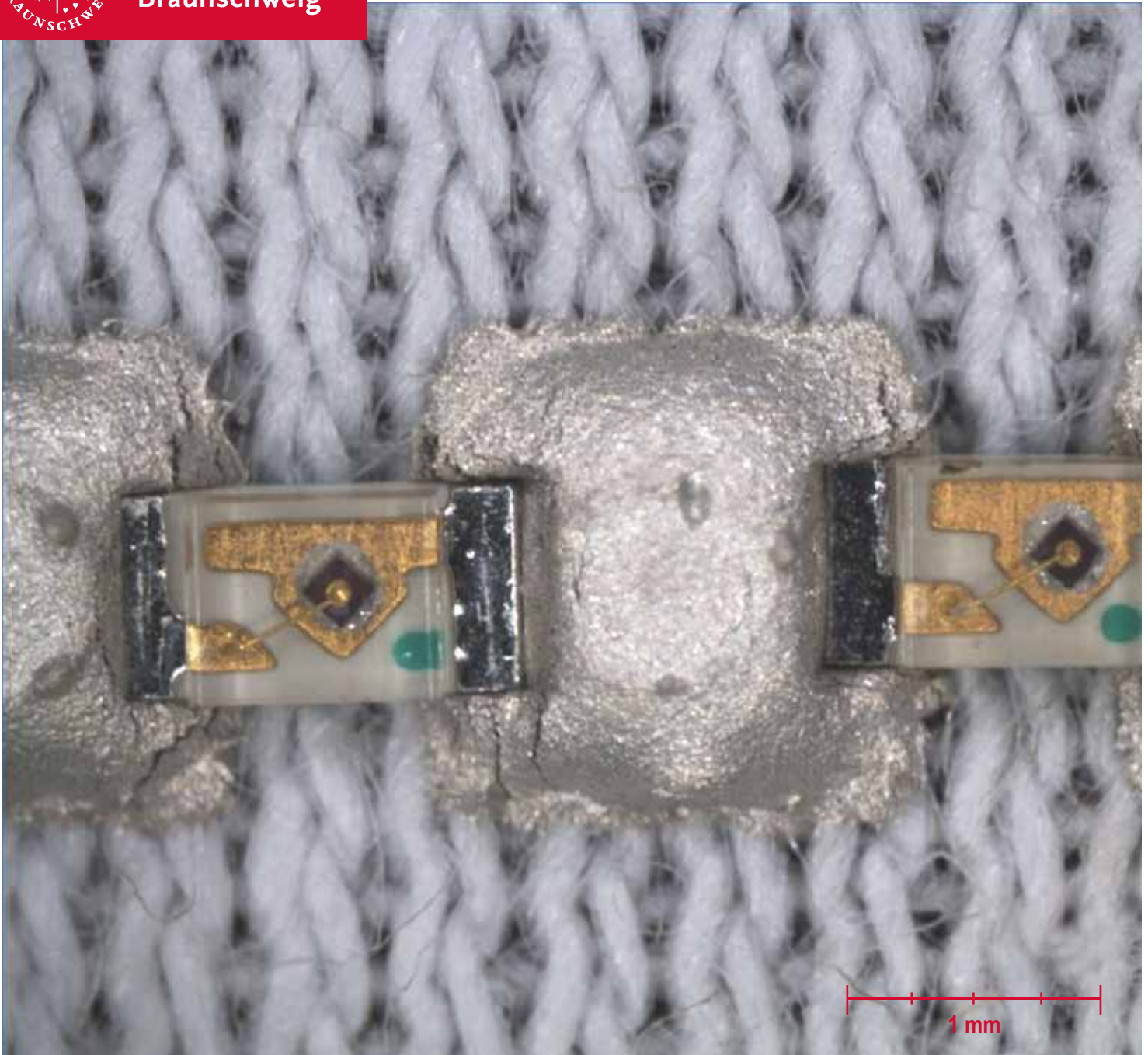




Technische  
Universität  
Braunschweig

Institut für Füge- und  
Schweißtechnik

*ifs*



# report

6. Jahrgang | Ausgabe 2011

# Das Jahr neigt sich schon dem Ende ...



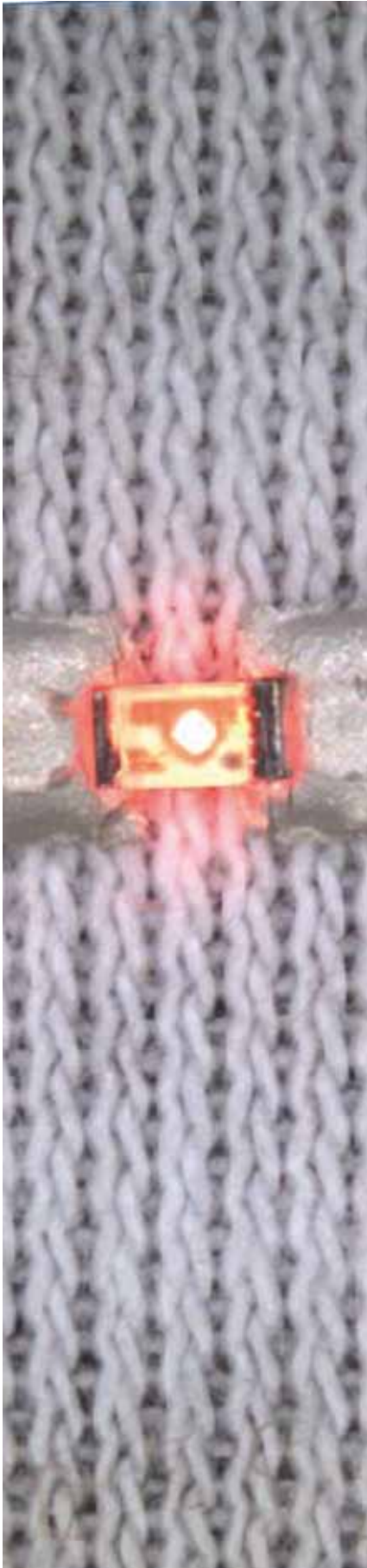
Geschäftsführender Leiter  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h. c. Klaus Dilger

... und es erscheint die erste Ausgabe des *ifs*-reports 2011. Dies ist unter anderem mit der Dynamik verbunden, die das Jahr 2011 mit sich gebracht hat.

Es war eine hohe Dynamik im Sinne des Arbeitsumfangs und der Arbeitsinhalte sowie auch der Institutsstruktur. Einige Kollegen haben uns verlassen, viele sind hinzugekommen. Diese stete Veränderung der personellen Zusammensetzung ist einerseits der Attraktivität der deutschen Wirtschaft geschuldet, die den Absolventen an unserem Institut verlockende Angebote unterbreitet, aber auch der durch das Ministerium vorgegebenen Stellenstruktur. Hier hat sich in den vergangenen Jahren ein stetiger Wandel weg von Dauerstellen hin zu Zeitverträgen vollzogen. Dies hält zum einen den Institutsleiter jung, da nur er älter wird und die Mitarbeiter jung bleiben, zum anderen sorgt es dafür, dass neue Ideen aufgegriffen und mit höchster Motivation bearbeitet werden. Nachteilig ist, dass auf diese Weise auch Know-how verloren geht und ein nicht unerheblicher Einarbeitungsaufwand entsteht. Bisher war vor allem auch durch unsere akademische Direktorin Frau Dr. Pries und unseren akademischen Oberrat Herrn Dr. Nitschke-Pagel dafür gesorgt, dass Erfahrung und Wissen kontinuierlich weitergetragen werden konnten. Herr Dr. Fischer, der neu zum Institut gekommen ist und die Leitung der Abteilungen Kleben und mechanisches Fügen wie auch Faserverbundtechnologie übernommen hat, wird diese Kontinuität stärken.

Inhaltlich wurde der vergangene Zeitraum maßgeblich von der Weiterentwicklung der Elektromobilität geprägt. Themen waren hier Leichtbaustrukturen für Elektrofahrzeuge und unterschiedliche Aspekte der Batterieproduktion. Hierüber werden wir in einem zukünftigen *ifs* report berichten. Aber auch in der vorliegenden Ausgabe werden Sie aktuelle und interessante Aspekte der Fügetechnik finden. Beispiele hierfür sind die Herstellung von „Smart Textiles“ und das Elektronenstrahlschweißen in kombinierter Mehrprozessentechnik. Das ebenfalls dargestellte „Festkolloquium Eigenspannungen“ war ein Highlight im akademischen Jahr. Wir haben in dem in diesem report dargestellten Zeitraum viele Kooperationen gepflegt und ausgebaut und neue Partnerschaften geschlossen. Hier sei allen Partnern explizit für die gute Kooperation gedankt. Es hat Spaß gemacht. Ich hoffe, Sie haben etwas Freude beim Lesen unseres reports 2011.

