

Kombinierte Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von monolithischen CFK-Klebeverbindungen

Florian STARK *, Jan-Carl GRAGER *, Christian U. GROßE *

* Technische Universität München, Centrum Baustoffe und Materialprüfung, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, München

Kurzfassung

Durch den zunehmenden Einsatz von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) im Automobil- und Aeronautiksektor, werden auch erhöhte Ansprüche an die Fügeverfahren gestellt. Traditionelle thermische und mechanische Fügeverfahren wie Schweißen oder Nieten, welche sich bei Metallverbunden bewährt haben, sind für Faserverbundwerkstoffe nur bedingt oder auch gar nicht einsetzbar, da durch den Fügeprozess der Faserverbundwerkstoff so geschädigt werden kann, dass es dadurch zu signifikanten Einbußen hinsichtlich der Festigkeit und Dauerfestigkeit des Bauteils kommt. Das Kleben, vor allem mit chemisch abbindenden Klebstoffen, eignet sich hier besonders, um zwei Bauteile aus CFK oder auch als Hybrid, in Form einer Metall-CFK-Verbindung, zu fügen. Um die Qualität einer Klebung zu überprüfen, werden oft zerstörende Prüfverfahren eingesetzt. Diese Prüfung ist mit hohen Kosten und Zeitaufwand verbunden. Ziel dieser Studie ist die Evaluierung konventioneller zerstörungsfreier Prüfverfahren, wie Ultraschall (Phased-Array und Impuls-Echo) und der optischen Lockin-Thermografie (OLT), zur Qualitätssicherung von CFK-Klebeverbindungen als mögliche „in-situ“ Verfahren. Als Referenzverfahren wurde die Computertomografie eingesetzt. Untersucht wurden bis zu 6 mm starke CFK-CFK-Probekörper mit unterschiedlichen Klebschichtdicken und künstlich eingebrachten Klebschichtinhomogenitäten (Luft einschüsse, fehlender Klebstoffauftrag, Delaminationen, etc). Verwendet wurden Zweikomponentenklebstoffe auf Epoxidharz- und Polyurethanbasis. Erste Ultraschallergebnisse zeigen, dass sowohl die Phased-Array als auch die Impuls-Echo-Methode in der Lage sind, Klebdicken von ca. 0,6 mm bis ca. 2,5 mm sicher darzustellen. Die Computertomografie erwies sich als geeignetes Medium um die tatsächliche Fügespaltstärke der Probekörper zu bestimmen und verifizierte damit die US-Dickenmessungen. Luft einschüsse konnten auf dem C-Bild sowie mittels OLT, mit einer Modulationsfrequenz von 0,05 Hz identifiziert werden. Aus diesen Messungen kann man bereits ein mögliches Potential für die Kombination aus Lockin-Thermografie und Impuls-Echo bzw. Phased-Array zur Überprüfung von Klebeverbindungen bzw. klebtechnischen Reparaturmaßnahmen ableiten.



F. Stark^{1,2}, J.-C. Grager¹ und C.U. Große¹

1) Technische Universität München, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Centrum Baustoffe und Materialprüfung
2) Automation W+R GmbH, Composite Materials

1. Einführung

Das Kleben, vor allem mit chemisch abbindenden Klebstoffen, eignet sich besonders, um zwei Bauteile aus CFK oder auch als Hybrid in Form einer Metall-CFK-Verbindung zu fügen. Um die Qualität einer Klebung zu überprüfen, werden oft zerstörende Prüfverfahren eingesetzt. Diese Prüfung ist mit hohen Kosten und Zeitaufwand verbunden. Ziel dieser Studie ist die Evaluierung konventioneller zerstörungsfreier Prüfverfahren wie Ultraschall (Phased-Array und Impuls-Echo) und der optischen Lockin-Thermografie (OLT) zur Qualitätssicherung von CFK-Klebeverbindungen als mögliche „in-situ“-Verfahren. Als Referenzverfahren wurde die Computertomografie eingesetzt. Untersucht wurden bis zu 6 mm starke CFK-CFK Probekörper mit unterschiedlichen Klebschichtdicken und künstlich eingebrachten Klebschichtinhomogenitäten (Luftfeinschlüsse, fehlender Klebstoffauftrag, Delaminationen, etc.). Verwendet wurden Zweikomponentenklebstoffe auf Epoxidharz- und Polyurethanbasis.

