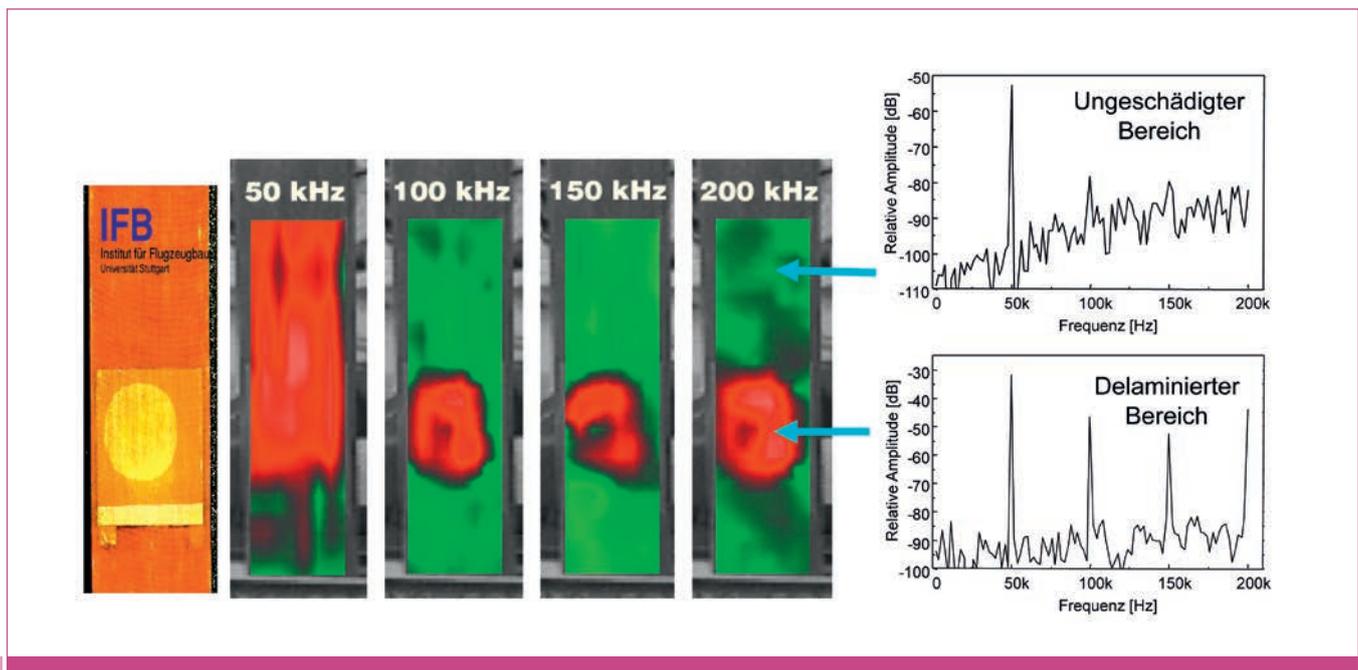


Neue Materialien auf dem Prüfstand

Innovative zerstörungsfreie Prüfung für Luftfahrtanwendungen



Der Traum vom Fliegen – der Wunsch, schnell und sicher von A nach B zu gelangen. Aber warum endete der erste Menschenflug, von dem die Sage berichtet, mit einem tragischen Flugunfall? Solche Probleme scheinen Engel, die ja viel fliegen, nicht zu kennen. Flugunfälle haben also mit Menschen zu tun: Fehler des Piloten oder (ebenfalls vom Menschen verursachte) technische Fehler. Bei Dädalus und Ikarus lag beides vor, denn der eine hatte als Konstrukteur einen temperaturempfindlichen Werkstoff gewählt und dabei nicht einkalkuliert, dass der andere, Sohn und Pilot zugleich, trotz Warnung den Betriebsbereich dieses Werkstoffs verlassen konnte. So kam es zu Festigkeitsverlust und Absturz. Also schon beim sagenhaften ersten Flug der Luftfahrt ein Problem mit Werkstoffauswahl und Betriebssicherheit.

1. Einleitung

Statt des ersten nichtmetallischen Luftfahrtwerkstoffs Wachs verwenden wir für unsere heutigen Fluggeräte andere moderne nichtmetallische Werkstoffe mit überlege-

nen mechanischen Eigenschaften, die aber derzeit nicht voll ausgeschöpft werden können, weil wir von den Werkstofffehlern und ihren Auswirkungen noch nicht genug wissen. Werkstoffunsicherheit macht Flugzeuge also schwerer und im

Betrieb weniger rentabel. Umgekehrt ermöglicht eine bessere Kenntnis von Fehlern und ihren Auswirkungen Einsparungen von Gewicht und Treibstoffverbrauch, um Ressourcen effizienter einzusetzen und den Ausstoß von Schadstoffen reduzieren zu können. Durch die höhere Ausnutzung des Werkstoffpotentials wird eine intensivere Nutzung von Luftfahrzeugen ermöglicht: Mit jedem Kilogramm Massereduzierung können pro Jahr einige hundert Euro Treibstoffkosten eingespart werden.

