

Klebung mit „einstellbarer“ Versagensgrenze für die Qualifizierung eines Verfahrens zur Bestimmung der Festigkeit von Klebverbunden

Kerstin ALBINSKY*, Frank MOHR*, Jochen SKUPIN*, Ralph WILKEN*,
Oliver FOCKE**, Philipp HUKÉ**, Michael KALMS**, Christoph von KOPYLOW**

* Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM,
Wiener Straße 12, 28359 Bremen, jochen.skupin@ifam.fraunhofer.de

** Bremer Institut für angewandte Strahltechnik BIAS,
Klagenfurter Straße 2, 28359 Bremen

Kurzfassung. Eine in der klebtechnischen Qualitätssicherung seit langem bestehende Fragestellung ist die zerstörungsfreie Bestimmung der Festigkeit von Klebverbunden. Im Rahmen des Fraunhofer-Innovationsclusters Multifunktionelle Materialien und Technologien (MultiMaT) wird ein systematischer Ansatz zur Entwicklung eines entsprechenden Prüfverfahrens verfolgt.

Hierzu werden gezielt geschwächte Klebungen von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) hergestellt. Der Klebverbund wird mit einer Stoßwelle belastet, die abhängig von ihrer Amplitude zu einer lokalen Öffnung der geschwächten Klebung führt. Die Stoßwelle wird durch ein Plasma angeregt, dass mit einem kurzen Laserpuls in einem Opfermaterial auf der Verbundoberfläche erzeugt wird. Die so erzeugte Schädigung lässt sich nachfolgend durch zerstörungsfreie Prüfung (ZfP), z.B. mit Ultraschall, nachweisen.

Die reproduzierbare Herstellung von geschwächten Klebungen ermöglicht eine Korrelation der zu ihrer Schädigung notwendigen Laserenergie mit ihrer zerstörend gemessenen Verbundfestigkeit. Hieraus kann ein Verfahren entwickelt werden, um durch Kombination von Laserpulsen mit variabler Intensität und dem Nachweis des Versagens der Klebung mit ZfP-Methoden die Festigkeit von Klebverbunden bei vernachlässigbarer lokaler Schädigung – also quasi zerstörungsfrei – zu bestimmen.

Einleitung

Das Fraunhofer-Innovationscluster Multifunktionelle Materialien und Technologien – kurz „MultiMaT“ – besteht seit 2008. Sein Ziel ist es, ein Netzwerk zwischen großen, mittleren und kleinen Unternehmen sowie materialwissenschaftlichen Einrichtungen aufzubauen, in dem branchenübergreifend in Bremen spezifische Innovationsfelder im Bereich neuer Materialien und der damit verbundenen Fertigungsprozesse auf höchstem Niveau bearbeitet werden. Die regionale Nähe der Hochschulen, außeruniversitären Forschungseinrichtungen und Unternehmen ermöglicht die enge Zusammenarbeit verschiedener Partner.

Die Entwicklung moderner Materialsysteme dient der Verbesserung von Formgebung und mechanischen Kennwerten und rückt zunehmend „intelligente Werkstoffe“ (smart materials) in den Vordergrund. Die Integration von Funktionen in Werkstoffe und Bauteile verlangt nach neuen Fertigungs- und Montageprozessen.



Ganzheitliche Fertigungssysteme, in denen Funktionsmaterialien, Füge- und Montagetechnologien sowie neueste Oberflächenschutzkonzepte aufeinander eingestellt sind, machen das Konzept des Innovationsclusters "Multifunktionelle Materialien und Technologien" aus. Insbesondere die Bereiche der sensorierten Bauteile, die Oberflächentechnik und die Verbindungs- und Montagetechnologien gelten dabei als technologische Schwerpunkte. Neben dem tiefgehenden Verständnis von Grenzflächen in Werkstoffkombinationen ist dazu die Entwicklung von Fertigungstechnologien unter Einbeziehung der spezifischen Randbedingungen unterschiedlicher Branchen notwendig. Die Themenfelder des Innovationsclusters umfassen dabei:

- Applikation und Integration von Sensorik
- Miniaturisierte Sensorik
- Langzeitbeständige funktionelle Oberflächen
- Fügen von Faserverbundstrukturen

Ein gemeinsamer Aspekt, der in verschiedenen dieser Themenfelder zum Tragen kommt, ist die Qualitätssicherung von Klebverbindungen. Dies umfasst neben der Qualitätssicherung des Fertigungsprozesses Kleben auch die zerstörungsfreie Prüfung von Klebverbindungen. Innerhalb des MultiMaT-Teilprojekts FüFast werden Konzepte erarbeitet, wie CFK-Klebverbindungen zerstörungsfrei auf ihre Qualität prüfbar sind.

