügten Sandwichstrukturen in Abhängigkeit vom Schaumkern (Kerndicke 25 mm)



Bild 3: Geprüfte Sandwichproben – oben Versagen der Fügestelle, unten Versagen durch Eindringen der Deckschicht in den Schaumkern

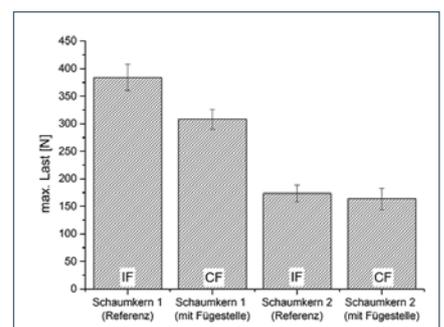


Bild 4: Ergebnisse der Dreipunktbiegeversuche an monolithischen und gefügten Sandwichstrukturen in Abhängigkeit vom Schaumkern (Kerndicke 25 mm)

Deckschicht in den Schaumkern. Zudem entspricht das Versagen der gefügten Proben mit dem Schaumkern höherer Dichte dem Ergebnis der Vierpunktbiegung, da es zum Versagen der Fügestelle kommt. Das Versagensverhalten der gefügten Proben mit dem Kernmaterial 2 ändert sich jedoch durch den modifizierten Prüfaufbau.



Bild 5: Versagen der Sandwichproben – oben Versagen durch Eindrücken des Sandwichs an der Krafteinleitung, unten Versagen durch Einknicken des Sandwich und Bruch der Deckschicht

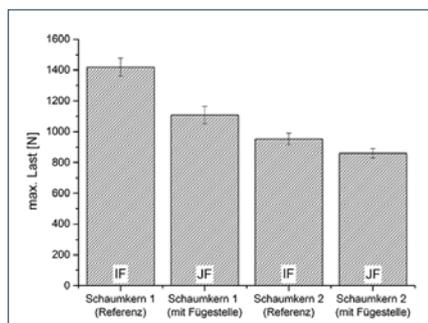
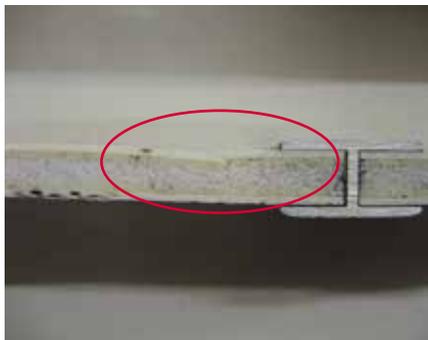


Bild 6: Ergebnisse der Dreipunktbiegeversuche an dünnen, monolithischen und gefügten Sandwichstrukturen in Abhängigkeit vom Schaumkern (Kerndicke 5 mm)

Durch die Lasteinleitung in das zum Fügen der Sandwichstrukturen genutzte H-Profil wird hier das Eindrücken der Deckschichten verhindert und es kommt auch in diesem Fall zum Versagen der Fugestelle. Dabei liegt die Versagenslast unterhalb der Tragfähigkeit der monolithischen Referenzstruktur, sodass in diesem speziellen Fall die Bewertung der Fugestelle möglich wird.

Demgegenüber zeigen weitere Versuchsreihen, dass auch die Dreipunktprüfung nur eingeschränkt zur Bewertung der Fugestellen von Sandwichstrukturen geeignet ist, da das Versagensverhalten durch den Kernwerkstoff beeinflusst wird. Dargestellt wird dies am Beispiel einer Probenreihe, bei der die Schaumkerndicke auf 5 mm reduziert wurde (Bild 5). Zum Fügen wurde in diesem Fall ein H-Profil mit einer Schenkellänge von 11 mm eingesetzt. Die Referenzproben versagen hier wiederum durch das Eindrücken des Druckstempels in das Sandwich (IF). Die gefügten Sandwichproben versagen hingegen durch ein Einknicken der Sandwichschenkel in unmittelbarer Nähe der Einspannung infolge des Eindrückens der Schaumkerne (engl. *Core Failure*, CF). Dabei kann es zusätzlich zum Bruch der oberen Deckschichten kommen. Das Einknicken der Sandwichschenkel ist auf zwei Faktoren zurückzuführen: Zum einen wird durch das H-Profil das Eindringen des Druckstempels in das Sandwich verhindert, zum anderen wirkt das Profil als lokale Versteifung, wodurch die Verformung des Sandwiches in diesem Bereich behindert wird.

Dieses Versagensverhalten wirkt sich unmittelbar auf die in den Versuchen ermittelten maximalen Lasten aus (Bild 6). Während es bei dem dichteren Kernmaterial zu einem deutlichen Abfall der maximalen Last kommt, liegt diese im Falle des leichteren Kerns für die gefügten Sandwiche auf dem Niveau der Referenzproben. Eine Aussage über die Fugestellenqualität kann somit anhand dieser Versuche nicht getroffen werden, da das Versagensverhalten bei der Tragfähigkeitsbewertung der Fugestellen berücksichtigt werden muss. Daraus folgt, dass auch die Dreipunktbiegung nur begrenzt dazu geeignet ist, das Tragverhalten von stumpf gefügten Sandwichstrukturen zu bewerten.