*Klaus Dilger*



# Smart Textiles:

## Laserbasiertes Abisolieren von Kupferlackdrähten als Prozessschritt bei der Fertigung

Smart Textiles sind Textilien, häufig in Form von Kleidungsstücken, die dem Anwender durch die integrierte Elektronik zusätzliche Funktionen bieten. Skijacken mit eingebauten MP3-Playern, Westen mit Überwachungsfunktionen für ältere Menschen, Babystrampler mit Sensoren oder Oberteile mit einem eingebauten Defibrillator sind dabei nur einige wenige Beispiele aus dem Bereich der Bekleidungsindustrie. Weitere Anwendungen sind beispielsweise durch die Montage von Leuchtdioden auf Textilien in der Beleuchtung von Fahrzeughimmeln denkbar. Für die Realisierung solcher intelligenten Textilien müssen die in Abb. 1 dargestellten Voraussetzungen erfüllt sein. Elektronische Bauteile mit Abmessungen bis zu 1,6 mm x 0,8 mm und kleiner müssen reproduzierbar auf das Textil montiert

gegenüber Umwelteinflüssen kann dabei auch durch eine anschließende Verkapselung der Bauelemente realisiert werden. In vielen Fällen ist es von Vorteil, wenn die in das Textil integrierten Leiterbahnen von der Außenwelt elektrisch isoliert sind, da gerade im Bereich der Bekleidungsindustrie mit Feuchtigkeit und somit der Gefahr von Kurzschlüssen zu rechnen ist.

Schutztextilien mit integrierten Sensoren und Elektronikkomponenten können weit aus mehr Sicherheit bieten als konventionelle Schutzkleidung. Damit solche Schutzkleidung bezahlbar bleibt und breit vermarktet werden kann, bedarf es umfangreicher Forschungen im Bereich der Mikrosystemtechnik (MST). Durch die Einbindung elektronischer Komponenten in technische Textilien wird eine



Abb. 1: Aufbau von intelligenten Textilien

werden können. Des Weiteren muss für eine elektrische Verbindung dieser Bauteile untereinander im Textil eine geeignete Leiterbahnstruktur vorhanden sein. Letztlich muss dann noch eine dauerhaft stabile elektrische Kontaktierung zwischen den Bauelementen und der Leiterbahnstruktur hergestellt werden. Die Langzeitstabilität

neuartige hybride Bekleidung entwickelt. Dazu wurde in einem Verbundprojekt in einem durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt am Institut für Füge- und Schweißtechnik (*ifs*), Abteilung Mikrofügen, ein Konzept zur Fertigung und Kontaktierung von Smart Textiles mitentwickelt und

am Beispiel einer Health-Monitoring-Unterwäsche zur Überwachung vitaler Körperfunktionen für Polizei und Feuerwehr demonstriert. Zentrale Aufgabe des Projektes ist die Entwicklung einer Schlüsseltechnologie: Eine Verbindungstechnik von textilen Mikrosystemen, die effektiv mit Kleidung kombiniert werden kann. Dazu wurden umfangreiche Untersuchungen über die Entlackung, Kontaktierung und Verkapselung solcher MST-Bauteile durchgeführt. Dabei wurden Textilien verwendet, in die elektrisch isolierte Kupferlackdrähte mit einem Durchmesser von 75 µm eingestrickt waren. Für eine elektrische Kontaktierung der Bauteile mit den Leiterbahnen muss jedoch in einem vorgelagerten Prozessschritt der Schutzlack auf den Drähten partiell entfernt werden. Möglich ist dies durch den Einsatz von Flammen, Chemikalien oder Messern, die jedoch zum Teil nicht die geforderte Geschwindigkeit oder Selektivität für die Produktion von Smart Textiles bieten. Für eine schnelle und lokal begrenzte Entfernung der Lackschicht wurde im Rahmen des Projektes ein Nd:YAG Laser mit einem minimalen Spotdurchmesser von 200 µm gewählt, siehe Abb. 2. Dieser gestattet es, die Lackschicht sicher zu entfernen und dabei das umliegende Textil nur minimal zu beschädigen. Eine Schwierigkeit besteht darin, dass die Lackdrähte aufgrund des Fertigungsprozesses der Gestricke nicht reproduzierbar an den

gleichen Stellen liegen können. Damit eine aufwendige Detektion der Lackdrähte und anschließende Feinjustage der Position des Laserfokus in der x-y-Ebene vermieden werden kann, wurde nach einer Möglichkeit gesucht, in einem weiten Bereich zuverlässig zu entlacken.

Im Rahmen des Projektes wurde eine modifizierte Abisolierungsmethode erarbeitet. Durch Testreihen konnte gezeigt werden, dass der verwendete Kupferlackdraht nicht nur entlackt werden kann, wenn er direkt durch den Laserstrahl getroffen wird. Durch den gewählten Prozess ist es zudem möglich den Draht zu entlacken, wenn der Fokuspunkt des Lasers bis zu 0,8 mm neben dem Draht liegt, siehe Abb. 3. Entscheidend ist dabei jedoch, dass der Draht nicht zerstört wird, wenn der Draht zufälligerweise doch genau im Fokus des Lasers liegt. Wie bei den meisten Verfahren zur Abisolierung von Kupferlackdrähten bleibt diese nach der Einwirkung durch den Laser in Pulverform zurück. Durch eine Druckluftbehandlung können diese Rückstände jedoch ohne negativen Einfluss auf die Position der integrierten Lackdrähte entfernt werden. Weiterhin ist zu beobachten, dass durch die angewandte Methode eine deutlich geringere Schädigung des Textils verursacht wird. Die Textilfasern weisen lediglich eine leichte Verfärbung ohne erkennbare Schädigung auf. Eingebrennte



Health-Monitoring-Unterwäsche \*  
Quelle: Mehler Vario System

Löcher und damit vollständig zerstörte Fasern sind nicht zu erkennen. Die Arbeiten zu diesem Prozessschritt wurden im Rahmen des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16SV3424 finanzierten Projekts „Integration von Mikrosystemen zur Herstellung von multifunktionalen intelligenten Schutztextilien – MST4IT“ durchgeführt. Zusätzlicher Dank gilt dem VDI-VDE-IT für die Aufgabe als Projektträger.

\* Zum Demonstrator: Dieser besteht aus neun Interposern für Sensoren mit einem zusätzlichen Interposer für den Netzanschluss. Als Sensoren wurden im Rahmen des Projektes ein Atemsensor, ein Temperatursensor sowie ein Lagesensor ausgewählt. Die Informationen dieser Sensoren werden drahtlos an ein Handgerät, das sogenannte Smart Meter, übertragen.

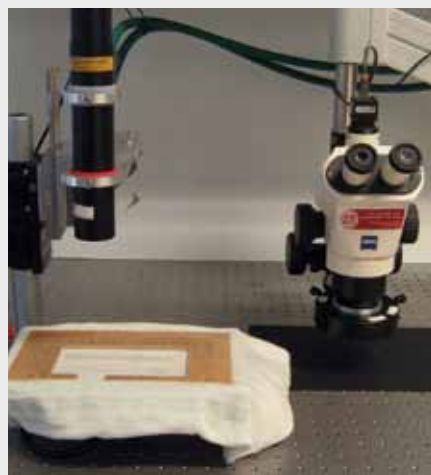


Abb. 2: Versuchsaufbau zum laserbasierten Entlacken

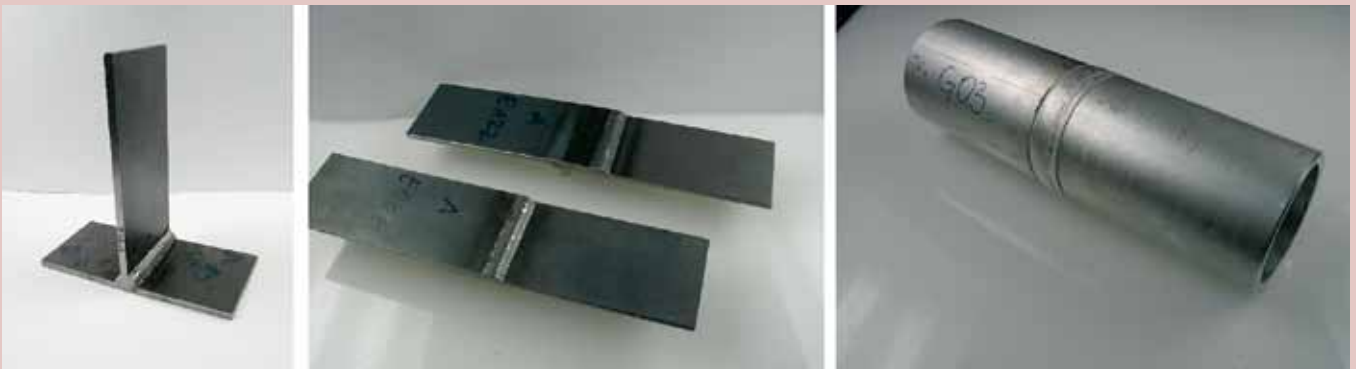


Abb. 3: Im linken Bereich abisolierter Kupferlackdraht. Im rechten Bereich nicht bearbeiteter schwarzer Kupferlackdraht.

