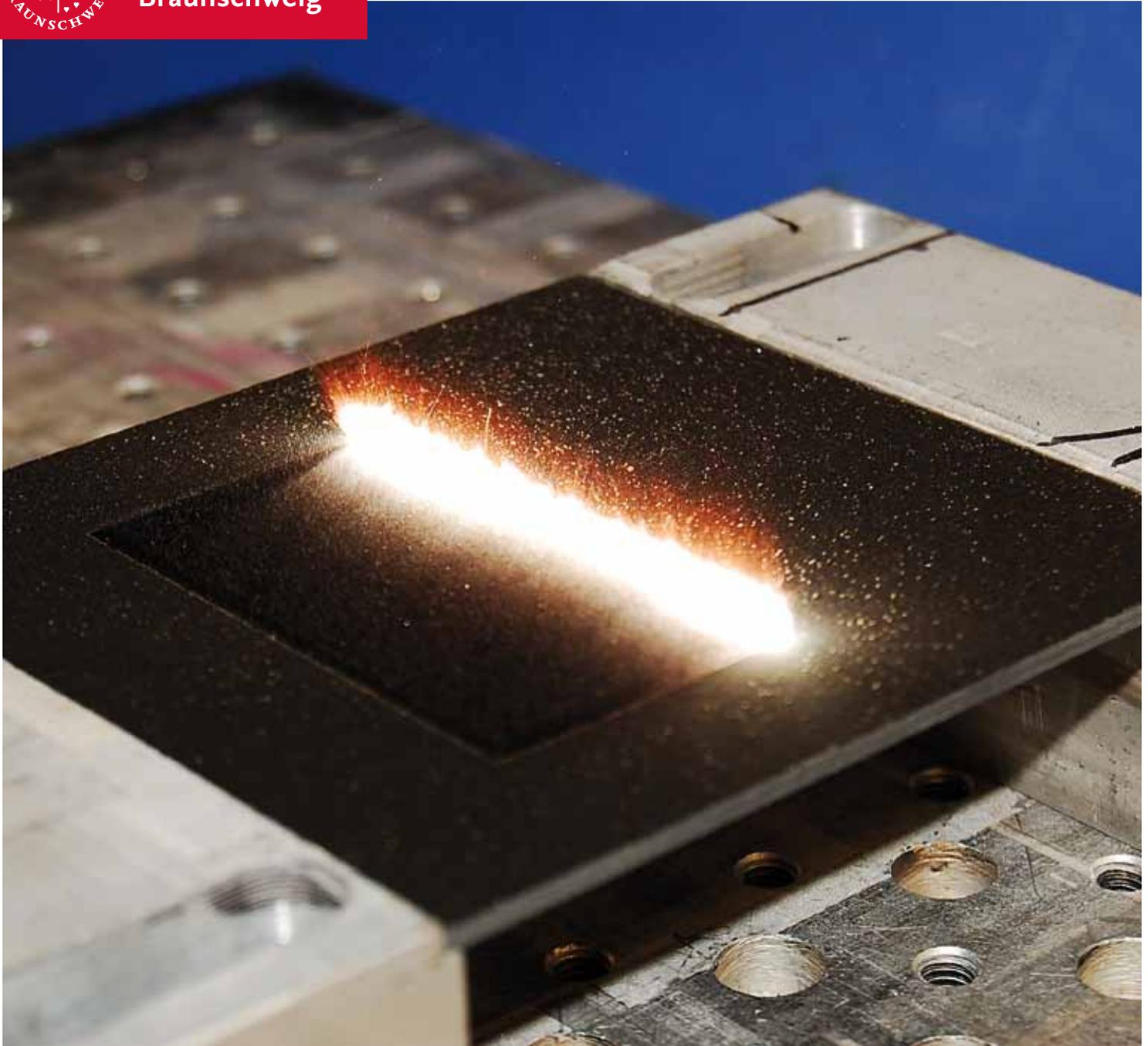




Technische  
Universität  
Braunschweig

Institut für Füge- und  
Schweißtechnik

*ifs*



# report

7. Jahrgang | Ausgabe 1 | 2012

# Liebe Freunde der Fügetechnik



Geschäftsführender Leiter  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h. c. Klaus Dilger

Noch vor der Sommerpause möchten wir Ihnen eine kleine Auffrischung bezüglich der Arbeiten und sonstigen Ereignisse am und rund um das *ifs* geben.

Viel Energie ist in den vergangenen Monaten aufgewendet worden, um die Bewerbung „Open Hybrid LabFactory – Materialentwicklung und Produktionstechnologie für den wirtschaftlichen und multifunktionalen Leichtbau“ im Rahmen der Forschungscampusinitiative des BMBF zu erarbeiten, die federführend vom *ifs* koordiniert wurde. Näheres zu diesem spannenden Thema finden Sie im vorliegenden *ifs report*.

Weiter ist über die Ausweitung unseres Strahltechniklabors zu berichten. Neben unserer neuen Elektronenstrahlschweißanlage K26-3 von pro-beam haben wir den TRUMPF TruDisk-Laser, verbunden mit einem Laserbearbeitungszentrum, hier neu installiert. Unter anderem nutzen wir diesen Laser, um mit dem Laserstrahlschweißen unter reduziertem Druck qualitativ sehr hochwertige Schweißungen von z. B. Zahnrädern oder Aluminium-Druckgussbauteilen herzustellen. Auch hierzu mehr im *ifs report*.

Im Rahmen der Lehre ist es uns gelungen, aus Hochschulpaktmitteln und aus den Mitteln der Studiengebühren Ausstattungen für bestehende und auch für neue Labore zu akquirieren.

So wird in Zusammenarbeit mit dem IWF derzeit ein Labor zur Kunststoffverarbeitung aufgebaut, das unter anderem über eine Spritzgießanlage verfügt. Im Untergeschoss wird ein Raum zu einem Multifunktionslabor umgebaut, um zukünftig in den gut ausgestatteten Laboren auch unter angemessenen Rahmenbedingungen arbeiten zu können. Wir hoffen, auch in der nächsten Mittelvergaberunde wieder erfolgreich zu sein. Es ist angedacht, in Zusammenarbeit mit Professor Sinapius – Leiter des neuen Instituts für Adaptronik und Funktionsintegration – das Faserverbundlabor erheblich zu erweitern, um den Studierenden damit auch die Möglichkeit zu geben, größere und komplexere Bauteile herstellen zu können. Neben diesem finden Sie viele weitere interessante Forschungsergebnisse und weitere Neuigkeiten, auch rund um unser Institut und unsere Forschungsaktivitäten.

Ich bedanke mich für Ihr Interesse am Institut und unserer Arbeit, wünsche Ihnen Spaß beim Lesen und eine hoffentlich angenehme und erholsame Sommerzeit!

# Klebvorbereitung per Lasertechnik

Besonders bei faserverstärkten Kunststoffen ist die Vorbehandlung für eine strukturelle und dauerhafte Klebverbindung entscheidend. Ein am *ifs* verfolgter Ansatz besteht darin, durch den Einsatz von Laserstrahlung Trennmittel und andere Kontaminationen zu entfernen, um somit das Potenzial dieser Werkstoffklasse besser nutzbar zu machen.

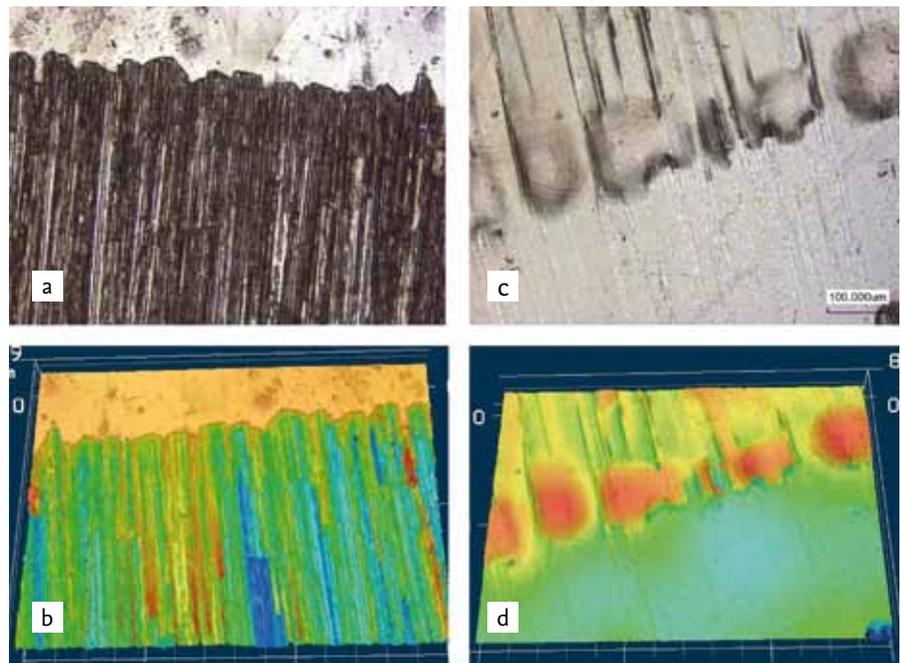


Abbildung 1: Mittels LSM (konfokales Lasermikroskop) aufgenommene Oberflächenbilder von laservorbereiteten CFK Oberflächen

Im Zuge der ständig steigenden Bemühungen zur Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von Flug- und Fahrzeugen spielt der Werkstoffleichtbau eine wachsende Rolle. In den letzten Jahren sind dabei vor allem faserverstärkte Kunststoffe in den Fokus gerückt. Um das Potenzial dieser Leichtbauwerkstoffe optimal auszunutzen, sind die entsprechenden Fügeverfahren hier von entscheidender Bedeutung.

