More Info at Open Access Database www.ndt.net/?id=17428

Untersuchungen von Glas-Metall Klebverbindungen mit Hilfe von Ultraschall

Daniel BRACKROCK, Christoph RECKNAGEL, Gerhard BREKOW, Marc KREUTZBRUCK
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

Kurzfassung. Klebverbindungen im modernen Hochbau können helfen, innovative ästhetische Bedürfnisse im Fassadenbau umzusetzen, technologische Verbesserungen zu erreichen, aber auch die Wechselwirkung von Gebäuden mit der Umwelt unter energetischen Aspekten zu optimieren. Aufgrund der hohen sicherheitstechnischen Bedeutung gibt es hohe Anforderungen an die Leistungsfähigkeit, Dauerhaftigkeit und die Gütesicherheit.

Mit einer zerstörungsfreien praxistauglichen Prüftechnik, die eine sichere Überprüfung der Integrität von Glas-Metall Klebverbindungen im Ingenieurhochbau gewährleistet, kann sowohl ein wichtiger Beitrag zur Qualitätssicherung bei der Herstellung von Fassadenelementen aber auch bei der späteren Bauwerksüberwachung im Verlauf der Nutzungsdauer geleistet werden. Für eine Beurteilung der Qualität der Verbundfuge (z.B. bezgl. Standsicherheit) sind dabei Aussagen zur Homogenität der Verbundfuge, zum adhäsiven und kohäsiven Verbundverhalten gefordert. Hierzu besteht aktuell insbesondere Bedarf an zerstörungsfreien praxisgerechten, hoch ortsauflösenden und möglichst bildgebenden Untersuchungsverfahren.

Es wird mit einem Matrixarray und mit konventionellen Winkelprüfköpfen eine Prüftechnik vorgestellt, mit der die Wechselwirkung zwischen Ultraschallwelle und Fehlstelle in der Klebefuge untersucht wird. Hierbei ist das erste Untersuchungsziel, mit einer angepassten Ultraschall-Prüftechnik mögliche Inhomogenitäten oder Schädigungsstellen in der geklebten Glas-Metall Verbindung zu detektieren.

Über diese qualitativen Aussagen hinaus werden weiterführende Informationen über die flächenhafte Ausdehnung und den Ort einer mangelnden Klebung ermittelt. Dazu werden die Messwerte zusammen mit den Positionen des Ultraschallprüfkopfs aufgezeichnet. Mit Hilfe einer bildhaften Auswertung der gemessenen Ultraschallechos in Abhängigkeit vom Prüfkopfort werden die Möglichkeiten einer detaillierten Integritätsanalyse der Glas-Metall Klebschicht dargestellt.

In diesem Beitrag werden experimentelle Prüfergebnisse vorgestellt, die im Sinne einer Verfahrensvalidierung an einem speziellen Beispielprobekörper zur Nachstellung einer SSG-Verglasung (ermittelt wurden und die Detektion fehlerhafter Klebestellen in einer Glas-Metall-Klebverbindung zum Ziel haben.

Lizenz: http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/

1. Einführung

Unterbrechungsfreie Glasfassaden mit hohem architektonischem Gestaltungspotenzial werden im städtebaulichen Bereich immer häufiger eingesetzt. Aufgrund der hohen Sicherheitsrelevanz und des zunehmenden Bedarfs an derartigen baukonstruktiven Lösungen kommt sowohl dem Nachweis fehlstellenfreier als auch dauerhaft ungestörter Klebverbindungen zwischen Glas und metallischem Träger (sog. Structural Sealant Glazing-Bauart) eine maßgebende Bedeutung bei der Ausnutzung der Potenziale derartiger Klebverbindungen zu.