### Zusammenfassung und Ausblick

Durch die im Projekt durchgeführten Arbeiten konnten grundlegende Erkenntnisse zur experimentellen Bewertung der mechanischen Eigenschaften von Fügeverbindungen an Sandwichstrukturen gewonnen werden. Die dargestellten Ergebnisse zeigen exemplarisch die Herausforderungen und Einschränkungen von genormten Versuchen zur Bewertung der Tragfähigkeit gefügter Sandwichstrukturen. Um eine Bewertung der Prüfergebnisse ansatzweise zu ermöglichen und als Grundlage zur Optimierung der Fugestellen zu nutzen, ist es zwingend notwendig, das Versagensverhalten stumpf gefügter Sandwichstrukturen zu berücksichtigen. Des Weiteren konnte nachgewiesen werden, dass der Kernwerkstoff entscheidenden Einfluss auf das Tragverhalten hat und die Optimierung der Fugestelle in Abhängigkeit vom Kernwerkstoff erfolgen muss.

### Danksagung

Das Forschungsvorhaben „Lasteinleitung in Faserverbandsandwichstrukturen – Vergrößerung der Akzeptanz und Erleichterung der konstruktiven Auslegung durch Richtlinien und Normen (FaSaNorm)“ (Förderkennzeichen 01FS11008) wurde durch Mittel des BMWi gefördert. Die Verfasser bedanken sich ausdrücklich für diese Unterstützung.

Autoren:

Dipl.-Ing. Malte Mund

Dr.-Ing. Stefan Kreling

Ansprechpartner:

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

# Neues, volumetrisches Messverfahren zur Messung von Dehnungen in Klebstoffen

Dehnungsmessungen bilden in Kombination mit zerstörenden Prüfverfahren, z. B. anhand von Zug- oder Zugscherproben, die Basis für ein Materialverständnis bei unterschiedlichsten Last- und Umgebungsbedingungen. Eine Vielzahl von anwendungs- und materialspezifischen Dehnungsmessmethoden wurde daher entwickelt. Die bekannten Dehnungsmessmethoden, z. B. Dehnungsmessstreifen oder optische Bildkorrelationsverfahren, können jedoch nur Dehnungszustände erfassen, die an der Oberfläche auftreten und sich an einer zugänglichen Messstelle befinden. Bei der Untersuchung von Klebungen besteht darüber hinaus die gesonderte Herausforderung, dass die Klebschicht durch die Fügeiteile verdeckt wird, so dass viele Verfahren nur eingeschränkt nutzbar sind. Darin bestand die Motivation der Autoren, ein neues Verfahren zu finden, das das Dehnungsverhalten des Klebstoffes im kompletten Volumen messen kann.

Angewendet wird hierzu die In-situ-Computertomographie (CT) und ein Algorithmus zur Partikelverfolgung von Markern im Klebstoff (particle tracking). Anhand des entwickelten Verfahrens können wesentlich mehr Informationen als mit den bekannten mechanischen Dehnungsmessmethoden gewonnen werden, da das dreidimensionale Verformungsverhalten eines Messbereiches unter Lastbeaufschlagung gemessen und berechnet wird. Die damit gewonnenen Daten tragen zu einer wesentlich besseren Charakterisierung des mechanischen Verhaltens von Klebungen und somit auch zu einem vertieften Verständnis des Materialverhaltens bei.

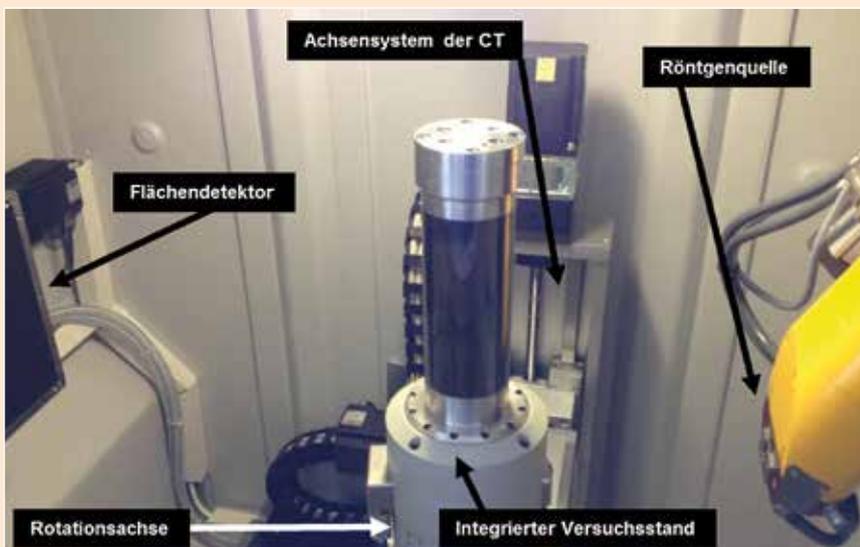


Bild 1: Versuchsaufbau zur In-situ-Belastung von Klebstoffproben im Computertomographen

## Grundprinzip der In-situ-Computertomographie

Ein Computertomograph (CT) besteht aus einer Röntgenquelle, einem Achssystem mit Rotationseinheit und einem Flächendetektor für Röntgenstrahlen (siehe Bild 1). Bei der Computertomographie wird die akkumulierte Absorption von Röntgenstrahlen einer Probe bei unterschiedlichen Winkeln aufgenommen und daraus anschließend mathematisch die volumetrische Verteilung in der Probe rückgerechnet. Bei einer In-situ-Messung wird der Probekörper zusätzlich während der Messung (z. B. durch Temperatur oder eine mechanische Belastung) verformt. CT-Messungen an Klebungen ermöglichen eine zerstörungsfreie dreidimensionale Darstellung der Klebschicht. Je nach Auflösungsverhalten der CT sowie Größe und Absorptionsverhalten lassen sich Fügeiteile, Klebschicht sowie darin vorhandene Poren und Partikel unterscheiden. Um eine Klebprobe im Computertomographen belasten zu können, ist ein spezieller Prüfstand notwendig.