Die konsequente Umsetzung des Leichtbauprinzips ist die Motivation für aufwändige Prüfungen in der Luftfahrt: Alles, was fliegen soll, muß leicht und betriebssicher sein, es muss in Produktion und Wartung geprüft werden, und zwar so, dass dadurch die Leistungsfähigkeit des Prüfobjektes nicht beeinträchtigt wird. Diese Aufgabe hat die „Zerstörungsfreie Prüfung“ (ZFP), die dafür sorgen soll, dass der Traum vom Fliegen nicht abrupt endet. Zerstörungsfreie Prüfverfahren sind im medizinischen Erfahrungsbereich bekannt und beliebt. Jahrzehntlang gehörten Ultraschall- und Röntgenverfahren zum Grundrepertoire nicht nur von Internisten, sondern auch von zerstörungsfreien Prüfern. Das genügte im technischen Bereich jedenfalls für Metalle mit ihrer hohen Ordnungszahl und schwachen Ultraschalldämpfung.

Zur Qualitätssicherung moderner faserverstärkter Werkstoffe („GFK“= glasfaserverstärkter Kunststoff, „CFK“= kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff) mit ihren vielen Grenzflächen reichen diese an Metallen etablierten Verfahren nicht mehr aus. Die Prüfer mussten also umdenken, ebenso wie die Konstrukteure: Wer ein metallisches Bauteil naiv durch eines aus Faserkunststoffverbundwerkstoff (FKV) mit gleicher Geometrie ersetzt, macht es nicht optimal, weil er das mit der Faserrichtung verbundene Werkstoffpotential nicht ausschöpft. Aber leider haben die neuen Werkstoffe nicht nur bessere Eigenschaften als Metalle, sondern auch andere Fehler- und Versagensmöglichkeiten, z.B. Delaminationen, Porosität, Ondulationen, Impactschäden. Letztere sind bei Metallwerkstoffen kein Problem: Ein Blech zeigt einen erlittenen Schlagschaden mit einer Delle an, das ist eine Folge aus dem Spannungs-Dehnungsdiagramm und seinem plastischen Bereich. Da letzterer bei einer FKV-Platte fehlt, federt diese zurück und

SUMMARY

To make the dream of flight (enrooted deeply in mankind since more than a millennium) come true, aerospace vehicles require for their operation high safety standards and at the same time low structural weight to maximize the payload and/or to reduce fuel consumption and environmental load. These different boundary conditions result in strict requirements for reliable production and maintenance inspection to make sure that components with safety-relevant defects are identified and replaced early enough to prevent catastrophic failure while unnecessary replacement of intact components is avoided. Of course it is assumed that the process of inspection itself does not affect the performance or the reliability of the investigated component. Such inspection methods are called "non-destructive". For non-destructive inspection of metals there are well established methods based on x-rays, pulse-echo ultrasound, and eddy current. However, for modern high-strength non-metallic materials like carbon fibre reinforced polymers (CFRP) being used for light weight structures (see Themenheft Nr. 3 devoted to such materials), these traditional methods are not the best since material properties and the kind of defects differ substantially from metals. Hence there is a need of innovative methods for material-oriented non-destructive testing (NDT) responding to the specific properties of such materials and structures made out of them. This chapter deals with innovative NDT: It gives some ideas about how they work, about their drawbacks and advantages and the way how typical kinds of defects appear when being examined with different methods. It is shown that some methods allow for rapid and remote inspection of large areas. It should be mentioned that there are limitations for the applicability of some methods. Hence it would be a major step forward if the design engineers were familiar with these innovative methods in order to make sure that their well-designed light-weight structures can be tested non-destructively both during production and maintenance inspection.

sieht an der Oberfläche intakt aus, aber innen können unerkannt schlimme Schäden entstanden sein.

Schäden in FKV sind vielfältiger und schwerer erkennbar als in Metall. Deswegen sind die Möglichkeiten der neuen faserverstärkten Werkstoffe nicht nur Chancen für den Konstrukteur, sondern auch große Herausforderungen an die Prüfer, zumal diese Werkstoffe immer häufiger für sicherheitsrelevante und somit teure Bauteile (Luft- und Raumfahrt, Medizin, Fahrzeugwesen) eingesetzt werden.