Derzeit ist die Anwendung von SSG-Lösungen im Fassadenbau von Ingenieurhochbauten noch stark mit baurechtlichen Auflagen belegt bzw. zusätzlich anzuordnende konstruktive Maßnahmen schränken die volle Ausnutzung der SSG-Potenziale ein. Eine Ursache hierfür ist auch der Mangel an Verfahren, die eine dauerhaft qualitäts- und anforderungsgerechte Ausbildung der Klebefuge nachweisen.
Die meisten Untersuchungen zur zerstörungsfreien Prüfung von Klebverbindungen betreffen Klebungen zwischen Metallblechen, zwischen kohlefaserverstärkten Kunststoffen, zwischen CFK-Metall-Schichten und zwischen Glas-Metall-Schichten.
Hierbei kommt eine Prüftechnik mit aktiver Thermografie oder eine Ultraschall-Prüftechnik zum Einsatz.

Nachfolgend sollen die bisher positiven Erkenntnisse oder Bewährungen auf deren Adaptionsfähigkeit an die spezifischen Anforderungen an Klebefugen (SSG-Bauweise) untersucht werden.

2. Stand der Technik und neuere Entwicklungen

Aktuelle Veröffentlichungen geben einen Einblick, wie bisher Verklebungen mit angepassten zerstörungsfreien Prüftechniken untersucht werden:

In dem Beitrag von Gaston [1] wird über qualitätsbestimmende Randbedingungen für Klebverbindungen berichtet. Es wird insbesondere darauf hingewiesen, dass in vibrationsbelasteten und korrosiven Umgebungen Klebverbindungen sich eher eignen als Nieten oder Schweißverbindungen, wobei flächige Klebverbindungen den großen Vorteil einer breiteren Spannungsverteilung gegenüber Punktverbindungen oder Nahtverbindungen aufweisen.

Zur Steigerung der Haftfestigkeit dickerer Klebstoffschichten, die besonders bei Verwendung zäher Klebstoffe Spannungen reduzieren können, können Füllstoffe eingesetzt werden, und zur Erhöhung der Scherbelastbarkeit eignen sich Zwei-Komponenten-Epoxidharze, die hohe Biegewechselfestigkeiten bei Betriebstemperaturen bis etwa 80 Grad C aufweisen.

In dem Beitrag von Bähr et al [2] wird über eine innovative Technik für die Verklebung von Glas und rostfreiem Stahl für den Einsatz in der Biotechnologie und in der endoskopischen Medizin berichtet. Die physikochemischen Eigenschaften, wie Scherfestigkeit, maximale Belastung bei Versagen, Dehnbarkeit und Glasübergangstemperatur der Klebstoffe sind dabei untersucht worden.

Während alle geprüften Epoxidharze bei der Glas/Edelstahl Verklebung versagten, zeigten die untersuchten Acrylate aufgrund der ausgezeichneten Dehnbarkeit eine hohe Toleranz gegenüber internen Spannungen, die auf die unterschiedlichen Expansionskoeffizienten von Glas und Edelstahl zurückzuführen sind.

In dem Beitrag von Thiemann et al [3] wird eine Infrarot-Thermografie für die Überprüfung einer großflächigen Stahlrahmenstruktur benutzt, auf die eine Glasscheibe aufgeklebt ist.

Die in der Automobilindustrie in der Erprobungsphase befindliche Prüftechnik verwendet eine Infrarot-Kamera.

Der zu untersuchende Klebestreifen besteht aus einem hochelastischen Polyurethan, hat eine Breite von 15 mm und eine Dicke von 5 ±2 mm. Die durch Induktion erfolgende thermische Anregung und die Messung mit der Infrarot-Kamera erfolgen von der Glasseite. Nach der Empfindlichkeitsjustierung an einem Referenzmodul können nicht verklebte Bereiche, Lufteinschlüsse, Porositäten, Einschnürungen, Unterbrechungen der Klebefuge und kissing bonds nachgewiesen werden.

In weiteren Fachbeiträgen werden die ultraschallangeregte Thermografie, der Einsatz von Matrixarrays, die Verwendung von geführten Wellen oder aber von Schallemissionssonden für die Untersuchung von Klebverbindungen beschrieben [4-9].

