

Qualitätssichere Klebverbindungen mittels prozessintegrierter ZfP

Philipp HUKÉ*, Thomas MEER**, Rainer STÖBEL**, Udo MEYER***, Martin NÄGELE****, Christian TORNOW***

* BIAS Bremer Institut für angewandte Strahltechnik GmbH

** EADS Forschung GmbH

*** Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM)

**** Optoprecision GmbH

Kurzfassung. In der Automobil- und Luftfahrtindustrie werden immer mehr Leichtbauweisen eingesetzt. Insbesondere bei sicherheitsrelevanten, strukturell geklebten Faserverbundbauteilen (FVK) ist eine Qualitätssicherungskette schwierig zu realisieren. Die Vorbehandlung von Bauteiloberflächen nimmt dabei eine Schlüsselfunktion in der klebtechnischen Fertigung ein. Für die automatisierte Überwachung von FVK-Oberflächen im Bereich der klebtechnischen Fertigung werden daher die Grundlagen für die Aerosol-Benetzungsprüfung dargestellt. Dies betrifft die Entwicklung neuer Möglichkeiten des Aerosolauftrags, der Bilderzeugung und Bildverarbeitung, um mit dieser Methode die Kontamination der Oberflächen im Fertigungstakt erfassen zu können. Ein zweiter Schritt ist die Prüfung der Klebverbindung. Dafür wurden Proben mit definierter Restfestigkeit, sogenannte "Weak-Bonds" hergestellt. Die zu verbindenden FVK-Oberflächen wurden dabei mit unterschiedlichen Oberflächenvorbehandlungsparametern behandelt, um gezielt schlechte Adhäsion festgelegter Stärke und Größe einzustellen. Diese behandelten Oberflächen dienen zur Weiterentwicklung und Überprüfung der Funktionsweise von erweiterten NDT (E-NDT) Verfahren vor und nach dem Kleben. Die belastende Prüfung der Klebverbindung wird mit zwei Verfahren durchgeführt. Ein Verfahren nutzt die aktive Thermografie (Ultraschall- und optische Anregung), das andere Verfahren basiert auf der gezielten Belastung mit einer Stoßwelle. Die Stoßwelle wird durch die explosionsartige Zündung eines Plasmas in einer Opferschicht erzeugt. Die Eigenschaften der Stoßwelle werden dabei wesentlich durch die Parameter der Anregung mit einem Laser und dem Opfermaterial bestimmt. Für die Untersuchung der einzustellenden Eigenschaften vor und nach der Belastungsprüfung wird eine vergleichende, konventionelle Prüfung mit Thermografie und Ultraschall durchgeführt, um die geöffneten Klebverbindungen zu detektieren.

1 Einführung

In Leichtbauanwendungen und insbesondere in der Fertigung komplex geformter Bauteile für den Flugzeugbau nehmen Verbundwerkstoffe und deren klebtechnische Verbindung eine zunehmend wichtige Rolle ein. Das dabei eingesetzte Material ist in den verarbeitenden Unternehmen insbesondere bei der Verwendung neuer Werkstoffe wie Thermoplast häufig der größte Kostenfaktor. Es bietet sich daher zum Erhalt und zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit an, die Effizienz beim Materialeinsatz zu verbessern und dadurch die Kosten zu senken. Innerhalb einer voll automatisierten Prozesskette stellt die Prüftechnik respektive die Qualitätsprüfung ein wichtiges Werkzeug zur Kostenvermeidung dar [1]. Für einige Prozessschritte, wie z.B. die Überprüfung der Oberfläche nach der Vorbehandlung, bzw. vor der Klebstoffapplikation, werden daher in einem Verbundprojekt innovative Prüfmethoden entwickelt, siehe Abbildung 1.