## 3D-Dehnungsmessverfahren für Klebstoffe

Die In-situ-Computertomographie (CT) erlaubt die Bestimmung des dreidimensionalen Verschiebungsfeldes einer Klebung (siehe Bild 2). Hierzu werden dem Klebstoff Partikel beigemischt, die in den CT-Aufnahmen identifiziert und über mehrere CT-Aufnahmen bei unterschiedlichen Lasten hinweg nachverfolgt werden können. Im Gegensatz zu gängigen Dehnungsmessverfahren, die lediglich Oberflächendehnungen messen können, kann mit dem neuen Verfahren die Dehnung im Klebstoff zwischen zwei Fügeiteilen dargestellt werden.

**Eine Messung hat folgenden Ablauf:**

- CT-Messung im unbelasteten Zustand
- CT-Messung im belasteten Zustand
- Identifikation und Zuordnung der Partikel
- Berechnung des dreidimensionalen Verschiebungsfeldes

**Messergebnis an einer Klebstoffzugprobe**

Zur Analyse des Potenzials des Messverfahrens wurde eine Zugscherprobe einachsig auf Zug belastet und bei unterschiedlichen Belastungsstufen CT-Messungen durchgeführt (siehe Bild 3). Dabei wurde eine Zugscherprobe mit CFK-Substraten und einem zweikomponentigen Polyurethanklebstoff verwendet, dem 63 bis 80 µm große Glasperlen beigefügt wurden. Das in Bild 4 dargestellte Verschiebungsfeld zeigt das komplexe Verformungsverhalten der Zugscherprobe mit einem Anteil aus reinem Schub sowie einer an den Überlappenden überlagerten Schälbeanspruchung. Die gezeigten Verläufe können über dem gesamten Volumen analysiert werden. Die Autoren erhoffen sich, mit diesem Verfahren die Veränderung des Materialverhaltens der Klebstoffe, zum Beispiel nach einer Alterung oder zyklischen Belastung, näher untersuchen zu können. Die detaillierten Ergebnisse sind für die Veröffentlichung in einer kommenden Ausgabe des Journal of Adhesion angenommen.

Wir bedanken uns bei dem Institut für angewandte Mechanik für die gewährte Unterstützung bei dem In-situ-Prüfstand.

Autoren:

Dipl.-Ing. Holger Kunz  
Dipl.-Chem. Elisabeth Stamm

Ansprechpartner:

[h.kunz@tu-braunschweig.de](mailto:h.kunz@tu-braunschweig.de)

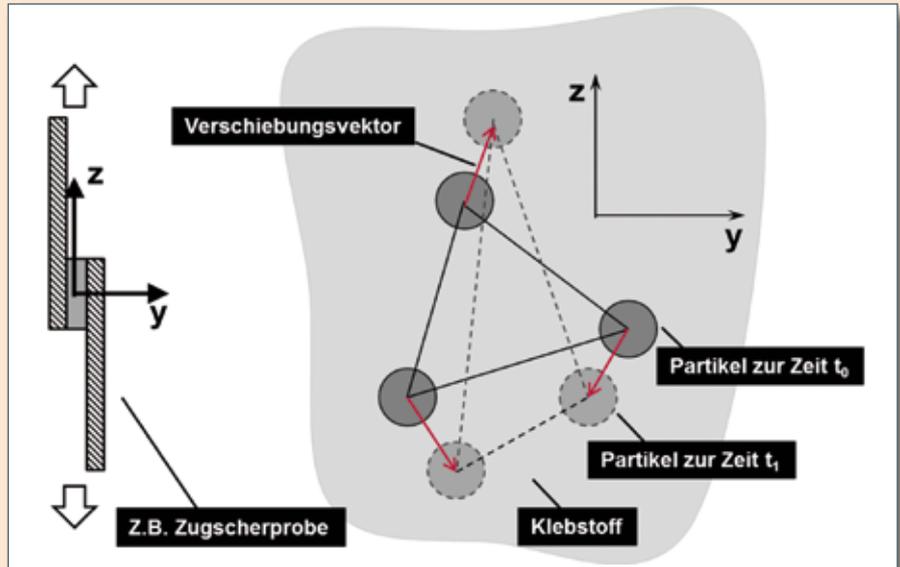


Bild 2: Schematische Darstellung zur Partikelverfolgung und Berechnung der Verschiebungen

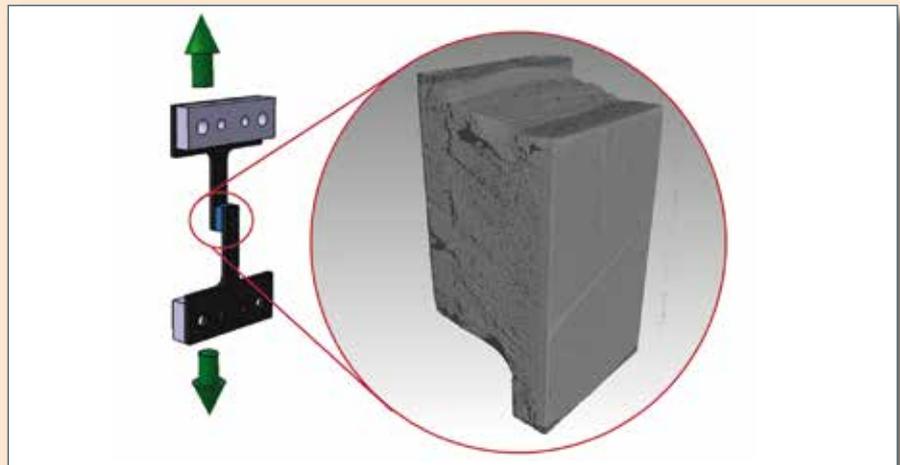


Bild 3: Geometrie der untersuchten Zugscherprobe (CAD, links) und dessen CT-Aufnahme (rechts)