In dem vorliegenden Beitrag wird eine Ultraschall-Prüftechnik vorgestellt, die mit dem Einsatz eines Matrixarrays für die Senkrechteinschallung und mit Winkelprüfköpfen für die Schrägeinschallung jeweils in Kontakttechnik eine detaillierte Analyse der Klebschicht ermöglicht.

Die Prüftechnik nutzt die Fokussierung des Matrixarrays und die kurze Impulslänge der breitbandigen Winkelprüfköpfe aus, um in Kombination mit angepassten Signalverarbeitungsalgorithmen einen eindeutigen Schadensnachweis zu erzielen. Es wird ein Probekörper aus einer repräsentativen Glas-Metall Klebverbindung mit künstlich eingebrachten punktuellen und flächigen Fehlstellen flächenhaft abgerastert.

Für die Auswertung der Messergebnisse sind Schnittbilder des Klebschichtvolumens in allen drei Raumrichtungen erstellt worden, also in der x-y und x-z-Ebene (C- und B-Bild) sowie in der y-z-Ebene. Somit wird eine quantitative ortsgetreue Wiedergabe der eingebrachten Klebfehler ermöglicht.

3. Messaufbau

Für die Untersuchungen ist ein Probekörper (originalmaßstäblicher Ausschnitt eines SSG-Fassadenelementes) verwendet worden, der aus einer 8 mm dicken Glasplatte (Einscheiben-Sicherheitsglas = ESG) besteht, die mit einer 12 mm breiten und 6 mm hohen Klebeschicht (2-k Silikonklebstoff) auf einem Aluminiumträger (vorbereitetes Aluminiumprofil) befestigt ist (Abbildung 1).

Die künstlich eingebetteten flächigen Fehlstellen in der Klebeschicht bzw. in den Grenzflächen/Kontaktflächen zum Aluminiumprofil bzw. Glas bestehen aus Papier- und Styroporstreifen. Die punktuellen Fehlstellen sollen mittels kleinen Styropor- und Glaskugeln nachgebildet werden.

Damit wird der Versuch unternommen, die aus der Praxis berichteten typischen Artefakte bzw. Fehlstellen nachzubilden. Die Lage der künstlichen Fehlstellen in der Klebeschicht ist in Abbildung 2 und deren räumliche Anordnung in Abbildung 3 veranschaulicht.

Die Schallgeschwindigkeiten für Longitudinalwellen betragen in der Glasplatte 5600 m/s und in der Klebeschicht 952 m/s. Für den Nachweis der künstlichen Fehler in der Klebeschicht sind sowohl Longitudinalwellen als auch Transversalwellen eingesetzt worden. Die Longitudinalwellen sind mit einem Matrixarray und die Transversalwellen sind mit einem konventionellen Winkelprüfkopf jeweils in Impuls-Echo-Technik verwendet worden. Die Ankopplung erfolgte auf der Glasplatte in Kontakttechnik.