Die breit gefächerten Stuttgarter Aktivitäten im Bereich der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik vor allem an FKV führten dazu, dass mit diesen modernen Werkstoffen zugleich deren innovative Prüfmethodik erforscht und entwickelt wurde. Das war rückschauend ein glücklicher Umstand, der auch durch den Sonderforschungsbereich SFB 381 „Charakterisierung des Schädigungsverlaufs von Faserverbundwerkstoffen mittels zerstörungsfreier Prüfung“ begünstigt wurde, in dessen Rahmen wir fakultätsübergreifend Machbarkeiten und Grenzen sowohl der Werkstoffe als auch der Prüfverfahren ausloten konnten [1]. Dabei zeigte sich, dass das Verständnis

für das Versagensverhalten moderner Werkstoffe die Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz innovativer Prüfverfahren ist. Die Schadensfrüherkennung ermöglicht rechtzeitige (d.h. „zustandsorientierte“) Instandhaltungsmaßnahmen. Nur so werden Bauteile besser und zuverlässiger.

Hier besteht ein Optimierungsproblem: Der Konstrukteur ist beim Entwurf eines Bauteils mit den Möglichkeiten und Einschränkungen moderner ZFP nicht unbedingt so vertraut, dass er die spätere Prüfbarkeit hinreichend berücksichtigt. Diese Situation sollte sich möglichst bald ändern, denn später bei Produktion und Wartung wird Wert darauf gelegt, dass Bauteilfehler auch von Nichtspezialisten, also am besten automatisch, schnell und sicher erkannt und sogar hinsichtlich ihrer Relevanz für die Lebensdauer und Reparaturfähigkeit beurteilt werden. Naheliegend ist der Traum von schnellen bildgebenden Verfahren, die nur Defekte anzeigen und am liebsten auch deren Relevanz bewerten. Von diesem Ziel sind wir noch weit entfernt. Zu klären ist also: Wo stehen wir derzeit? Was ist schon jetzt machbar und was vielleicht in absehbarer Zeit? Der Blick auf solche Entwicklungen ist wichtig, denn bei modernen Werkstoffen ist der Weg vom erfolgreichen Labortest in die Praxis langwierig. Die Absicherung in alle Richtungen ist notwendig und sinnvoll, damit fehlerhafte Bauteile früh genug ersetzt und betriebsfähige nicht unnötig ausgetauscht werden [2].

2. Warum ist ZFP an FKV anders als an Metallen?

Die an Metallen etablierten allseits bekannten ZFP-Verfahren Röntgen, Ultraschall und Wirbelstrom sind an FKV nicht so erfolgreich, weil die Ordnungszahlen kleiner, die Ultraschalldämpfung höher und die elektrische Leitfähigkeit geringer sind. Außerdem geht es bei FKV häufiger um die Bewertung von Grenzflächen und Anisotropie. An Grenzflächen ändern sich die physikalischen Eigenschaften abrupt, so kommt es prinzipiell zu Reflexionen von Wellen aller Art. Dabei geht es auch um die Qualität der Grenzfläche, also die Frage, ob die Grenzfläche kraftschlüssig ist. Von praktischem Interesse sind ZFP-Methoden, die schnell und berührungslos großflächig abtastern und das Messergebnis bildhaft darstellen. Das ist für Luftfahrzeu-

ge mit ihren großen Strukturen besonders wichtig. Punktuell mit der Hand aufgesetzte Messvorrichtungen erfordern bei flächiger Inspektion hohen Zeitaufwand, und ein Flugzeug verdient nur dann Geld, wenn es fliegt.

Darum hat sich das Team „Zerstörungsfreie Prüfung“ des Instituts für Kunststofftechnik (IKT) schon früh mit der Entwicklung von ZFP-Methoden beschäftigt, die den Erfordernissen moderner Werkstoffe und Bauteile besser gerecht werden als die, die wir aus dem Metallbereich kennen. Die folgenden Ergebnisse sollen beispielhaft zeigen, was innovative ZFP Prüftechnik über FKV-Bauteile und ihre typischen Schäden verraten kann. Gemeinsam ist allen ZFP-Verfahren, dass sie auf der Wechselwirkung unterschiedlicher Arten von Wellen mit dem Werkstoff und seinen Defekten beruhen. Jedes Verfahren nutzt also spezifische physikalische Eigenschaften aus und zeigt die Strukturen „im Licht einer bestimmten Wechselwirkung“. Die Entscheidung für ein bestimmtes ZFP-Verfahren hängt also davon ab, welche Aspekte untersucht werden sollen. Im Folgenden werden nicht die klassischen ZFP-Methoden und ihre Anwendung betrachtet. Im Vordergrund stehen luftfahrtbezogene Beispiele. Die innovativen ZFP-Methoden werden dabei kurz und möglichst anschaulich dargelegt.