Im Flugzeugbau werden bisher Faserverbundbauteile am häufigsten durch Niete gefügt. Dieses Verfahren hat jedoch den entscheidenden Nachteil, dass durch die eingebrachten Löcher die hauptlasttragenden Fasern unterbrochen werden und es zusätzlich zu Spannungsspitzen im Randbereich der Verbindungselemente kommt. Darüber hinaus entsteht durch das Eigengewicht der Niete, besonders bei mehrreihig genieteten Leichtbaukonstruktionen,

ein nicht zu vernachlässigender Gewichtszuwachs.

Ein hohes Leichtbaupotenzial faserverstärkter Kunststoffe liegt im Kleben. Durch die erzielbare flächige Krafteinleitung, welche ohne eine Schädigung der Fasern geschieht, können Spannungsspitzen vermieden und somit eine deutlich erhöhte Materialausnutzung ermöglicht werden. Aufgrund der häufig aus dem Fertigungsprozess auf den Oberflächen verbleibenden Trennmittelrückstände ist jedoch für eine sichere und dauerhafte Klebverbindung eine Vorbehandlung der Oberflächen unerlässlich.

## Konventionelle Verfahren

Die am weitesten verbreitete Methode zur Klebvorbereitung von Faserverbunden ist das manuelle Schleifen. Dabei wird mechanisch die oberste Matrixlage und damit

auch die auf ihr bestehenden Kontaminationen abgetragen. Wesentliche Nachteile dieses Prozesses sind zum einen die händische Ausführung, die einen hohen Prozess- und Personalaufwand zur Folge hat, und zum anderen die vergleichsweise geringe Prozesskontrolle und Reproduzierbarkeit. Eine Schädigung der Fasern kann beim Schleifen nicht ausgeschlossen werden. Die oberste Matrixlage kann auch durch konventionelle Partikelstrahlverfahren mechanisch entfernt werden. Allerdings kann auch in diesem Fall eine Schädigung der Fasern eintreten. Durch die Staubbildung sind eine Einhausung sowie eine Nachreinigung der Oberflächen bei beiden Verfahren zwingend notwendig.

Insbesondere im Flugzeugbau werden häufig Abreißgewebe, sogenannte Peel-Plies, zur Klebvorbehandlung verwendet. Diese Gewebe werden während der Bauteilherstellung in die Oberfläche eingelegt und direkt vor dem Kleben entfernt, wodurch eine Oberfläche mit definierter Topographie entsteht. Kontaminationen der Oberfläche werden gemeinsam mit dem Gewebe und der obersten Matrixlage entfernt. Die Nachteile bestehen zum einen darin, dass ein zusätzliches Halbzeug benötigt wird, zum anderen wurden in verschiedenen Veröffentlichungen Rückstände des Abreißgewebes sowie Trennstoffreste nachgewiesen, welche zu einer Verschlechterung der Klebfestigkeit führen. Ein weiterer erheblicher Nachteil bei der Verwendung dieser Methode besteht darin, dass sie nicht für eine Reparatur geeignet ist, da in den Klebbereichen nachträglich kein Peel-Ply eingebracht werden kann.

Aus diesen Gründen wurde im Rahmen des AiF ZIM Projektes „MOLAB“ der Einsatz von Festkörperlasern zur Klebvorbehandlung von Faserverbundwerkstoffen untersucht. Durch den Einsatz der gepulsten Laserstrahlung wurden in einem weitgehend thermischen Prozess die oberste Matrixlage und mit ihr eventuelle Kontaminationen und Trennmittelrückstände entfernt. Die Herausforderung bestand dabei darin, die Prozessparameter so einzustel-

len, dass einerseits ein vollständiger Abtrag erfolgt, jedoch andererseits durch die eingebrachte Energie keine Schädigungen verursacht werden.

Die verwendeten Festkörperlaser sind aufgrund ihrer Robustheit und kleinen Bauweise auch für die mobile Bearbeitung, z. B. im Reparatursatz, geeignet. Ein weiterer Vorteil besteht in der Strahlübertragbarkeit mittels Lichtwellenleiter, die die Bearbeitung von großen und dreidimensionalen Bauteilen sowie eine Automatisierung ermöglicht.

#### Versuche und Ergebnisse

Im Projekt wurden zwei in der Luftfahrt gängige CFK-Materialien mit duroplastischer Matrix verwendet und mit einem ebenfalls luftfahrtzugelassenen Folienklebstoff geklebt. Im ersten Schritt erfolgte eine Parametervariation und Analyse der erzielten Oberflächen mittels Licht-, Laser- und Elektronenmikroskop. Die Abbildung 1 zeigt dazu im konfokalen Lasermikroskop aufgenommene Oberflächen nach der Laserbehandlung. Die Abbildungen 1a und 1b zeigen vollständig freigelegte Fasern und den Übergangsbereich zwischen unbehandeltem und vorbehandeltem Bereich. In den Abbildungen 1c und 1d ist zu sehen, dass die Fasern nicht freigelegt wurden und es im Randbereich der bearbeiteten Zone zu Ablösungen zwischen Matrixharz und Fasern gekommen ist.

Das Versagensverhalten nach der Laserbehandlung im Zugscherversuch kann mit diesen Ergebnissen korreliert werden. Bei den in den Abbildungen 1c und 1d dargestellten Oberflächen kommt es zum Versagen innerhalb der abgelösten Harzschicht (vgl. dazu Abbildung 2c).

Dabei tritt das Versagen bei niedrigeren Kräften auf, verglichen mit den geschliffenen Referenzproben (vgl. Abbildung 3). Eine intensivere Vorbehandlung, bei der die Matrixschicht vollständig entfernt wurde, führt zur Delamination unterhalb der obersten Faserlage (Abbildung 2d). Bei Auswahl der richtigen Parameter werden

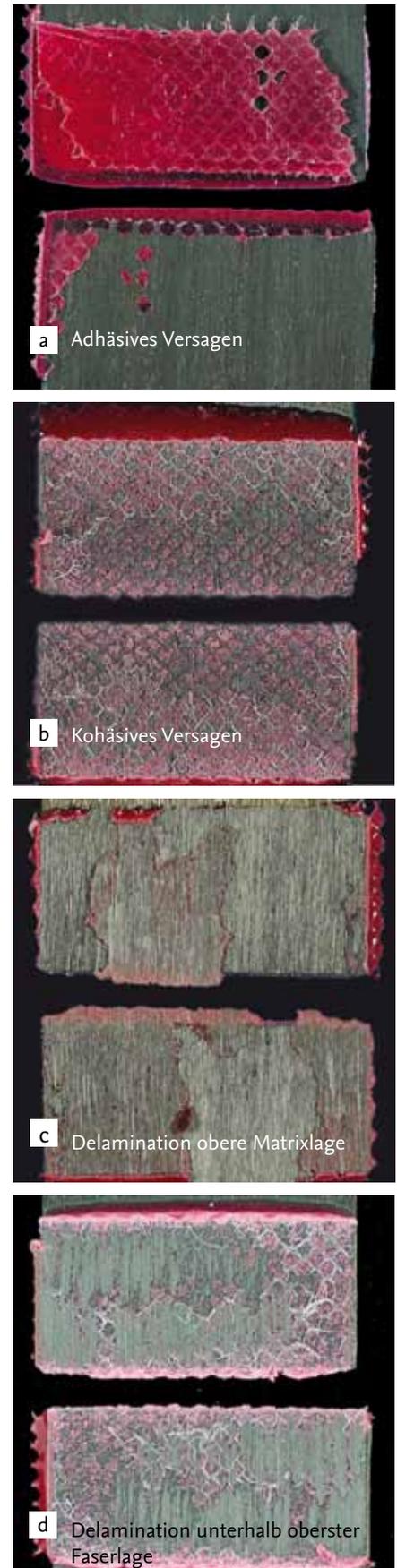


Abbildung 2: Bruchbilder von verschiedenen vorbehandelten CFK Zugscherproben

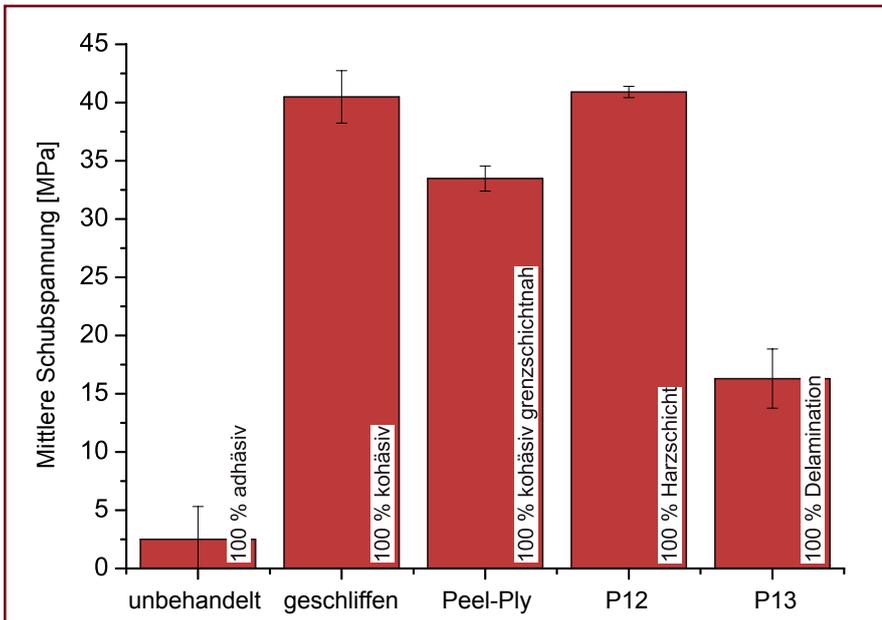


Abbildung 3: Verbindungsfestigkeiten vorbehandelter CFK Proben: unbehandelt, geschliffen, Peel-Ply und Laserparameter P12 und P13

trotz der auftretenden Delaminationen die Festigkeiten der geschliffenen Referenzen erreicht (Abbildung 3).