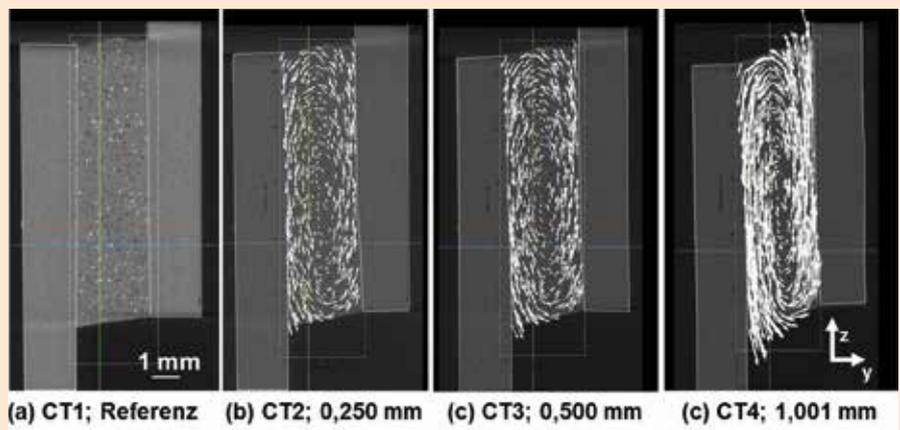


Bild 4: Verschiebungsfeld einer belasteten Zugscherprobe



## 2. Forum Fügetechnik

# Veranstaltungen

Am Freitag, dem 6. Februar 2015 fand das nunmehr zweite Forum Fügetechnik an der TU Braunschweig statt, bei dem aktuelle Themen aus Industrie und Forschung vorgestellt und diskutiert wurden. Die Veranstaltungsreihe wird seit 2014 vom *ifs* organisiert und soll sich immer am ersten Freitag im Februar als fester Termin in den Terminkalendern von Wissenschaftlern und Ingenieuren aus dem Umfeld des Institutes mit seinen verschiedenen Themenfeldern aus den Fügetechniken etablieren. Insbesondere auch alle ehemaligen Mitarbeiter und Doktoranden, welche die Arbeit des Instituts aus eigener Erfahrung kennen, sind hier angesprochen. Neben den aktuell mit dem *ifs* verbundenen wissenschaftlichen Mitarbeitern sind es die Ehemaligen, die einerseits einen Einblick in aktuelle Themen des *ifs* bekommen sollen sowie andererseits auch selbst durch einen Vortrag aus ihrem derzeitigen Tätigkeitsbereich ein fügetechnisches Thema präsentieren können.

Durch den zeitlichen Rahmen von nur einem Nachmittag ist die Anzahl der Themen natürlich begrenzt, jedoch konnten wieder neun Vorträge zu den Schwerpunkten Mischbau in der Automobiltechnik, Kleben und mechanisches Fügen, zerstörungsfreie Prüfmethoden und Elektromobilität am Beispiel des elektrisch angetriebenen Rennsportwagens des von Studenten organisierten *Lions Racing Teams* vorgestellt werden. Auch der aktuelle Stand zum Aufbau der beiden

„LabFactories“ wurde thematisiert. So wurde im Rahmen eines Vortrages zunächst der derzeitige Planungs- und Baufortschritt der Open Hybrid LabFactory (OHLF) in Wolfsburg dargestellt, am frühen Abend wurde der fachliche Teil des Forums dann mit dem Besuch der Battery LabFactory Braunschweig (BLB) abgeschlossen. Im Rahmen der BLB, welche sich in einem Nachbargebäude des Instituts für Füge- und Schweißtechnik befindet, forschen sieben Institute der TU Braunschweig interdisziplinär an der Fertigung von leistungsfähigen Traktionsbatterien (siehe Artikel Seiten 4-5). Der Besuch der BLB bot gleichzeitig auch die Möglichkeit, den E-Racer des *Lions Racing Teams* zu besichtigen (siehe Gruppenfoto).

Die Organisation des Forums Fügetechnik hatte in diesem Jahr wieder ein Team aus aktiven und ehemaligen Doktoranden bzw. Mitarbeitern in personeller Form von Erk Wiese und Kristian Lippyk übernommen. Eine ganze Reihe von Ehemaligen hat sich wieder einmal eingefunden und mit den aktuell am *ifs* aktiven Mitarbeitern ausgetauscht. Der Netzwerkgedanke wurde an diesem Freitag ebenfalls neu diskutiert, ein „Fügetechnik-Netzwerk“ in Vereinsform ist geplant. Das mehr kollegiale „Netzwerken“ konnte dann zur Abendveranstaltung wie im Vorjahr am Eintracht-Stadion an der Hamburger Straße im Clubraum des Restaurants Wahre Liebe ausklingen.

GrWi





## 36. Assistentenseminar Füge- und Schweißtechnik

Vom 05. – 07. Oktober 2015 fand zum 36. Mal das jährliche Assistentenseminar der Wissenschaftlichen Gemeinschaft Fügetechnik im DVS statt, der die schweißtechnischen Institute von RWTH Aachen, TU Berlin, TU Braunschweig, TU Chemnitz, TU Clausthal, TU Dresden und OVGU Magdeburg angehören. Die Organisation oblag in diesem Jahr dem *ifs* der TU Braunschweig, das diesmal in das Camp Reinsehen in der Lüneburger Heide einlud.

