

Eng verbunden

## Zur Philosophie des Klebens

Der Leichtbau bedeutet im Betrieb gesteigerte Effizienz und damit Ressourcenschonung. Der damit verbundene Einsatz von Funktionsmaterialien, dem optimalen Werkstoff am richtigen Ort, erfordert die Kombination von zum Teil sehr unterschiedlichen Materialien, bei deren Zusammenfügen klassische Fügeverfahren nicht möglich oder Materialschwächung durch Bohren für beispielsweise gewichtserhöhende Schraub- oder Nietverbindungen prohibitiv sind. Das Fügeverfahren der Wahl ist das Kleben [1]. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über einige aktuelle Aspekte dieser Technologie.

Auf dem Markt sind Tausende von Klebstoffen verfügbar, daher drängt sich die Frage auf, ob wirklich noch weitere benötigt werden. Dennoch gibt es zahlreiche Fälle, in denen kommerziell verfügbare Klebstoffe nicht geeignet sind: Sie genügen beispielsweise nicht der geforderten Alterungsbeständigkeit, sie ermöglichen nicht die benötigte Produktivität,

zum Beispiel aufgrund einer zu langsamen Härtungsgeschwindigkeit, oder sie weisen nicht die geforderten mechanischen Eigenschaftsprofile auf. Oftmals erfüllen die etablierten Klebstoffe die meisten Anforderungen, aber ihnen fehlt die eine, die entscheidende Eigenschaft. Und gerade in der Kombination ungewöhnlicher Merkmale liegt neben einer detaillierten Kenntnis



»Klebtechnik ist – insbesondere im Fahrzeugbau – eine schon länger eingeführte Technologie, deren Potenzial noch nicht voll ausgeschöpft ist.«

Prof. Dr. rer. nat. Bernd Mayer ist Leiter des Fraunhofer-Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM in Bremen.

der Oberflächenbeschaffenheit sowie der Prozess- und Life-cycle-Bedingungen oft der Schlüssel zur Einsatzfähigkeit in der Produktion.

Gerade für den effektiven Leichtbau sind auch völlig neue Wege und Konzepte gefordert. Unabhängig davon, ob es sich um eine konkrete Produktentwicklung oder das Aufzeigen eines neuen allgemeiner einsetzbaren Wegs handelt – im Mittelpunkt steht meist die Verbesserung der Produktivität bei der klebtechnischen Fertigung. Ein Beispiel dafür ist die Klebstoff-Schnellhärtung mit modifizierten Klebstoffen.

### KLEBSTOFF-SCHNELLHÄRTUNG MIT MODIFIZIERTEN KLEBSTOFFEN

Im Fertigungsprozess soll die Härtung reaktiver Klebstoffe unter milden Bedingungen, das heißt bei möglichst niedriger Temperatur, erfolgen. Gleichzeitig soll der Härtungsprozess so schnell wie möglich ablaufen, ohne dabei die Lagerstabilität der ungehärteten Klebstoffe zu beeinträchtigen. In nahezu idealer Weise werden diese Forderungen von photohärtenden Klebstoffen erfüllt. Daher sind derartige Systeme seit Langem ein Entwicklungsschwerpunkt; sie sind aber nur für eine begrenzte Zahl von Anwendungen geeignet, da wenige zu fügen- de Substrate hinreichend transparent sind, um die härtende Strahlung zum Klebstoff durchzulassen.

Bei den konventionell thermisch härtenden Klebstoffen sind Möglichkeiten gefragt, die Wärme rasch, zielgerichtet und selektiv in Bauteile und Klebstoff einzubringen. Geeignete Methoden hierfür sind etwa Induktion, Mikrowellen, Heißluft oder IR-Strahler. Die Identifizierung der optimalen Methode zum schnellen Erwärmen auf eine für die chemische Vernetzung notwendige Temperatur ist aber nur eine der Herausforderungen. Problematisch sind auch die Materialeigenschaften des gehärteten Klebstoffs. Bei den meisten kommerziellen Klebstoffen erhält man ein schaumiges, mechanisch instabiles Polymerisat, wenn diese in-