Autoren:  
Dipl.-Ing. Andrej von Schilling  
Dipl.-Ing. Gregor Hemken  
Ansprechpartner:  
[g.hemken@tu-bs.de](mailto:g.hemken@tu-bs.de)

# Linienweißnähte an dünnen Blechen

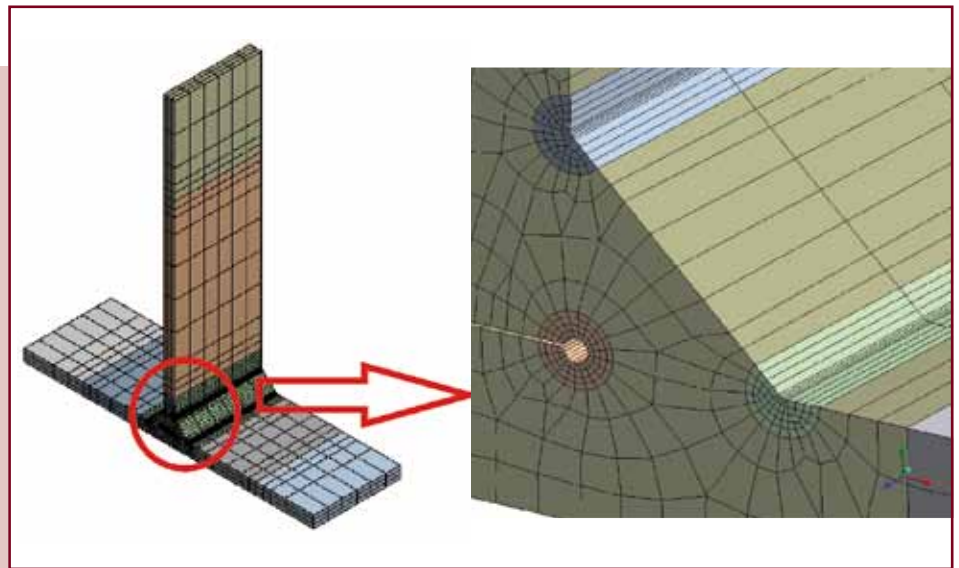
## Erweiterung des Kerbspannungskonzeptes auf Nahtübergänge



Untersuchte Probenformen

Die Betriebsfestigkeit von Bauteilen aus geschweißten Stahl- oder Aluminiumstrukturen ist insbesondere unter den Gesichtspunkten Leichtbau und Einsparungen beim Fertigungsprozess von zentraler Bedeutung. Bei solchen Strukturen stellen die Nahtschweißverbindungen der Komponenten oftmals das schwächste Glied in der Kette dar.

Gerade unter dem Aspekt, dass auch Sicherheitsbauteile oft geschweißt werden, sind für den Konstrukteur genaue und zuverlässige Berechnungsmethoden für eine gezielte Vorauslegung von Schweißnähten in Bezug auf die Betriebsfestigkeit unabdingbar. Die Kerbspannungen werden rechnerisch, z. B. mittels der Finite-Element Methode, ermittelt. An den versagenskritischen Orten, den Nahtübergangs- und Wurzelkerben der Schweißverbindung, werden die dort vorliegenden Kerben durch Referenzradien  $r_{ref}$  abgebildet. In Abhängigkeit von den vorliegenden Blechdicken erfolgt für geschweißte Grobblechverbindungen ( $t > 5$  mm) eine Berechnung der Kerbspannung mit dem Referenzradius von  $r_{ref} = 1,0$  mm, für Feinblechverbindungen ( $t < 5$  mm) mit  $r_{ref} = 0,05$  mm. Die in den Kerben berechneten elastizitätstheoretischen Kerbspannungen werden zulässigen Beanspruchungen aus einer sogenannten „Referenzwöhlerlinie“ gegenübergestellt. Bei Grobblechverbindungen ( $r_{ref} = 1,0$  mm) zeigt sich, dass diese Referenzwöhlerlinien zwar abhängig von der Werkstoffgruppe (Aluminium, Stahl), aber weitgehend unabhängig von dem Versagensort (Nahtwurzel, Nahtübergang) sind. Angeregt durch die Ergebnisse des AiF-Clusters „Anwendbarkeit von Festigkeitskonzepten für schwingbelastete geschweißte Bauteile“, bei denen für Schweißverbindungen an Aluminiumlegierungen zum Teil Anrisse in Nahtübergangskerben auftraten, obwohl die berechneten maximalen Kerbspannungen, basierend auf der Kerbradienmodellierung mit  $r_{ref} = 0,05$  mm, an den Wurzelkerben höher sind, wurden weitere Ergebnisse aus vorangegangenen Forschungsvorhaben im Hinblick auf dieses Verhalten näher betrachtet. Auch hier ergaben sich zum Teil signifikant geringere ertragbare lokale Beanspruchungen für die Nahtübergänge bei Ermittlung der Beanspruchungen mit  $r_{ref} = 0,05$  mm.



FEM-Modell einer T-Stoß Probe

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist daher die Klärung der Ursachen unterschiedlicher lokaler Beanspruchbarkeiten von Nahtwurzel und Nahtübergang sowie die Entwicklung von Kennwerten und eines einheitlichen Vorgehens zur zuverlässigen Bewertung von Nahtwurzel und Nahtübergang bei Nahtschweißverbindungen an Feinblechen aus Aluminium und Stahl bei der Anwendung des Kerbspannungskonzeptes. Im Rahmen theoretischer Arbeiten ist die experimentell ermittelte Schwingfestigkeit in Abhängigkeit von Versagensort, Beanspruchungsmittelwert ( $R = 0$ ,  $R = -1$ ), Blechdicke, Beanspruchungsart (Normalspannung, Schub) und Werkstoff (Aluminium, Stahl) für die Versagenskriterien „technischer Anriss“ und „Bruch“ systematisch zu beschreiben. Dies geschieht zum einen durch die im Hinblick auf diese Fragestellungen weiterführende Auswertung von Versuchsergebnissen aus der Literatur.

Weiterhin werden die Ergebnisse der in diesem Forschungsprojekt durchgeführten Schwingfestigkeitsversuche ausgewertet und die Unterschiede in den Referenzwöhlerlinien für die Versagensorte quantifiziert. Es sollen mögliche Einflussfaktoren rechnerisch betrachtet werden, um die Ursachen für das unterschiedliche Schwingfestigkeitsverhalten der verschiedenen Nahtbereiche zu untersuchen. Aus den Ergebnissen dieser theoretischen Arbeiten soll später eine geeignete Bewertungsmethodik abgeleitet werden.

Im Einzelnen wird folgenden Fragen nachgegangen:

- Ist die Kerbwirkung im Nahtübergang und der Nahtwurzel unterschiedlich, evtl. aufgrund unterschiedlicher Spannungsgradienten bzw. beanspruchter Volumina?
- Werden die lokalen Beanspruchungszustände durch die übliche lokale Diskretisierung ausreichend genau erfasst?
- Kann eine einheitliche Bewertung von Nahtübergangs- oder Wurzelkerben mit unterschiedlichen Korrekturfaktoren unter Berücksichtigung des statistischen Größeneinflusses erreicht werden?