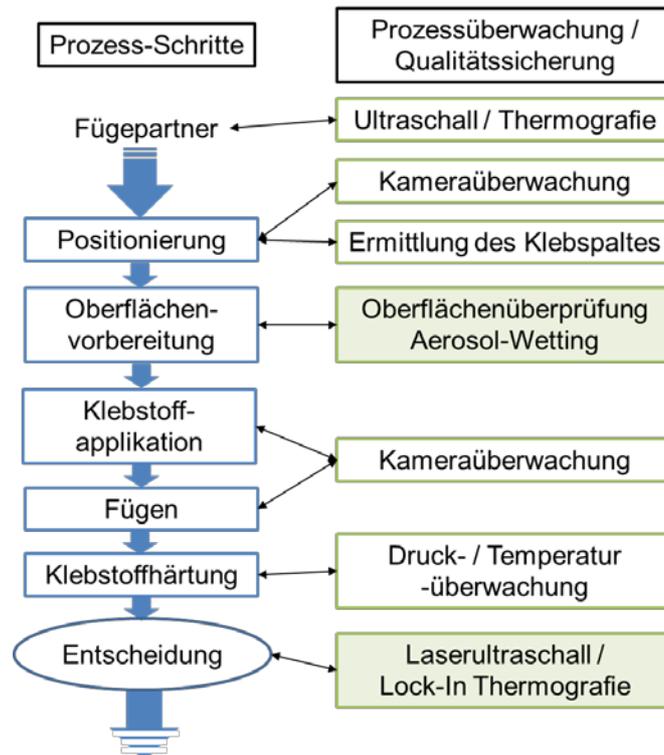


Abbildung 1. Prozesskette der Klebverbindung mit den korrespondierenden Prozessüberwachungs- und Qualitätssicherungsmethoden. Die Fügepartner werden eingangs mit Ultraschall und Thermografie auf Poren und Delaminationen untersucht. Die Robotergestützte Positionierung wird mit einer Kamera überwacht und der resultierende Klebspalt mittels Laser-Scanning erfasst. Die Oberfläche muss für die Klebverbindung vorbereitet werden. Um eventuelle Kontaminationen zu beseitigen, wird ein Plasmaverfahren eingesetzt. In diesem Projekt wird der Aerosol-Wetting-Test zur Überprüfung der Oberfläche entwickelt. Die Klebstoffapplikation und das Fügen der Partner werden mit einer Kamera überwacht. Die Aushärtung des Klebstoffes im Ofen oder der Autoklave wird mittels Druck und Temperatur gesteuert. Eine endgültige Entscheidung, ob die Klebverbindung ausreichend ist, soll anhand der erweiterten NDT-Verfahren durchgeführt werden.

Der Anspruch an das Qualitätssicherungsmittel besteht besonders in der Fähigkeit, eine zerstörungsfreie und dabei von der Prüfteilgeometrie unabhängige Inspektion mit hoher Zuverlässigkeit ausführen zu können. Bis heute existiert kein zerstörungsfreies Prüfverfahren, das qualifizierbar Klebverbindung hinsichtlich ihrer Festigkeit prüft und das für einen Einsatz in der Fertigung geeignet ist. Da nachweislich Kontaminationen die Verbund-Festigkeit beeinträchtigen, müssen die Oberflächen der Fügepartner schnell und effizient geprüft werden. Für einen Einsatz in der Fertigungskette gibt es bereits erste Ansätze mit der Aerosol-Benetzungsprüfung, die speziell für die Anforderungen an die Charakterisierung von FVK-Oberflächen optimiert und um die IR-Spektroskopie erweitert werden sollen. Eine der wesentlichen Herausforderungen bei der Entwicklung von zerstörungsfreien Prüfmethoden für die klebtechnische Verbindung ist die Erstellung von geeigneten Proben, die reproduzierbar die gleiche Kontamination oder Restfestigkeit aufweisen.

2 Herstellung von Proben mit gezielt eingestellter Restfestigkeit

Ziel der Arbeit bei EADS-IW ist die Herstellung von Klebverbindungen mit definiert schlechter Haftung. Dies soll dem Zweck dienen, Fehlstellen (Weak-Bonds) definierter Festigkeit und Größe in einen Klebeverbund mit einzubringen.

Klebverbindungen unterscheiden sich im einfachsten Fall durch ihre kleberspezifische maximale Haftungskraft. Die Klebverbindungen lassen sich in drei Graden unterscheiden:

I. Haftende Verbindung

- Klebung haftet mit >80% der spezifizierten Haftungskraft des Klebstoffes

II. Schwache Verbindung

- Haftungskraft der klebtechnischen Verbindung liegt zwischen 20% und 60%
- Nicht erkennbar mit Standard US

III. Kissing Bond

- Haftungskraft und Scherfestigkeit < 20%
- Adhäsives Versagen bei Belastung
- Nicht erkennbar mit Standard US

Die so hergestellten Proben werden für die Prüfung und Weiterentwicklung der untersuchten E-NDT Verfahren (Aerosol Wetting, Laser Bond Inspection, aktive Thermographie) verwendet.

Die nach Peel Ply Abzug mit Siloxanen kontaminierten FVK Oberflächen werden mit einer AD-Plasmafackel (Plasmatreat) definiert behandelt, um den Grad der Adhäsion einstellen zu können. Die Oberflächen sind mit kontinuierlich ansteigendem Abstand zwischen FVK und Plasmadüse und unterschiedlichen Verfahrensgeschwindigkeiten behandelt worden, siehe Abbildung 2. Es zeigte sich, dass nicht mit allen Parametern definierte Weak-Bonds herstellbar sind.

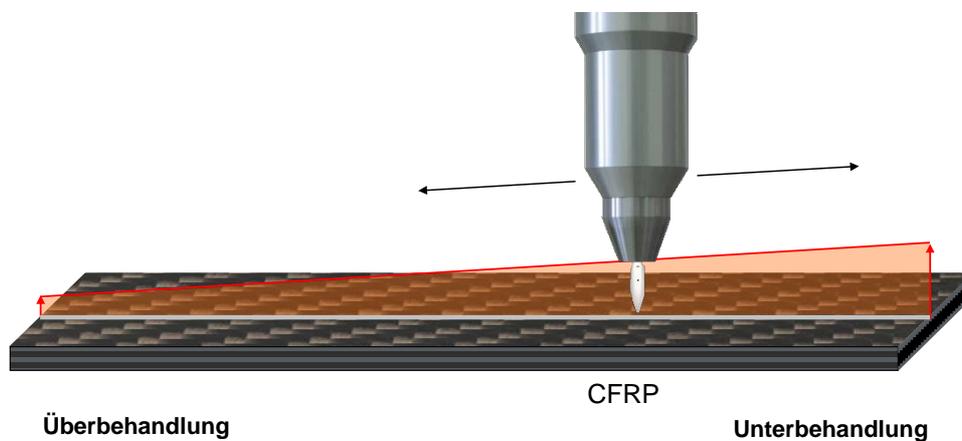


Abbildung 2. Erstellung von definierten Weak-Bonds mit AD-Plasma

Der Abstand der Plasmadüse wird kontinuierlich über die Probeplatten verändert (Abbildung 2). Dadurch ist der Reinigungseffekt entsprechend mehr oder weniger intensiv. Mit den so vorbehandelten CFK-Laminaten lassen sich Schälproben (G1c) herstellen, welche entsprechend des Abstandes den gesamten Bereich von einer Überbehandlung, bis hin zu einer Unterbehandlung darstellen. Ein optimaler Behandlungszustand ist dazwischen zu finden. Der variierende Abstand aus Abbildung 2 wirkt sich direkt auf das resultierende Bruchbild, in Abbildung 3, aus.