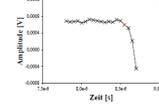
2. Prüfobjekte / Voruntersuchungen



Epoxidharzklebstoff



Epoxidharzklebstoff

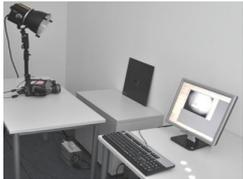


Ultraschall-Durchschallung zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit im ausgehärteten Epoxidharz- und PUR-Klebstoff:
Prüffrequenz: 350 Hz

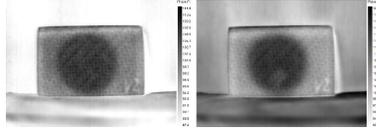
$$v_p(\text{Epoxid}) = 2240 \text{ m/s}$$

$$v_p(\text{PUR}) = 1550 \text{ m/s}$$

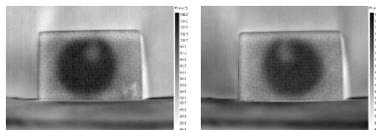
3. Prüfverfahren



Zunächst wurden die Probekörper mit der optischen Lockin-Thermografie untersucht. Der Vorteil ist die schnelle, bildgebende Darstellung des gesamten Probekörpers. Verschiedene Modulationsfrequenzen wurden getestet. Bereits bei einer Frequenz von 0,1 Hz erkennt man den Übergang Klebstoff/CFK. Für die Durchdringung der PUR-Klebstoffschicht werden 0,05 Hz benötigt. Deutlich erkennbar werden dann Fehlklebungen wie z. B. Luftblasen oder fehlender Klebstoffauftrag. Die Detektionsgröße liegt bei > 2 mm (abhängig von der Tiefenlage des Fehlers). Die Simulation von Weak-Bonds /Kissing Bonds durch Ölauftrag führte zu keinem sichtbaren Ergebnis in der OLT.



Modulationsfrequenz: 0,10 Hz (links) und 0,05 Hz (rechts)

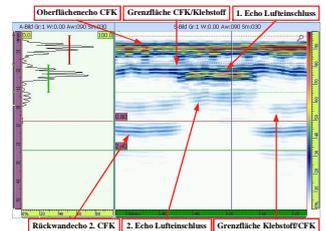


Aufnahme Vorder- (links) und Rückseite (rechts); Modulationsfrequenz: 0,05 Hz

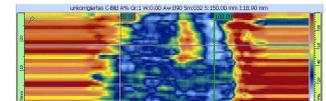
Phased-Array-Ultraschall führt, ähnlich wie die Thermographie, relativ schnell zu Ergebnissen. Als Koppelmedium wurde hier Wasser verwendet. S- und C-Scans ermöglichen eine intuitive Darstellung der Klebefläche sowie die Darstellung eines Lunkers darin. Mit Hilfe des A-Scans und der Kenntnis der Laufzeit im Klebstoff lassen sich zum einen sehr gut die Klebstoffdicken berechnen, zum anderen die Tiefenlage der Fehlstelle absolut bestimmen (sowohl für Epoxidharzklebstoff als auch für PUR-Klebstoff). Vergleichende Messungen von CFK-Materialien aus unterschiedlichen Verfahren (RTM und Nasspress) zeigten keine signifikanten Unterschiede bei der Klebdickenbestimmung. Für komplexe Geometrien sind jedoch die meisten Phased-Array-Prüfköpfe zu groß und können nicht mehr eingesetzt werden.



Phased-Array-Ultraschall mit 5 MHz Prüfkopf.



Ultraschallprüfung einer Probe mit Luftfeinschluss. Oben sind A- und S-Scan und unten der dazugehörige C-Scan dargestellt



IR-Thermografie

Ultraschall (Phased-Array)

CT / Radiografie

Ultraschall (Impuls-Echo)

Dickenbestimmung mittels Computertomografie (CT). Röntgenstrahlung wird von CFK und Klebstoff unterschiedlich stark absorbiert.



Durchstrahlungsaufnahme bei 60 KV. Gut erkennbar ist hier auch der Injektionskanal zur Erzeugung der Luftblase.



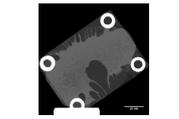
CT-Aufnahmen bei 120 kV (Luftblase). Klebstoff und CFK sind gut differenzierbar.



Probe mit eingestellter Klebschichtdicke (2,4 mm) und markierten Messpunkten für Ultraschalldickenmessungen



Durchstrahlung der Klebeprobe für Ultraschalldickenmessung. Sichtbar sind die Passscheiben (Stahl) und fehlender Klebstoffauftrag (dunkelgrau).