**BILD 1** Motorhauben-Innenteil mit aufgeklebter lokaler Schlossverstärkung (oben links); die mit PASA-Technologie aus dem Fraunhofer IFAM aufgebrachte Schlossverstärkung im Detail nach Beschichtung durch kathodische Tauch-Lackierung (KTL) und KTL-Ofen (oben rechts); Probenpräparation (unten links) und Detailansicht der Schlossverstärkung im Querschliff (unten rechts) zur Visualisierung der Homogenität der Klebfuge (alle Bilder: © Fraunhofer IFAM)

nerhalb weniger Sekunden gehärtet wurden; die Ursache für das Aufschäumen sind verdampfende oder sich zersetzende Komponenten. Für gute mechanische Eigenschaften ist hingegen eine definierte Morphologie erforderlich, die sich jedoch in der kurzen Härtungszeit oft nicht ausbilden kann.

Um dennoch die erforderlichen mechanischen Eigenschaften erzielen zu können, müssen Reaktivsysteme ausgewählt werden, die in der Lage sind, hinreichend schnell miteinander zu reagieren und zugleich auch eine definierte Heterogenität aufweisen [2]. Da sich Letztere nicht durch Entmischungsvorgänge ausbilden kann, müssen die Domänen etwa in Form von Nanopartikeln oder mikroskaligen Elastomerpartikeln vorgegeben werden.



»Ohne die Verbindungstechnik Kleben ist eine moderne Industriegesellschaft nicht vorstellbar.«

Prof. Dr. rer. nat. Andreas Hartwig ist stellvertretender Institutsleiter des Fraunhofer-Instituts für

Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM in Bremen und leitet die Abteilung Klebstoffe und Polymerchemie.

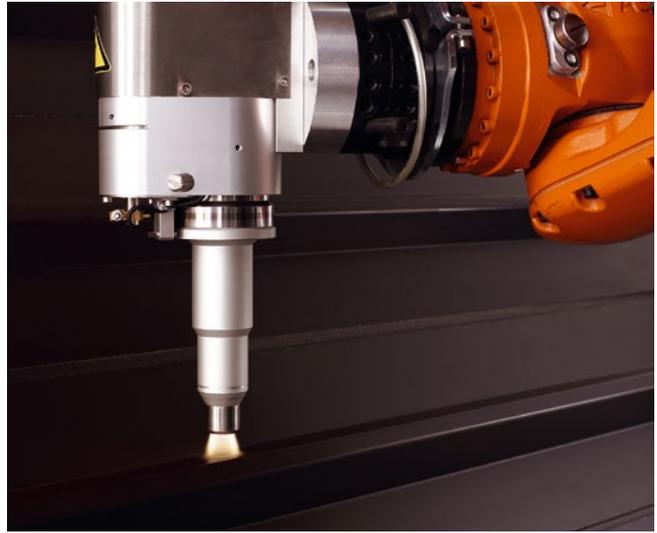
Ein Anwendungsbeispiel für die thermische Schnellhärtung ist der Einsatz von Bauteilen, die mit Klebstoff vorbeschichtet wurden. Bei ihnen würde der aus der Vorbeschichtung resultierende Produktivitätsvorteil ohne Einsatz der Schnellhärtung oftmals zunichte gemacht.

#### PASA-TECHNOLOGIE – MIT KLEBSTOFF VORBESCHICHTETE BAUTEILE

Die Montage und klebtechnische Verbindung von Bauteilen kann beschleunigt werden, wenn kein Klebstoff aufgetragen werden muss, sondern dieser sich bereits als trockene Schicht auf dem Bauteil befindet. Das ist besonders dann sinnvoll, wenn die Applikation des Klebstoffs unter den gegebenen Produktionsbedingungen ungünstig ist. Ein Beispiel hierfür ist die lokale Verstärkung von Blechbauteilen im Presswerk in der Automobilindustrie – eine Arbeitsumgebung, in der der Umgang mit flüssigen Klebstoffen schwerlich vorstellbar ist. Bild 1 zeigt diese Anwendung am Beispiel eines Motorhaubennenteils mit aufgeklebter Schlossverstärkung, bei der ein vorapplizierbarer Klebstoff zum Einsatz kam [3]. Bei dem Klebstoff handelt es sich um ein Epoxidharz, das auf dem Verstärkungsblech als trockene Schicht vorbereitet war.