In 20 Fachvorträgen stellten die teilnehmenden Doktoranden ihre aktuellen Forschungsarbeiten vor, die sich unter anderem mit der Optimierung von Schweißprozessen, numerischer Schweißsimulation sowie den Auswirkungen des Schweißens auf den Werkstoffzustand befassten. In Anwesenheit der Professoren sowie

einiger Abteilungsleiter der beteiligten Institute entspann sich so ein ums andere Mal der fachliche Dialog. Darüber hinaus bot ein abwechslungsreiches Rahmenprogramm die Möglichkeit zum nicht-fachlichen Austausch. Neben einer abendlichen Fackelwanderung durch die Heide, bei der den Teilnehmern unter anderem die vorwiegend militärische Geschichte des Camps Reinsehen nähergebracht wurde, sorgte insbesondere der Besuch eines Kletterparks für Hochgefühle.

Vonseiten des *ifs* nahmen am diesjährigen Assistentenseminar außer Professor Klaus Dilger und Frau Dr. Helge Pries die Doktoranden Ann-Christin Hesse, Fabian Teichmann und Nico Hempel teil. Ein Tagungsband mit den wissenschaftlichen Beiträgen der Teilnehmer ist derzeit in Vorbereitung.

ViFi





Am 24. Juli 2015 fand zum ersten Mal der nun jährlich ausgetragene NFF-Cup statt. Insgesamt waren zehn Institute, die im Niedersächsischen Forschungszentrum Fahrzeugtechnik beteiligt sind, vertreten. Nach eingehender taktischer Schulung und diversen Konditionseinheiten hat sich das nun bestens vorbereitete ifS-Team mit dem klaren Ziel des Pokalgewinns am Sportzentrum eingefunden.

Die Abwehr vor

- Torwart Tobias Reincke wurde von den erprobten Verteidigern
- Michael Griese,
- David Blass und
- Malte Mund gebildet. Im Mittelfeld liefen neben Allroundtalent
- Christoph Mette die Konditionswunder
- Paul Diekhoff,
- Kai Mi Yang sowie
- Angelo Brunetti auf. Der Sturm wurde durch den
- „Bomber“ Vitali Fischer besetzt.

Der Auftakt begann mit einem Spiel gegen das ISF. Der Gegner wurde hierbei von Anfang an durch ein geschlossenes Mannschaftspressing stark unter Druck gesetzt und zu Fehlern gezwungen. Als Folge resultierten zwei schnelle Tore durch Fischer vom ifS-Team. Im Anschluss wurde die Führung souverän verteidigt und über die Zeit gebracht.

Im zweiten Spiel stand das legendäre „Langer Kamp“-Derby gegen das IWF an. Aufgrund eines fulminanten Startes ging das ifS kurz nach Anpfiff durch Mette in Führung. Nach einer schönen Kombination zwischen Fischer und Mette hieß es kurz nach Wiederanpfiff bereits 2:0. Die Abwehr um Blass und Griese hielt dem sich nun entwickelten Druck durch das IWF stand, sodass am Ende ein ungefährdeter 2:0 Derbysieg zu Buche stand.

Im dritten Gruppenspiel forderte das AIP den derzeitigen Gruppenersten heraus. Durch ein schnelles, äußerst unglückliches Eigentor nach einer Ecke lag das ifS nach zwei Minuten mit 0:1 zurück. Jedoch zeigte sich nun die Moral und die sich in den vorherigen Wochen gebildete Geschlossenheit des Teams. Insbesondere Abwehrspieler Mund zeigte seine Klasse und erzielte zwei Tore, wobei ein Tor nach einem Sololauf à la Messi geschossen wurde. Das Spiel endete mit einem souveränen 5:1 für das ifS. Die Ausgangslage in der Gruppe war nun klar. Ein Unentschieden im letzten Spiel gegen das IVB würde zum Gruppensieg reichen. Trotz eines verhaltenen Startes brillierte mit zunehmender Dauer das Mittelfeld um Yang, Diekhoff und Brunetti. Das IVB war chancenlos und verlor deutlich mit 1:6. Das ifS war damit klarer Gruppensieger mit 12 Punkten und 15:2 Toren und traf nun im Halbfinale auf das elenia.

Im Halbfinale entwickelte sich ein ausgeglichenes, taktisch geprägtes Spiel. Beide Mannschaften neutralisierten sich und kamen zu kleinen Torchancen. Kurz vor der Halbzeit ging das elenia durch einen falsch ausgeführten Freistoß in Führung. Allerdings besaß das ifS noch diverse Möglichkeiten, den Ausgleich zu erzielen, und scheiterte an der eigenen Chancenverwertung. Aufgrund des zunehmenden Risikos wurde nach einem Konter das 0:2 durch die starke Spitze des gegnerischen Teams erzielt. Das elenia war aufgrund der höheren Cleverness der verdiente Sieger dieses Halbfinals und gewann am Ende den ersten NFF-Pokal. Gratulation! Nach dem letzten Spiel wurde gemeinsam bei Grillfleisch und Bier das Turnier analysiert und der Abend klang langsam aus. Im Nachhinein möchten wir uns ganz herzlich beim NFF für die tolle Organisation dieses Fußballturniers bedanken. Wir freuen uns auf eine Wiederholung dieser Veranstaltung im nächsten Jahr.

Herzlichen Glückwunsch

# 8 neue Dokortitel seit unserer letzten Ausgabe



← **Sebastian Müller** überzeugte die Prüfungskommission Univ. Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger, Prof. Jens Friedrichs (IFAS) und Prof. Martin Fehlbier (Uni Kassel) am 5. Juni 2015. Seine Dissertation mit dem Titel **Berechnung der thermischen Ermüdung von Aluminium-Druckgießformen** erhielt das Prädikat „**summa cum laude**“. Die gewonnenen Erkenntnisse sind für die Auslegung einer optimierten Formkonstruktion sowie eines optimierten Gießprozesses einsetzbar.