Insbesondere sind Schwingfestigkeitsversuche an Überlappstößen, T-Stößen und Rohrproben geplant, bei denen Versagen auch gezielt im Nahtübergang herbeigeführt wird. Während beim Überlapp- und T-Stoß überwiegend Normalbeanspruchung in der Naht herrscht, tritt bei der Rohrprobe unter Torsion überwiegend Schubbeanspruchung in der Schweißnaht auf. Als Schweißverfahren wird das Lichtbogenschweißen (MIG) eingesetzt. Als Werkstoffe werden die naturharte Aluminiumlegierung AlMg3Mn und der Stahl H320LA (ZStE 340) verwendet.

Autoren:

Dipl.-Ing. Erdeniz Ince

Dipl.-Ing. Martin Vogt

Ansprechpartner:

[e.ince@tu-bs.de](mailto:e.ince@tu-bs.de)

#### Kooperationspartner

Das IGF-Forschungsvorhaben (16.431 N/1) wird durch die Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. – FAT im Arbeitskreis Fügetechnik (AK 25) betreut. Die Forschungsarbeiten werden von folgenden Kooperationspartnern durchgeführt:

- Technische Universität Darmstadt, Institut für Systemzuverlässigkeit im Maschinenbau – SzM  
Prof. Dr.-Ing. H. Hanselka  
in Kooperation mit
- Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt, Prof. Dr.-Ing. H. Hanselka
- Technische Universität Braunschweig, Institut für Füge- und Schweißtechnik, jfs, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger

# Elektronenstrahlschweißen mit kombinierter Mehrprozesstechnik

Metallkundlich-technologische Untersuchungen von austenitisch-ferritischen Stählen ohne Schweißzusatz



Zentrifugentrommel aus 1.4462  
Quelle: BMA Braunschweiger Maschinenbauanstalt

Austenitisch-ferritische Stähle, auch Duplex-Stähle genannt, weisen ein zweiphasiges Gefüge mit etwa gleichen Anteilen von Ferrit und Austenit auf. Sie zeichnen sich gegenüber austenitischen Stählen durch eine deutlich höhere Festigkeit und eine im Vergleich zu ferritischen Stählen gesteigerte Duktilität aus. Bevorzugtes Einsatzgebiet von Duplex-Stählen sind daher dickwandige Bauteile im Maschinen-, Apparate- und Anlagenbau.

Zum Schweißen dieser Bauteile wird aus wirtschaftlichen und qualitativen Gründen das Elektronenstrahlschweißen verwendet. Um die geforderten mechanisch-technologischen Eigenschaften und die Korrosionsbeständigkeit zu gewährleisten, ist der Einsatz der Einstrahltechnik, in Verbindung mit einem überlegierten Schweißzusatzwerkstoff, WIG-geschweißten Kosmetiklagen auf der Schweißnahtober- und -unterraupe sowie einer Wärmenachbehandlung des gesamten Bauteils Stand der Technik. Die qualitätssichere Herstellung ohne eine Wärmenachbehandlung sowie das Schweißen ohne Zusatzwerkstoff würden große Kostenvorteile mit sich bringen, sofern die geforderte Schweißnahtgüte und Korrosionsbeständigkeit der Naht erreicht werden. Aus metallurgischer Sicht ist in diesem Zusammenhang das Austenit-Ferrit-Verhältnis (A-F-Verhältnis) von größter Bedeutung. Von einem ausgewogenen A-F-Verhältnis hängen insbesondere die Duktilität, Festigkeit und die Korrosionsbeständigkeit der Schweißnaht ab. Ein Ferritgehalt von unter 65 % wird nach gängigen Qualitätsrichtlinien dabei als ausreichend erachtet. Verfahrensbedingt kommt es beim Elektronenstrahlschweißen aufgrund der hohen Energiedichte des Verfahrens zu sehr schnellen Aufheiz- und Abkühlraten des Schweißgutes. Bei Duplex-Stählen führt dies zu einer Ferritisierung der Schweißnaht, da die diffusions- und damit zeitabhängige Austenitausscheidung weitestgehend unterdrückt wird. Außerdem kommt es durch den geringen

Umgebungsdruck in der Arbeitskammer ( $10^{-4}$  mbar) zu einer deutlichen Effusion des starken Austenitbildners Stickstoff. Dies bedingt eine Reduzierung der  $\delta$ -V-Umwandlungstemperatur, was in Verbindung mit den hohen Abkühlgeschwindigkeiten beim EBW zu unzulässig hohen Ferritanteilen im Schweißgut von über 90 % führt. Zudem steht Stickstoff in direktem Zusammenhang mit der Lochkorrosionsbeständigkeit und der Festigkeit der Schweißnaht.

Im Rahmen des AiF-Forschungsvorhabens, das gemeinsam mit dem Institut für Werkstoff- und Fügetechnik der TU Magdeburg und mit Unterstützung der pro-beam technologies GmbH bearbeitet wird, wird deshalb angestrebt, eine Ferritisierung der Schweißnaht durch den Einsatz innovativer Mehrstrahl- und Mehrprozessstechniken zu verhindern. Es werden dabei der Standard-Duplex-Stahl X2CrNiMoN22-5-3 und der Lean-Duplex X2CrNiN23-4 in Walz- und Gussqualität in Dicken von 15 bis 30 mm untersucht. Die Gefüge- und Werkstoffeigenschaften dieser Legierungen zeigt Abb. 1.

Zur Entwicklung einer Mehrprozessstechnologie war es zunächst notwendig, Korrelationen zwischen den  $t_{12/8}$ -Abkühlzeiten, den mechanisch-technologischen Güte Kennwerten und den Lochkorrosionsbeständigkeiten zu ermitteln, da darauf aufbauend geeignete Strategien für die Mehrprozessstechnologie entwickelt werden sollten. Die Variation der Abkühlzeiten erfolgte in den Grundlagenversuchen durch mehrfaches Überschweißen der Schweißnaht oder durch ein Vorwärmen des Bauteils auf Temperaturen größer 400 °C.

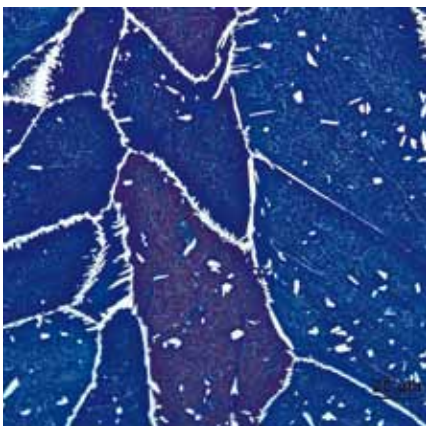


Abb. 1: RT

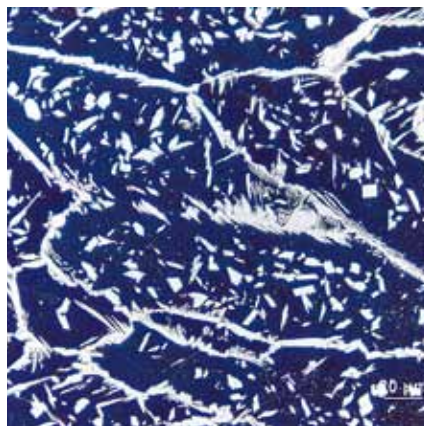


Abb. 2: 550 °C

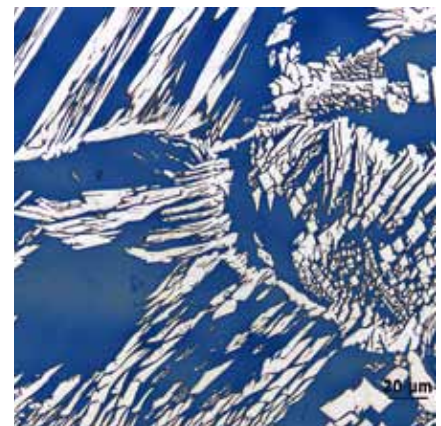


Abb. 3: 650 °C

Durch das Schweißen mit mehrfachen Überfahrten konnte die  $t_{12/8}$ -Abkühlzeit bis auf 48 s erhöht werden, allerdings wurde dabei der Stickstoffgehalt im Schweißgut deutlich reduziert. Ein Optimum wurde bei drei Überschweißungen mit 70 % Ferrit und 0,093 % Stickstoff (Grundwerkstoff 0,19 %) erreicht. Die Kerbschlagarbeit bei -40 °C zeigte mit ca. 40 J dem VdTÜV-Werkstoffblatt 418 entsprechend akzeptable und vergleichbare Werte zu einer artgleichen E-Hand-Schweißung.