3. Berührungslose Inspektion von Luftfahrtstrukturen

Die funktionsrelevante Struktur eines Flugzeugrumpfes besteht im Wesentlichen aus Spanten, Stringern und Außenhaut, welche zunehmend aus FKV hergestellt werden. Die Lockin-Thermografie wurde im Rahmen eines BMBF-Projektes am IKT gemeinsam mit Industriepartnern zu einem kommerziellen Gerät entwickelt. Damit lassen sich Strukturen aus FKV schnell und berührungslos inspizieren.

Hierbei wird der Prüfbereich mit leistungsstarken Lampen um wenige Grad Celsius erwärmt. Werden die Lampen periodisch betrieben, also z.B. im Rhythmus von zehn Sekunden ein- und ausgeschaltet, dann entsteht auf der Oberfläche des Prüfobjektes eine Temperaturschwingung, die sich als stark gedämpfte „thermische Welle“ ins Innere fortsetzt und dort an Grenzflächen zur Bauteiloberfläche reflektiert wird, wo sie sich wie ein „thermisches

Echo“ der ursprünglichen Temperaturschwingung überlagert. Eine Thermografiekamera erfasst ständig das resultierende Temperaturfeld an der Oberfläche. Der so erhaltene Bildstapel aus bis zu einigen Tausend Bildern wird mittels einer diskreten Fouriertransformation analysiert und die Information über das „Muster der Temperaturschwingung“ zu nur noch zwei Messbildern (lokale Amplitude und Phase) des Prüfobjektes komprimiert. Das Amplitudenbild zeigt die Intensität der Temperaturschwingung in jedem Pixel, das Phasenbild die Verzögerung zum periodischen Betrieb der Lampen. Es hat sich schon früh gezeigt, dass letzteres mehr Tiefenreichweite hat als die Amplitude und dass es unanfälliger ist gegen Oberflächenbeschaffenheit, Beleuchtungs- und Farbunterschiede [3].

Diese „Effektmodulationsthermographie mit Phasenwinkelbild“ [4-7] wird auch als „optisch angeregte Lockin-Thermografie (OLT)“ bezeichnet in Anlehnung an den Lockin-Verstärker, der ebenfalls aus einem verrauschten Wechselspannungssignal Amplitude und Phasenlage eines darin verborgenen viel kleineren effektmodulierten Nutzsignals extrahiert.

OLT eignet sich generell zum Abbilden verborgener Strukturen mit einer über die Modulationsfrequenz einstellbaren Tiefenreichweite, die in CFK aber bestenfalls knapp unter einem Zentimeter liegt (Phasenbild). Die Bilder erfassen Flächen von etwa einem Quadratmeter Größe in weniger als einer Minute, wobei die Messdauer von der Modulationsfrequenz abhängt. Das folgende Messbeispiel entstand am CFK-Heckkonus einer Dornier Do 328 (01a). Werkszeichnung (01b) und gemessenes Phasenwinkelbild (01c) sind direkt gegenübergestellt: Stringer und Spanten sind klar zu erkennen.

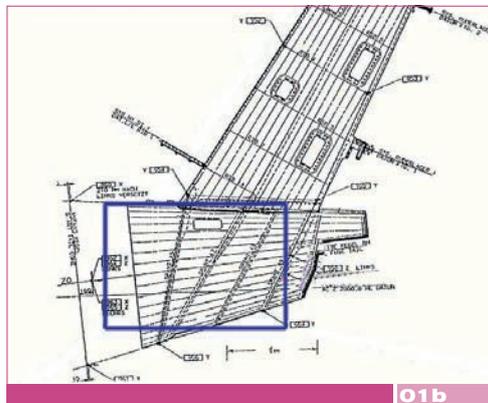
Da die Bilder durch Reflexion thermischer Wellen an Grenzflächen entstehen, sprechen sie nur auf deren thermische und nicht auf ihre mechanischen Eigenschaften an. Die Frage, ob die Grenzfläche Zug- oder Schubspannung übertragen kann, ist aber praxisrelevant, wenn man verborgene Fügeflächen nicht nur abbilden, sondern auch hinsichtlich ihrer Lastübertragung prüfen will.

