HAL open science

Kissing Bonds Gezielte Herstellung und Detektion mit Ultraschall

Jens Schuster, Ming-Hong Chen, Quentin Govignon

To cite this version:

Jens Schuster, Ming-Hong Chen, Quentin Govignon. Kissing Bonds Gezielte Herstellung und Detektion mit Ultraschall. DACH-Jahrestagung 2019, May 2019, Friedrichshafen, Germany. pp.1-8/24569. hal-02503751

HAL Id: hal-02503751

https://imt-mines-albi.hal.science/hal-02503751v1

Submitted on 10 Mar 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

More info about this article: http://www.ndt.net/?id=24569

Kissing Bonds – Gezielte Herstellung und Detektion mit Ultraschall

Jens SCHUSTER [1], Ming-Hong CHEN [2], Quentin GOVIGNON [2]
[1] Hochschule Kaiserslautern, Pirmasens
[2] Ecole des Mines d´Albi-Carmaux, Albi, Frankreich

Kontakt: E-Mail: jens.schuster@hs-kl.de

Kurzfassung. Kissing Bonds stellen bei der Verklebung von Faserverbundkomponenten speziell im Luftfahrtbereich eine bisher nicht zufriedenstellend gelöste Fragestellung dar. In dieser Forschungsarbeit wurde versucht, Proben mit Kissing Bonds durch Variation des Mischungsverhältnisses der Komponenten eines Zweikomponentenklebers gezielt herzustellen, wobei als Kriterium galt, dass diese Klebeverbindungen im C-Scan unauffällig sind, aber deutlich schlechtere Scherfestigkeiten als Proben mit einwandfreier Verklebung aufweisen. Anschließend wurden die Proben hinsichtlich der Änderung der Mittenfrequenz mittels Featurescans (F-Scans) geprüft. Als Ultraschallgerät stand hierfür eine USPC 3040S AIRTECH 4000 Tauchtankanlage vom Ingenieurbüro Dr. Hillger mit einem Frequenzbereich von 0,5 – 35 MHz zur Verfügung. Es war möglich, frequenzbasiert Kissing-Bond-Proben von Gut-Proben zu unterscheiden. Im Folgenden wurde ein Blindtest mit zehn Proben durchgeführt, bei dem mit der entwickelten Methode eine fehlerfreie Selektion in Gut- und Schlechtklebungen möglich war.

Einführung

Der verstärkte Einsatz von polymeren Verbundwerkstoffen in der Luft- und Raumfahrttechnik, dem Automobilbau und anderen Industriezweigen bringt die Notwendigkeit mit sich, polymerbasierte Komponenten miteinander zu verfügen. Neben dem traditionell im Luftfahrtbereich praktizierten Nieten, das wenig Werkstoff gerecht ist, bietet sich hier vor allem das Kleben an. Im Vergleich zu konventionellen Verbindungstechniken besitzt das Kleben eine Reihe von Vorteilen wie z.B. gleichförmige Spannungsverteilung, bessere Ermüdungs-und Dämpfungseigenschaften, vernachlässigbarem Gewicht und die Möglichkeit, ungleiche Materialien zu verbinden [1]. Allerdings gibt es auch eine Reihe von Nachteilen und Schwachpunkten von Klebungen wie z.B. Risse, Poren , bzw. Porositäten, mangelnde Adhäsion und Kissing Bonds [2 – 4]. Es werden daher zerstörungsfreie Prüfverfahren eingesetzt, um die Haftfestigkeit der gefügten Komponenten speziell im mobilen Einsatz zu überprüfen. Die Ultraschallprüfung mit ihrer guten Eignung für die Prüfung an Großbauteilen und einer hervorragenden Anzeigefähigkeit von Delaminationen, Poren und Einschlüssen besitzt aber große Probleme bei der Detektion von Kissing Bonds.