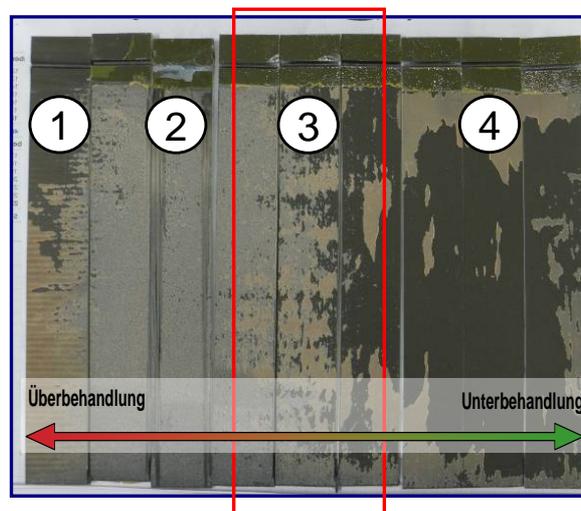


Abbildung 3. Bruchbilder des gesamten Untersuchungsbereiches

In blau umrandeten Bereich in Abbildung 3 sind die Versagensbilder dargestellt, welche von einer Überbehandlung (1) über kohäsives Versagen (2) bis adhäsives Versagen durch Unterbehandlung (4) reichen. Der Übergangsbereich von kohäsiv zu adhäsiv (3) ist der für die Erstellung definierter Weak-Bonds relevante Bereich und wird in einem zweiten Schritt genauer untersucht.

Das Verhalten lässt sich auch anhand von Festigkeitswerten (G_{1c}) ablesen (Abbildung 4). Hier ist die relative interlaminaire Energiefreisetzungsrate über den Behandlungsabstand aufgetragen, wobei der blaue Graph den blau markierten Proben in Abbildung 3 und der rote Graph eine genauere Betrachtung des rot markierten Bereichs (Zustand 3) entspricht. Anhand der Bruchbilder und der mechanischen Kennwerte kann über den Behandlungsabstand die erzielbare Adhäsion an FVK Oberflächen von 100% (kohäsiv) bis 20% (adhäsiv) stufenlos eingestellt werden. Dies wird in den Abbildungen 3 und 4 durch den Zustand 3 beschrieben.

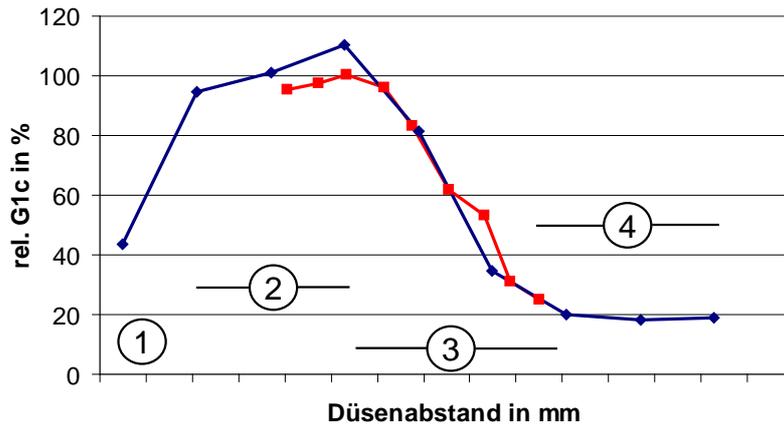


Abbildung 4. Relative Energiefreisetzungsrate (G_{1c})

Um Fehlstellen mit definierter Festigkeit in einen Klebeverbund einzubringen, wird in einem ersten Behandlungsschritt die gesamte Oberfläche mit den Bedingungen für die Weak-Bonds behandelt (Zustand 3: 20% bis 100% Festigkeit).

Für die Erzeugung unterschiedlich großer Fehlstellen im Klebeverbund, werden Schablonen verwendet, welche die Flächen der späteren Weak-Bonds abdecken. Die verbleibende Fläche wird in einem zweiten Behandlungsschritt entsprechend einer guten Klebung (100% Klebfestigkeit – Zustand 2) behandelt, siehe Abbildung 5.