Nicht kraftschlüssige Verbindungen können sich relativ zur Grenzfläche bewegen. Wir haben deswegen intensiv daran gearbeitet, die mechanische Auswirkung defekter Fü-



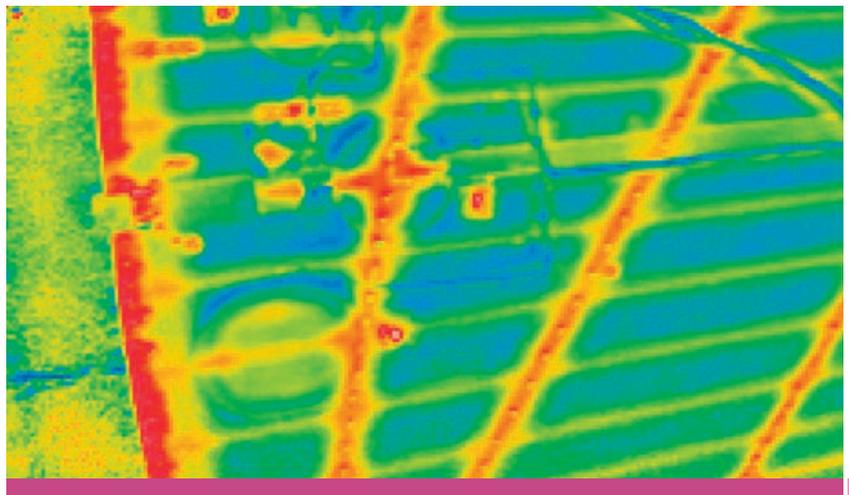
01a

Abbildung rückseitiger Spanten und Stringer im CFK-Heckkonus der Do 328.



01b

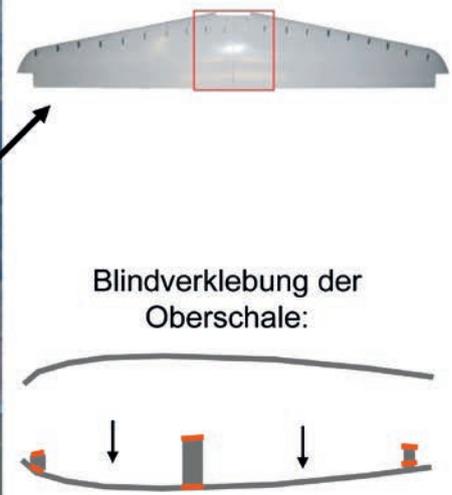
Werkszeichnung des Heckkonus.



01c

Phasenbild des in Abb. 1b blau markierten Bereichs des CFK-Heckkonus [8].

geverbindungen zu erfassen, indem wir nicht die thermische Seite einer thermischen Welle erfassen, sondern die mit ihr verbundene modulierte thermische Ausdehnung. Letztere ist mit Interferometrie messbar: Wie bei OLT wird das Prüfobjekt zwar durch modulierte Beleuchtung periodisch erwärmt, nun wird jedoch ständig die in Moirè-Streifen der Speckle-Muster codierte lokale Höhenänderung des Bau-



02a

Elektroflugzeug e-Genius des Instituts für Flugzeugbau (IFB) [10].

teils verfolgt und wiederum als Bildstapel abgelegt. Anschließend wird pixelweise die zeitliche Veränderung der Höhe fouriertransformiert und aus dem ganzen Bildstapel wieder Amplituden- und Phasenbild der thermisch induzierten mechanischen Verformung extrahiert. Die Bildstapelmathematik ist also ähnlich wie bei OLT, aber wegen der vorgeschalteten Interferenzstreifenbewertung erheblich aufwändiger. Diese „optisch angeregte Lockin-Interferometrie (OLI)“ [7,9] ist wegen der schmalbandigen phasempfindlichen Signalfilterung, die die Lockin-Technik darstellt, um eine Größenordnung rauschärmer als konventionelle Interferometrie. Sie erwies sich erwartungsgemäß als besonders robust, die Tiefenreichweite ist wegen der in der Signalentstehung invol-

vierten Tiefenintegrale um etwa 50 Prozent größer als bei OLT, zudem ist der apparative Aufwand geringer: Die optische Detektorarray hat viel mehr Pixel und ist um eine Größenordnung billiger als eine Thermografiekamera. Dieses ZFP-Verfahren, das Phase und Amplitude der lokalen thermisch bedingten Ausdehnungsmodulation und somit neben dem thermischen auch das lokale mechanische Verhalten darstellt, hat sich bereits bei der Erkennung defekter Klebeverbindungen im Bereich Holm/Rippen/Schale bewährt.

Besonders intensiv haben wir mit Lockin-Shearografie (OLF) diese Kraftschlüssigkeit an dem zweiseitigen Elektroflugzeug e-Genius (02a) untersucht, das am Institut für Flugzeugbau (IFB) der Universität Stuttgart konstruiert und gebaut wurde [10].