Lizenz: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de

Ein “Kissing Bond” kann definiert werden als eine Fehlstelle in der Grenzschicht zwischen zwei festen Festkörperoberflächen in sehr innigem Kontakt, aber einem starken Abfall der Grenzflächenhaftung, wobei der Kissing Bond zumeist von mehr oder wenigen gut haftenden Bereichen umgeben ist. Auf Grund dieses innigen Oberflächenkontakts und daraus folgend geringen Schallreflektionen an der Grenzfläche sind Kissing Bonds meist nur schwer oder gar nicht mit Ultraschall zu detektieren [4 - 6].

Um Kissing Bonds besser zur Anzeige zu bringen, gibt es in der Literatur sehr viele Ultraschall basierte Ansätze, aber auch Versuche mit anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren wie z.b. vibro-akustischer Modulation oder Thermographie [7 - 9]. Bei der Ultraschallprüfung ist zu konstatieren, dass klassische C-Scans oder die Betrachtung reiner A-Wellen nicht zielführend sind. Die Versuche, trotzdem mit Ultraschall Kissing Bonds detektieren zu können, sind daher vielfältig [6, 10 - 15]. Es wurden auch schon Versuche mit merkmalsgestützten Methoden zur Qualifizierung von Klebungen durchgeführt [16, 17]. Leider fokussierten einerseits die merkmalsbasierten Ultraschallprüfungen nicht auf die Auffindung von Kissing Bonds. Andererseits sind die zitierten Untersuchungen nur schwer vom Labor in eine Prüfung im Feld oder am z.B. Flugzeug übertragbar. Nicht zuletzt im Hinblick auf den Wunsch von Airbus [18], dass es ein Prüfverfahren für Klebungen geben müsste, das binär in gute und schlechte Klebungen, signalisiert in Form einer Ampel mit roter und grüner Farbanzeige, unterscheidet, wurden eigene merkmalsbasierten Studien mit Ultraschall durchgeführt.

1. Verwendete Geräte und Materialien

1.1 Ultraschallanlage und Prüfköpfe

An der Hochschule in Pirmasens steht für die Ultraschallprüfung eine vierachsige USPC 3040S AIRTECH 4000 Tauchtankanlage vom Ingenieurbüro Dr. Hillger zur Verfügung (Abb 1.).

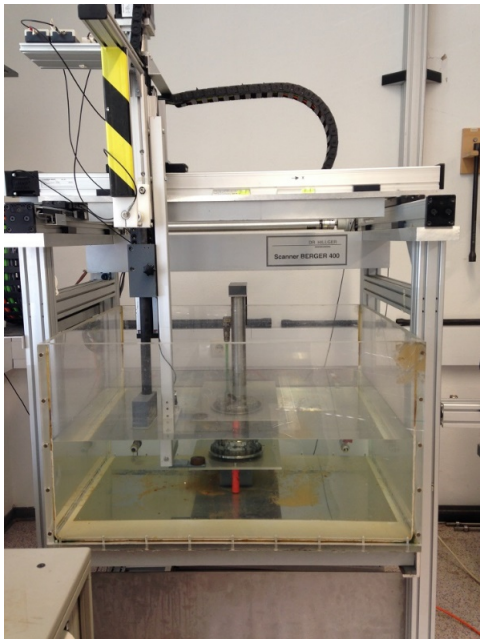


Abb. 1: Tauchtechnikanlage der Fa. Hillger

Sie besitzt einen Frequenzbereich von 0,5 bis 35 MHz und erlaubt die Prüfung von Platten mit einer Maximalgröße bis 800 mm x 600 mm und Rohren mit einem Durchmesser

bis zu 300 mm. Der Ultraschall kann über Wasser oder auch über Luft angekoppelt werden. Neben gewöhnlichen A-, B-, C- und D-Bildern können auch andere Merkmale, z. B. die Frequenz ausgewertet werden. Dazu verfügt die Anlage über zwei Peakdetektoren und eine softwareseitige Echtzeit-FFT-Berechnung. Als Prüfkopf wurde ein 5 MHz Schallwandler der Fa. Olympus/Panametrics mit einer Fokuslänge von 50 mm eingesetzt.