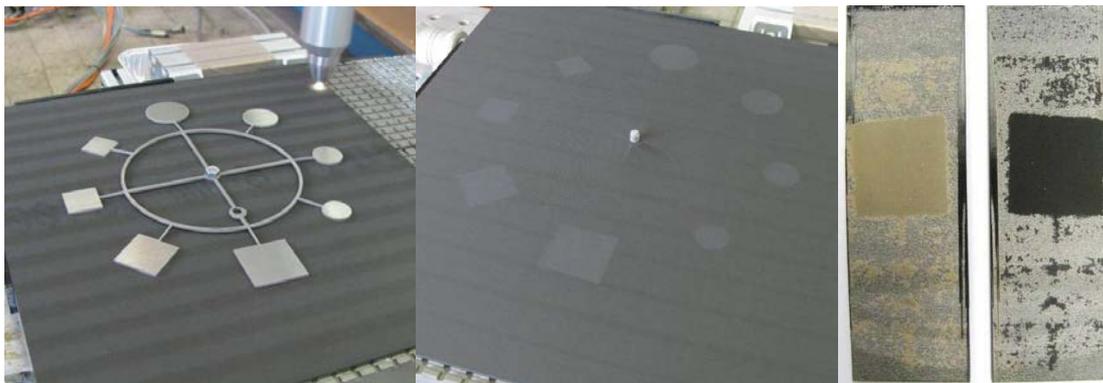
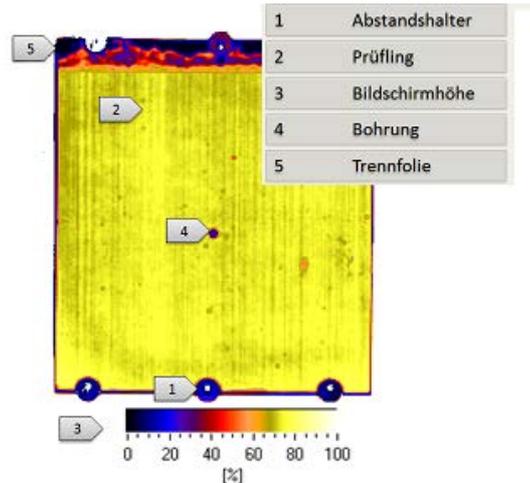
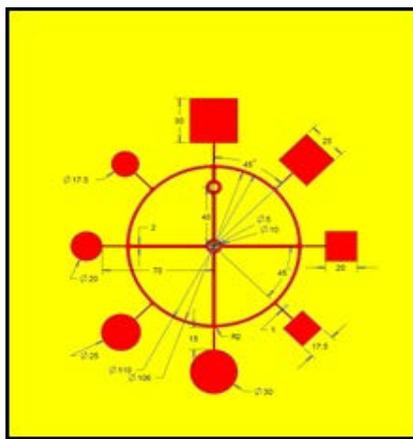


Abbildung 5. Erstellung der Weak-Bonds, während und nach der Behandlung (links, mitte) und Fehlstellen nach dem Öffnen der Klebung (rechts - WeakBond hier: 20%; lxb: 30 x 30mm)

Die behandelten Lamine werden nach der Plasmabehandlung im Autoklaven mit einem Filmklebstoff (Epoxy) bei 120°C verklebt, wobei als Fügepartner ein Laminat ohne Fehlstellen Verwendung findet. Die dargestellten geklebten FVK-Proben wurden zur Überprüfung mit klassischer Ultraschallprüfung im Wasserbad getestet. Die Fehlstellen sind weder im Rückwand- noch im Hilfsreflektorecho, siehe Abbildung 6, zu erkennen. Es liegt hier vermutlich keine eindeutige Grenzfläche im Weak-Bond vor, die mit Ultraschallprüfung detektiert werden konnte.



a) **Abbildung 6.** a) Skizze der Probe mit Lage der künstlich eingebrachten Fehlkleben; b) US-C-Bild (Hilfsreflektorecho) einer Probe mit künstlich eingebrachten Fehlkleben. Keine der in a) skizzierten Fehlstellen konnte detektiert werden.

Im Rahmen des Projektes sollen weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen NDT Verfahren durchgeführt werden, um die künstlich eingebrachten Fehlkleben zu erkennen.

3 Überprüfung der für die Klebung vorbereiteten Oberfläche

Die am Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM entwickelte und patentierte Aerosol-Benetzungsprüfung ist sowohl zur automatisierten Kontrolle der Benetzungseigenschaften von Oberflächen im industriellen Umfeld als auch für Laboruntersuchungen einsetzbar.

Ein Ultraschallzerstäuber erzeugt ein definiertes Wasseraerosol, das in Abhängigkeit zur Oberflächenenergie ein spezifisches Tropfenmuster auf der zu prüfenden Oberfläche bildet. Die Tropfen werden automatisch von einem Kamerasystem erfasst und mit Hilfe einer Bildverarbeitungssoftware dargestellt. Im Falle eines definierten Flüssigkeitsvolumen hängt die Tropfengröße direkt vom Kontaktwinkel ab, so dass anhand der Tropfengrößenverteilung die Benetzungsfähigkeit der Oberfläche erfasst werden kann. Durch die Vorgabe von Sollwerten ist es möglich, den Reinigungs- und Aktivierungseffekt einer Oberflächenvorbehandlung, z. B. einer Beflammung oder einer Plasmabehandlung, mit diesem Verfahren zu bewerten und zu überwachen.