Klebtechnische Fragestellung

Kleben gilt – wie auch das Schweißen – als spezieller Prozess, d.h. als ein Prozess, bei dem die Konformität des dabei erzeugten Produkts nicht ohne weiteres oder nicht in wirtschaftlicher Weise verifiziert werden kann. Entsprechend werden ständige Überwachung und/oder die Befolgung der dokumentierten Verfahrensanweisungen gefordert, um sicherzustellen, dass die festgelegten Anforderungen erfüllt werden (siehe z.B. Abs. 3.4.1 in EN ISO 9000:2000). Wünschenswert wären daher Methoden zur zerstörungsfreien Bestimmung der Festigkeit von Klebverbindungen.

Im Projekt FüFast wird ein erster Schritt in diese Richtung unternommen, indem ein Verfahren entwickelt wird, um so genannte „Weak Bonds“, also Klebverbindungen mit deutlich geschwächter Festigkeit, detektieren zu können.

Lösungsweg

Zur zerstörungsfreien Bestimmung der Festigkeit einer Klebung wird ein neuer systematischer Ansatz verfolgt:

1. Es werden Klebungen mit einer definiert geschwächten Festigkeit hergestellt.
2. Diese Klebungen werden einer laserinduzierten Schockwelle ausgesetzt, die lokal begrenzt zu starken Spannungen in der Klebung führt. Geschwächte Klebungen können dabei abhängig von der eingebrachten Laserenergie zerstört werden, während intakte Klebungen unbeeinflusst bleiben (siehe Abbildung 1).
3. Mittels zerstörungsfreier Prüfung wird ermittelt, ob eine Schädigung der Klebung erfolgt ist oder nicht. Zurzeit werden hierzu konventionelle Ultraschallprüfungen eingesetzt. Es sind aber auch alternative Verfahren wie Laserultraschall, Thermografie oder gepulste Shearografie^[1] möglich, sofern diese bei der gegebenen Probengeometrie die Detektion der erzeugten Fehlstelle erlauben.

- Die Qualifizierung des Verfahrens erfolgt durch Korrelation der zur Erzeugung einer Fehlstelle benötigten Schockwellenenergie mit der aus zerstörenden Versuchen gewonnenen Festigkeit des Klebverbunds.

Dieser Artikel fokussiert auf die Herstellung von Klebungen mit geschwächter Festigkeit. Die Zerstörung und Prüfung der Klebungen wird im Kurzbeitrag „Kontrollierte und zerstörungsfreie Anregung von Stoßwellen zur Öffnung von Kissing Bonds“ zu Poster P63 dargestellt.

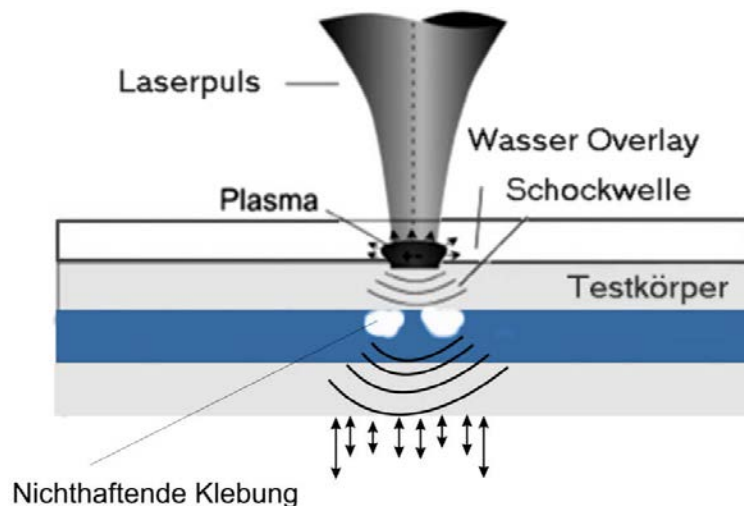


Abbildung 1: Zerstörung der Klebung mit Laserschockwellen

Herstellung von Klebungen mit geschwächter Festigkeit

Schwächungsmechanismus

Als Klebstoff kommt ein zweikomponentiges Epoxyd-Harz/Härter-System zum Einsatz. Die eigentliche Härtingsreaktion dieses Klebstoffsystems erfolgt bei Raumtemperatur mit einer Geschwindigkeitskonstante von ca. $0,25 \text{ h}^{-1}$. Die Aminhärter-Komponente reagiert dabei außerdem unter Bildung von Carbonaten mit der Umgebungsluft. Die Geschwindigkeitskonstante der Carbonatbildung beträgt ca. 4 h^{-1} und ist damit ungefähr 16-mal schneller als die Härtingsreaktion des Klebstoffs.