1.2 Scherprüfvorrichtung

Zum mechanischen Nachweis von Kissing Bonds wurden Scherversuche mit einer speziell entwickelten Scherprüfvorrichtung unternommen, die in einer Universalprüfmaschine (Zwick 1445) zur Kraftaufbringung eingebracht worden war (Abb. 2).

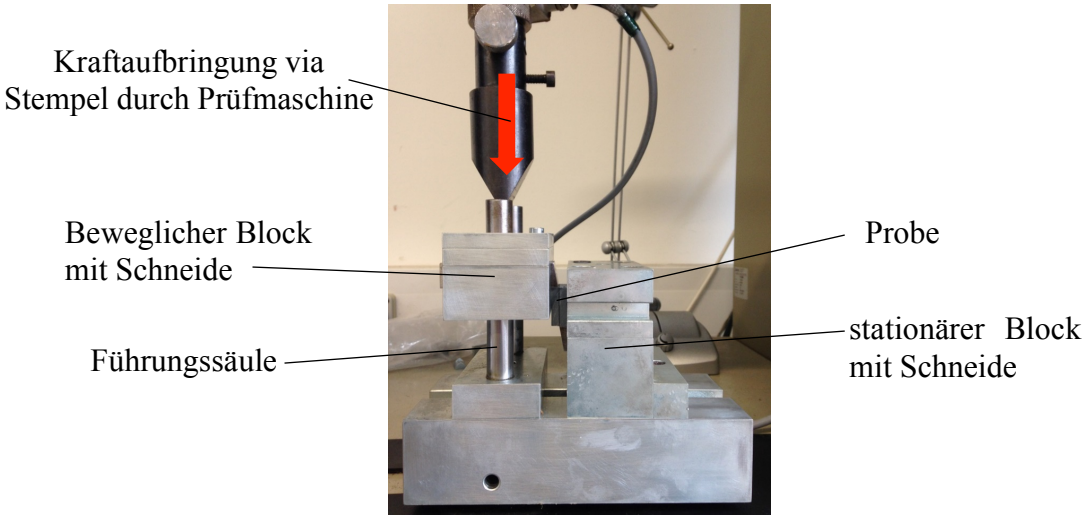


Abb. 2: Schervorrichtung

1.3 Fügematerial

Als Material für die zu verklebenden Fügepartner wurde ein PVC-Plattenmaterial mit einer Dicke von 5 mm und einer Dichte von 1,35 g/cm^3 verwendet. Die gemessene Schallgeschwindigkeit lag bei 2.200 m/s.

1.4 Fügemedium

Als Klebstoff wurde ein UHU-Plus Schnellfest Zweikomponentenkleber verwendet, da dieser über eine ähnliche akustische Impedanz wie das PVC verfügt.

2. Herstellung von Probekörpern mit Kissing Bonds

2.1 Grundlagen

Kissing Bonds liegen vor, wenn die folgenden Kriterien erfüllt sind [19]:

1. Die Scherfestigkeit im Kissing-Bond–Bereich ist massiv reduziert, bzw. es können (fast) keine Scherspannung übertragen werden
2. Das Versagen im Kissing-Bond–Bereich ist immer adhäsiv
3. Kissing Bonds sind in C-Scans unauffällig.

Zur Herstellung von Kissing Bond gibt es grundsätzlich drei Vorgehensweisen:

1. Herstellung eines innigen „trockenen“ Kontakts zwischen den Fügepartnern durch erhöhten Druck auf deren Oberflächen
2. Einbringung einer trennenden Kontamination
3. Herstellung einer Klebung mit nichthaftendem Kleber

2.2 Versuche zur Herstellung von Kissing Bonds

Entsprechend den Ausführungen von Brotherhood, etc. wurden PVC-Platten mit einer Größe von 60 mm x 60 mm durch Schraubzwingen zusammengedrückt und anschließend einer Ultraschallprüfung mit der Auswertungsblende im Bereich der Kontaktfläche der Fügepartner unterzogen [4]. Es zeigte sich heraus, dass diese einfache Kraftaufbringung zur Erzeugung eines Kissing Bonds nicht ausreichend und die Fügefläche deutlich im C-Scan sichtbar ist. Kontaminationen, wurden nicht eingebracht, weil aus [4] ersichtlich ist, dass zwar mit z.B. FreeKote-Spray eine Fehlstelle ähnlich einem Kissing Bond herzustellen ist, in dem die Anhaftung des Klebers verhindert wird, aber dies von der Natur her kein Kissing Bond darstellt.