Die Verbindungsfestigkeiten von nicht vorbehandelten Proben gegenüber Vergleichsproben, bei denen vor dem Kleben ein Abreißgewebe entfernt wurde, werden mit den laservorbehandelten Proben deutlich übertroffen.

Weiterführende Zugscherversuche an Proben mit einer bei höheren Temperaturen härtenden Matrix zeigen, dass das Auftreten von Delaminationen stark von der verwendeten Matrix abhängig ist. Mit diesem

Material wurde nach der Laservorbereitung kohäsives Versagen im Klebstoff bei Erreichen der Festigkeit der geschliffenen Referenzen erreicht. Somit wird das Potenzial des verwendeten Klebstoffes vollständig ausgenutzt.

#### Zusammenfassung und Ausblick

Im Projekt MoLaB konnte am *ifs* gemeinsam mit dem Projektpartner Clean-Lasersysteme GmbH gezeigt werden, dass für ausgewählte Matrixharzsysteme eine effektive Klebvorbehandlung von Faserverbundkunststoffen mittels Festkörperlaser realisierbar ist. Untersuchungen an gewobenen

Materialien und Materialien mit stark schwankender Matrixharzdicke (z. B. genähte Rovings) zeigen, dass in diesem Bereich die Anwendung problematisch ist, da es teilweise zu inhomogenem Abtrag oder Matrixharzresten an den Oberflächen kommen kann. Es gilt also für den konkreten Anwendungsfall noch weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten vorzunehmen und die entsprechenden Prozessparameter an das Material und die gegebenen Anforderungen anzupassen.

Weitere geplante und bereits begonnene Arbeiten beschäftigen sich mit dem Einsatz anderer Wellenlängen (CO<sub>2</sub>-Laser im MIR-Bereich und moderne Excimerlaser im UV-Bereich) sowie mit der Vorbehandlung von Faserverbundmaterialien mit thermoplastischer Matrix, die insbesondere im Automobilbau für Mittel- und Großserienanwendungen von stetig wachsendem Interesse sind. Sowohl für thermoplastische als auch für duroplastische Matrixsysteme werden außerdem Atmosphärendruckplasmavorbehandlung und neuartige, staubfreie Partikelstrahlverfahren betrachtet.

#### Danksagung

Das Projekt MoLaB wird gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Das Projekt erfolgt in enger Zusammenarbeit mit der Clean-Lasersysteme GmbH.



REM Aufnahme von laserbehandeltem CFK – freigelegte Fasern

Autoren:

Dipl.-Ing. Stefan Kreling

Dr. rer. nat. Fabian Fischer

Ansprechpartner:

[s.kreling@tu-braunschweig.de](mailto:s.kreling@tu-braunschweig.de)

Weniger Spritzer,  
schönere Nähte:  
Wer hätte gedacht,  
dass es von Vorteil ist,  
die teure Vakuumtechnik  
des Elektronenstrahl-  
schweißens mit dem  
energieärmeren Strahl  
eines Festkörperlaser  
zu vereinen.

## Unter Tiefdruck



Abbildung 1:  
Metaldampffackel und Spritzerbildung beim Laserstrahlschweißen mit Festkörperlaser bei verschiedenen Drücken

Neueste Strahlquellen mit hervorragenden Strahlqualitäten haben dem Laserstrahlschweißen eine Vielfalt neuer Anwendungen ermöglicht. Auch das Schweißen größerer Blechdicken ist somit zunehmend möglich. Dennoch existieren Restriktionen, die ihre Ursache unter anderem im Zusammenhang Wellenlängen-Spritzerbildung, wie bei der Anwendung von CO<sub>2</sub>-Lasern bzw. Festkörperlaser, oder der spezifischen Ausbildung von Dampfkapillare und Dampffackel unter den vorliegenden atmosphärischen Bedingungen haben. Hier existiert als Alternative das Elektronenstrahlschweißen, das einerseits erhebliche Einschweißstiefen ermöglicht, andererseits aufgrund der systemimmanenten Prozessführung im Vakuum (ca. 10<sup>-3</sup> mbar) atmosphärische Einflüsse eliminiert. Nachteilig sind hier allerdings, neben im Allgemeinen höheren Investitionskosten, der Pumpaufwand zur Erzeugung des Vakuums und die Röntgenstrahlung, die aufgrund des Abbremsens der hochbeschleunigten Elektronen entsteht. Es stellt sich folglich die Frage: Ist es möglich, durch die Kombination von Prozessanteilen des Elektronen- und des Laserstrahlschweißens die Vorteile der beiden Verfahren zu vereinigen oder kumulieren die Nachteile?

In einem laufenden Forschungsprojekt wird der Versuch unternommen, eine solche neue Technologie zu erforschen, umzusetzen und für den Markt zugänglich zu machen. Das Forschungsprojekt erfolgt unter Mitwirkung der TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH, der pro-beam AG & Co. KGaA – einem der führenden deutschen Hersteller von Elektronenstrahltechnologie – sowie dem Institut für Füge- und Schweißtechnik der TU Braunschweig. Der Ansatz besteht hier darin, einen TRUMPF-Scheibenlaser als Strahlquelle zu nutzen und den Prozess im Vakuum zu führen, wobei in diesem Zusammenhang der Begriff Vakuum weiter zu fassen ist. Es handelt sich um Drücke zwischen 10 und 500 mbar, so dass der Pump- und Anlagenaufwand im Vergleich zum Elektronenstrahlschweißen erheblich minimiert werden kann. In der Praxis führt dies tatsächlich zu einer Vereinigung der positiven Effekte beider Verfahren, dargestellt im Folgenden hauptsächlich bezüglich der Qualität der Schweißung.

Beim konventionellen Laserstrahlschweißen kann es unter bestimmten Randbedingungen bezüglich Schweißnahtgeometrie und Prozessparametern dazu kommen, dass der ausströmende Metalldampf auf die Schmelzschicht an der Kapillarrückwand trifft und bei Überwindung der Oberflächenspannung die Ablösung von Schweißspritzern bewirkt. Spritzer führen in der Produktion zu einer Vielzahl ernsthafter Probleme, wie Ablagerungen und Anhaftungen auf der Blechoberfläche sowie zusätzlicher Verschmutzung des Schutzglases. Zusätzlich stellen Schweißspritzer einen

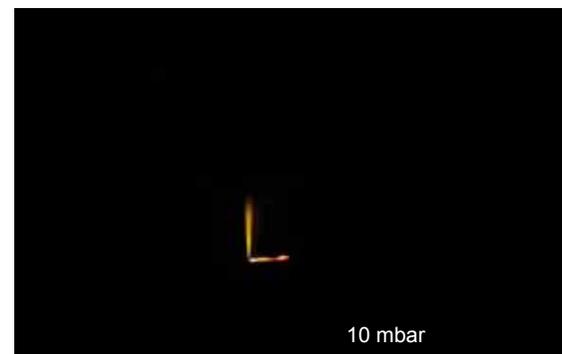
der Technik darstellt. Den Lösungsansatz für die beschriebene Spritzerproblematik stellt hierbei der reduzierte Druck in der Prozessumgebung des Schweißvorganges dar. Der reduzierte Umgebungsdruck führt in erster Linie zu einer Veränderung der beim Laserstrahlschweißen mit Festkörperlaser typischen Metalldampffackel (vgl. Abbildung 1). Die Fackel bei Schweißungen unter Atmosphärenbedingungen wirkt sehr hell und prägt sich zudem sehr hoch und breit aus. Es kommt zu einer starken Spritzerbildung rund um das Schweißbad. Bereits eine geringe Druckabsenkung



500 mbar



100 mbar



10 mbar

Materialverlust in der Naht dar, der zu äußeren Unregelmäßigkeiten, wie z. B. Nahtfall, Randkerben oder Löchern führen kann. Ein Festigkeitsabfall der Schweißnaht und die Beeinträchtigung der Lebensdauer des Bauteiles sind die nachteiligen Folgen.

Die Problematik der Spritzerbildung tritt primär beim Schweißen größerer Blechdicken mit Festkörperlasern auf, CO<sub>2</sub>-Laser zeigen hier verfahrensbedingt ein weniger stark ausgeprägtes Spritzerregime. Vor allem bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten steigt die Spritzerbildung bei Verwendung von Festkörperlasern stark an. Demzufolge existiert eine Diskrepanz zwischen qualitativen und ökonomischen Interessen, die sich mit zunehmender Schweißtiefe weiter vergrößert. Aus den beschriebenen Gründen existieren demnach Laserstrahlschweißanwendungen, welche dem CO<sub>2</sub>-Laser bisher weitestgehend vorbehalten sind, wie z. B. der Getriebebau. Anhaftende Spritzer könnten sich andernfalls im Betrieb lösen und so zu einem Ausfall des Gesamtsystems führen. Festkörperlaser konnten dadurch bislang keinen Durchbruch in diesem Wirtschaftszweig erzielen. Jedoch hat die Entwicklung der hochbrillanten Laserstrahlquellen mit ihrer hervorragenden Strahlqualität und ihrem vergleichsweise hohen Wirkungsgrad dazu geführt, dass diese Laser für industrielle Zwecke heutzutage favorisiert werden. Aus wirtschaftlichem Interesse, insbesondere aus Gründen der Energieeffizienz und der Fertigungsflexibilität, wird der Festkörperlaser von der Industrie zunehmend gefordert, vorausgesetzt die erreichbare Schweißnahtqualität lässt dies zu.