**Oliver Krahn** → verteidigte seine Doktorarbeit „**Einfluss des Gießprozesses auf die Fügeignung von Aluminium-Druckgussbauteilen**“ am 18. Mai vor den Referenten Prof. Klaus Dilger und Prof. Michael Rethmeier (TU Berlin)



**Stefan Kreling** → promovierte am 18. März mit seiner Dissertation „**UV- bis M-IR-Laserstrahlung zur Klebvorbehandlung von CFK**“. Die Doktorarbeit stellt eine neue, technologisch und wirtschaftlich hochinteressante Methode zur Verarbeitung von Halbzeugen und Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen dar. Die Professoren Klaus Dilger und Martin Wiedemann waren die Referenten.



*Der Doktormantel... wird seit 2004 von den frisch gebackenen Doktoren am ifs signiert. Er trägt mittlerweile 26 Unterschriften.*

*Diese schöne Tradition brachte Professor Dilger ans Institut.*

*Alle Fotos auf dieser Doppelseite: A. Poschmann und S. Sternberg*



Die Dissertation von **Ilko Hartung** trägt den Titel „**Funktionale Beschichtung von Textilbetonbauteilen**“ und betrachtet die Möglichkeiten der Beschichtung unterschiedlicher Betonformulierungen zur Verbesserung der Medienbeständigkeit. Er hat sie am 16. März öffentlich vorgetragen. Referenten waren Prof. Klaus Dilger und Prof. Stefan Böhm (Uni Kassel), den Vorsitz hielt Prof. Christoph Herrmann (IWF), links im Bild.



Mit **Ruben Heid** freuten sich am 13. Januar seine Kollegen Thorsten Schuchardt und Christian Garthoff, seine Doktormutter Dr.-Ing. Helge Pries und rechts Weggefährte Sebastian Müller. Die Prüfung zum Thema „**Vergleichende Untersuchung verschiedener Warmarbeitsstähle unter seriennahen Bedingungen im Aluminiumdruckguss**“ wurde von den Professoren Klaus Dilger und Martin Fehlber abgenommen.



**Erk Wiese** erreichte den Titel „**Kleb- und prozesstechnische Bewertung des Falzklebens**“ ein. Am 17.12.2014 wurde er von Prof. Klaus Dilger und Prof. Klaus Dröder geprüft.



**Markus Weber** hat am 15.10.2014 mit Auszeichnung bestanden. Titel seiner Dissertation: „**Haftungsmechanismen kationisch vernetzender Haftklebstoffe für den Direktauftrag**“. Berichter waren Prof. Klaus Dilger und Prof. em. Gerd Habenicht (TU München).



**Christian Srajbr** verteidigte seine Arbeit im Juni 2014. Prof. Joachim Rösler hatte den Vorsitz, Prüfer neben Prof. Dilger war Prof. Böhm aus Kassel. Mit seiner Promotionsschrift „**Zerstörungsfreie Prüfung von Fügeverbindungen mit Induktions-Puls-Phasen-Thermografie**“ hat Christian Srajbr einen deutlichen Beitrag zur Qualitätssicherung der Fügechnik geleistet.





## AB 2015

Die Fachkonferenz AB wurde von Prof. Lucas da Silva in Porto ins Leben gerufen. Sie findet seit 2011 alle zwei Jahre an der Fakultät für Ingenieurwesen (FEUP) an der Universität Porto statt und erfreut sich seitdem wachsender Beliebtheit und Anerkennung im internationalen Konferenz-Kalendarium.

Zur 3. Internationalen Klebtechnik-Konferenz AB2015 in Porto (Portugal) Anfang Juli 2015 konnten mehrere ifs-Mitarbeiter aus den Abteilungen Klebtechnik und Leichtmetall-Druckguss Vorträge und auch ein Poster anmelden, um somit ihre Forschungsergebnisse aus laufenden oder kürzlich abgeschlossenen Projekten einem internationalen Fachpublikum vorzustellen. Der Schwerpunkt der AB2015 (Adhesive Bonding 2015) liegt auf dem sogenannten strukturellen Kleben, also dem strukturmechanisch festen oder hochfesten Kleben und den Fragestellungen der Berechnung und Beschreibung überlagerter Randbedingungen und Phänomene. Zusammen mit Prof. Robert D. Adams aus Großbritannien als Co-Chairman der Konferenz und einem internationalen Advisory Board konnte Prof. da Silva ein straffes Programm aus 105 Vorträgen und 44 Postern für die nur über zwei Tage laufende Konferenz zusammenstellen. Dabei wurden neben der Strukturmechanik von Klebungen (Kennwerte, konstruktive Aspekte) auch weitere Themenbereiche berücksichtigt, etwa die Applikations- und die Oberflächenbehandlungstechniken oder die Dauerhaftigkeit von Klebverbindungen. Diese wurden in 19 Vortrags-Sessions und einer Poster-Session thematisch gruppiert.

Typisch für die AB ist der Modus, die Einzelbeiträge zunächst nur als Vortrag oder Poster zu präsentieren, einen klassischen Tagungsband in gedruckter oder elektronischer Form gibt es nicht. Die Vortragenden werden vielmehr ermuntert, die vorgestellten Themen etwa zeitgleich zur Konferenz als Manuskript abzugeben und der Konferenz-Chairman verteilt die eingereichten Beiträge auf drei verschiedene internationale Journals mit klarem Klebtechnik-Schwerpunkt – dem „The Journal of Adhesion“, dem „International Journal of Adhesion and Adhesives“ sowie dem „Journal of Applied Adhesion Science“, wo Sonderausgaben zur Konferenz AB erscheinen. Alle Journals sorgen mit dem sogenannten „Peer-Reviewing“ im Vorfeld der Fachbeitrags-Produktion für eine kritische fachliche Durchsicht der dargestellten Themen. Die Gutachter geben auch Anregungen zur Verbesserung von einzelnen Manuskriptbestandteilen und stellen so die fachlich als auch sprachlich möglichst hochwertige Darstellung der einzelnen Themen in den Journals sicher.