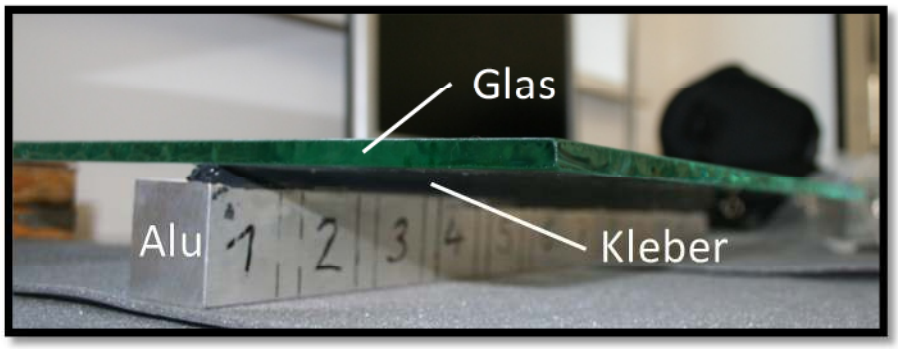

Abbildung 1: Probekörper mit einer Glas-Metall Klebeverbindung

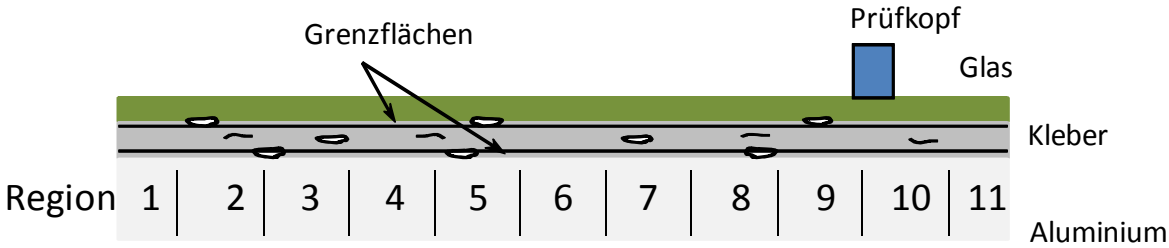

Abbildung 2: Lage der künstlichen Fehler in der Klebeschicht

Das 2,25 MHz Matrixarray besteht aus 60 Schwingerelementen, mit denen das Schallbündel auf die Glas-Klebstoff-Grenzfläche fokussiert wird. Das Matrixarray ist an das in der BAM entwickelte Phased Array Ultraschallgerät COMPAS-XL angeschlossen welches von einem Steuerrechner aus bedient wird.

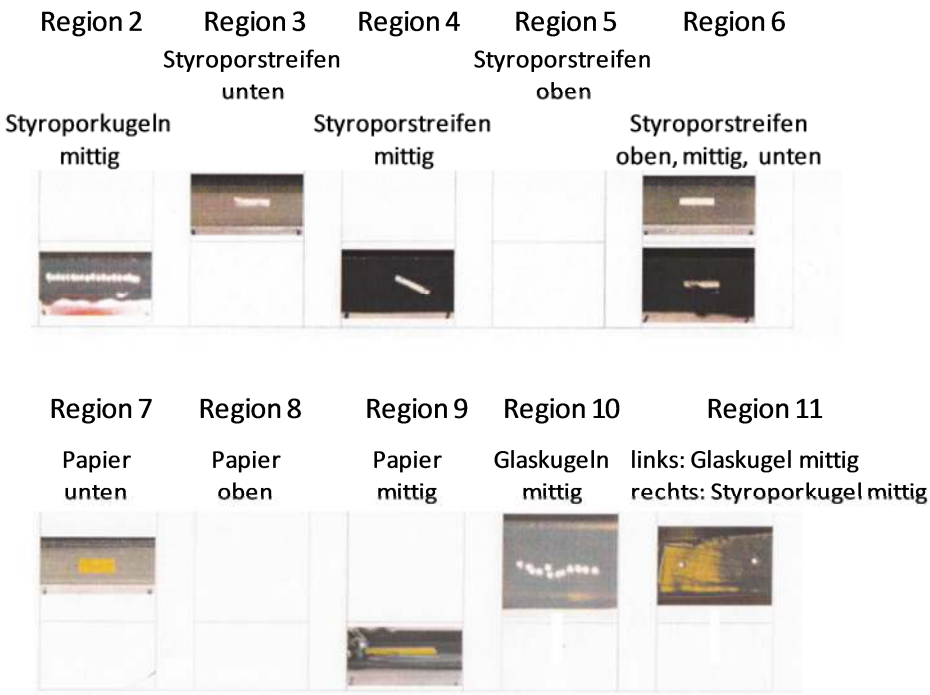

Abbildung 3: Variation und räumliche Anordnung der künstlichen Fehlstellen im Probekörper

Da die Positionsdaten des manipulatorgeführten Matrixarrays dabei ebenfalls vom Messsystem aufgezeichnet werden, kann durch angepasste Überlagerungsalgorithmen für die aufgezeichneten Echosignale die Ortsauflösung vor allem aber der Signal-Rausch-Abstand deutlich gesteigert werden. Die konventionellen Winkelprüfköpfe haben eine Frequenz von 5 MHz und zeichnen sich durch eine kurze Impulslänge aus.