Um langfristig die steigenden Effizienz- und Qualitätsanforderungen zu befriedigen, wurde eine innovative Möglichkeit beim Schweißen mit Festkörperlaser erprobt, die bislang nicht den Stand

führt zu einer sichtbar schmalere Ausbildung der Fackel und einer deutlichen Abnahme der Anzahl von Schweißspritzern. Eine weitere Verminderung des Druckes auf 100 mbar führt dazu, dass die Metalldampffackel in ihrer Ausprägung weiter reduziert wird und sich ausschließlich über die Fügestelle erstreckt. Laserstrahlschweißungen in diesem Druckbereich lassen nur noch vereinzelte Spritzer erkennen. Ab einem Umgebungsdruck von 10 mbar wird die Fackel vollständig unterdrückt, und die Spritzerbildung wird gänzlich unterbunden. Auf den Oberflächen der geschweißten Bauteile sind insbesondere auch bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten keine anhaftenden Spritzer vorzufinden. Begründet durch den reduzierten Druck entstehen Schweißnähte, die qualitativ mit Elektronenstrahlnähten vergleichbar sind. Es ist gelungen, 10 mm dicken Baustahl mit 6 kW Laserleistung und einem Vorschub von 2 m/min in einer sehr guten Nahtqualität ohne jegliche Unregelmäßigkeiten durchzuschweißen. Unter Atmosphärendruck sind Schweißnähte dieser Qualität selbst mit einem CO<sub>2</sub>-Laser nicht zu erreichen.

Der reduzierte Umgebungsdruck lässt jedoch nicht nur die Unterdrückung der Metalldampffackel und somit ein spritzerfreies Schweißen zu. Zudem ergeben sich weitere charakteristische Merkmale und Besonderheiten in der Schweißnahtqualität. Bei gleichen Prozessparametern bewirkt die Absenkung des Druckes eine Erhöhung der Einschweißtiefe und eine ausgeprägte Veränderung der Nahtgeometrie. Mit einer Laserleistung von 6 kW ist es im Grobvakuum bei 10 mbar gelungen, eine 25 mm tiefe Einschweißung in einem Stahlblech zu erzeugen. Diese Schweißiefen sind unter atmosphärischen Bedingungen, vor allem unter dem Aspekt der zugrundeliegenden Leistung, nicht realisierbar.

Abbildung 2:  
Entwicklung der  
Schweißnähte durch  
Reduzierung des  
Umgebungsdrucks

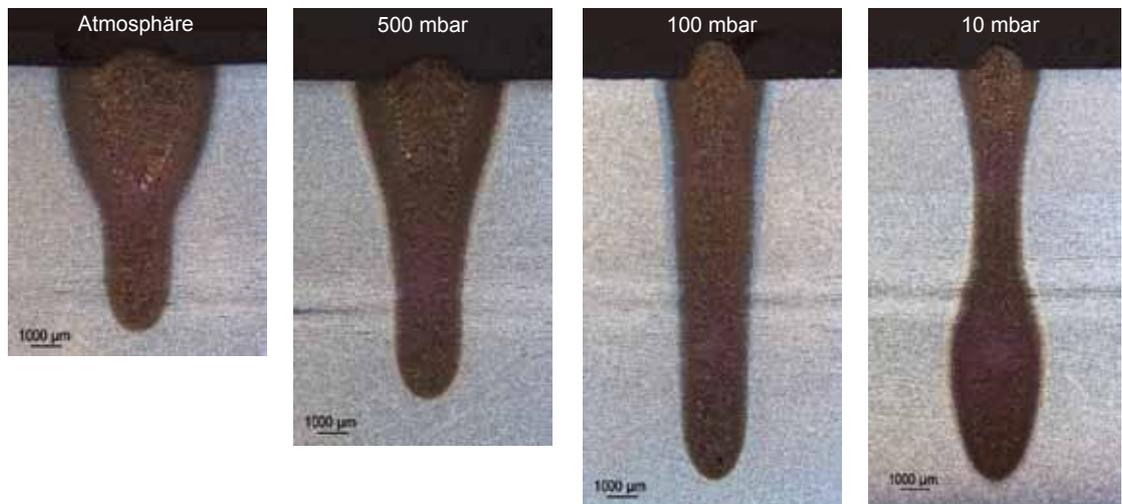


Abbildung 2 zeigt die Veränderung der Schweißnahtgeometrie, welche ausschließlich durch die Reduzierung des Umgebungsdruckes hervorgerufen wurde. Die konventionell hergestellte Naht besitzt eine relativ breite Nahtberraupe und nimmt die Form eines Nagelkopfes an. Die Nahtbreite nimmt mit sinkendem Druck ab, die Aufschmelzung des Materials hat jetzt vornehmlich in der Tiefe stattgefunden. Bei einem Druck von 100 mbar bilden sich Schweißnähte mit einem großen Aspektverhältnis und parallelen Nahtflanken aus. Eine Druckreduzierung um eine weitere Zehnerpotenz führt zu einer deutlichen Veränderung der Geometrie der Schweißnaht. Die Einschweißtiefe bleibt weitestgehend erhalten, jedoch wird im Querschliff eine vasenähnliche Form der Nahtgeometrie sichtbar. Die wesentlichen Merkmale dieser Vasenform sind die Taille in der Nahtmitte und eine bauchige Verbreiterung im Wurzelbereich. Es hat hier den Anschein, als sei die Kaustik des Laserstrahls im Querschliff „eingefroren“.

Das Verfahren „Laserstrahlschweißen bei reduziertem Druck“ besitzt weiteres Potenzial bei der Lasermaterialbearbeitung. Insbesondere im Dickblechbereich besteht bei Durchschweißungen ein entscheidender Vorteil darin, dass das „Durchsacken“ der Naht komplett vermieden werden kann. Trotz der für eine Durchschweißung benötigten höheren Energie zeigen Schweißnähte mit 10 mm Tiefe keinen Nahteneinfall oder Wurzeldurchhang. Bei Schweißungen unter Atmosphärendruck wäre dies undenkbar, da der extrem hohe Leistungsüberschuss zu einem starken Nahteneinfall und Wurzeldurchhang führen würde. An Blechen mit 3 mm Wanddicke können die bei einer Durchschweißung auftretenden typischen Randkerben durch den Einsatz von reduziertem Druck ebenfalls vermieden werden.

Die Besonderheiten und Merkmale des Laserstrahlschweißens bei reduziertem Druck zeigen deutliche Qualitätsverbesserungen hinsichtlich Spritzerbildung und nahtgeometrischer Eigenschaften.

Das Verfahren verspricht dadurch erhebliche Effizienzsteigerungen in bestehenden Märkten und die Erschließung einer Vielzahl neuer Anwendungsfelder. Überall dort, wo erhöhte Anforderungen an die Schweißnahtqualität bestehen, ist ein Einsatz des Verfahrens denkbar, beispielsweise im Bereich der Powertrain-Fertigung der Automobilindustrie. Auf Basis der in diesem trilateralen Projekt gesammelten Erkenntnisse erfolgte die Beantragung eines öffentlich geförderten Forschungsvorhabens, in dem das Verfahren „Laserstrahlschweißen bei reduziertem Umgebungsdruck“ mit Festkörperlasern für hochqualitative Bauteile des Getriebebaus qualifiziert werden soll. Mit den angestrebten Forschungsergebnissen soll das bisher nur geringfügig ausgeschöpfte Potenzial der Festkörperlaser für die industrielle Praxis erschlossen werden.

Ausgehend von der im Vergleich zu CO<sub>2</sub>-Lasern energieeffizienteren Strahlerzeugung und flexibleren Strahlführung führt der wirtschaftliche Vorteil über die höhere Leistungsdichte direkt zu höheren Schweißgeschwindigkeiten und somit kürzeren Fertigungszeiten. Diese wiederum führen letztendlich zu einer höheren Produktivität und zu erheblich reduzierten Gesamtprozesskosten. Bei Erreichung der hohen Anforderungen an die Einhaltung von Toleranzen sowie insbesondere Spritzerfreiheit der Bauteile nach dem Schweißprozess können kostenintensive Nachbehandlungsschritte entfallen, und das Laserstrahlschweißen rückt zum Beispiel an das absolute Ende der Fertigungskette zur Zahnradherstellung.

Autoren:  
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christian Börner  
Dr.-Ing. Thomas Krüssel  
Ansprechpartner:  
[ch.boerner@tu-braunschweig.de](mailto:ch.boerner@tu-braunschweig.de)

# Untersuchung der Eigenspannungen unter mehrachsiger Beanspruchung in Rundschweißverbindungen aus hochfesten Stählen

Der folgende Artikel beschreibt das Ziel und erste Ergebnisse des DFG-Forschungsprojektes FA992/1-1 mit dem Titel: „Eigenspannungsabbau in Schweißverbindungen aus hochfesten Stählen unter mehrachsiger Beanspruchung“. Die Untersuchung des Eigenspannungsabbaus erfolgt dabei unter Variation der Parameter Werkstofffestigkeit, Ausgangshöhe der Schweißeigenspannungen, Spannungsamplitude und Mittelspannung.

Trotz allgemein gesicherter Kenntnisse über die Bedeutung von Eigenspannungen für die strukturelle Sicherheit von Bauteilen bestehen hinsichtlich der Bedeutung von Eigenspannungen bei Schweißkonstruktionen nach wie vor Unsicherheiten. Diese basieren primär auf mangelnden Kenntnissen über das Verhalten der Eigenspannungen während der drei Phasen der Ermüdung, d. h. anrissfreie Phase, Rissbildungs- und Rissfortschrittsphase. Hierbei ist vor allem der Zusammenhang zwischen der Ausgangshöhe der Eigenspannungen, den Werkstoffeigenschaften und dem resultierenden Relaxationsverhalten mehrachsiger Eigenspannungen bei mehrachsiger Beanspruchung ungeklärt, so dass bisher keine eindeutigen Validierungsmodelle existieren.

Das Ziel des Projektes ist es daher, die Zusammenhänge zwischen Werkstoffzustand, Schweißnahtgestalt und Ausgangseigenspannungen bei zweiachsiger quasistatischer und zyklischer Beanspruchung zu analysieren. Dabei soll der Eigenspannungsabbau unter den beschriebenen Bedingungen quantitativ untersucht und daraus die Wirksamkeit der Eigenspannungen für die Schwingfestigkeit aufgezeigt werden. Ziel soll es sein, den Einfluss von Schweißeigenspannungsfeldern auf die Lebensdauer geschweißter Verbindungen in Normen und Regelwerken zu integrieren.