Entsprechend der dritten Vorgehensweise wurden Probeplatten (60 mm x 60 mm) mit Kissing Bonds hergestellt, in denen bei dem Zweikomponentenkleber das Verhältnis zwischen Harz und Härter variiert wurde. Das vom Hersteller empfohlene Verhältnis liegt bei 5:5. Die Mischungen 1:9 und 9:1 waren wenig adhäsiv und wurde im Hinblick auf mögliche Kontaminationen des Tauchtanks nicht verwendet.

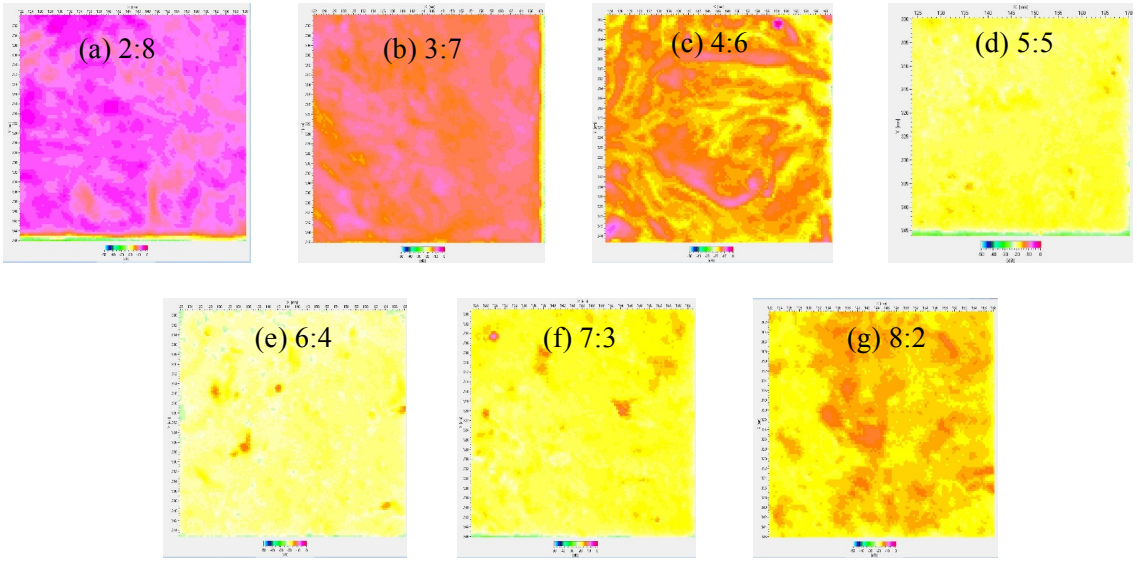


Abb. 3: C-Scan der Klebungen mit verschiedenen Harz-Härter-Mischungen

Es ist ersichtlich, dass die Mischungen (d) bis (f) sich nicht signifikant unterscheiden. Die anderen Mischungen lassen sich hingegen über einen C-Scan ausgrenzen.