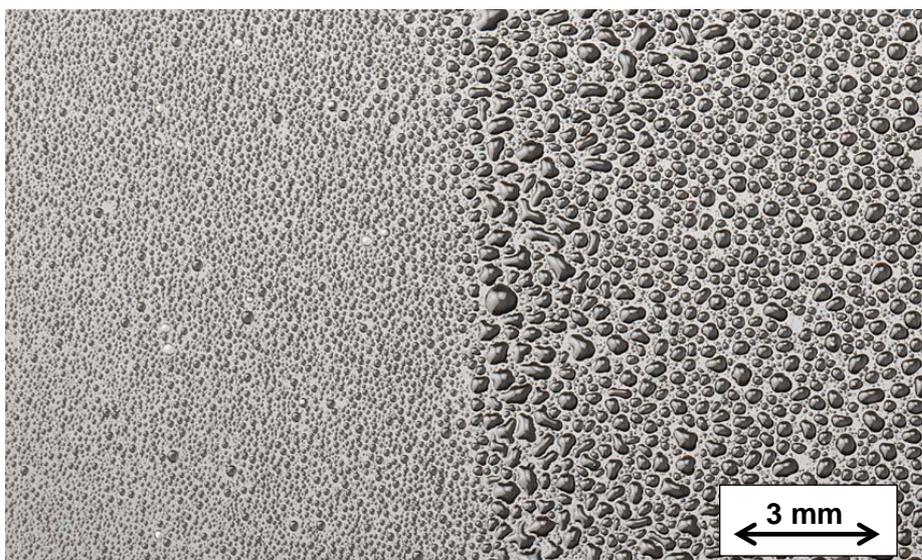


Abbildung 7. Änderung der Tropfengröße an der Grenze zwischen beflamtem (rechts) und unbeflammtem (links) Polypropylen-Kunststoffblend.

3.1 Die Vorteile der Aerosol-Benetzungsprüfung des Fraunhofer IFAM

Im Vergleich mit herkömmlichen Methoden zur Bestimmung der Benetzbarkeit von Oberflächen – wie Testtinten, Wasserablaufstest oder Kontaktwinkelmessungen – bietet die Aerosol-Benetzungsprüfung viele Vorteile:

- Die Prüfung kann variabel nicht nur auf kleinen, vom Benutzer festgelegten Flächen erfolgen, sondern auch auf großflächig durchgeführt werden. So ist es möglich, auch große Bauteile in kurzer Zeit vollflächig zu prüfen.
- Die Bewertung der Tropfengrößen erfolgt objektiv und automatisiert mit Hilfe einer Auswertesoftware.
- Durch die Verwendung eines Wasseraerosols erfolgt eine rückstandsfreie Rücktrocknung der Oberflächen binnen kurzer Zeit. Dadurch steht das Bauteil unmittelbar nach der Prüfung für weitere Prozessschritte zur Verfügung.
- Die Prüfung kann direkt in den Fertigungsprozess integriert werden.

Für die Anpassung des Verfahrens als Messsystem für die industrielle Fertigung ist es notwendig, dass das Verfahren sowohl auf glatten als auch auf rauen Oberflächen funktioniert. Im Rahmen des Projektes „Qualitätskleben“ werden Untersuchungen strukturierten bzw. rauen Oberflächen durchgeführt. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen direkt in die Anpassung des Messaufbaus ein, darüber hinaus werden die angewendeten Auswertelgorithmen angepasst und optimiert. Um die Robustheit der Auswertung auf FVK-Oberflächen zu verbessern, soll zur Charakterisierung der Tropfenverteilungen zusätzlich zu dem bereits verwendeten Lageparameter auch der Streuungsparameter herangezogen werden. Dabei soll bewertet werden, wie gut die ermittelte Verteilung von der idealen Verteilung abweicht.

Die Tropfenverteilungen auf den Probenoberflächen werden von der Oberflächenrauigkeit und der Oberflächenenergie beeinflusst. Insbesondere bei den rauen FVK-Oberflächen erschwert das die Interpretation der Sprühbilder. Um die Effekte zu trennen, wurden Proben unterschiedlicher Rauigkeit hergestellt.

Der Kontaktwinkel von glatten (Abbildung 8) und rauen Proben unterscheidet sich. Hierbei entspricht der Wert #800 einer eher glatten Oberfläche, und der Wert #180 einer rauen Oberfläche. Bei der Untersuchung mit Hilfe der Aerosol-Benetzungsprüfung kommt es zu einer Abnahme des mittleren Tropfendurchmessers bei Zunahme der Rauigkeit (Abbildung 9).