02b

Blindklebung des Höhenleitwerks.



02c

ZFP mit OLI an Höhenflossedes E-Genius.

Nach Befunden an anderen Flugzeugen war es uns wichtig, vor der Flugerprobung und den Wettbewerbsflügen die intakte Lastübertragung von Leitwerks- und Tragflächenholm an die jeweiligen Bepunktungen abzusichern, an denen Blindklebung (02b) erfolgt.

Die strukturelle Ankopplung der Höhenflosensoberschale wurde in vielen Einzelaufnahmen berührungslos mit OLT und OLI (02c) untersucht. Je nach Verfahren und Modulationsfrequenz sieht man unterschiedlich tief hinein. Direkte Vergleiche haben ergeben, dass OLI die thermischen Strukturen, z.B. überlappende FKV-Bereiche, fast ignoriert und primär auf die Füllfläche Holm/Schale anspricht, wobei die gleichmäßige Breite und Homogenität der Verbindung gut zu erkennen sind.

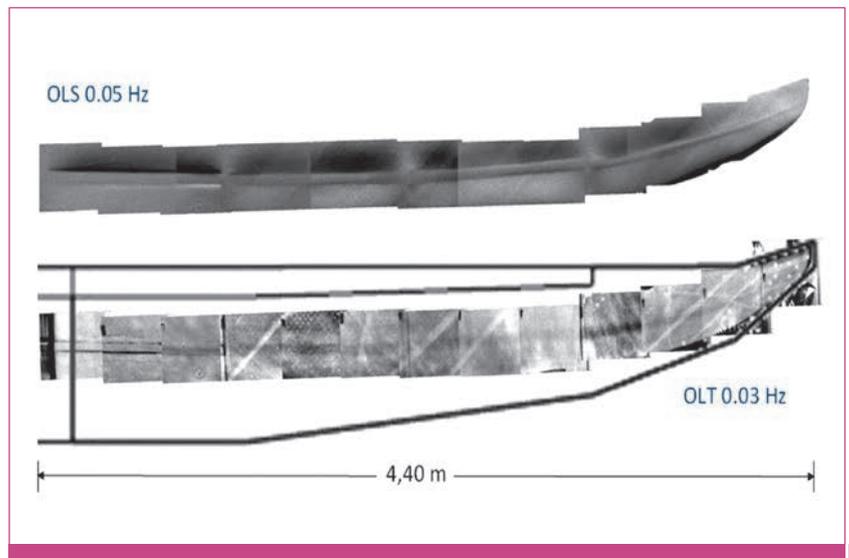
Das gilt auch für die Messergebnisse am Tragflügel, die in 03 für OLI und OLT jeweils mosaikartig zusammengestellt und zur besseren Übersicht in die Zeichnung der Draufsicht eingefügt wurden.

Auch hier zeigt OLT besonders die thermischen Strukturen und OLI den entlang der ganzen Tragfläche gleichmäßigen Holmverlauf. Zu beachten ist jedoch, dass solche ZFP-Untersuchungen keinerlei Aussagen über die Festigkeit der Klebung erlauben.

4. Selektive Abbildung defekter Bereiche

Da OLT und OLI auf ganzflächiger Anregung mit Licht beruhen, bilden sie zugleich intakte und defekte Bauteilbereiche ab. Erst die Interpretation der Bilder durch einen sachkundigen Auswerter lässt auf den Defekt schließen. Zur Erhöhung der Defekterkennungswahrscheinlichkeit („probability of detection“, POD) sind ZFP-Verfahren wünschenswert, die intakte Bereiche ignorieren und selektiv verborgene Defekte darstellen.