4. Messergebnisse

Mit dem Matrixarray sind auf mäanderförmigen Fahrspuren auf der Glasplatte in dichten Mess-und Spurabständen A-Bilder aufgenommen worden (siehe Abbildung 4). Zur Fokussierung des Schallbündels auf die Glas-Kleber-Grenzfläche haben sämtliche Schwingerelemente mit entsprechender Schrägeinschallung der Longitudinalwelle beigetragen. Aus den A-Bildern der einzelnen Fahrspuren sind jeweils TD-Bilder erzeugt worden. Durch Abzug der Rückwandechoanzeigen sind die detektierten Fehlerlagen deutlich herausgearbeitet worden, was in Abbildung 5a und 5b dokumentiert wird.

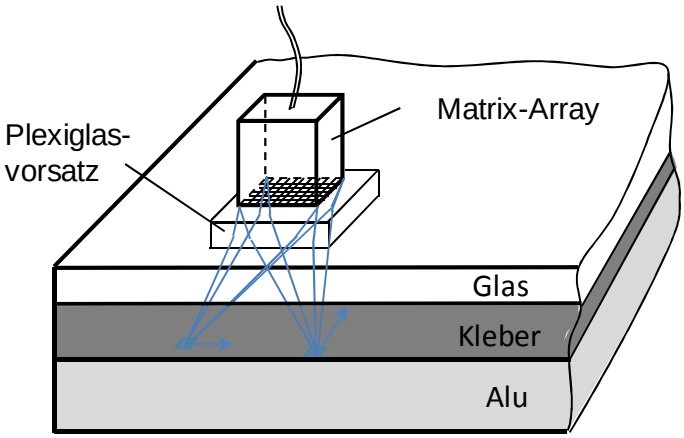

Abbildung 4: Schematische Darstellung der Messdatenaufnahme mit dem Matrixarray

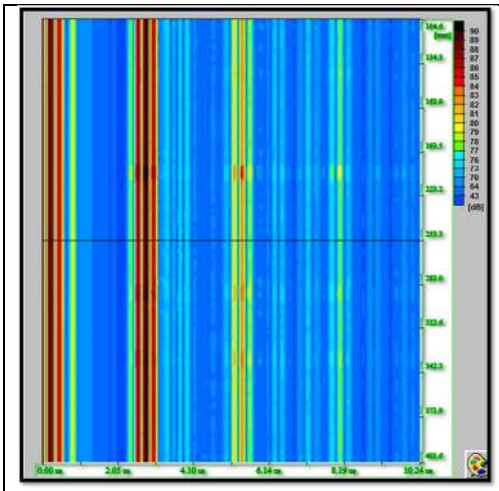

Abbildung 5a: TD-Bild einer Spur mit Rückwandecho-Anzeigen

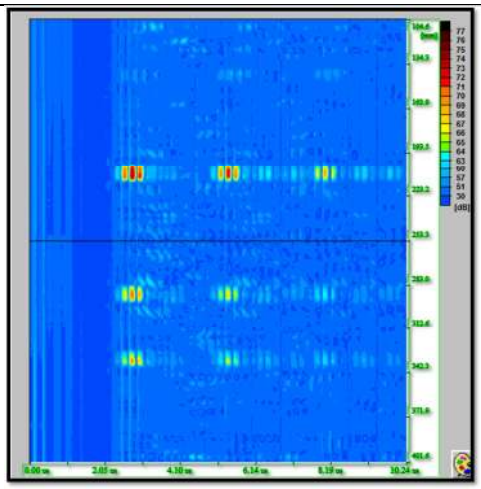

Abbildung 5b: TD-Bild einer Spur nach Abzug der Rückwandecho-Anzeigen

Aus den TD-Bildern sämtlicher Fahrspuren ist dann ein C-Bild ermittelt worden, das die flächenhafte Verteilung der gemessenen Echoanzeigen in der Grenzschicht zwischen Glas und Kleber wiedergibt (siehe Abbildung 6).