Durch das Vorwärmen auf Temperaturen bis 850 °C und eine nachfolgende Schweißung ohne Überschweißung ergaben sich ab 650 °C Ferritgehalte von unter 65 % im Schweißgut, die aber bei weiterer Erhöhung der Temperatur nicht mehr wesentlich verringert werden konnten. Eine Stickstoffeffusion durch die Vorwärmung wurde bei dieser Versuchsserie nicht nachgewiesen. Die Ergebnisse sind exemplarisch in Abb. 2 bis Abb. 4 dargestellt. Da Duplexwerkstoffe ein komplexes temperaturabhängiges Ausscheidungsverhalten aufweisen, wurden zusätzlich umfangreiche metallurgische Untersuchungen zu der zeit- und temperaturabhängigen Bildung intermetallischer Phasen und Karbide im Grundwerkstoff und im Schweißgut durchgeführt.



Während sich im Grundwerkstoff bei den typischen Vorwärmzeiten mit dem Elektronenstrahl weder lichtmikroskopisch noch im Rasterelektronenmikroskop über Rückstreubilder eine Phasenbildung nachweisen ließ, waren im Schweißgut aufgrund der dendritischen Erstarrung und den damit verbundenen Elementseigerungen lokal begrenzt feinste Karbidausscheidungen oberhalb von 650 °C nachzuweisen. Oberhalb von 700 °C traten erwartungsgemäß erste Ausscheidungen der  $\chi$ -Phase auf.

Auf Basis dieser grundlegenden Untersuchungen und Ergebnisse wurde bei der nachfolgenden Entwicklung der Mehrstrahltechnik davon ausgegangen, dass über definierte Strahlfiguren entweder eine längere Abkühlzeit bei gleichem N-Gehalt im Schweißgut durch Erhöhung des Wärmeeintrags gewährleistet wird oder eine zu starke N-Effusion durch Entwicklung spezifischer Strahlfiguren vermieden werden sollte. Hierfür musste zunächst eine Optimierung der Leistungsverteilung der aufeinanderfolgenden Schmelzbäder durchgeführt werden, um somit die Wärmeinbringung und die Abkühlgeschwindigkeit gezielt zu steuern. Durch die Nutzung der Mehrstrahltechnik konnte dann in Kombination mit einer vorangegangenen Vorwärmung der Ferritgehalt im Schweißgut auf unter 65 % FE gesenkt werden. Dies stellt eine erhebliche Verbesserung zu den Ergebnissen mit der konventionellen Einstrahltechnik dar.

Diese Ergebnisse und weiterführende Untersuchungen zum Korrosionsverhalten durch Analyse des Elektrochemischen Rauschens (ECR) sind bereits vorliegenden Veröffentlichungen [1 bis 3] zu entnehmen.



Abb. 4: 750 °C

- [1] Krasnorutskyi, S.; Zinke, M.; Keil, D.; Pries H.: *Metallkundlich-technologische Untersuchungen zum Elektronenstrahlschweißen von Duplexstahl ohne Schweißzusatz: DVS-Berichte Band 270 (2011), Seite 17-22*
- [2] D. Keil, M. Zinke, H. Pries, S. Krasnorutskyi.: *Metallurgical investigations on electron beam welded duplex stainless steels, IIW Document II-A-229-11 (der Beitrag wird zur Zeit für Welding in the World reviewed)*
- [3] Assing, M.: *Untersuchungen zur optimalen Vorwärmung beim Elektronenstrahlschweißen von Duplexwerkstoffen ohne Zusatzwerkstoff: Diplomarbeit am ifs, TU Braunschweig 2011*

## Danksagung

Die Untersuchungen wurden aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. gefördert (AiF-Nr.: 16.277 B / DVS-Nr.: 1.066) und von der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS unterstützt.

Für diese Unterstützung sei gedankt.

Ansprechpartnerin:  
Dr.-Ing. Helge Pries  
h.pries@tu-bs.de

# Mikromagnetische Bestimmung von Schweißeigenspannungen

Eigenspannungen, die in technischen Bauteilen ohne Angriff äußerer Lasten vorhanden sind und eine erhebliche Größenordnung erreichen können, entstehen in Konstruktionswerkstoffen bei praktisch jedem Bearbeitungsprozess und natürlich auch beim Schweißen.

Man weiß heute sehr genau, inwieweit Eigenspannungen die Eigenschaften unterschiedlicher Werkstoffe verschlechtern oder verbessern können. Als beispielhaft kann hier der Widerstand gegen Spannungsrisskorrosion bei metallischen Werkstoffen genannt werden, der durch hohe Zugeigenspannungen an der Oberfläche merklich herabgesetzt werden kann, oder aber die Schwingfestigkeit von Stählen und Aluminiumwerkstoffen, die beispielsweise durch gezielte Oberflächenbehandlungen, wie das Kugelstrahlen erheblich verbessert werden kann. Dies hat dazu geführt, dass sich die gezielte Optimierung von Eigenspannungszuständen überall dort, wo insbesondere hochfeste Werkstoffe, wie gehärtete oder vergütete Stähle angewendet werden (z. B. im Getriebebau), als ein selbstverständlich genutztes Ingenieurswerkzeug etabliert hat. Dies war deshalb möglich, weil gleichzeitig verlässliche Qualitätssicherungsstrategien auf der Basis fertigungsbegleitender Eigenspannungsmessungen entwickelt wurden, die in der Automobilindustrie bei der Kontrolle von Oberflächeneigenspannungen an Zahnrädern, Blatt- und Schraubenfedern, Wellen, Nockenwellen, Ventilen und ähnlichen Bauteilen heute Stand der Technik und damit aus den Fertigungsprozessen nicht mehr wegzudenken sind.

Der tiefgehende Eingriff in den Werkstoffzustand, der mit dem Schweißen zwangsläufig verbunden ist, führt naturgemäß ebenfalls dazu, dass mitunter sehr hohe Eigenspannungen entstehen können. Da diese ursächlich vor allem auf behinderte Schrumpfvorgänge zurückzuführen sind, befürchtet man in der Praxis immer dort, wo durch versteifende Maßnahmen vor allem dem Verzug entgegengewirkt werden soll, dass die Bauteile nach Fertigstellung erhebliche Zugeigenspannungen enthalten, die im schlimmsten Fall die Streckgrenze des Werkstoffs erreichen. Da die Eigenspannungen weder sichtbar noch mit einfachen Mitteln quantifizierbar sind, werden dann häufig entweder teure Glühbehandlungen veranlasst, ohne sich deren Nutzen sicher sein zu können, oder aber sinnlose Behandlungen wie das sogenannte „Vibrationsentspannen“ angewendet.

In Zeiten, in denen anspruchslöse Werkstoffe wie der St37 bei Schweißkonstruktionen Standard waren, mag dies noch akzeptabel gewesen sein, betrachtet man aber die aktuelle Entwicklung, so ist unübersehbar, dass der Einsatz moderner, hochfester schweißbarer Stähle mit Streckgrenzen bis zu 1100 MPa und darüber künftig deutlich zunehmen wird, wenn das Potenzial solcher Werkstoffe auch tatsächlich ausgenutzt werden kann. Dies bedeutet aber auch, dass eine Abkehr von der schweißtechnischen Praxis, Schweißeigenspannungen als Angstfaktor ohne präzisen Nachweis auf der Basis vermeintlicher Erfahrungen abhandeln zu können, dann unvermeidbar ist.

Das heißt, dass genau wie im vorangehend beschriebenen Beispiel zuverlässige Qualitätssicherungsstrategien benötigt werden, die eine explizite Berücksichtigung realer Eigenspannungen in Schweißverbindungen ermöglichen. Als Standardmethode der Eigenspannungsbestimmung in metallischen Werkstoffen kann heute unstrittig die Beugung von Röntgen-, Neutronen- oder Synchrotronstrahlung genannt werden, die eine exakte Eigenspannungsbestimmung an metallischen und kristallinen nichtmetallischen Werkstoffen praktisch uneingeschränkt möglich macht. Der einzige Nachteil dieser Methode besteht darin, dass neben einem hohen Maß an Fachwissen ein mitunter erheblicher apparativer Aufwand erforderlich ist und zudem Strahlenschutzmaßnahmen die Anwendbarkeit und besonders die Größe der Untersuchungsobjekte beschränken. Deshalb ist der Wunsch nach einfacheren, aber dennoch zerstörungsfreien Messmethoden verständlich.