Durch die Carbonatisierung bildet sich ein mit Aminhärter angereicherter Film auf der Klebstoffoberfläche, der beim Fügen der CFK-Platten zu einem Abfall der kritischen spezifischen Brucharbeit G_{Ic} der Klebung führt.

Beeinflussung der Festigkeit der Klebung

Es wurden verschiedene Einflussfaktoren auf die Carbonatbildung untersucht:

- Die Bildung der Carbonate ist stark von der Temperatur abhängig. Bei Temperaturen um 45°C konnte eine reduzierte Carbonatbildung gezeigt werden und bei Temperaturen über 60°C erfolgt keine Carbonatbildung mehr.
- Da die Carbonatbildung eine Gasphasenreaktion mit der Umgebungsluft ist, kann sie durch eine inerte Atmosphäre (z.B. Stickstoff) unterbunden werden. Für bereits gebildete Carbonate erfolgt unter inerte Atmosphäre eine langsame Rückreaktion.

3. Die Carbonatbildung lässt sich durch die Variation der Reaktionszeit vor dem Klebstoffauftrag, d.h. durch die Verweilzeit des Klebstoffs im statischen Mischer, beeinflussen. Durch diese Vorreaktion (Pre-Polymerisation) steigt das Molekulargewicht des Aminhärters an. Der Dampfdruck des Amins sinkt, so dass die Carbonatisierungsreaktion und damit die Anreicherung des Amins an der Klebstoffoberfläche behindert wird, was zu einem Anstieg der Brucharbeit G1c führt (siehe Abbildung 2).

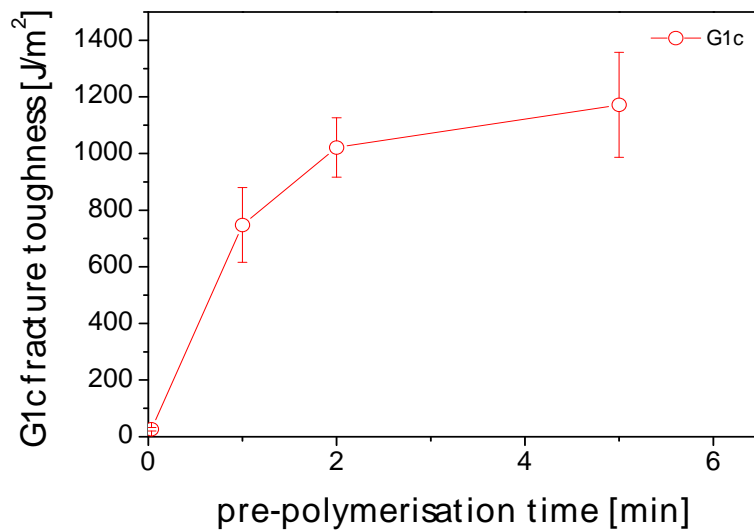


Abbildung 2: Abhängigkeit der kritischen spezifischen Brucharbeit G1c von der Dauer der Pre-Polymerisation

4. Die Carbonatisierung erfolgt während der offenen Zeit in Umgebungsluft zwischen dem Klebstoffauftrag und dem Fügen der CFK-Platten. Mit längeren Offenzeiten erfolgt ein Abfall der Festigkeiten (siehe Abbildung 3).

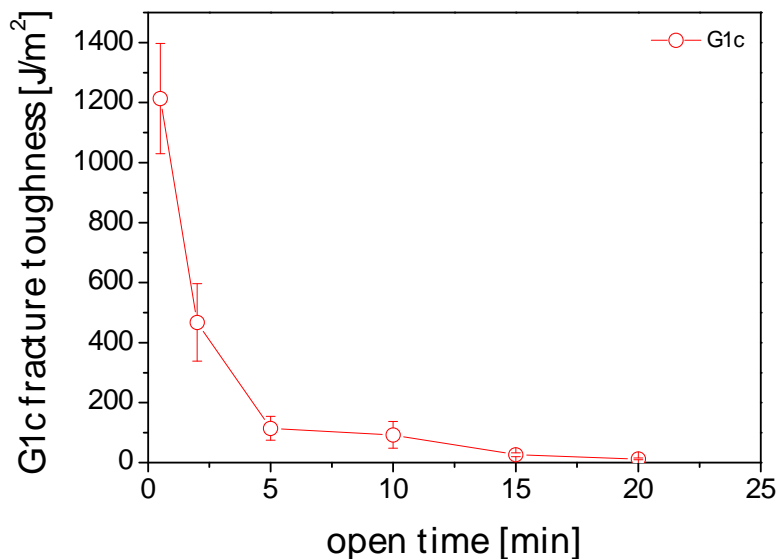


Abbildung 3: Abhängigkeit der kritischen spezifischen Brucharbeit G1c von der offenen Zeit vor dem Fügen der CFK-Platten