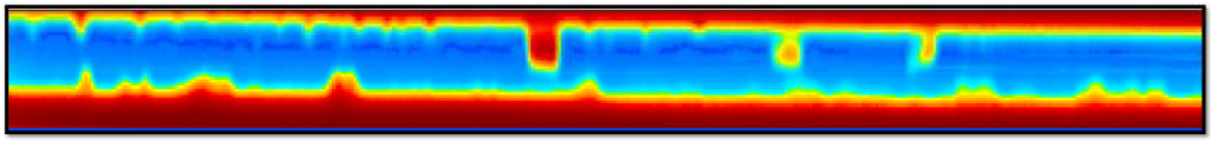

Abbildung 6: C-Bild aus Grenzschicht Glas-Kleber nach Abzug der Rückwandecho-Anzeigen

Abbildung 7: Foto mit Teilansicht der Glasklebverbindung mit künstlichen Fehlstellen zwischen Glas und Kleber

Aus der Gegenüberstellung des Fotos in Abbildung 7 und des C-Bildes in Abbildung 6 ist zu erkennen, dass die drei künstlichen Fehlstellen zwischen Glas und Kleber eindeutig nachgewiesen worden sind.

Die in der Klebermitte (innerhalb des Klebstoffvolumens) liegenden künstlichen Defekte sind mit Winkelprüfköpfen in Schrägeinschallung nachgewiesen worden. Die hierbei eingesetzten Transversalwellen erfahren eine Brechung an der Grenzfläche zwischen Plexiglasvorlauf und Glas sowie an der Grenzfläche zwischen Glas und Kleber.

Die Messdatenaufnahme der Winkelprüfköpfe erfolgte auf den mäanderförmigen Fahrspuren jeweils in zwei Messfahrten mit entgegengesetzter Einschallrichtung, wie in Abbildung 8 dargestellt ist.

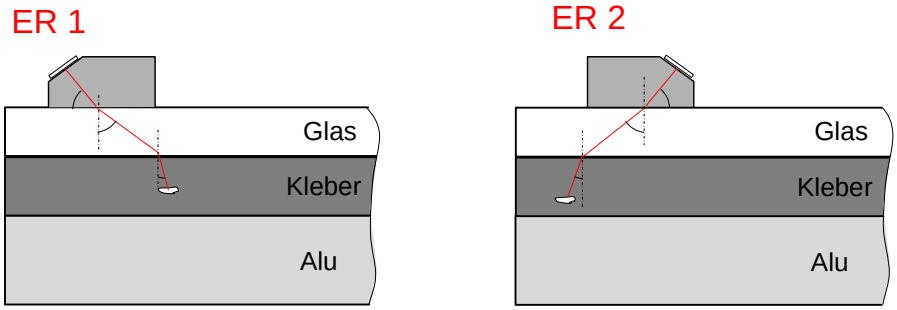

Abbildung 8: Zwecks Erfassung aller Fehleranzeigen sind die Winkelprüfköpfe in getrennten Messfahrten mit entgegengesetzten Einschallrichtungen (ER1 und ER2) eingesetzt worden