2.3 Scherversuche

Scherversuche wurden durchgeführt, um zu überprüfen, ob sich die Verklebungen (d) bis (f) in ihrer Scherfestigkeit unterscheiden. Hierzu wurden aus den gescannten Probeplatten je fünf kleine Scherproben mit einer Breite von 10 mm und einer Länge von 20 mm ausgesägt und zur Scherprüfung derart in die Schervorrichtung (Abb. 2) eingebracht, dass

die Schneiden saugend aneinander vorbeigleiten konnten und sich die Scherebene in der Klebefläche befand. Die Scherfestigkeit berechnet sich aus der durch die Universalprüfmaschine aufgebrachten Kraft und der Fügefläche:

$$\tau = \frac{F}{A} \qquad (1)$$

mit τ - Scherfestigkeit [N/mm^2]
F – Scherkraft [N]
A – Scherfläche [mm^2]

Die Ergebnisse der Scherprüfung sind in Tabelle 1 dargestellt:

Tabelle 1: Ergebnisse der Scherprüfungen

Harz : Härter	Mittelwert τ_{max} [N/mm^2]	Standardab-weichung [N/mm^2]	Abweichung vom Maximalwert [%]
2:8	< 3,0	-	99,2
3:7	9,5	4,3	74,5
4:6	29,7	2,0	20,6
5:5	37,4	4,4	-
6:4	33,9	0,8	9,3
7:3	19,5	1,7	47,9
8:2	18,1	4,6	51,6

Es zeigt sich, dass die Mischung (f) einen Abfall in der Scherfestigkeit zur Klebung mit dem optimalen Mischungsverhältnis von Harz zu Härter um fast 50 % besitzt. Dies ist als ein massiver Abfall zu bezeichnen, so dass Mischung (f) dieses Kriterium für einen Kissing Bond erfüllt.

3. Merkmalsbasierte Ultraschallprüfung

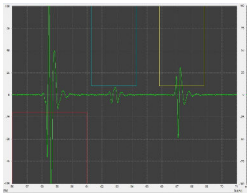
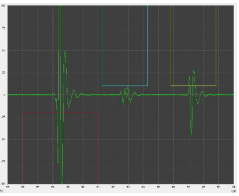
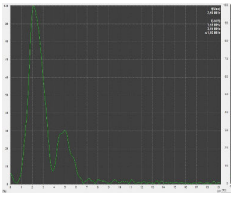
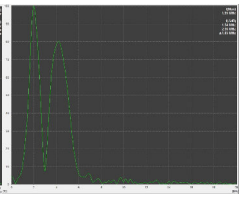
3.1 Grundlagen

Bei der konventionellen Ultraschallprüfung wird die Amplitudenwelle (A-Welle) im Zeitbereich ausgewertet. Daneben ist es natürlich auch möglich, über eine real-time Fast-Fourier-Transformation (FFT) das Frequenzspektrum einer A-Welle anzuzeigen. Mit der in Pirmasens vorhandenen Anlage ist es auch möglich, entsprechend eines C-Scans einen F-Scan (Feature Scan) mit z.B. der Mittenfrequenz als Feature durchzuführen. Bei der merkmalgestützten Ultraschallprüfung definiert man möglich robuste Merkmale der A-Welle im Frequenz- und im Zeitbereich wie z.B. der Mittenfrequenz, der 6 dB-Bandbreite, der Anzahl der Peaks im Amplitudenbereich oberhalb eines Schwellwertes, etc. mit genau definierten Prüfparametern, die unbedingt, weil sie die zu messenden Merkmale beeinflussen, eingehalten, bzw. präzise eingestellt werden müssen.

3.2 Merkmalsdefinition

Um diese Merkmale zu definieren und auf ihre Signifikanz zu überprüfen, wurden Ultraschallprüfungen an neun Punkten an je zehn Probeplatten mit 5:5 und 7:3 Mischungen durchgeführt. Die exemplarischen Darstellungen der Frequenz- und Amplitudenanzeigen sind in Tabelle 2 zu sehen.