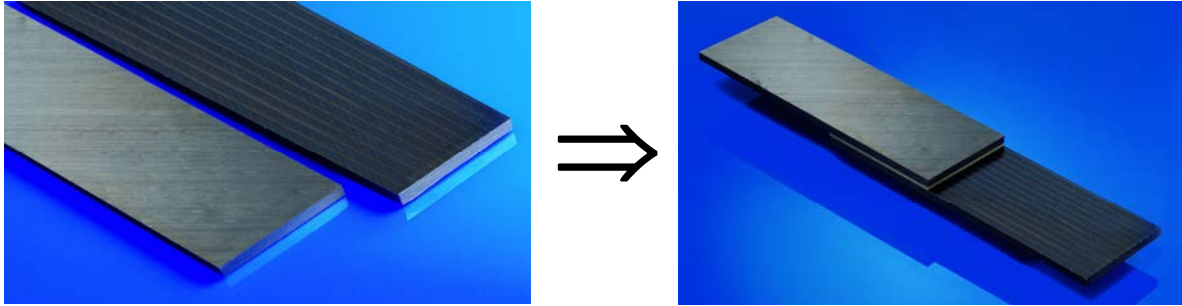


Abbildung 4: Herstellung von Zugscherproben mit geschwächter Klebung

Herstellung von Proben mit geschwächten Klebungen

Es werden Zugscherproben aus kohlenstoffaserverstärktem Kunststoff (CFK) hergestellt (siehe Abbildung 4). Der Klebstoffauftrag erfolgt über eine robotergesteuerte Applikationsanlage mit statischem Mischer (siehe Abbildung 5). Die Einstellung der Festigkeit der Klebverbindung erfolgt über die im vorhergehenden Abschnitt unter Punkt 4 beschriebene Variation der offenen Zeit.

Es werden jeweils mehrere Zugscherproben mit gleicher offener Zeit hergestellt. An einem Teil davon wird zerstörend die Verbundfestigkeit gemessen, während für den anderen Teil die benötigte Pulsenergie zur Erzeugung einer lokalen Fehlstelle ermittelt wird.



Abbildung 5: Robotergeführte Applikationsanlage

Zusammenfassung

Klebung mit geschwächter Festigkeit werden laserinduzierten Schockwellen ausgesetzt, die abhängig von der eingesetzten Laserenergie und der Festigkeit der Klebung zur Erzeugung einer lokalen Fehlstelle führen. Diese Fehlstellen lassen sich mittels konventioneller oder erweiterter ZfP-Verfahren nachweisen.

Die beschriebene Methode zur gezielten Herstellung geschwächter Klebungen erlaubt die Korrelation zwischen der zur Schädigung notwendigen Laserenergie und der zerstörend gemessenen Festigkeit des Klebverbunds. Dies ermöglicht die Qualifizierung eines Verfahrens, das erlaubt, durch Kombination von Laserpulsen mit variabler Intensität und dem Nachweis der erzeugten Fehlstelle in der Klebung mittels ZfP-Methoden, die Festigkeit von CFK-Kleverbunden bei vernachlässigbarer lokaler Schädigung – also quasi zerstörungsfrei – zu bestimmen.

Referenzen

- [1] Defect detection on carbon fibre reinforced plastics (CFRP) with laser generated Lamb waves, *O. Focke, P. Huke, A. Hildebrand*, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 30
- [2] Assessment of kissing bond defects in adhesive joints of carbon fiber-reinforced plastics before and after the treatment with laser generated shock waves, *M. Kalms, S. Hellmers, O. Focke, P. Huke, C. von Kopylow, R. Bergmann, R. Wilken* (to be published in NDT & E International, Publisher ELSEVIER)
- [3] Adhesive bond strength evaluation in composite materials by laser-generated high amplitude ultrasound, *M. Perton, A. Blouin, J.-P. Monchalin*, Journal of Physics: Conference Series 278 (2011) 012044
- [4] Composite bond inspection, *Robert Lee Crane, Giles Dillingham*, Journal of Material Science (2008) 43:6682–6694

Danksagung

Die Autoren danken dem Fraunhofer-Innovationscluster Multifunktionelle Materialien und Technologien (MultiMaT), dem Land Bremen und dem Europäischen Fonds für Regionalentwicklung für Finanzierung und Unterstützung des Projekts.