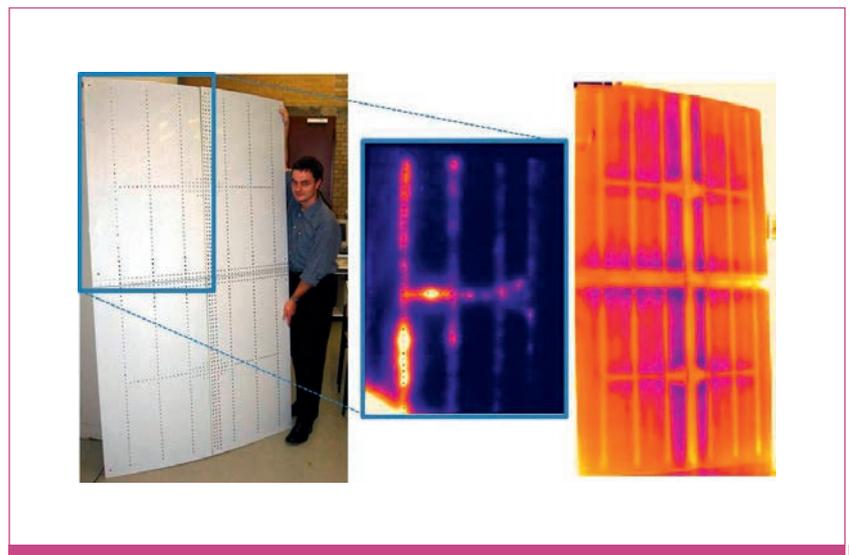
Eine mechanische Belastung, z.B. Ultraschall mit genügend hoher (und trotzdem zerstörungsfreier) Leistung, erzeugt im Bereich loser und einander noch berührender Grenzflächen Hysterese- oder Reibungseffekte, die zu Erwärmung führen [11]. Die elastischen Wellen werden an den freien Oberflächen des Prüfobjektes reflektiert und laufen so lange hin und her, bis ihre Energie in einer passend orientierten reibenden Grenzfläche in Erwärmung umgesetzt wird. „Abgefragt“ wird daher wie-



03

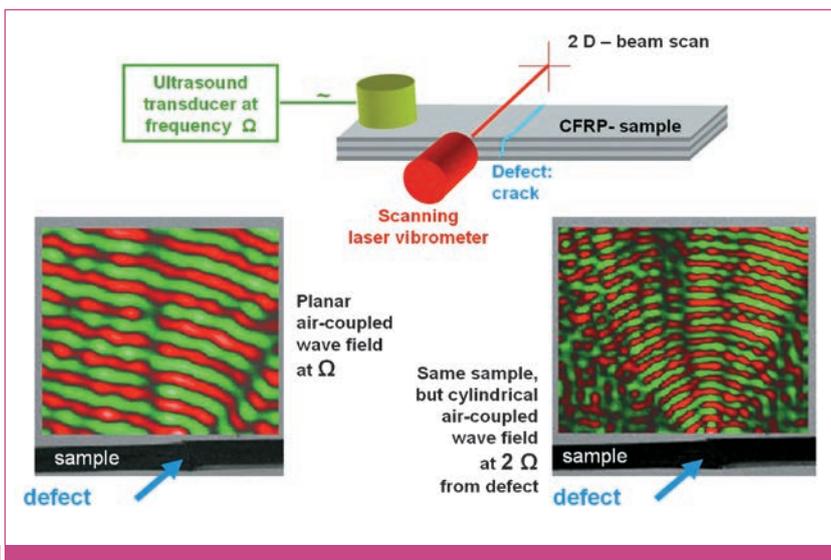
ZFP am Holmbereich der äußeren linken Tragfläche des e-Genius mit OLT und OLS, deren Ergebnisse die gleichmäßige Klebequalität belegen.

der der thermische Effekt, und zwar mit der Thermografiekamera: Wird die Ultraschallamplitude tieffrequent moduliert (z.B. im Rhythmus von zehn Sekunden ein- und ausgeschaltet), so sendet eine verborgene reibende Grenzfläche eine thermische Welle dieser Frequenz aus, die schließlich die Oberfläche erreicht und dort als lokale Temperaturmodulation wieder über Frequenzanalyse bildhaft dargestellt wird. Von Vorteil ist, dass mit dieser (ebenfalls am IKT entwickelten) Ultraschall-Lockin-Thermografie („ULT“) [7,12] von allen Grenzflächen selektiv nur die mit mangelnder Kraftschlüssigkeit („Schlupf“) abgebildet werden, und zwar der Übergangsbereich von fester zu klaffender Fügeverbindung. So lassen sich z.B. im Nietefeld des Rumpfpannels eines Air-



04

Inspektion der Nietereihen eines metallischen Rumpfpannels (Airbus A 330) mit ULT und OLT.



05

Interferometrischer Nachweis der selektiven Oberwellenabstrahlung aus einer Bruchstelle in CFK-Laminat in die umgebende Luft [14]