Tabelle 2*:* Eigenschaften im Frequenz- und Zeitbereich

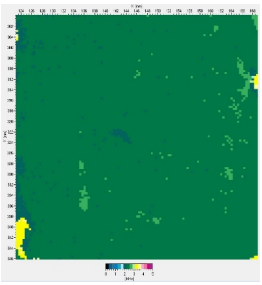
Zeitbereich		**Frequenzbereich**	
5:5	7:3	5:5	7:3
			

Es fällt auf, dass im Frequenzbereich der zweite Peak von der 7:3-Mischung wesentlich größer ist, als der von der 5:5-Mischung. Darauf basierend wurden folgende einfache Merkmale zur Unterscheidung zwischen „Good Bonds“ und „Kissing Bonds“ definiert (Tabelle 3):

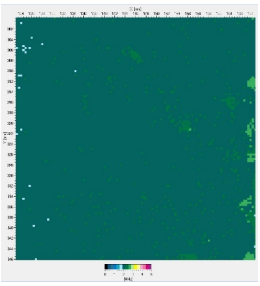
Tabelle 3*:* Definierte Merkmale im Frequenz- und Zeitbereich

Mixture		5:5	7:3
Erster Frequenzpeak	[MHz]	~2,10	~1,95
Zweiter Frequenzpeak	[MHz]	4,5 ~ 5,0	3,7 ~ 4,2
Relative Amplitude des zweiten Peaks	[%]	10 ~ 60	60 ~ 99
Anzahl Amplitudenpeaks des Fügeflächenechos		1	2

Weiterhin wurden F-Scans mit Auswertung der Peakfrequenz von 5:5- und 7:3-Probeplatten durchgeführt, die exemplarisch in Abb. 4. dargestellt sind. Die leicht höhere Peakfrequenz der 5:5-Mischung ist ersichtlich, was gut mit Tabelle 3 korrespondiert.



(a)



(b)

Abb. 4: F-Scans der (a) 5:5 Mischung und (b) der 7:3 Mixture

3.3 Validierung

Um das Prüfung und die gewählten Merkmale zu hinsichtlich ihrer Aussagekraft und Trennschärfe zu validieren, wurden je zehn weitere Probeteile mit 5:5 und 7:3 Klebermischungen angefertigt und anschließend vermischt. Ein visueller Unterschied zwischen den Proben bestand nicht.

Mittels der gewählten Merkmale war es möglich, die 20 Probeteile mit einer 100% Trefferquote in „Good Bondings“ (Gutteile) und „Kissing Bonds“ (Schlechtteile) zu unterscheiden.

4. Zusammenfassung und Fazit

Es ist möglich Kissing Bonds, die durch ein falsches Kleber-Mischungsverhältnis erzeugt wurden, mittels merkmalbasierter Auswertung im Frequenzbereich mit einer hundertprozentigen Trefferquote zu identifizieren. Diese sind in einem C-Scan nicht zu erkennen. Folgende Merkmale wurden hierbei berücksichtigt:

- Erster Frequenzpeak
- Zweiter Frequenzpeak
- Relative Amplitude des zweiten Peaks
- Anzahl der Amplitudenpeaks von Ultraschall-A-Wellen im Zeit- und Echtzeit-FFT

Als Kissing Bonds werden in dieser Untersuchung Verklebungen bezeichnet, die im C-Scan unauffällig sind, aber einen massiven Abfall in der Scherfestigkeit besitzen. Der Nachweis dieses Abfalls erfolgte durch mechanische Scherfestigkeitsprüfungen.

Die vorgestellten Ergebnisse gelten auf Grund der speziellen Natur der Merkmale natürlich quantitativ nur für die verwendeten Materialien, Prüfparameter und Prüfgeräte. Werden Untersuchungen mit abweichenden Materialien oder Parametern durchgeführt, so müssen die quantitativen Merkmale neu bestimmt und ggf. validiert werden. Es liegt auf der Hand, dass bei Ultraschallprüfung im Feld extrem hohe Anforderungen an die Reproduzierbarkeit der Prüfkopfankopplung zu stellen sind.