Zu diesem Zweck wird das Relaxationsverhalten von makroskopischen Schweißeigenspannungen an zylindrischen Stumpfnahtrproben unter Zug-Druck-, Torsions- und kombinierter Zug-Druck-/Torsionsbeanspruchung (phasengleich und phasenverschoben) systematisch untersucht. Die Untersuchungen erfolgen an Stählen, die bei schwingbeanspruchten Konstruktionen bereits weit verbreitet sind (S355J2H) bzw. künftig verstärkt eingesetzt werden sollen (S690QL).

Abbildung 1:  
Rundschweiß-  
verbindung unter  
Torsionsbeanspruchung

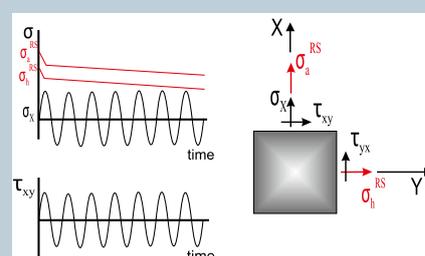
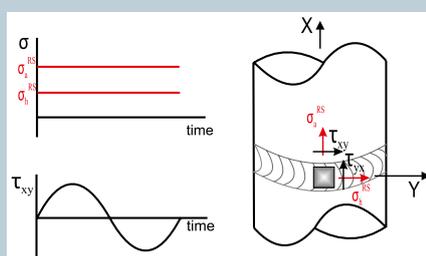


Abbildung 2:  
Zyklische Axial- und Torsionsbelastung mit der Betrachtung des Eigenspannungszustandes

Eigenspannungen unterliegen denselben Gleichgewichtsgesetzen wie sie auch für Lastspannungen, die durch externe Beanspruchungen erzeugt werden, gelten. In Abbildung 1 ist eine Rundschweißverbindung unter zyklischer Torsionsbeanspruchung dargestellt. Die Axial- und Umfangseigenspannungen der Oberfläche sind in x-Richtung bzw. y-Richtung abgebildet. Die zeitveränderliche Scherbeanspruchung, kombiniert mit Eigenspannungskomponenten in x- und y-Richtung, führt zu einer Änderung der Hauptspannungsrichtung mit der Zeit, was als Beispiel für eine nichtproportionale mehrachsige Beanspruchung betrachtet werden kann.

Für eine weitere Betrachtung zeigt Abbildung 2 ein infinitesimales Element innerhalb des Schweißgutes einer Rundschweißverbindung. Die Schweißnaht unterliegt einer zyklischen Axialbelastung in x-Richtung und einer zyklischen Torsionsbelastung in Umfangsrichtung, mit einer konstanten phasengleichen Amplitude (in-phase). Ohne Berücksichtigung der Eigenspannungen stellen die auf das Element ausgeübten Beanspruchungen einen proportionalen mehrachsigen Belastungszustand dar. Werden die Eigenspannungskomponenten in Betracht gezogen, wird der Belastungszustand jedoch nichtproportional.

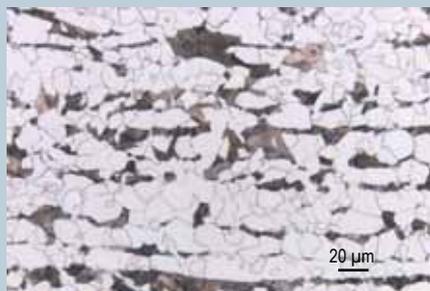
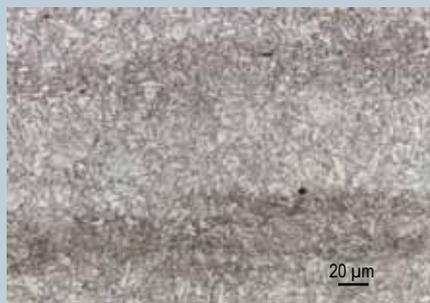


Abbildung 3a: Ferritisch-perlitisch, 180 HV10 (oben) und 3b: Bainitisch-martensitisch, 310 HV10 (unten)



Der Beanspruchungszustand wird komplexer, wenn das Bauteil zusätzlich Mittelspannungen (Zug oder Torsion) ausgesetzt ist. Dies bedeutet letztendlich, dass die Berücksichtigung von Eigenspannungen zu der Problemstellung nichtproportionaler mehrachsiger Ermüdung führt, was wiederum in wesentlich komplizierteren Zusammenhängen resultiert.

Im Gegensatz zu belasteten Komponenten – deren externe Beanspruchung konstant bleibt – können Schweißeigenspannungen während einer zyklischen Belastung abgebaut werden. Somit liegt hier eine nichtproportionale mehrachsige Ermüdung vor, bei der einzelne Eigenspannungskomponenten mit der Zeit abgebaut werden können und deren Abbau von der mehrachsigen zyklischen Belastung abhängt.

Von entscheidender Bedeutung ist die genaue Bestimmung der anfänglichen Schweißeigenspannungsfelder. Die ausgewählten und kontrollierten Schweißparameter für jede Probe führen zu unterschiedlichen Eigenspannungszuständen, je nachdem, ob eine behinderte Schrumpfung oder Phasenumwandlung als dominanter Mechanismus zur Entstehung von Schweißeigenspannungen wirkt.

Die Bestimmungen der Oberflächeneigenspannungen in vier Querschnitten der geschweißten Proben (Q1 bis Q4) wurden mittels Röntgenbeugungsverfahren durchgeführt (Abb. 4). Im Gegensatz zu flachen S355J2H-Proben wurden in axialer Richtung Druckeigenspannungen bei Rundschweißverbindungen am Schweißnahtübergang festgestellt.

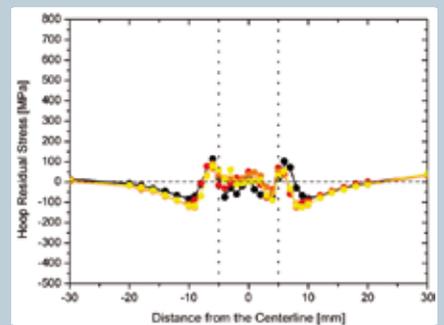
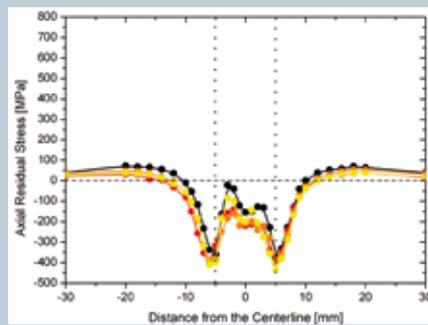
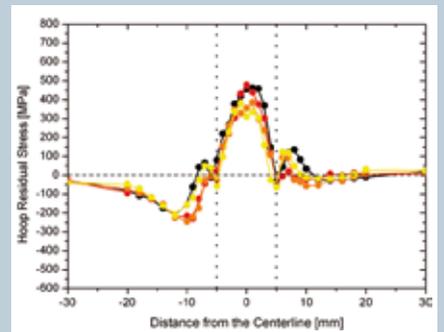
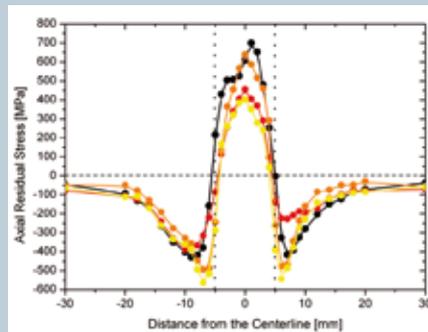
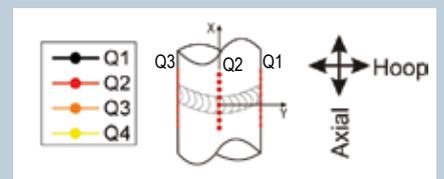


Abbildung 4: Axial- und Umfangseigenspannungen an Blindnahtproben aus S355J2H (oben) und S690QL (unten) mit einer Streckenergie von 3,6 kJ/cm.



### Experiment

Es wurden WIG-geschweißte Proben aus S355J2H und S690QL hergestellt. Die metallurgische Analyse der Grundwerkstoffe zeigte eine ferritisch-perlitische Mikrostruktur mit einer durchschnittlichen Härte von 180 HV10 für S355J2H (Abb. 3a) und eine bainitisch-martensitische Mikrostruktur mit einer Härte von 310HV10 für S690QL (Abb. 3b).



Bei den Umfangseigenspannungen an der gleichen Stelle handelt es sich wiederum um Zugeigenspannungen. Bei S690QL-Schweißnähten mit denselben Schweißparametern liegen höhere Eigenspannungen vor als bei S355J2H. Wie erwartet, hat die höhere Streckgrenze von S690QL zu vergleichsweise höheren Eigenspannungen geführt.

Zur Bestimmung des Eigenspannungsfeldes werden die Synchrotron- und Neutronenbeugungsverfahren als ergänzende Messverfahren benutzt. Die Bereiche, in denen diese Beugungsverfahren die Eigenspannungen jeweils bestimmen können, sind in Abbildung 5 schematisch dargestellt.