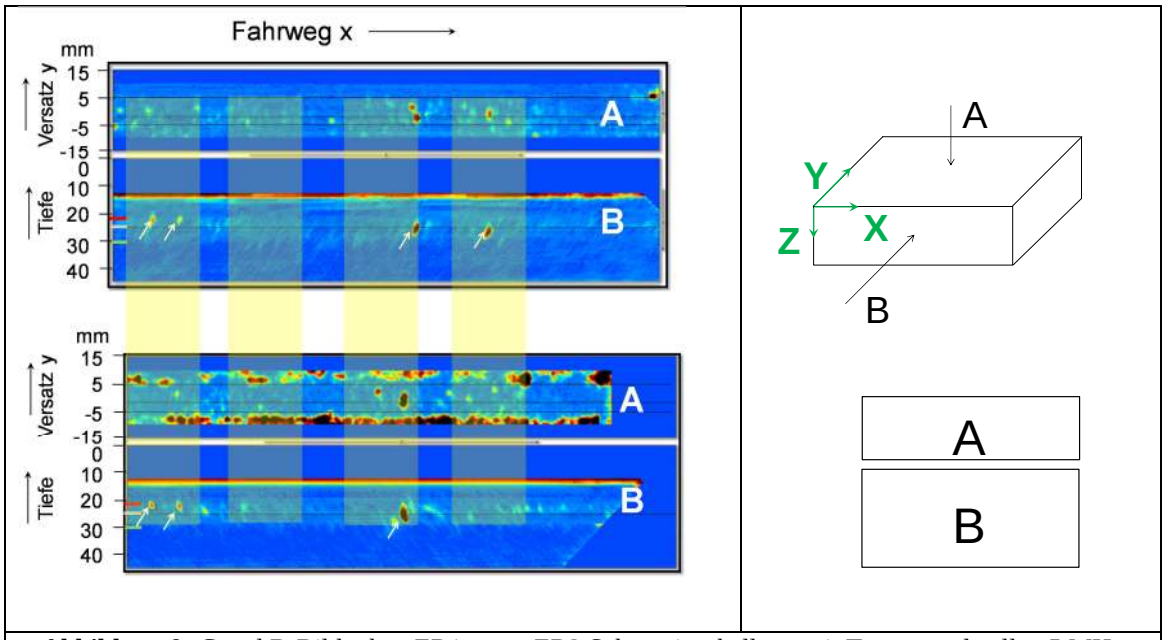

Abbildung 9: C und B-Bild, oben ER1 unten ER2 Schrägeinschallung mit Transversalwellen 5 MHz

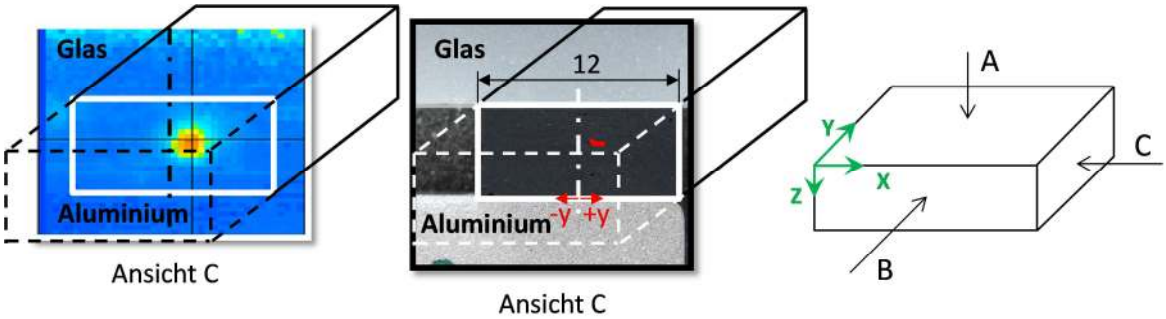

Abbildung 10: Übereinstimmung zwischen Ultraschallbild und Foto einer nachgewiesenen Fehlstelle im Klebstoff

Einige ausgewählte Messergebnisse in Abbildung 9 zeigen detektierte Fehlstellen in der Klebermitte. Da die Aufnahme der Ultraschallmessdaten eine dreidimensionale Analyse der untersuchten Klebverbindung gestattet, können Schnittbilder in der x-y, x-z, und y-z-Ebene erstellt werden.

Während in Abbildung 9 C-und B-Bilder Schnittebenen in der x-y und x-z-Ebene darstellen, zeigt Abbildung 10 ein Schnittbild in der y-z-Ebene. Um die Ultraschall-nachweise der Fehlstellen zu überprüfen ist der Testkörper an den zuvor mit Fehlern markierten Positionen zerschnitten worden. Das in Abbildung 10 wiedergegebene Foto zeigt die Bestätigung eines mit Ultraschall zuvor nachgewiesenen Fehlers. Damit ist die grundsätzliche Leistungsfähigkeit zur Detektion innerer Fehlstellen in einer Größe von 1 bis 2 mm erbracht worden.