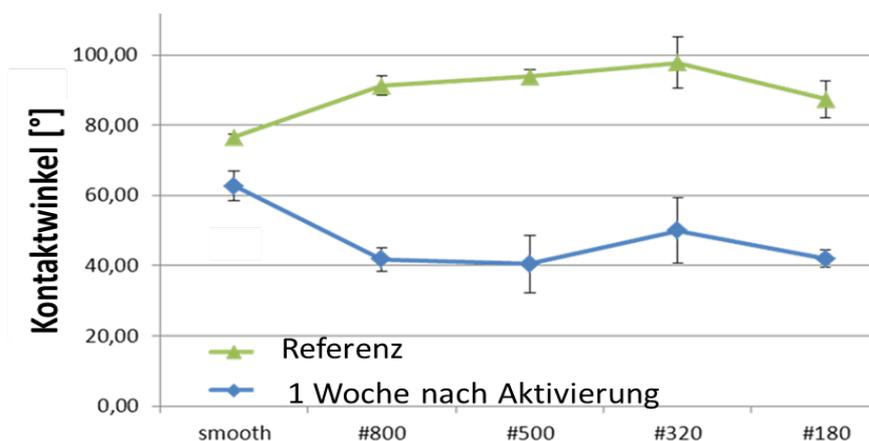


Abbildung 8. Kontaktwinkelmessungen an Proben unterschiedlicher Rauigkeit

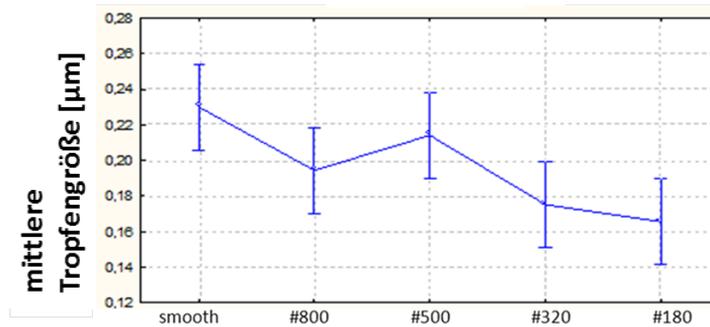


Abbildung 9. Aerosol-Benetzungsprüfung (unten) an Proben unterschiedlicher Rauigkeit.

Des Weiteren wurde mit der Untersuchung des Zusammenhanges von Volumenstrom und Tropfenverteilungen auf unterschiedlichen Oberflächen begonnen. Die Rosin-Rammler-Verteilung [2], die die Tropfengrößenverteilung beschreibt, wird durch zwei Parameter bestimmt. Der Lageparameter, der mit dem mittleren Tropfendurchmesser korrespondiert, zeigt für unterschiedliche Volumenströme eine unterschiedlich fallende Charakteristik (Abbildung 10). Der Lageparameter, der die Breite der Rosin-Rammler-Verteilung beschreibt, variiert ebenfalls mit dem Volumenstrom. Hier besteht die Möglichkeit, den Einfluss der Rauigkeit auf die Tropfenverteilung von dem der Oberflächenspannung zu trennen.

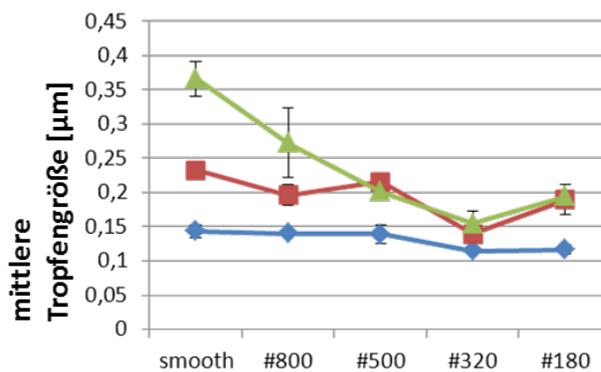


Abbildung 10. Lageparameter (mittlere Tropfengröße) der Rosin-Rammler-Verteilung in Abhängigkeit von Oberflächenrauigkeit bei 2 ml/min (blau), 4,5 ml/min (rot) und 7 ml/min (grün) Durchflussmenge

4 Prüfung der Klebverbindung

Bisher ist kein zerstörungsfreies Prüfverfahren in der Lage, die Festigkeit von Klebverbindungen von CFK-Verbänden zu erfassen. Laserbasierte Verfahren die mittels einer Stoßwelle Verbindungen prüfen, konnten bisher nur nichthaftende Klebungen zwischen Metallen nachweisen [3, 4]. Für die Zertifizierung struktureller CFK-Klebungen sind konventionelle zerstörungsfreie Prüfmethode zwar prinzipiell möglich (z. B. EASA AC20-107B), aber derzeit nicht verfügbar. Daher wird in einem ersten Schritt versucht, die fehlerhafte Klebestelle mithilfe einer Lasergenerierten Stoßwelle zu öffnen und dann mit Thermografie oder Laserultraschall kontakt- und berührungsfrei nachgewiesen.

In der Literatur finden sich zwei gegensätzliche Beschreibungen des Öffnungsmechanismus von oberflächennahen Fehlstellen bzw. des Abplatzens von Beschichtungen [5, 6]. Die Stoßwelle wird in beiden Fällen erzeugt, indem ein Plasma in einem Opfermaterial durch einen kurzen Laserpuls induziert wird. Eine kontrollierte Erzeugung hängt damit von vielen Parametern ab, die in Tabelle 1 gelistet sind.

Tabelle 1: Einflussparameter bei der Öffnung von schwachen Klebverbindungen mittels Lasergenerierter Stoßwellen

Laserstrahl	Prozessgrößen
Wellenlänge	Räumliche Eingrenzung (z. B. Wasserfilm, Plasmakammer)
Energie	
Pulsdauer, -form	Opfermaterial (Schichtdicke, Laser- Material-Wechselwirkung)
Strahlform (Fokussierung)	
Initiale Stoßwelle	Akustisches Materialverhalten
Amplitude	Impedanz
Frequenzspektrum	Dämpfung
Räumliches Profil	Nichtlinearität
Materialaufbau	Resultierende Stoßwelle
Dimension der Fügepartner (akustische Propagation)	Amplitude
	Frequenzspektrum
Klebschichtdicke	Räumliches Profil
Klebschichtdicke	Versagen der Klebverbindung
Klebschichtdicke	Adhäsiv
Restfestigkeit	Kohäsiv (unwahrsch.)