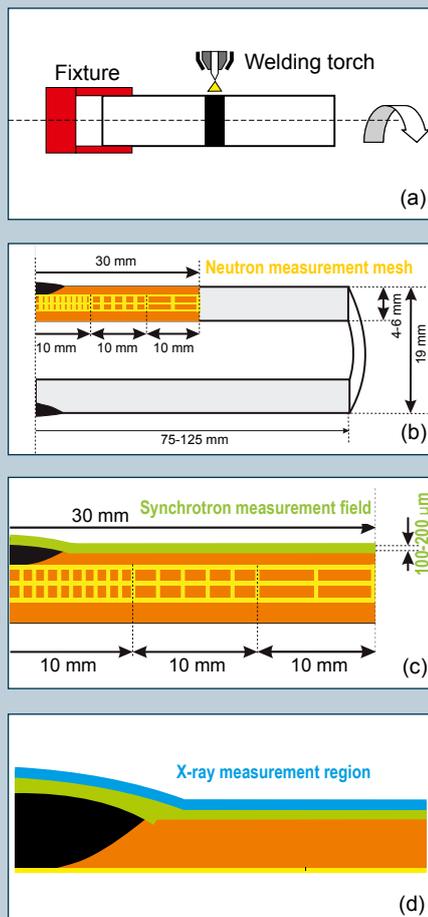


Abbildung 5:  
a) Schematische Darstellung der Probenherstellung  
b) Gitter für die Neutronenbeugungsverfahren  
c) Informationstiefe für Synchrotronbeugung  
d) Informationstiefe für Röntgenbeugung.

Um die bei der Entwicklung von Schweißigenspannungen eingesetzten Mechanismen zu beschreiben, wurden Temperaturmessungen mit Hilfe von Thermoelementen durchgeführt (Abb. 6).

Die in der ersten Phase des Projektes erzielten Ergebnisse werden auf der Internationalen Eigenspannungstagung (ICRS9), die im Oktober dieses Jahres in Garmisch-Partenkirchen stattfindet, zur Diskussion gestellt. In der zweiten Phase des Projektes wird das Verhalten von Schweißigenspannungen unter axialen oder/und torsionalen Beanspruchungen untersucht.

Das vorgestellte Projekt wird über eine zweijährige Laufzeit von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt und finanziell gefördert. Der Autor dankt der DFG für die großzügige Unterstützung.

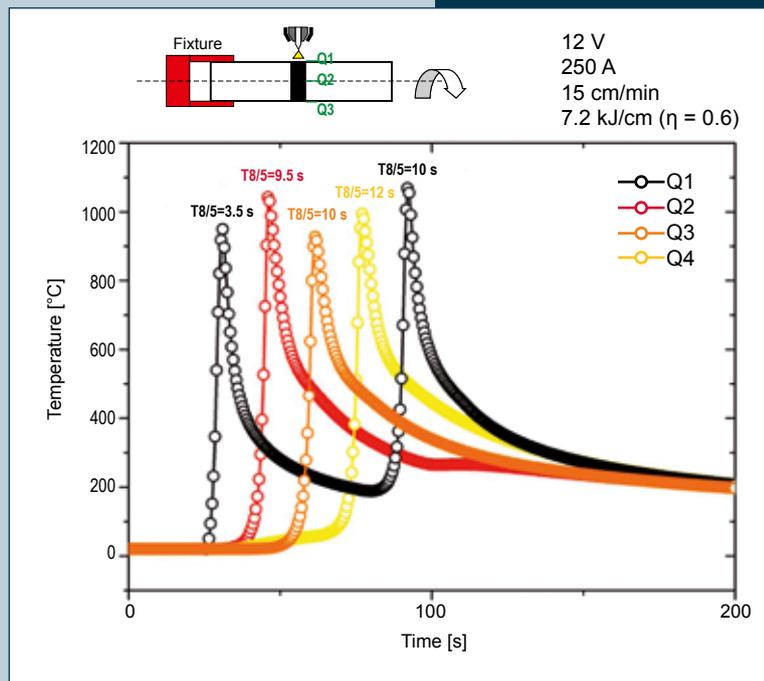


Abbildung 6:  
Temperaturmessung in der wärmebeeinflussten Zone während des Schweißens zur Beschreibung der Mechanismen des Eigenspannungsaufbaus.

Projektleiter und Ansprechpartner:  
Dr. -Ing. Majid Farajian  
m.farajian@tu-braunschweig.de

Abteilung:  
Festigkeit und Bauteilverhalten  
Dr. -Ing. Thomas Nitschke-Pagel

# Bewerbung zur Förderinitiative „Forschungs-Campus – öffentlich-private Partnerschaft für Innovationen“ des BMBF

Unter dem Motto „Open Hybrid LabFactory – Materialentwicklung und Produktionstechnik für den wirtschaftlichen und multifunktionalen Leichtbau“ hat das Niedersächsische Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF), vertreten durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger, am 15. Februar 2012 eine Bewerbung zur Förderinitiative beim koordinierenden Projektträger in Jülich eingereicht.

Der Fahrzeugleichtbau stellt die Grundlage für einen energieeffizienten Fahrzeugbetrieb dar. Nur mit erheblich leichteren Fahrzeugen können die ehrgeizigen CO<sub>2</sub>-Reduktionen bis zum Jahr 2050 dargestellt werden. Bei den gängigen Leichtbaukonzepten sind jedoch sowohl die Energie- und Ressourceneffizienz in der Fahrzeugherstellung problematisch als auch die Kosten, die durch den Einsatz alternativer Materialien und Prozesse entstehen und ein Vielfaches der Kosten herkömmlicher Fahrzeugkomponenten aus-

machen. Um sowohl eine positive Energiebilanz als auch Kundenakzeptanz zu finden, besteht ein zwingender Ansatz darin, neuartige hybride Werkstoffkonzepte zu erarbeiten.

Diese hybriden Werkstoffkonzepte setzen – beanspruchungs- und kostenabhängig – gezielt unterschiedliche Werkstoffe ein und kombinieren diese, nach Möglichkeit unter Nutzung bestehender Prozessketten, mit robusten und großserientauglichen Prozessen.



Dabei soll gewährleistet werden, dass diese Prozesse in bestehende Fertigungsstraßen und Fabriken integriert werden können.

Um Mobilität künftig noch umweltbewusster zu gestalten, müssen unter anderem neue Antriebskonzepte und die Reduzierung des Fahrzeuggewichtes konsequenter vorangetrieben werden. Erst die Durchdringung dieser Technologien in großvolumige Fahrzeugsegmente mit hohen Stückzahlen wird einen spürbaren Beitrag zur Erfüllung der Umweltziele leisten.

umsetzen möchte, ist am Standort Wolfsburg die Open Hybrid LabFactory geplant. Diese soll ausgehend vom Campus Wolfsburg des Niedersächsischen Forschungszentrums für Fahrzeugtechnik (NFF), wo Fahrzeugkonzepte entwickelt werden, aufgebaut werden. Die vor Ort ansässigen Industrieunternehmen und anderen Einrichtungen bieten dabei hervorragende Voraussetzungen für den Aufbau eines Forschungscampus mit fahrzeugorientiertem und produktionstechnischem Hintergrund.



Einbettung der Open Hybrid LabFactory in den Campus Wolfsburg – ein leistungsfähiges und innovatives Umfeld

Um diesen Zielen näher zu kommen, möchte das Niedersächsische Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF) gemeinsam mit regionalen Unternehmen und internationalen Technologieführern der Branche – wie der Volkswagen AG, der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt (DLR), dem CFK-Valley e.V. aus Stade sowie weiteren Instituten der Niedersächsischen Technischen Hochschule (NTH) – ein neues Kapitel zum bezahlbaren Leichtbau aufschlagen. „Durch den Aufbau einer 'Forschungsfabrik', zu der alle Institutionen und Partner Zugang haben und gemeinsam an seriennahen Werkstoffen und Fertigungsverfahren arbeiten, können die Ziele des Kooperationsprojektes schnell, unbürokratisch und effektiv erreicht werden“, resümiert Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger, der für das NFF Koordinator der Bewerbung zur Förderinitiative Forschungscampus, der Open Hybrid LabFactory, ist.

Mit einem aus Wirtschaft und Wissenschaft gebildeten Konsortium, das Technologien für neue und kostengünstige Konzepte des Automobilleichtbaus entwickeln und diese in Fertigungstechnologien

Im Detail ist das Vorhaben zweiteilig zu betrachten. Zum einen ist dort die Errichtung der LabFactory – der Infrastruktur – mit integrierten Projekthäusern und Büroflächen vorgesehen, zum anderen können mittels dieser Infrastruktur die Aktivitäten des Forschungscampus in Form von öffentlich geförderten und bilateralen Forschungsprojekten durchgeführt werden. Zusätzlich wird die Region mit den bestehenden Einrichtungen, wie dem MobileLifeCampus und dem InnovationsCampus der Wolfsburg AG, zu einem Ort des intensiven Austausches von Forschung und Industrie. Weiterhin wurden innerhalb der Volkswagen AG am Standort Wolfsburg durch den Geschäftsbereich „Komponente“ in direkter Nähe zur geplanten Open Hybrid LabFactory die Kompetenz-Center „Kunststofftechnik“ und „Werkzeugbau“ eingerichtet, deren Infrastruktur und Know-how im Rahmen des Aufbaus und des späteren Betriebs der Open Hybrid LabFactory zur Durchführung von Forschungsarbeiten genutzt werden können.



Teilnehmer des 1. Abstimmungstreffens zur Open Hybrid LabFactory am 20. April 2012 in Wolfsburg

Bereits heute wurden innerhalb dieser Kompetenz-Center mehr als 30 Dissertationen unter Beteiligung der Institute des Niedersächsischen Forschungszentrums Fahrzeugtechnik (NFF) realisiert. Im Zuge dieser Ausrichtung bildet die Open Hybrid LabFactory ein Forum für vorwettbewerbliche Innovationen, die in die Volkswagen-internen Kompetenz-Center überführt werden können und auch den anderen Projektpartnern zur Verfügung stehen. Somit ist ein schneller Marktzugang sichergestellt, was den Wettbewerb fördert und eine hohe Erfolgsquote bei der Umsetzung der entwickelten Technologien neuer Materialien und Produktionsverfahren garantiert.

Bei einem ersten Abstimmungstreffen am 20. April 2012 in Wolfsburg kam das gesamte Konsortium erstmalig zusammen. Durch die Koordinatoren wurde die Bewerbung mit allen Einzelheiten vorgestellt und erläutert. Seitens der Konsortiumsmitglieder erfolgte eine kurze Vorstellung der Kompetenzen und Forschungsinteressen der jeweiligen Partner.