Referenzen

1. **Light, G. M. und Kwun, H.**, ´Nondestructive Evaluation of Adhesive Bond Quality´, *Report*, Southwest Research Institute, San Antonio, TX, USA(1989)
2. **Guyott, C. C. H., Cawley, P. und Adams, R. D.**, The Non-Destructive Testing of Adhesively Bonded Structure: A Review´, *Journal of Adhesion* **20** (1986) 129-159
3. **Adams, R. D. und Cawley, P.**, ´A Review of Defect Types and Nondestructive Testing Techniques for Composites and Bonded Joints´, *NDT International* **21** 4 (1988) 208 - 222
4. **Brotherhood, C. J., Drinkwater, B. W. und Guild, F. J.**, ´The Effect of Compressive Loading on the Ultrasonic Detectability of Kissing Bonds in Adhesive Joints, *Journal of Nondestructive Evaluation* **21** 3 (2002) 95 – 104
5. **Jeenjitkaew, C. und Guild**, **F.J.**, The Analysis of Kissing Bonds in Adhesive Joints´ *Journal of Adhesion and Adhesives* **75** (2017) 101-107
6. **Alston, J., Croxford, A., Potter, J. und Blanloeuil**, **P.**, ´Nonlinear non-colinear ultrasonic detection and characterization of kissing-bonds´ *NDT&E International* **99** (2018) 105 - 116
7. **Chen, B.Y., Soh, S.K., Lee, H.P., Tay, T.E. und Tan, V.B.C.**, ´A vibro-acoustic

modulation method for detection of delamination and kissing bond in composite´ *Journal of Composite Materials* **50** 22 (2016) 3089 – 3104

8. **Tighe, R.C., Dulieu-Barton, J.M. und Quinn, S.**, ´Identification of kissing defects in adhesive bonds using infrared thermography´ *International Journal of Adhesion and Adhesives* **42** (2013) 60 - 68
9. **Vijaya Kumar, R.L., Bhat, M.R. und Murthy, C.R.L.**, Evaluation of kissing bond in composite adhesive lap joints using digital image correlation´ *International Journal of Adhesion and Adhesives* **64** (2016) 168 – 178
10. **Delrue, S., Tabatabaeipour, M. und Hettler, J.**, ´Applying a nonlinear, pitch-catch, ultrasonic technique for the detection of kissing bonds in friction stir welds´ *Ultrasonics* **68** (2016) 71 – 79
11. **Poveromo, S.L. und Earthman, J.C.**, ´Analysis of "kiss" bonds between composite laminates´ *JOM* **66** 6 (2014) 970 - 978
12. **Yan, D., Drinkwater, B.W. und Neild, S.A.**, ´Measurement of the ultrasonic nonlinearity of kissing bonds in adhesive joints´ *NDT&E International* **42** 5 (2009) 459 – 466
13. **Brotherhood, C.J., Drinkwater, B.W. und Dixon, S.**, ´The detectability of kissing bonds in adhesive joints using ultrasonic techniques´ *Ultrasonics* **41** 7 (2003) 521 – 529
14. **Kundu, T.**, **Maji, A., und Gosh, T.**, ´Detection of kissing bonds by lamb waves´ *Ultrasonics* **35** (1998) 573 - 580
15. **Nagy, P.B.**, ´Ultrasonic-detection of kissing bonds at adhesive interfaces´ *Journal of Adhesion Science and Technology* **5** 8 (1991) 619 – 630
16. **Thomas, G.H. und Rose, J.L.**, ´An ultrasonic evaluation and quality control tool for adhesive bonds´ *Journal of Adhesion* **10** (1980) 293-316
17. **Pavlopoulou, S., Worden, K. und Soutis, C.**, ´Novelty detection and dimension reduction via guided ultrasonic waves: Damage monitoring of scarf repairs in composite laminates´ *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **27** 4 (2016) 549 - 566
18. **Kruse, T.** ´Bonding of CFRP primary aerospace structures: overview on the technology status in the context of the certification boundary conditions addressing needs for development´ *Proceedings "19th International Conference on Composite Materials – ICCM19"* Montreal, Kanada (2013) 5635 – 5643
19. **Adams, R.D. und Drinkwater, B. W.** ´Nondestructive Testing of Adhesively-Bonded Joints´ *NDT&E International* **30** 2 (1997) 93-98