Neben den eigenen Vorträgen waren einzelne *ifs*-Kollegen auch mit der Leitung einer Session betraut. Hier gilt es, die Vortrags- und Diskussionszeiten im Auge zu behalten und die Diskussion ggf. anzufachen oder am Leben zu halten. Die beiden Konferenztage wurden am Donnerstag mit der Poster-Session und am Freitag mit einer Stadtrundfahrt im Reisebus, dem Besuch einer Portwein-Kellerei und dem anschließenden Conference Dinner abgeschlossen. Gerade letztere Programmpunkte garantieren natürlich, dass praktisch alle Teilnehmer bis zum Ende der Veranstaltung teilnehmen und nicht schon vorzeitig vom Tagungsort abreisen, wie es bei so mancher Veranstaltung am letzten Tag häufig beobachtet werden kann.



Das Conference Dinner am Freitagabend im Restaurantbereich der Portwein-Kellerei bot neben dem guten Essen auch die Gelegenheit zu abschließenden Ansprachen der Chairmen und einer live gespielten musikalischen Unterhaltung. Auch bot sich die Gelegenheit, die beiden Konferenz-Preisträger für den besten mündlichen Vortrag und das beste Poster bekannt zu geben und die Buchpreise hierfür zu übergeben.



In diesem Jahr gingen beide Preise an Teilnehmer vom *ifs* der TU Braunschweig. Den Preis in der Kategorie „bester Vortrag“ erhielt Holger Kunz für sein Thema „Analysis of the micro-mechanical behaviour of adhesives under load using micro computed tomography“ (AB15\_126). Er konnte die Jury offensichtlich mit seiner Idee zur Messung des dreidimensionalen Verschiebungsfeldes in Klebstoffen unter Last mit Hilfe der Computertomographie (CT) überzeugen. Bei dem Verfahren werden CT-Aufnahmen einer geklebten Probe bei unterschiedlichen Lasten aufgenommen und anschließend kleinste Markerpartikel, die dem Klebstoff beigemischt werden, in den Aufnahmen nachverfolgt. Auf diese Weise kann die vollständige dreidimensionale Verteilung der Verschiebungen in der Klebschicht visualisiert werden. Weitere Details wurden im Beitrag auf Seite 41 beschrieben.



Holger Kunz – Bester Vortrag

In der Kategorie „beste Poster-Präsentation“ konnte Gregor Wisner ein gemeinsam mit dem Institut für Grundbau und Bodenmechanik (IGB) der TU Braunschweig gestaltetes Poster vorstellen zum Thema „Adhesive bonding of measurement equipment on impact-driven offshore monopile foundations“ (AB15\_103, Poster 39). Die Gestaltung des Posters wurde durch einen aufgeschnitten dargestellten Monopfahl für eine Offshore-Windenergieanlage dominiert. Die real etwa 60 m hohe und 6 m im Durchmesser große Stahlstruktur wurde in einem Forschungsprojekt mit ausschließlich geklebten Messeinrichtungen ausgestattet und in einem Offshore-Windpark eingerammt (s. a. Titelmotiv und Artikel Seite 6 ff). Hier konnte die Wahl des gesamten Kleb-Konzeptes für die Pfahl-Baustelle überzeugen. Die geklebte Messtechnik widerstand den Rammschlägen und zeichnete Beschleunigungen bis zum 1.200-fachen der Erdbeschleunigung in der Pfahlwand auf.

GrWi



Gregor Wisner – Bestes Poster

Autoren:

Dipl.-Ing. Gregor Wisner

Dipl.-Chem. Elisabeth Stammen

Ansprechpartner für:

- Untersuchung von Klebschichten mit Markerstoffen:  
[h.kunz@tu-braunschweig.de](mailto:h.kunz@tu-braunschweig.de)
- Geklebte Messeinrichtungen in einem Monopfahl  
[g.wisner@tu-braunschweig.de](mailto:g.wisner@tu-braunschweig.de)

# Studentischer Lehrpreis an der TU Braunschweig

Am 3. Juni 2015, dem Tag der Lehre der TU Braunschweig, wurden bereits zum dritten Mal besonders innovative Lehrveranstaltungen von Studierenden der TU Braunschweig ausgezeichnet.

Der LehrLEO wurde in den Kategorien „Beste Grundständige Lehre“, „Beste Vorlesung“, „Bestes Seminar/Beste Übung“ und „Bester Lehrauftrag“ verliehen. Der Preis soll Lehrveranstaltungen auszeichnen, welche die Begeisterung der Studierenden für ein jeweiliges Fachgebiet geweckt haben, um somit das Engagement für die Lehre zu würdigen.

Als „Bestes Seminar/ Beste Übung“ wurde von den Studierenden das Seminar *Technology Business Model Creation* des Lehrstuhls für Entrepreneurship am Institut für Füge- und Schweißtechnik gekürt. „Die Auszeichnung war auf jeden Fall ein sehr klares Signal, damit wir unser Lehrangebot noch weiter nach oben optimieren“, so Prof. Dr. Reza Asghari.

Das Seminar ermöglicht Studierenden der TU Braunschweig, der Ostfalia Hochschule und der HBK, technologieorientierte Geschäftsideen zu entwickeln.