Neben dem NFF und den o. g. Partnern gehören weiterhin die BASF AG, Salzgitter AG, Wolfsburg AG, Magna International Inc., der Faserhersteller DowAksa sowie weitere kleine und mittelständische Betriebe dem Konsortium an, das aus über 30 Mitgliedern aus Wissenschaft und Industrie besteht. Insgesamt bekamen durch dieses Abstimmungstreffen, an dem über 60 Personen teilgenommen haben, alle Partner einen umfangreichen Überblick über das Konsortium und die damit verbundenen Möglichkeiten, die die Open Hybrid LabFactory bietet.

Zum Abschluss der Veranstaltung standen die Herren Prof. Dr. Jürgen Lehold (Leiter Konzernforschung, Volkswagen AG) und Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger den Teilnehmern für eine Diskussion zur Verfügung, um weiterführende Fragen zu beantworten. Prof. Dr. Lehold hat bei dieser Gelegenheit noch einmal das Interesse seitens der Volkswagen AG an diesem Vorhaben bekräftigt und dieses durch die Zusage, den Bau der LabFactory – also der Infrastruktur – auch im Falle eines negativen Förderbescheids entscheidend zu unterstützen, verdeutlicht.

Am Ende des Tages haben alle Teilnehmer so zu einer zielführenden und produktiven Veranstaltung beigetragen.

Zur erfolgreichen Realisierung dieses Vorhabens ist eine Gesamtinvestition von 50 Millionen Euro eingeplant. Um diese Summe aufzubringen und die Ziele so schnell wie möglich zu erreichen, aber auch um nachhaltig die Ausbildung von Nachwuchsesingenieuren in den niedersächsischen Hochschulen zu fördern, hat sich das NFF um die Fördergelder der Initiative „Forschungscampus“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) beworben.

Zusätzlich wird das Partnerkonsortium dabei ausdrücklich vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur sowie dem Niedersächsischen Wirtschaftsministerium gefördert.



Prof. Dr. Jürgen Lehold (Leiter Konzernforschung Volkswagen AG) und Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger stehen für Fragen rund um die Open Hybrid LabFactory zur Verfügung

**Projektleiter und Ansprechpartner:**

Dr. rer. nat. Fabian Fischer  
fabian.fischer@tu-braunschweig.de

## 32. Assistentenseminar

### Füge- und Schweißtechnik



Nationalpark Eifel



Ehemalige NS-Ordensburg Vogelsang

Die Vorträge der gleichnamigen Veranstaltung sind als gebundene Ausgabe beim Verlag DVS Media erschienen. € 31,60  
ISBN-13: 9783871552984

Das gemeinsame Assistentenseminar der Schweißtechnischen Institute der RWTH Aachen, TU Braunschweig, TU Chemnitz, TU Clausthal, TU Dresden und Universität Magdeburg fand im September 2011 zum insgesamt 32. Mal statt. Eingeladen wurde von Professor Reisgen (RWTH Aachen) in das beschauliche Simmersrath-Erkensruh in der Eifel. Die fachlichen Vorträge des schweißtechnischen Nachwuchses zeigten die große Bandbreite der Forschungsbereiche der beteiligten Institute. Sie befassten sich u.a. mit Lichtbogenverfahren, der Strahltechnik und den Auswirkungen des Schweißprozesses auf Werkstoffe. Neben den fachlichen Inhalten blieb Zeit für die Besichtigung der Gedenkstätte Vogelsang und die Möglichkeit zum gegenseitigen Kennenlernen. Seitens des *ifs* aus Braunschweig haben neben Professor Klaus Dilger auch Christian Börner, Jonas Hensel und Jakob Klassen teilgenommen.



### Felix Eichleiter

**Fertigungs- und prozessbedingte Eigenschaften von Klebverbindungen im Karosseriebau.** Referenten: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger | Prof. Dr.-Ing. Sven Jüttner

## Glückwünsche zur Promotion



### Martin Vogt

**Schwingfestigkeitsbewertung geschweißter Bauteile aus offenen Stahlprofilen.** Referenten: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer



### Markus Bruns

**Mikromagnetische Lebensdauervorhersage geschweißter Stahlkonstruktionen.** Referenten: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer

# Auswahl abgeschlossener Projekte

Jährlich werden am *ifs* zahlreiche Forschungsvorhaben erfolgreich abgeschlossen. Bedingt durch die große fachliche Breite existiert hier eine beachtliche inhaltliche Vielfalt, die zumeist auch interdisziplinäre Ansätze erfordert. Da nicht jedes Forschungsvorhaben im Rahmen des *ifs report* näher porträtiert werden kann, wird im Folgenden eine kleine Auswahl vorgestellt.

## DiAHa

### Direktauftrag von Haftklebstoffen

#### Ziele:

- Direktauftrag von Haftklebstoffen auf Bauteilen und in situ Vernetzung auf dem Bauteil
- Erprobung verschiedener Applikationsverfahren zur viskosen Beschichtung von Bauteilen mit Haftklebstoffen
- Aufbau einer Prototypenanlage in Zusammenarbeit mit der Biolink GmbH

#### Kernpunkte:

- Entwicklung und Modifizierung geeigneter Haftklebstoffchemie zur Vernetzung an Atmosphäre
- Erprobung flexibler Beschichtungstechnologien zur Erzeugung haftklebriger Schichten hoher Oberflächenqualitäten auf komplexen Geometrien

#### Förderinstitution:

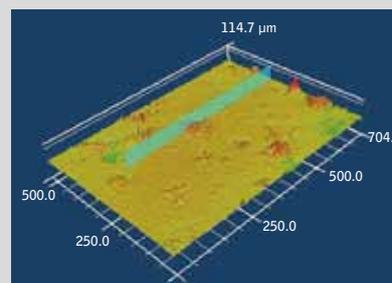
AiF ZIM KF 2012204GZS



Sprühdüse zur Bauteilbeschichtung



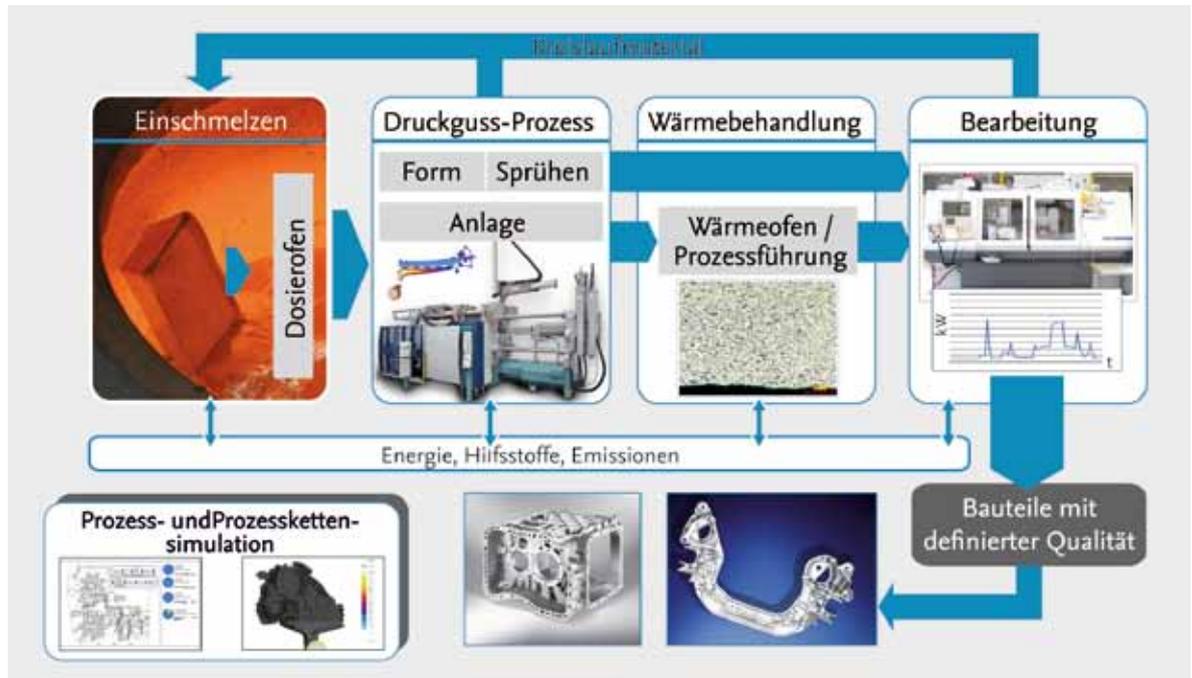
Sprühbeschichtetes Bauteil



Konfokale LSM zur Charakterisierung der Klebschichttopographie

## ProGRess

Gestaltung ressourcen-effizienter Prozessketten am Beispiel Aluminiumdruckguss

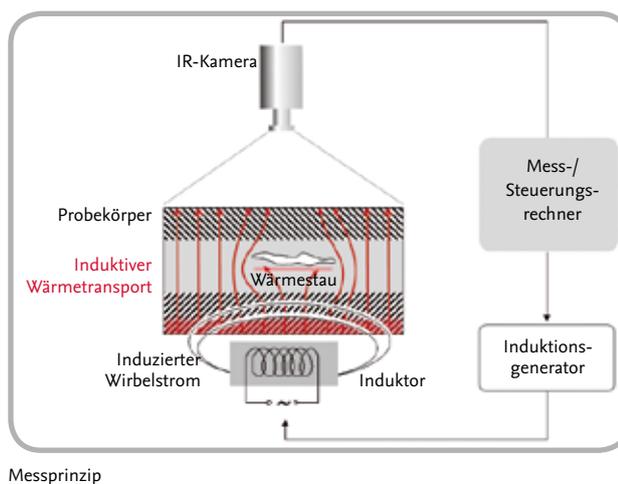


Die Prozesskette Aluminiumdruckguss ist energieintensiv. In diversen Einzelprozessen wird das Aluminium mehrfach aufgeschmolzen, gegossen, zerspannt und wärmebehandelt. Über die Optimierung der Produkt- und Prozessgestaltung und deren Wechselwirkungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette zielt das Projekt **ProGRess** auf eine Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz im Aluminiumdruckguss um bis zu 15 Prozent ab.