Am ifs wird seit vielen Jahren neben den genannten Beugungsmethoden ein mikromagnetisches Messverfahren angewendet, das die letztgenannten Voraussetzungen grundsätzlich erfüllt. Abb. 1 zeigt das komplette Messsystem, das aus einem einfachen 19"- Gehäuse, einem etwa zigaretenschachtelgroßen Sensor sowie einem üblichen Notebook mit der Mess- und Datenerfassungssoftware besteht. Das Messverfahren beruht auf dem Effekt, dass ferromagnetische Werkstoffe wie Eisen, Kobalt oder Nickel und deren magnetische Legierungen eine Abhängigkeit zwischen

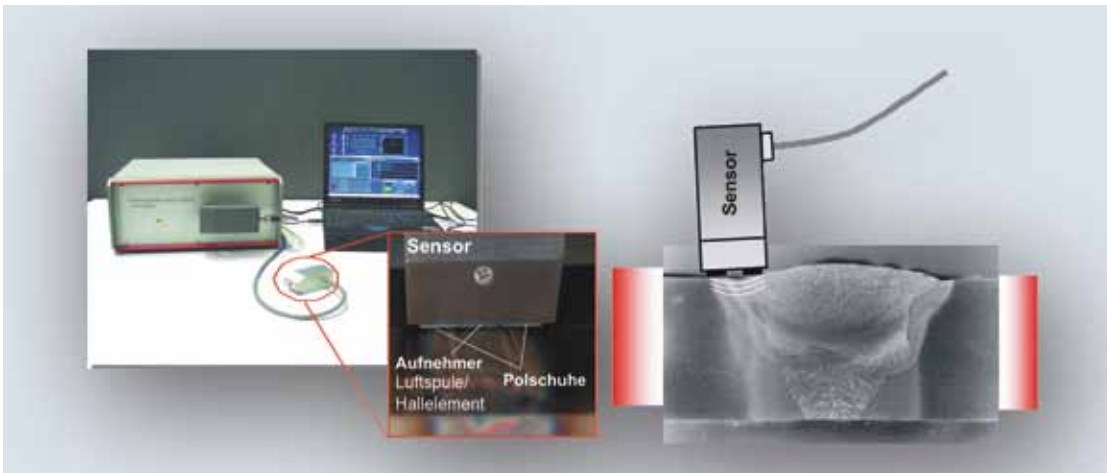


Abb. 1: Messsystem mit Sensor (links) und Anwendungsschema (Mitte, rechts).

den Magnetisierungseigenschaften und dem elastischen Verformungszustand der Mikrostruktur zeigen. Das bedeutet, dass bei Anlegen eines magnetischen Wechselfeldes die Form der aus Feldstärke und Induktion gebildeten magnetischen Hystereseurve vom Spannungszustand abhängt und dieser durch eine genaue Analyse der Hysterese daher prinzipiell bestimmt werden kann (Abb. 2). Da die Hysterese aufgrund der mikroskopisch diskontinuierlich ablaufenden Ummagnetisierungsprozesse ebenfalls nicht kontinuierlich durchlaufen wird, sondern sich die Übergänge als Sprünge, nach ihrem Entdecker Barkhausensprünge benannt, vollziehen, ist die Methode meist als sogenannte Barkhausen-rauschmethode bekannt. Tatsächlich hat sich aber gezeigt, dass die alleinige Konzentration auf diesen Effekt eine Bestimmung von Spannungen oder Eigenspannungen nicht erlaubt, weil auch die Mikrostruktur des Werkstoffes Einfluss auf die magnetische Hysterese ausübt. Dies bedeutet, dass für jeden Werkstoffzustand eine Kalibrierung unumgänglich ist.

Für Schweißverbindungen kam die Methode bisher nicht in Betracht, weil sehr unterschiedliche Werkstoffe und lokal inhomogene Werkstoffeigenschaften in der Schweißnahtumgebung – die zudem noch verfahrensabhängig sind und durch die jeweilige Wärmeleitung beeinflusst werden – zu einer so großen Zahl unterschiedlicher Zustände führen würden, dass eine an den Erfordernissen der Praxis orientierte Kalibrierung undenkbar war. In einem durch die Forschungsvereinigung des DVS unterstützten und durch die AiF geförderten IGF-Forschungsvorhaben „Mikromagnetische Bestimmung von Schweißspannungen“ wurden die Anwendungsmöglichkeiten der mikromagnetischen Methode für die Schweißspannungsbestimmung sowie anhand praxisrelevanter Schweißverbindungen der erforderliche Kalibrieraufwand untersucht. Die Idee des Vorhabens bestand darin zu prüfen, inwieweit die magnetische Methode für die schweißtechnische Praxis geeignet ist, wo die Grenzen liegen und Kalibrierdaten zu erarbeiten, die für die spätere Anwendung an typischen Praxisverbindungen und -werkstoffen zur Verfügung stehen.

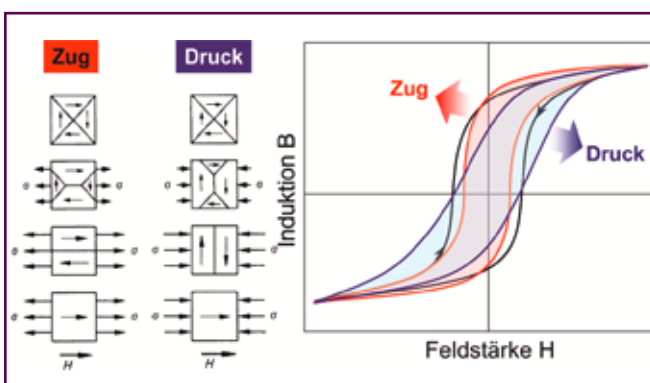


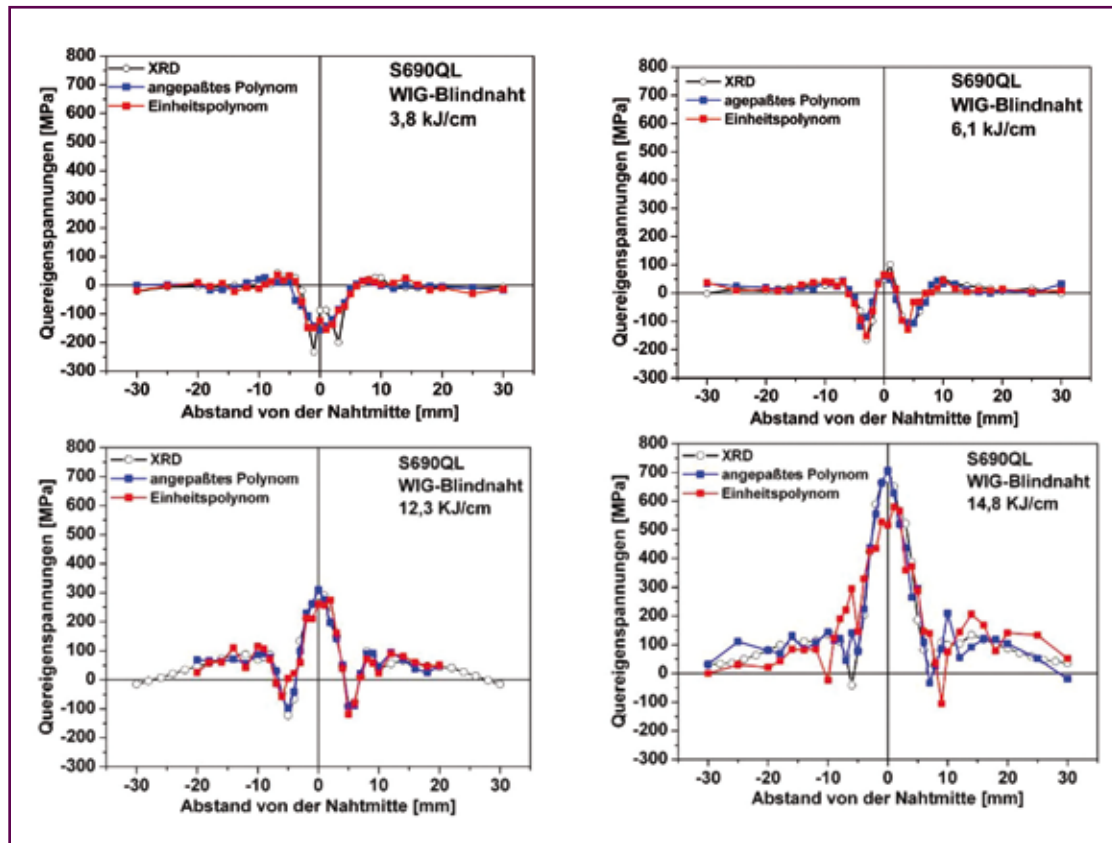
Abb. 2: Schematische Darstellung des Prinzips der magnetoelastischen Verformung (Magnetostraktion). Einfluss der Spannung auf die Form der magnetischen Hystereseurve.