In Kooperation mit mehreren Instituten und Forschungseinrichtungen erhalten die Studierenden die Möglichkeit, sich mit zukunftsorientierten Forschungsprojekten auseinanderzusetzen und für diese ein Geschäftsmodell zu formulieren. Die Teilnehmer erhalten so – neben einer generellen Einführung in das Thema Entrepreneurship – die Möglichkeit, praxisnah mit Hilfe des *Business Model Canvas* Unternehmensideen zu konkretisieren. Die vermittelten Fähigkeiten helfen den Studierenden auch bei der späteren Durchführung von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, indem neue Ansätze und Ideen für die wirtschaftliche Umsetzung ihrer Forschungsergebnisse aufgezeigt werden.

„Ich finde es extrem gut, dass in diesem Seminar Wirtschaft (industrielles Wissen) und das universitäre Know-how zusammengebracht wird. Man hat so die Möglichkeit, an Forschungsergebnisse der Uni heranzukommen und daraus ein Startup zu gründen.“ (Daniel Steinhauß, Student des Wirtschaftsingenieurwesens/ Maschinenbau der TU Braunschweig)

Als Preisgeld erhielten alle Preisträgerinnen und Preisträger ein Preisgeld in Höhe von 3.000 Euro zur Weiterentwicklung ihrer Lehre und natürlich den LehrLeo-Pokal. Der Lehrstuhl für Entrepreneurship bedankt sich herzlich bei allen Studierenden für ihre Unterstützung.

Weitere Informationen unter:  
[www.tu-braunschweig.de/entrepreneurship/](http://www.tu-braunschweig.de/entrepreneurship/)



Der Präsident der Technischen Universität Braunschweig, Professor Jürgen Hesselbach, gratuliert Professor Reza Asghari und seinen drei Teammitgliedern Oktay Erol, Lennart Büth und Samir Roshandel. Foto: teach4TU/Daniel Götjen

# Neuzugänge



**Julia Weimer**, M.Sc. hat Anfang des Jahres 2015 ihr Chemiestudium mit Schwerpunkt Polymerwissenschaften an der TU Darmstadt beendet. Seit Mitte September ist sie am *ifs* in der Abteilung Faser- und Werkstoffverbunde als wissenschaftliche Mitarbeiterin tätig und beschäftigt sich mit organisch vorbeschichteten Blechhalbzeugen für den hybriden Leichtbau.



Dipl.-Ing. **Tobias Jansen** ist seit August diesen Jahres wissenschaftlicher Mitarbeiter am *ifs* in der Abteilung Faser- und Verbundwerkstoffe. Im Rahmen der Battery LabFactory beschäftigt er sich mit dem Schneiden von Batteriefolie mittels Laser.



**Julian Brodhun**, M.Sc. hat im März 2015 sein Maschinenbaustudium an der TU Braunschweig abgeschlossen. Seit Juni 2015 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am *ifs* in der Abteilung Faser- und Werkstoffverbunde. Er beschäftigt sich mit dem mechanischen Fügen und Kleben von Mischbaustrukturen.



Dipl.-Ing. **Dirk Philipp** studierte an der TU Braunschweig Maschinenbau mit der Vertiefungsrichtung Energie- und Verfahrenstechnik. Als wissenschaftlicher Mitarbeiter untersucht er seit April 2015 am *ifs* den Verschleiß von Klebstoff-Dosieranlagen und entwickelt einen Schnelltest zur Verschleißquantifizierung.



**Fabian Teichmann**, M.Sc. hat an der Otto-von-Guericke-Universität in Magdeburg Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau mit Fachrichtung Produktionstechnik studiert und war während seiner Masterarbeit in der Konzernforschung der Volkswagen AG tätig. Seit Januar 2015 ist er am *ifs* und befasst sich hier mit dem Elektronen- und Laserstrahl-schweißen von Aluminium-Druckgusslegierungen.



Dipl.-Ing. **Cecil Roos** absolvierte 2014 das Studium der Luft- und Raumfahrttechnik an der TU München mit Schwerpunkt Leichtbau und Berechnung. Seit September vergangenen Jahres am *ifs*, liegt sein Arbeitsschwerpunkt im Bereich der Simulation von Haftung.



**Vitali Fischer**, M. Sc. hat an der Universität Paderborn Maschinenbau studiert und ist seit August 2014 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am *ifs* in der Abteilung Klebtechnik beschäftigt. Schwerpunkt seiner Arbeit ist die Vorbehandlung und Aktivierung von schwer klebbaren Polymeroberflächen mit Hilfe von Atmosphärendruck-Plasma.



**Tobias Reincke**, M.Sc. hat im Anschluss an sein duales Studium bei Airbus sowie des Wirtschaftsingenieurwesens im Bereich Maschinenbau an der TU Braunschweig zum 1. 8. eine Stelle als wissenschaftlicher Mitarbeiter am *ifs* in der Abteilung Faser- und Werkstoffverbunde angenommen. Seine Aufgabe ist die Erforschung hybrider Materialien und Fertigungstechnologien im Rahmen der „Open Hybrid LabFactory“ am Standort Wolfsburg.



**Julian Steinberg**, M.Sc. hat an der Universität Paderborn Wirtschaftsingenieurwesen - Fachrichtung Maschinenbau studiert und ist seit Juli 2014 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am *ifs* tätig. In der Abteilung Faser- und Werkstoffverbunde beschäftigt er sich mit dem mechanischen Fügen von Multimaterialbauweisen und ist zusätzlich am Projekt „Open Hybrid LabFactory“ beteiligt.



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-bs@tu-braunschweig.de](mailto:jfs-bs@tu-braunschweig.de)  
[www.jfs.tu-braunschweig.de](http://www.jfs.tu-braunschweig.de)

## IMPRESSUM

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