Fehlstellen in der Grenzfläche zwischen Kleber und Metallrahmen und im grenzflächennahen Bereich sind aufgrund der hohen Schallschwächung im Kleber mit der bisher eingesetzten Prüftechnik nicht nachweisbar.

5. Zusammenfassung

Die bildhafte Darstellung der Ultraschall-Messergebnisse zeigt, dass die Klebverbindungen der SSG-Bauart, wie sie in städtebaulichen Glasfassaden angewandt werden, hinsichtlich innerer Homogenität oder Verbundeigenschaften mit einer zerstörungsfreien Ultraschall-prüftechnik auf Fehlstellen überprüft werden können.

Die künstlichen Fehlstellen in der Klebverbindung zwischen Glas und Alurahmen sind in fast allen Fällen bis zur Hälfte der Klebschichtdicke nachgewiesen worden. Auch die Positionen der Fehlstellen hinsichtlich Tiefenlage in der Klebschicht und Lage in der Fahrspur des Prüfkopfes sind exakt feststellbar.

Für den Fehlernachweis im unteren Teil der Klebschicht sowie im Grenz-flächenbereich zwischen Kleber und Alurahmen sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Eine Fokussierung von Transversalwellen für den unteren Tiefenbereich der Klebschicht ist ein möglicher Lösungsansatz.

Referenzen

[1] Verbesserung der Haftfestigkeit von Klebverbindungen; T. Gaston; Machine Design * Band 75 (2003) Heft 21, Seite 83-86

[2] Withstanding frequent steam sterilization: Innovative technique to bond glass and stainless steel composites in biotechnology and endoscopic medicine; C. Bähr, E. Stammen, R. Thiele, S. Böhm, K. Dilger, J. Büchs; International Journal of Adhesion & Adhesives 33(2012) pp.15-25

[3] Automated defect detection in large-scale bonded parts by active thermography;
C. Thiemann, M. F. Zaeh, C. Srajbr, S. Boehm; 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, July 27-30, 2010, Québec (Canada)

[4] Thermografische Prüfung von Fügeverbindungen im Karosseriebau; U. Siemer; DGZfP-Jahrestagung Zerstörungsfreie Materialprüfung, Bremen, DE, 30.05.- 01.06.20011

[5] Acousto-ultrasonic evaluation of adhesively bonded CFRP-aluminum joints;
O. Y. Kwon, S.H. Lee; NDT&E International, Band 32 (1999) Heft 3,pp 153-160

[6] Evaluation of adhesively bonded joints in automotive industry with
ultrasonic matrix array transducer; R.Gr. Maev, S. Titov, A. Bogachenkov,
B.Ghaffari, K. Lazarz; 5th Pan American Conference for NDT, 2-6 October 2011, Cancun, Mexico

[7] Klebungen mit "einstellbarer" Versagensgrenze für die Qualifizierung eines Verfahrens zur Bestimmung der Festigkeit von Klebverbunden; K. Albinsky, F. Mohr, J. Skupin, R. Wilken, O. Focke, P. Huke, M. Kalms, C. von ; DGZfP-Jahrestagung Zerstörungsfreie Materialprüfung, Bremen, DE, 30.05.- 01.06.2011

[8] Ultraschallangeregte Thermografie in der industriellen Anwendung; Th. Zweschper, A. Dillenz , R. Moser; DGZfP-Jahrestagung Zerstörungsfreie Materialprüfung, Salzburg, DE, 17.05.- 19.05.2004

[9] Estimation of adhesive bond strength in laminated safety glass using guided mechanical waves: Part I. An energy velocity approach; S. Huo, H. Reis;
Insight Vol. 50 No 3 March 2008, pp.146-152