Das in Abb. 1 gezeigte Messsystem, das für die Untersuchungen eingesetzt wurde, stellt neben der erwähnten Barkhausenrauschamplitude eine Vielzahl weiterer spannungs- und gefügesensitiver magnetischer Messgrößen zur Verfügung. Die erste Aufgabe bestand daher darin, diese Größen zu systematisieren und die für eine praxisorientierte Anwendung des Verfahrens wesentlichen zu identifizieren. Hierzu wurden die magnetischen Parameter vergleichend an bekannte Last- und Eigenspannungszustände über eine vielparametrische Regressionsrechnung angepasst, bis stabile Auswertepolynome vorlagen. Im Ergebnis zeigte sich, dass von den über 40 verfügbaren Messgrößen ca. 7 eine reproduzierbare Aussage ermöglichen. Im zweiten Schritt wurden die benötigten Auswertekoeffizienten werkstoffabhängig an Baustählen mit Streckgrenzen von 235...960 MPa und des Weiteren im geschweißten Zustand nach Variation der  $t\&/5$ -Zeiten zwischen 5 und 25 sec. bestimmt. Als Schweißverfahren wurden das WIG und das MAG-Schweißen betrachtet, die Blechdicken lagen zwischen 5 und 20 mm.

Es zeigte sich sehr rasch, dass die Beschränkung auf die bekannte Barkhausenrauschamplitude eine verlässliche Bestimmung der Eigenspannungen in unterschiedlichen Schweißverbindungen nicht zulässt. Wird stattdessen auf eine größere Zahl magnetischer Parameter zurückgegriffen, so lassen sich einheitliche Auswertepolynome erstellen, mit denen an typischen schweißbaren Stählen innerhalb einer großen Breite möglicher Gefügestände eine Eigenspannungsbestimmung mit guter Verlässlichkeit möglich ist. Somit reduziert sich der notwendige Aufwand für die Erarbeitung von Kalibrierdaten für bis dahin nicht untersuchte Stähle erheblich. Abb. 3 zeigt am Beispiel eines Stahls S690QL, dass mit der magnetischen Methode die vorhandenen Eigenspannungen (hier vergleichend röntgenographisch bestimmt) nicht nur relativ genau wiedergegeben, sondern vielmehr auch deren Profile mit ihren charakteristischen Spitzen und Tiefen abgebildet werden können. Dabei verkürzt sich die Messzeit bei Eigenspannungsverteilungen, wie sie hier ermittelt wurden, mindestens auf ein Zehntel der für die röntgenographischen Messungen erforderlichen Zeit.

Als Ergebnis des Forschungsvorhabens hat sich gezeigt, dass die mikromagnetische Messmethode eine für die Praxis durchaus sinnvolle Alternative zu anderen Methoden der Eigenspannungsbestimmung darstellt. Der Vorteil des Verfahrens ist, dass der Aufbau der Messapparatur einen Einsatz auch unter rauen Umgebungsbedingungen erlaubt. Messungen sind auch dann noch

möglich, wenn z. B. korrosionsschützende Anstriche vorhanden sind. Die Bauteilgröße spielt dabei keine Rolle, solange die Messstellen für den Sensor zugänglich sind. Aufgrund der kurzen Messzeiten lassen sich auch ausgedehnte Eigenspannungsprofile in kurzer Zeit bestimmen, wobei insbesondere lokale Zugeigenspannungsspitzen sehr gut detektiert werden können. Allerdings ist die Kenntnis der Einsatzgrenzen mindestens genauso wichtig wie die des möglichen Anwendungspotenzials. So sind Messungen auf Schweißnahtgeometrien beschränkt, die keine übermäßig großen Oberflächenunebenheiten aufweisen, weil ansonsten wechselnde Luftspalte zwischen Oberfläche und Sensorelement die Messsignale beeinflussen. Messungen an Kehlnähten sind daher mit der vorhandenen Sensorgeometrie nicht möglich, wobei eine entsprechende Anpassung bei gegebenem Bedarf denkbar ist. Auch können Eigenspannungsbestimmungen nicht an Schweißverbindungen durchgeführt werden, bei denen weder der Werkstoff noch dessen abkühlzeitabhängiger Zustand näherungsweise bekannt sind. Mit den erarbeiteten Kalibrierdaten steht aber eine Datenbasis zur Verfügung, die einen ansehnlichen Teil von Praxisanwendungen abzudecken vermag. Die Messgenauigkeit liegt unter Beachtung der genannten Gesichtspunkte bei ca.  $\pm 50$  MPa, was für viele Anwendungen ganz sicher ausreichend sein dürfte. Liegen die Ansprüche im Einzelfall höher, so stößt die Methodik ebenso wie andere Verfahren an ihre Grenzen, und es gibt zum Rückgriff auf Beugungsmethoden keine Alternative.



Ansprechpartner:  
Dr.-Ing. Thomas  
Nitschke-Pagel  
[t.pagel@tu-bs.de](mailto:t.pagel@tu-bs.de)

Abb. 3: Vergleich röntgenographisch gemessener und mikromagnetisch berechneter Quereigenspannungen in WIG-Blindnahtschweißungen aus S690QL, Dicke 10 mm.

## „YOUNG PROFESSIONALS“

17. und 18. Juni 2011 in Wilhelmshaven mit  
DVS-LV-Wettbewerb „Jugend schweißt“

Die DVS-Landesverbände Niedersachsen/Bremen und Hamburg/Schleswig-Holstein veranstalteten die zweite Tagung der Nachwuchsförderung gemeinsam mit der Ausscheidung beider Landesverbände „Jugend schweißt“ in der Niederlassung Wilhelmshaven der SLV Hannover.



Michael Assing (jfs)



Mit ihrem Schützling zufrieden – Frau Dr. Pries (Mitte)

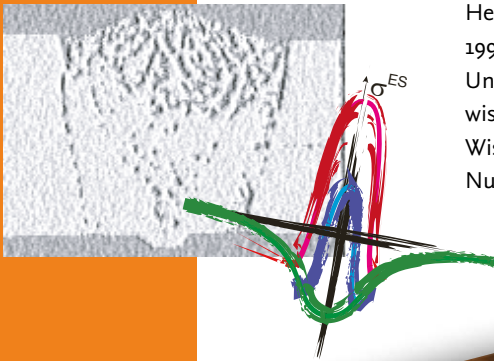


auch zufrieden – der Vorstand des Landesverbandes

Neun Vorträge von jungen Ingenieurinnen und Ingenieuren sowie von Studierenden wurden ergänzt durch zwei Übersichtsreferate mit den Themen: „Gründungsstrukturen Offshore Windenergie“ (Bernhard Richter) und „Werkstoffbedingte Schäden an Schweißverbindungen“ (Helge Pries) aus beiden Landesverbänden. Vorträge über die Inbetriebnahme und zeitgemäße Modernisierung einer Brennschneidanlage, über Schwingfestigkeitsverhalten von Bolzenschweißungen im Schiffbau sowie Laser-Hybrid-Schweißen von Stahlwerkstoffen waren Inhalte des ersten Tages. Der zweite Tag bot „Generative Fertigung mittels Selective-Laser-Melting“, „Lichtbogenlöten hochfester Feinbleche“ sowie einen Auszug einer Studienarbeit mit dem Thema „Hochfrequentes Hämmern von Schweißverbindungen aus Aluminiumlegierungen“. Dieser Beitrag wurde mit dem ersten Platz und einem Geldpreis für eine exzellente studentische Leistung honoriert. Michael Assing vom jfs der TU Braunschweig belegte mit seinem wissenschaftlichen Vortrag „Werkstoffkundliche Untersuchungen zum Elektronenstrahlschweißen von dickwandigen Duplexwerkstoffen ohne Zusatzwerkstoff“ den 4. Platz. Den teilnehmenden Hochschulen, Universitäten und Professoren wurde für ihren Einsatz gedankt. Die Vorträge wurden auch von den Teilnehmern „Jugend schweißt“ in deren Pausen besucht. Der DVS-Wettbewerb „Jugend schweißt“ bietet jungen Menschen im Alter zwischen 16 und 23 Jahren Gelegenheit, ihre fachkundlichen und praktischen Fertigkeiten im Schweißen unter Wettkampfbedingungen miteinander zu vergleichen. Auf der gemeinsamen Abendveranstaltung ergaben sich viele Gespräche der verschiedenen Teilnehmergruppen. Nach der Veranstaltung fand am Sonntagabend eine Schifffahrt mit Besichtigung des neuen Hafens statt – auch um der Jury genug Zeit für die Auswertung der Wettkampfergebnisse (u. a. am Schweißtrainer) zu geben. Anschließend wurden die Sieger gemeinsam für beide Landesverbände geehrt. Für die Veranstaltung im Jahr 2013 ist Flensburg als Austragungsort vorgesehen.