Der für die Erzeugung der Stoßwellen verwendete Nd:Yag-Laser ($\lambda=1064$ nm) erzeugt einstellbar 180 mJ - 450 mJ pro Puls bei Pulslängen von 10 ns – 25 ns. Die Strahlform entspricht einer Gaußkurve und der Strahldurchmesser wird auf dem (Opfer-)Material mithilfe einer Linse eingestellt. Um eine räumliche Eingrenzung mithilfe eines dünnen Wasserfilms zu erzeugen, wurde eine Probenhalterung konzipiert, die mehrere Versuche hintereinander ermöglicht. Da die initiale Stoßwelle nicht direkt gemessen werden kann, wurden die Stoßwellen zunächst auf einem „bekanntem“ Material (Aluminium) mit unterschiedlicher Dicke erzeugt. Das Frequenzspektrum der zu messenden resultierenden Stoßwellen liegt im Bereich 10..100 MHz. Um in diesem Bereich messen zu können, wurde ein modifiziertes Sagnac-Interferometer nach [7] aufgebaut, siehe Abbildung 11.

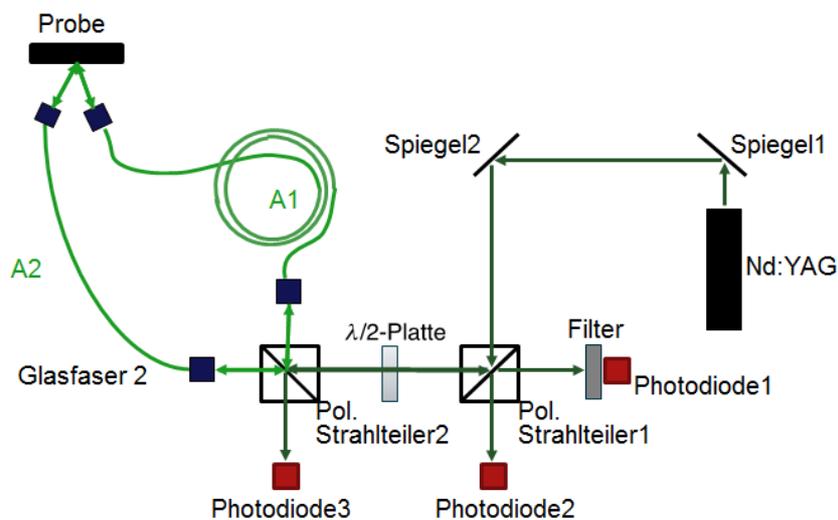


Abbildung 11. Sagnac-Interferometer zur Detektion von hochfrequenten Stoßwellen. Funktionsweise siehe Text.

Der Laserstrahl des linear polarisierten Detektionslasers (frequenzverdoppelter Nd:YAG mit 400mW Ausgangsleistung) wird über zwei Spiegel auf einen polarisierenden Strahlteiler gelenkt. Die Restanteile der unerwünschten Polarisationsrichtung werden gefiltert und mit der Photodiode 2 detektiert. Der Strahl passiert dann eine $\lambda/2$ -Platte mit der die Polarisationsrichtung eingestellt werden kann. Der senkrecht polarisierte Anteil der Strahlung wird durch die polarisationserhaltende Glasfaser 2 auf die Probe gelenkt und dabei um 45° gedreht. Nach Reflexion wird das Licht durch die polarisationserhaltende Glasfaser 1 zurück in den Aufbau geführt und dabei noch einmal um 45° gedreht. Das Licht wird mit der Photodiode 3 detektiert. Der von der $\lambda/2$ -Platte kommende waagrecht polarisierte Anteil wird vom polarisierenden Strahlteiler 2 reflektiert und nimmt denselben Weg wie der erste Lichtstrahl nur in entgegengesetzter Richtung.

Die spektrale Empfindlichkeit des Interferometers auf Schwingung der Oberfläche der Probe hängt von der unterschiedlichen Länge der Fasern ab und besitzt derzeit eine maximale Empfindlichkeit bei ca. 50 MHz.

Mit dem Sagnac-Interferometer wurden zunächst bei unterschiedlichen Pulsenergien, Pulsenergien, Materialdicken und mit und ohne Wasserfilm Stoßwellen aufgenommen, siehe Abbildung 12.