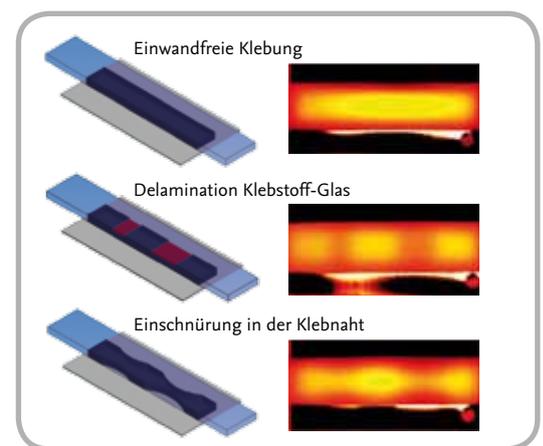
Förderinstitution: BMBF 02PO2055 – Projektträger PTKA

## AkThIndu

Optimierung der Induktionsthermografie zur zerstörungsfreien Prüfung von Fügeverbindungen



Messprinzip



Ergebnis der Prüfung einer Scheibenklebung

### Projekthalte:

- Weiterentwicklung der Anlagentechnik der induktionsangeregten Thermografie
- Optimierung der Induktoren auf die Belange der zerstörungsfreien Prüfung von Fügeverbindungen und der Materialprüfung
- Bestimmung von Potenzial und Grenzen der Fehlerdetektion bei Fügeverbindungen
- Entwicklung von manuellen und automatisierten Prüflösungen

Projektpartner: Edevis GmbH, IFF GmbH

# Kleben von formgehärteten Stählen

## Kurzdarstellung zum Projekt 16141N

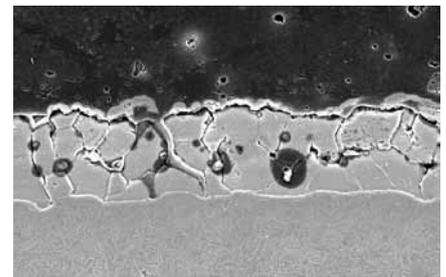
Der Einsatz hochfester formgehärteter Stähle ermöglicht es, die hohen Anforderungen von Kunden und OEMs an Leichtbau und Crashesicherheit im Automobilbau zu erfüllen. Im Warmumform- und Härteprozess bei bis zu 1100 °C entstehen auf den Oberflächen von borlegierten Eisen-Mangan-Stählen (22MnB5) undefinierte und meist schlecht haftende Zunderschichten, die zu erheblichem Verschleiß an den Umformwerkzeugen führen. Daher müssen die Zunderschichten vor einer Weiterverarbeitung oder nachfolgenden Fügeprozessen, wie z. B. dem Kleben, entfernt werden. Um die Verzunderung zu verhindern und die Korrosionsbeständigkeit zu erhöhen, werden die Materialien von vielen Herstellern mit zunderhemmenden Schichten (z. B. AlSi, Schutzlacken oder Zink) beschichtet. Zu diesem Zeitpunkt konnten keine grundlegenden Aussagen über das mechanische Verhalten geklebter Verbindungen derart beschichteter Werkstoffe getroffen werden. Ziel der Arbeiten war es daher, die Klebbarkeit von pressgehärteten Stählen mit verschiedenen Beschichtungen zu untersuchen und auf dieser Grundlage Aussagen und Empfehlungen bzgl. optimierter Klebstoffe, Vorbehandlungsverfahren und Schichtmaterialien zu treffen.



Querschliff im Übergang zur Versagenszone bei einem beschichteten hochfesten Stahl. Im rechten Teil des Bildes ist deutlich die fehlende Beschichtung zu erkennen.



Querschliff durch eine Klebverbindung zweier beschichteter Stähle. Beschichtungen, Diffusionszone und Grundwerkstoff sind deutlich voneinander zu unterscheiden.



REM Aufnahme einer Querschliffs einer mit Klebstoff penetrierten Beschichtung

Die Untersuchungen zeigen, dass für alle Kombinationen aus betrachteten Schichtsystemen und Klebstoffen vollständige Adhäsion zwischen Klebstoff und Schichtmaterial unter quasistatischen und schlagartigen Lasten erreicht werden kann. Abhängig von der verwendeten Schicht tritt das Versagen entweder innerhalb der Beschichtung oder vollständig kohäsiv im Klebstoff auf. Es wurde gezeigt, dass bei der Verwendung von Aluminium-Silizium-Beschichtungen in der Verbindung mit hochmoduligen Klebstoffen häufig vollständige Delaminationen zwischen der eigentlichen Beschichtung und der sich während des Glühprozesses ausbildenden Diffusionsschicht auftritt. Diese Delaminationen beginnen bei Zugscherproben infolge der auftretenden Spannungsspitzen im Bereich der Überlappungsenden. Durch die Verwendung von Klebstoffen mit geringerem E-Modul und höherer Bruchdehnung kann dieses Versagen vermieden werden. Auch unter Kopfgzugbeanspruchung zeigen sich die Aluminium-Silizium-Beschichtungen weniger emp-



Gefördert durch:

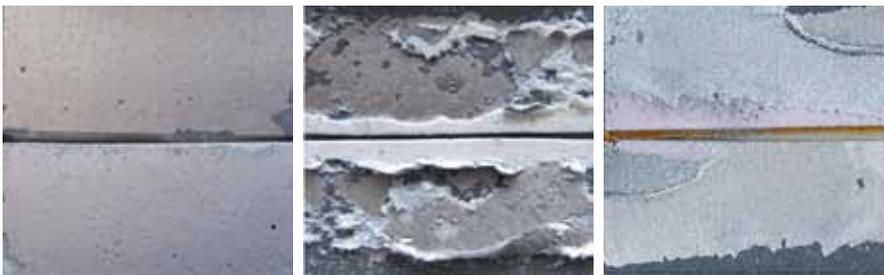


aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

findlich für Delaminationen. Diese Ergebnisse konnten auch in zyklischen Tests und unter schlagartiger Beanspruchung reproduziert werden.

Mechanische Prüfungen von optimierten anorganischen Zunderschutzschichten sowie von Zinkschichten ergeben eine hohe Schichtfestigkeit und rein kohäsives Versagen im Klebstoff, so dass das Potenzial der Verbindung aus höchstfestem pressgehärteten Stahl und Klebstoff vollständig ausgenutzt werden kann. Bei keinem der untersuchten Schichtsysteme ist im beschleunigten Alterungstest ein negativer Einfluss der Beschichtungen auf die Verbindungseigenschaften zu beobachten.

Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse zeigen, dass ein zuverlässiges Kleben auf mit einer Zunderschutzschicht versehenen 22MnB5-Stählen bei Auswahl eines entsprechenden Klebstoffes und der passenden zunderhemmenden Schicht möglich ist.



Bruchbilder von beschichtetem 22MnB5 – es ist deutlich zu erkennen, dass in Abhängigkeit der Klebstoffe unterschiedliche Anteile Schichtversagen auftreten.

Das IGF-Vorhaben 16141 N der FOSTA - Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. – Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf 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 durchführende Forschungsstelle bedankt sich ausdrücklich bei der AiF (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen) für die Förderung des Projektes sowie bei der FOSTA e.V. für die hervorragende Projektbetreuung und Organisation.

Autoren:

Dipl.-Ing. Stefan Kreling | Dr. rer. nat. Fabian Fischer

Ansprechpartner: [s.kreling@tu-braunschweig.de](mailto:s.kreling@tu-braunschweig.de)

## Neu am ifs



Dipl.-Wirtsch.-Ing. **Kristian Lippky** ist seit dem 1. November am Institut in der Abteilung Kleben und Mechanisches Fügen tätig. Nach der Anfertigung seiner

Diplomarbeit in der Konzernforschung der Volkswagen AG hat er sich für eine Promotion am ifs entschieden. Herr Lippky hat an der Ausschreibung zum Forschungscampus mitgearbeitet und soll vorläufig das Kompetenzfeld der Thermographie unterstützen.



Dr.-Ing. **Thomas Krüssel** entschied sich nach mehrjähriger industrieller Tätigkeit in leitender Funktion dazu, wieder mehr Gewicht auf die

wissenschaftlichen Aspekte seines Arbeitsumfeldes zu legen. Nach dem Studium des Maschinenbaus an der Uni Hannover und der anschließenden Assistentenzeit in Dortmund sowie Hannover wurde er 2005 am Institut für Werkstoffkunde promoviert. Der Strahltechnik seit dieser Zeit verbunden, leitete er eine Gesellschaft zur Applikationsentwicklung mit dem Elektronenstrahl und übernahm zum Februar 2012 die Leitung der Abteilung Strahltechnik in unserem Institut.



Dipl.-Wirtsch.-Ing. **Christoph Mette** unterstützt seit dem 1. März 2012 als wissenschaftlicher Mitarbeiter in unserem Haus die Abteilung Kleben und Mechanisches Fügen. Im Rahmen eines institutsübergreifenden Projekts bewegen sich

seine Forschungstätigkeiten auf dem Gebiet der Modifikation von strukturellen Klebstoffen unter Verwendung von Nanopartikeln.



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

Langer Kamp 8  
38106 Braunschweig  
Deutschland

Tel. +49 (0) 531 391-7820

Fax +49 (0) 531 391-5834

E-Mail: [ifs-bs@tu-braunschweig.de](mailto:ifs-bs@tu-braunschweig.de)

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

## **IMPRESSUM**

Herausgeber: Institut für Füge- und Schweißtechnik

Verantwortlich: K. Dilger

Redaktion: S. Müller

Grafik: B. Wolfrum