Ein anderes Beispiel sind Klebbolzen, die unter anderem in der Automobilindustrie benötigt werden, wenn der Aufbau der Karosserie aus carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) erfolgt und deshalb die üblichen Schweißbolzen nicht mehr verwendbar sind. Wenn nicht mit vorbeschichteten Bolzen gearbeitet würde, müsste eine extrem kleine Menge flüssigen Klebstoffs auf die Bolzen aufgetragen werden. Die hierfür notwendige Applikationstechnik ist aus dem Mikrokleben bekannt, hingegen wäre der prozesssichere Einsatz in der Automobilrohbaufertigung eine besondere Herausforderung.

Die Einsatzbereiche vorapplizierbarer Klebstoffe erstrecken sich über alle Bereiche der modernen Klebtechnik, und es wurde für diese Technologie aus dem Fraunhofer IFAM die Marke PASA – für Pre-Applicable Structural Adhesives – eingetragen.



**BILD 2** Reinigung und Aktivierung von komplexen Faserverbund-Kunststoff-Oberflächen durch Atmosphärendruck-Plasma

#### OBERFLÄCHENVORBEHANDLUNG VOR DEM KLEBEN

Da die Festigkeit einer Klebung nicht nur von der Kohäsion des Klebstoffs, sondern auch von der Adhäsion abhängt, ist es besonders wichtig, dass die zu verklebenden Fügeteile entsprechend vorbehandelt werden. Es genügt dabei nicht immer, die Fügeteileoberflächen von Fett oder Schmutzresten zu befreien. Vielmehr muss besonders dann, wenn hohe Festigkeiten verlangt werden, neben dem Entfetten eine mechanische oder eine chemische Vorbehandlung der Oberflächen erfolgen. Denn die Erfahrung zeigt, dass in etwa 70 % der Fälle, in denen Klebverbindungen aufgrund mangelnder Haftung versagen, die Oberflächen verunreinigt sind.

Für die Vorbehandlung der Fügeteileoberflächen steht eine Vielzahl von Technologien zur Verfügung, die je nach Art des zu



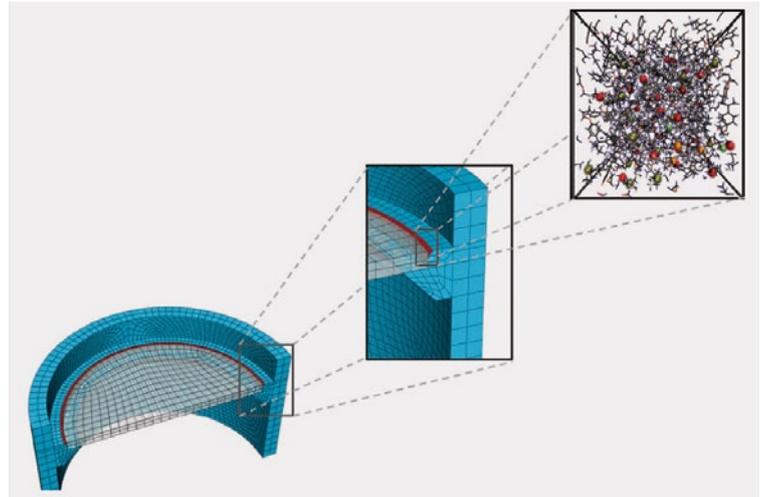
»Der Einsatz von Simulationsverfahren kann die Leistungsfähigkeit und Lebensdauer mit Klebtechnik gefügter Bauteile wesentlich verbessern und Entwicklungszeiten deutlich verkürzen.«

Dr. rer. nat. Marc Amkreutz arbeitet als Wissenschaftler im Bereich Adhäsions- und Grenzflächenforschung des Fraunhofer-Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM in Bremen.