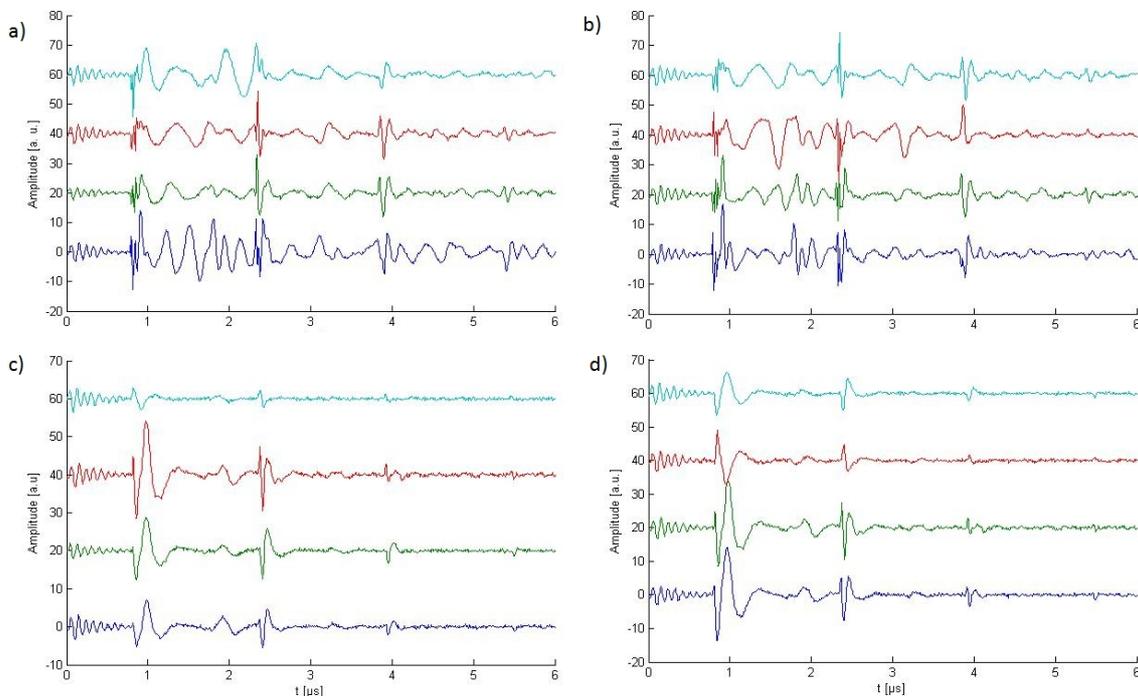


Abbildung 12. Ultraschallsignale erzeugt a) b) mit und c) d) ohne Wasserfilm. Die Ultraschallsignale sind mit unterschiedlichen Pulsenergien (jeweils 485 mJ, 480 mJ, 410 mJ, 389 mJ) erzeugt und zur besseren Anschaulichkeit übereinander gelegt worden. Dabei wurden die mit der niedrigsten Energie erzeugten Signale nach oben sortiert. Charakteristisch sind die Mehrfachechos in a) und b), die bei den Versuchen mit dem Wasserfilm entstehen.

Aus den gemessenen Stoßwellen werden in einem folgenden Schritt die Eigenschaften der Stoßwelle am Entstehungsort bestimmt. Mithilfe der Parameter für eine maximale Amplitude der Stoßwelle wurden weitere Versuche auf FVK durchgeführt und werden derzeit ausgewertet, um die Materialparameter (Impedanz, Dämpfung und Nichtlinearität) des FVK zu identifizieren.

5 Zusammenfassung

Eine Automatisierung für die klebtechnische Verbindung von insbesondere sicherheitsrelevanten Bauteilen erfordert eine Qualitätssicherung während der gesamten Prozesskette. Dafür wird dem BMBF-geförderten Projekt „Qualitätskleben“ der Aerosol-Wetting-Test weiterentwickelt, der eine Überprüfung der Oberflächen vor der Klebverbindung ermöglicht und so Kontamination rechtzeitig entdecken kann.

Die Oberflächen der Proben sind mit Fluor und Silan kontaminiert und werden mit einem Plasma vorbehandelt. In Abhängigkeit der einstellbaren Behandlungsintensität (Dauer und Distanz Plasma-Oberfläche) des Plasmas besitzt die Klebverbindung unterschiedliche Restfestigkeiten. Dafür wurden Proben mit gezielter Einstellung der Restfestigkeit erstellt und getestet. In einem zweiten Schritt wird die Klebverbindung mit Lasergenerierten Stoßwellen auf Kissing Bonds, Klebverbindungen mit geringer Restfestigkeit, getestet. Derzeit werden die Eigenschaften der Stoßwellen in Abhängigkeit der Laserparameter untersucht.

6 Danksagung

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ (Förderkennzeichen 02PJ2120) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Die Autoren möchten sich weiterhin bei Herrn Prof. Bergmann vom BIAS für seine Unterstützung bedanken.

7 Referenzen

-
- [1] Bergmann, R.B., Huke, P. (2012): Advanced Methods for Optical non-destructive Testing, Chapter 17, in: Optical Imaging and Metrology, Eds. Osten, W., Reingard N., Wiley, Weinheim, (2012)
 - [2] Rosin, P., Rammler, E., „The Laws Governing the Fineness of Powdered Coal,“ J. Inst. Fuel, Vol. 7, No. 31, pp.29-36, (1933)
 - [3] Miura Takahiro, Yamamoto Satoshi, Ochiai Makoto, “Visualization of weld defects in water by laser-ultrasonics”; 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China (2008)
 - [4] Marvin Klein, Todd Sienicki, Jerome Eichenberger, Laser Ultrasonic Inspection Of Welds Used In Shipbuilding Proceedings of US-Japan Symposium on Advancing Applications of NDE Maui, Hawaii, (2005)
 - [5] Bossi, R, Housen, K., Walters, C. „Laser Bond Inspection Device for Composites: Has The Holy Grail Been Found?“ Boeing Phantom Works, Seattle, WA CWA, Dublin, OH (2004)
 - [6] J. Yuan and V. Gupta, “Measurement of Interface Strength by the Modified Laser Spallation Technique,” Journal of Applied Physics, 74, pp. 2388-2410, (1993)
 - [7] Fomitchov, Pavel A. ; Krishnaswamy, Sridhar ; Achenbach, Jan D.: Extrinsic and intrinsic Fiber optic Sagnac ultrasound sensors. In: Opt.Eng. 39, pp. 1972-1984 (2000)