# Festkolloquium Eigenspannungen



Helmut Wohlfahrt vollendete am 1. Januar 2011 sein 75. Lebensjahr. Er war in der Zeit von 1992 bis 2001 Leiter des heutigen Instituts für Füge- und Schweißtechnik der Technischen Universität Braunschweig. Anlässlich seines Geburtstags veranstaltete das Institut ein wissenschaftliches Kolloquium, in dem ehemalige Schüler und fachlich nahestehende Wissenschaftler einen Überblick über den derzeitigen Erkenntnisstand der praktischen Nutzung von Eigenspannungen – nicht nur in Schweißverbindungen – als Ingenieurswerkzeug gaben.

Das Festkolloquium begann am Freitag, 11.03.2011 um 13.00 Uhr im Haus der Wissenschaft mit einer Begrüßung durch Prof. Klaus Dilger, der mit seinem Beitrag über Zeitzeugen und Wegbegleiter von Prof. Wohlfahrt dessen akademisches Wirken würdigte. Im Anschluss kamen am Freitag sieben der insgesamt 13 Referenten zu Wort. Sämtliche Volltexte stehen in ihrer Themenvielfalt unter [http://www.ifs.tu-bs.de/festkolloquium\\_wohlfahrt](http://www.ifs.tu-bs.de/festkolloquium_wohlfahrt) zum Download zur Verfügung.



Der LV Niedersachsen-Bremen und der BV Süd-Ost-Niedersachsen des DVS waren Gastgeber der Abendveranstaltung im Foyer des Institutsgebäudes am Langen Kamp 8. Dafür vielen Dank.

# Personelle Veränderungen



Dr. rer. nat. **Fabian Fischer** übernahm am 01. September in der Nachfolge von Dr.-Ing. Michael Frauenhofer die Abteilungen Klebtechnik und Faserverbundtechnologie. Dr. Fischer hat nach seinem Studium an der Leibniz Universität Hannover im Bereich der Technischen Chemie promoviert und ist nach einem mehrjährigen Ausflüg in die Industrie im Jahre 2008 wieder in die Forschung zurückgekehrt. In den letzten Jahren hat sich Dr. Fischer am Laser Zentrum Hannover e.V. intensiv mit der Bearbeitung von Faserverbundmaterialien beschäftigt. In seiner neuen Funktion nun möchte Dr. Fischer die Klebtechnik und die Faserverbundtechnologie näher zusammenbringen, um neue Fügekonzepte im Leichtbau zu entwickeln und zu etablieren.

Dipl.-Wirtsch.-Ing. **Saskia Fege** hat im September ihre Diplomarbeit am *ifs* eingereicht und mit der Note 1,3 abgeschlossen. Wir freuen uns, sie seit dem 01. Oktober als wissenschaftliche Mitarbeiterin für die Abteilung Festigkeit und Bauteilverhalten gewonnen zu haben. Neben ihrem DFG Projekt, in dem sie sich mit Schwingfestigkeit und Eigenspannungen dünnwandiger Laserschweißverbindungen aus Magnesium beschäftigt, betreut sie die Vorlesung „Werkstofftechnologie 1“.



Dipl.-Ing. **Bernward Schönteich** entschied sich im August für seinen Berufseinstieg für unser Institut und bearbeitet in der Abteilung Kleben und Mechanisches Fügen den Themenbereich der Applikationstechnik. Derzeit befasst er sich mit der Untersuchung thermischer Strömungssensorik an hochviskosen Klebstoffen und deren Fließverhalten.

Dr. rer.-nat. **Andreas Kundratek** hat sich nach verschiedenen wissenschaftlichen Tätigkeiten an der TU Braunschweig sowie der Ostfalia Hochschule Suderburg zu einem Wechsel ans *ifs* entschlossen und forscht nun in der Abteilung Kleben und Mechanisches Fügen an einer Elektronenstrahlvorbehandlung von Titanoberflächen zur Verbesserung der Alterungsbeständigkeit von Titanklebung.



Dipl.-Ing. **Ruben Heid** ist seit dem 1. Juli dieses Jahres wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut und verstärkt im Rahmen seiner Promotion in Kooperation mit der Audi AG in Ingolstadt die Abteilung Druckguss. Tätigkeitsschwerpunkt sind grundlegende Untersuchungen zur Optimierung der Standzeit von Druckgussformen unter seriennahen Bedingungen.

Dipl.-Ing. **Jonas Hensel** befasst sich seit dem 01. Mai in der Abteilung Festigkeit und Bauteilverhalten mit Untersuchungen zum Verhalten geschweißter Stahlverbindungen unter schwingender Beanspruchung. Dabei stehen insbesondere die Eigenspannungen infolge des Schweißprozesses und die Schwingfestigkeit im Vordergrund.



Dipl.-Ing. **Malte Mund** verstärkt unsere Abteilung Faserverbundtechnologie seit Anfang Mai 2011. Dort befasst er sich mit der Kraffeinleitung in Sandwichstrukturen mit Faserverbunddeckschichten sowie dem Verhalten asymmetrischer Sandwichstrukturen nach Impactschädigungen.

Dipl.-Wirtsch.-Ing. **Jakob Klassen** ist seit dem 01. März 2011 in der Abteilung Festigkeit und Bauteilverhalten. Neben seinen Aufgaben als Studienberater und der Betreuung der Vorlesung Füge-technik beschäftigt er sich mit der numerischen Simulation von schweißbedingten Eigenspannungen und Verzügen. In diesem Zusammenhang bearbeitet er die Forschungsvorhaben „Schweißen dicker Bleche unter Baustellenbedingungen“ sowie das „Repairwelding of Structures“




# Abschied

Dr.-Ing. Michael Frauenhofer hat im Sommer dieses Jahres neue Verantwortung auf dem Gebiet der Füge-technik und des Leichtbaus bei der Audi AG in Neckarsulm übernommen. Michael Frauenhofer hat schon im Studium der Materialwissenschaften in Bayreuth seine Leidenschaft für das Kleben und für Faserverbundwerkstoffe entdeckt und diese kontinuierlich gepflegt. So war es nur logisch, dass er sich nach seiner Diplomarbeit mit dem Titel „Elektronenstrahlhärtung von Matrixharzen“ bei Henkel Loctite in Bay Point, USA mit RTM (Resin Transfer Moulding)-Prozessen beschäftigt und dies in Arbeiten in *ifs*-Projekten zusammen mit Airbus über die Thermoanalyse von Faserverbundkunststoffen vertieft hat. Michael Frauenhofer war von Ende 2005 bis zum 31.07.2011 am *ifs* tätig, zuletzt als Leiter der Abteilungen Kleben und mechanisches Fügen und der Faserverbundtechnologie. Im Jahr 2010 wurde er mit dem Prädikat „mit Auszeichnung“ promoviert. Seine Expertise, sein Engagement und seine soziale Kompetenz waren der Grundstein für den erfolgreichen Aufbau der Abteilung „Faserverbundtechnologie“ und die Weiterentwicklung der Forschung in der Klebtechnik zu der heutigen Ausgewiesenheit. Herr Dr. Fabian Fischer wird die Arbeiten in diesem Sinne weiterführen und steht mit seinem Team als kompetenter Ansprechpartner für alle Fragen der Klebtechnik und der Faserverbundtechnologie zur Verfügung. Lieber Michael, vielen Dank für die schöne und erfolgreiche Zeit, wir bleiben dir freundschaftlich verbunden.

## In Anerkennung hervorragender wissenschaftlicher Leistungen:

Dr. Michael Frauenhofer empfängt den Förderpreis der Stiftung der Ingenieurkammer Niedersachsen. **Gratulation!**





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: G. Hemken

Grafik: B. Wolfrum