behandelnden Fügeparts, des gewünschten Behandlungsergebnisses sowie der Möglichkeit einer Prozessintegration zum Einsatz kommen. Generell kann zwischen nasschemischen und trockenen Vorbehandlungsverfahren unterschieden werden, wobei in beiden Fällen neben den oben genannten Funktionalitäten die Umweltverträglichkeit der Prozesse eine wichtige Rolle spielt. In diesem Zusammenhang sind in den zurückliegenden Jahren eine Reihe neuer und innovativer Behandlungsprozesse entwickelt worden, so zum Beispiel umweltverträgliche Anodisierungsprozesse für Aluminiumwerkstoffe und Plasmaverfahren, die bei Atmosphärendruck arbeiten. Gerade Letztere eignen sich besonders gut zur lokalen Vorbehandlung von Oberflächen, das heißt genau an den Positionen, an denen später geklebt werden soll, Bild 2.

#### VORHERSAGE VON EIGENSINNUNGEN

Neben der Entwicklung von Oberflächenbehandlungsprozessen und Klebstoffen ist die Betrachtung von Einflüssen des Produktions- beziehungsweise Fertigungsprozesses von besonderer Bedeutung für die erzeugten Produkte. Die in der Entwicklungsphase eines Produkts hergestellten Muster bieten nur einen begrenzten Einblick in die komplexen Vorgänge, die im späteren industriellen Herstellungsprozess auftreten können. Ein Beispiel ist das Härten reaktiver Klebstoffe, bei denen während der Fertigung eine chemische Vernetzung und somit eine Reduktion des Volumens auftreten. Dieser „Härtungsschrumpf“ lässt sich bisher nicht voraussagen, die Auswirkungen auf die Bauteileigenschaften müssen durch aufwendige und zeitintensive Messreihen bestimmt werden. Durch eine Berücksichtigung schon beim Design der Klebungen würde eine Kompensation der beim Härten auftretenden Spannungen im Fügepart beziehungsweise Verschiebungen der geklebten Komponenten relativ zum restlichen Bauteil möglich.



**BILD 3** Der aus dem atomaren Strukturmodell des Klebstoffs (oben rechts) berechnete Volumenschrumpf geht direkt als Parameter in die Auslegung des Bauteils (unten links) ein; so lassen sich Volumenänderung des Klebstoffs in der Klebfuge (mitte, rot hervorgehoben) und die sich aufbauenden Eigenspannungen im Bauteil vorhersagen

Derartige Fragestellungen und damit der Bedarf für entsprechende Simulationsverfahren bestehen etwa beim positionsgenauen Kleben von Linsen in optischen Geräten oder von Sensoren im Messtechnikbereich, bei denen eine hohe Präzision oder Zuverlässigkeit der Hochleistungsklebstoffe essenziell sind. In diesem Zusammenhang konnte durch Verknüpfen verschiedener Analyse- und Simulationen ein Simulationstool zur Vorhersage der Volumenänderung entsprechender Klebstoffe entwickelt werden [4]. Dazu wurde ein makrokinetisches Reaktionsmodell für die Beschreibung der im Klebstoff ablaufenden Vernetzungsreaktionen erstellt. In Kombination mit thermodynamischen Messungen lässt sich mit diesem Modell zu jedem Zeitpunkt die Zahl der vorhandenen reaktiven Gruppen und damit der Reaktionsumsatz berechnen.



»Personalqualifizierung ist ein zentraler Bestandteil der Qualitätssicherung, da der verlässliche Einsatz der Klebtechnik nur mit geschultem Personal möglich ist.«

Dr. rer. nat. Erik Meiß ist stellvertretender Abteilungsleiter im Bereich Weiterbildung und Technologietransfer – Klebtechnisches Zentrum – des Fraunhofer-Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM in Bremen.