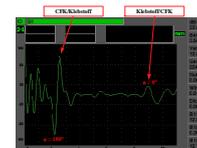


Die radiografischen Verfahren wurden zur Referenzierung eingesetzt und eignen sich ausgezeichnet um CFK-Klebeproben zu charakterisieren. Künstlich erzeugte Klebefehler (Delaminationen, Poren, Lunker) können damit leicht bewertet werden. Auch kann die tatsächliche Klebspaltdicke bestimmt werden. Dies ist notwendig, um die thermografischen und ultraschallbasierenden Messungen bewerten zu können.

Die Klebschichtdickenmessungen wurden vorwiegend mit dem Impuls-Echo-Verfahren mit einem 5 MHz Einzelschwinger-Prüfkopf durchgeführt. Der handliche Prüfkopf eignet sich sehr gut für komplexere Geometrien. Als Koppelmedium wurde Wasser verwendet. Da die porösen Klebstoffe die Ultraschallwelle stark dämpfen, kann das Signal über eine entfernungsabhängige Amplitudenkorrektur verstärkt werden. Die Laufzeiten wurden sowohl über die Flanke des Signals als auch über das Maximum bestimmt. Hier konnte man geringe Abweichungen von mehreren Prozent feststellen.



Impuls-Echo-Messung an Prüfboden mit 5 MHz Einzelschwinger-Prüfkopf



HF-Signal zur Klebschichtdickenmessung Phasensprung um 180° an Grenzfläche CFK/Klebstoff



Probekörper aus CFK (RTM) und PUR Klebstoff (2,6 mm)



Klebschichtdickenmessung eines 2K-Strukturklebstoffs auf Basis von Polyurethan

4. Zusammenfassung - Ausblick

Erste Ultraschallergebnisse zeigen, dass sowohl die Phased-Array-Methode als auch die Impuls-Echo-Methode in der Lage sind, Klebdicken von ca. 0,6 mm bis ca. 2,5 mm sicher darzustellen. Die Computertomografie erwies sich als geeignetes Medium, um die tatsächliche Fugespaltdicke der Probekörper zu bestimmen und verifiziert damit die US-Dickenmessungen. Luftfeinschlüsse konnten auf dem C-Bild sowie mittels OLT mit einer Modulationsfrequenz von 0,05 Hz identifiziert werden. Aus diesen Messungen kann man bereits ein mögliches Potential für die Kombination aus Lockin-Thermografie und Impuls-Echo bzw. Phased-Array zur Überprüfung von Klebeverbindungen bzw. klebtechnischen Reparaturmaßnahmen ableiten.

Klebschichtdickenmessung (Impuls-Echo)

- eignet sich sehr gut zur Klebschichtdickenmessung (ca. 0,6 – 2,5 mm mit 5 MHz Prüfkopf)
- gut für Bauteile komplexer Geometrien geeignet
- nur einseitiger Zugang notwendig
- DAC & TVG (Amplitudenkorrekturen auf Grund starker Dämpfung im Klebstoff) sind geeignete Hilfsmittel für dicke Klebstoffschichten
- Interpretation des A-Scans erfordert erfahrenen Prüfer
- Metall/CFK-Verklebungen können nur von der CFK-Seite aus geprüft werden

US-Phased-Array-Prüfkopf

- Kombination von Klebschichtdickenmessungen und im Hinblick auf Defekte praktikabel umsetzbar
- Gerätekosten
- elastische Vorlaufstrecke für gekrümmte Bauteile notwendig
- Geeignetes Koppelmedium notwendig

Thermografie (OLT)

- großflächige, komplexe Strukturen sind berührungslos untersuchbar
- nur einseitiger Zugang notwendig
- Gerätekosten (vor allem IR-Kamera)
- begrenzte Eindringtiefe (ca. 5 mm bei CFK)
- Auflösung nimmt mit steigender Eindringtiefe ab

Danksagungen:

Lehrstuhl für Angewandte Biophysik für die Unterstützung bei den radiografischen Messungen.
Fa. Roding Automobile GmbH für die Unterstützung und Bereitstellung von Klebstoff und CFK-Materialien

Kontakt:
Dr. Florian Stark:
f.stark@tum.de
Automation W+R GmbH
Messerschmittstraße 7
80992 München

Jan-Carl Grager B.Eng.
Jan-Carl.Grager@gmx.at
Technische Universität München

Prof. Dr.-Ing. Christian Große
grosse@tum.de
Technische Universität München
Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung
Baumbachstraße 7
81245 München