Molecular-Modelling-Verfahren ermöglichen die Simulation der Polymernetzwerke auf molekularer Ebene und die Berechnung der zugehörigen Dichte sowie des Polymervolumens. Bei einem Klebstoff bekannter Zusammensetzung lässt sich so die härtungsbedingte Volumenänderung zu jedem beliebigen Zeitpunkt voraussagen. Durch Integration dieser molekular bestimmten Kenngrößen in Finite-Elemente-Methoden können die Auswirkungen des Härtungsschrumpfs bei der Auslegung realer Bauteile berücksichtigt werden, **Bild 3**

#### AUTOMATISIERTE PROZESSE

Montageprozesse lassen sich nicht nur durch das schnelle Härten von Klebstoffen beschleunigen, sondern auch durch das Automatisieren der entsprechenden Fertigungsschritte. Dies gilt insbesondere für solche Industriezweige, in denen Prozesse heute noch im Wesentlichen manuell ablaufen – etwa im Flugzeugbau. Zeitintensive Aufgaben, die derzeit noch nacheinander erfolgen, können durch Voll- und Teilautomatisierung zusammengefasst werden. Im Flugzeugbau besteht die besondere Herausforderung, dass die Bauteile sehr groß sind und jeweils Unikate darstellen, da sie aufgrund der Größe durch unvermeidbaren Bauteilverzug geometrisch deutlich voneinander abweichen. Eine präzise Geometrievermessung jedes Bauteils ist hier notwendig, um eine exakte Klebstoffapplikation sowie ein exaktes Fügen mittels Roboter zu gewährleisten.

Neue Klebstoffsysteme in Kombination mit automatisierten Applikationstechniken werden auch im Bereich der Elektromobilität benötigt. Die serielle Fertigung von Fahrzeugen mit Elektroantrieb stellt völlig neue Anforderungen an die Verbindungstechnik. Gerade im Bereich der Antriebs- und Speichertechnik werden neuartige Klebstofflösungen gesucht, um den Betrieb der Fahrzeuge mit hoher Effizienz zu ermöglichen. Als Beispiele seien wärmeleitfähige oder elektrisch leitfähige Klebstoffe genannt.

#### QUALITÄTSSICHERUNG BEIM KLEBEN

In vielen Bereichen, insbesondere in der Mikrosystemtechnik und im Motorenbau, müssen Klebverbindungen gegen Medien

und Umweltbedingungen beständig sein, die weit über die üblichen Prüfbedingungen hinausgehen. Beispielhaft seien hier neue Motoren- und Getriebeöle genannt, die in zunehmendem Umfang Rohstoffe auf nachwachsender Basis enthalten, oder Sensoren, die in heißen Ölen oder beim „Structural Health Monitoring“ (SHM) von Großanlagen über lange Zeit zuverlässig funktionieren müssen. Hinzu kommt, dass bei solchen Anwendungen oftmals nur Klebfugendicken von wenigen Mikrometern gewünscht sind und die Fügebauteile häufig sehr unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweisen. In Kombination mit den auftretenden Temperaturwechseln resultieren hieraus erhebliche mechanische Spannungen. Um diese Herausforderungen zu lösen, sind neue Wege zur Zähelastifizierung von Klebstoffen ein Schwerpunkt bei der Entwicklung neuer Produkte.

Kleben ist nach ISO 9000 ff. ein „spezieller Prozess“. Dies bedeutet, dass wichtige Eigenschaften einer Klebung wie die Verbundfestigkeit oder die Verformungsfähigkeit nicht zu 100 % zerstörungsfrei überprüft werden können. Aus diesem Grunde ist ein Qualitätsmanagementsystem für die entsprechenden Fertigungsschritte unbedingt nötig [5]. Alle qualitätsbestimmenden Faktoren müssen identifiziert, kontrolliert und dokumentiert werden. Hierdurch wird es möglich, einen reproduzierbaren und rückverfolgbaren Fügevorgang hoher Qualität zu etablieren. Personalqualifizierung ist hier der Schlüssel zum Erfolg, da jeder Beteiligte – vom Konstrukteur bis zum Werker – über eine entsprechende Qualifikation verfügen muss, um den vom ihm bearbeiteten Prozess verstehen und beherrschen zu können. Das zertifizierende Personalqualifizierungsangebot des Fraunhofer IFAM spricht die verschiedenen Ebenen in den Anwenderbetrieben an [6]-[8]. In einigen Industriezweigen ist die klebtechnische Personalqualifizierung bereits durch eine Norm verbindlich geregelt [9].

#### SCHLUSSFOLGERUNG

An die Prozesssicherheit bei der Einführung neuer Technologien beziehungsweise bei der Modifizierung bereits genutzter




---

»Die optimale Kombination von Material, Prozesstechnik und Personalqualifikation ist entscheidend für den Markterfolg.«

Prof. Dr.-Ing. Horst-Erich Rikeit ist Mitarbeiter des Bereichs Business Development des Fraunhofer-Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM in Bremen.

---

Technologien werden hohe Anforderungen gestellt. Der Einsatz multifunktionaler Materialien, Materialien mit den optimalen Charakteristika und dem besten Leichtbaupotenzial am richtigen Ort macht das Fügeverfahren Kleben unverzichtbar. Neben der optimalen Materialentwicklung und -auswahl spielen Fertigungstechniken und damit auch die Qualifikation des Personals eine immer wichtigere Rolle, da hohe Qualität sowie Reproduzierbarkeit der Fertigungsprozesse wesentliche Voraussetzungen für den Markterfolg sind. ●

#### LITERATURHINWEISE

[1] Gerd Habenicht, A.: Kleben, 3. Aufl. Springer Verlag, Heidelberg 1997

[2] Hartwig, A.: Nicht aus einem Guss, Nachrichten aus der Chemie 58 (2010) 523-525

[3] Lühring, A.; Peschka, M.; Behrens, B.-A.; Rosenberger, J.; Pielka, T.: Herstellung partiell verstärkter Blechstrukturen: Strukturell kleben ohne Klebstoffverarbeitung?, Adhäsion – kleben & dichten 55, 10/2011 37-41

[4] Kolbe, J.; Wirts-Rütters, M.; Amkreutz, M.; Hoffmann, M.; Nagel, C.; Knaack, R.; Schneider, B.: Volumenschwumpf vorhersagen und rechtzeitig einplanen, Adhäsion – kleben & dichten 09, 38-42 (2009)

[5] DVS®- Richtlinie 3310: Qualitätsmanagement in der Klebtechnik

[6] DVS®- EWF-Richtlinie 3305: Klebpraktiker

[7] DVS®- EWF-Richtlinie 3301: Klebfachkraft

[8] DVS®- EWF-Richtlinie 3309: European Adhesive Engineer

[9] DIN 6701-2: Kleben von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen – Teil 2: Qualifikation der Anwenderbetriebe, Qualitätssicherung

#### Die Autoren:

PROF. DR. RER. NAT. BERND MAYER ist Leiter des Fraunhofer-Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM in Bremen.

PROF. DR. RER. NAT. ANDREAS HARTWIG ist stellvertretender Institutsleiter des Fraunhofer-Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM in Bremen und leitet die Abteilung Klebstoffe und Polymerchemie.

DR. RER. NAT. MARC AMKREUTZ ist als Wissenschaftler im Bereich Adhäsions- und Grenzflächenforschung des Fraunhofer-Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM in Bremen tätig.

DR. RER. NAT. ERIK MEISS ist stellvertretender Abteilungsleiter im Bereich Weiterbildung und Technologietransfer – Klebtechnisches Zentrum – des Fraunhofer-Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM in Bremen.

PROF. DR.-ING. HORST-ERICH RIKEIT ist Mitarbeiter des Bereichs Business Development des Fraunhofer-Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM in Bremen.

# bigHead®

## Sichere Verbindungen für den Leichtbau

### Einfach und zeitsparend zum Ankleben oder Einbetten.



Besuchen Sie  
[www.bighead.co.uk](http://www.bighead.co.uk)  
oder [www.kvt-koenig.com](http://www.kvt-koenig.com)  
Telefon +49 7306 782-0

**KVT**  
SOLUTIONEERING GROUP