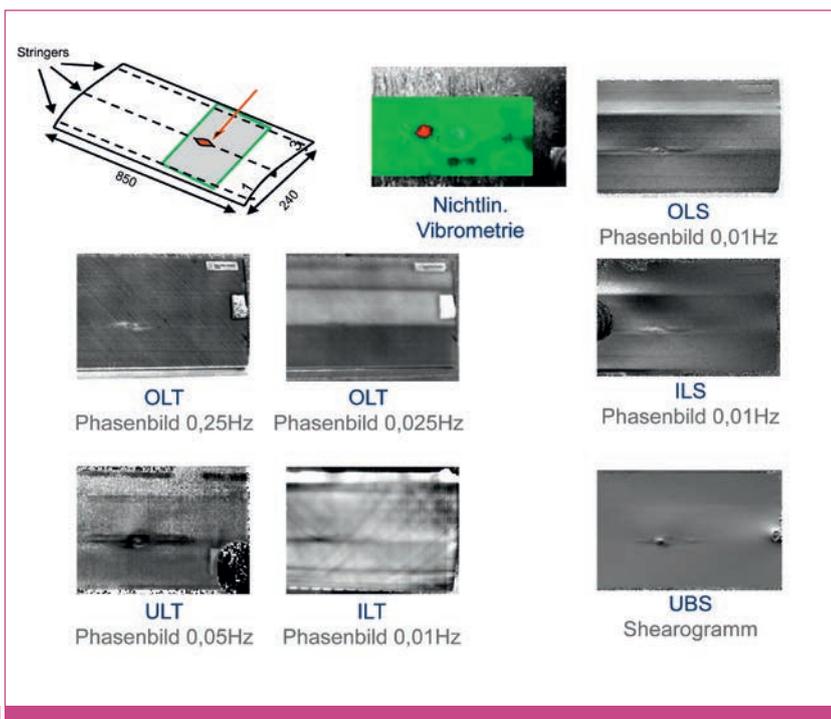
bus A 330 Nieten mit geringerem Anpressdruck mittels ULT identifizieren, obwohl sie mit OLT nicht auffallen (04).

Diese defektselektive Methode erfordert die Anbringung einer Ultraschallsonotrode. Die Größe des Umfeldes, in dem Ultraschall zur Defekterwärmung ausreicht, hängt von der einbringbaren Leistung ab. Es hat sich gezeigt, dass bei üblichen CFK-Strukturen eine Fläche von etwa 0,5 Quadratmetern um die Sonotrode herum in einer Minute untersuchbar ist. Auch die

Interferometrie lässt sich mit Ultraschall betreiben („Ultraschall-Burst-Shearografie (UBS)“), sie zeigt dann die lokale thermische Aufbeulung über dem Defekt, weil dieser sich stärker erwärmt als seine intakte Umgebung.

Eine andere Defekteigenschaft ermöglicht eine weitere ultraschallinduzierte defektselektive Abbildung: Eine noch anliegende defekte Fugestelle oder ein geschlossener Riss kann sich unter Druck nicht noch mehr schließen, aber unter Zug öffnen. Im Ultraschallfeld wird deswegen überwiegend die Druck- und weniger die Zugphase übertragen. Das asymmetrische bzw. nichtlineare Verhalten bei Bewegung senkrecht zur Grenzfläche entspricht einer „mechanischen Diode“. Oder anschaulich: Ein Riss kann klappern, eine feste Verbindung aber nicht. In der Elektrotechnik wird dieser Effekt durch den „Klirrfaktor“ beschrieben, der die Verzerrung eines sinusförmigen Signals und somit den Oberschwingungsanteil aufgrund von Nichtlinearität der Übertragungskette beschreibt. In Analogie dazu eignet sich ein Laservibrometer dazu, mit hoher Ansprechempfindlichkeit die nichtlineare Bewegung einer nicht-kraftschlüssigen Verbindung aufgrund der lokal erzeugten Oberschwingungen bildhaft darzustellen, also defektselektiv als „Klapperbild“ [13].

Diese „Nichtlineare Vibrometrie“ erfordert somit ebenfalls die Ankopplung einer Ultraschallsonotrode, aber statt der Thermografiekamera wird nun ein (teureres) scannendes Laservibrometer eingesetzt, dessen Ausgangssignal fouriertransformiert wird. Hier erfolgt die Auswertung also nicht aus einem Bildstapel, sondern während des berührungslosen Laserscans jeweils an einem Pixel und somit insgesamt langsamer. Diese „Scannende nichtlineare Vibrometrie“ hat den Vorteil, dass sie selektiv auf die nichtlineare lokale mechanische Auslenkung im Bereich eines Haftungsverlustes anspricht und allein diese abbildet. Mit Hilfe des scannenden Laservibrometers lässt sich diese Eigenschaft geschlossener Risse sichtbar machen. Der in die Luft abgestrahlte Schall erzeugt durch Druckänderungen minimale Änderungen des optischen Brechungsindex der Luft. Diese registriert das Laservibrometer und macht so, wie in (05) dargestellt, das abgestrahlte Schallfeld für das anregende Signal und die Oberwelle separat sichtbar.



06

CFK Landeklappensegment eines Airbus A 330. Der mittlere der drei Stringer ist an einer Stelle abgelöst (Pfeil in Skizze)

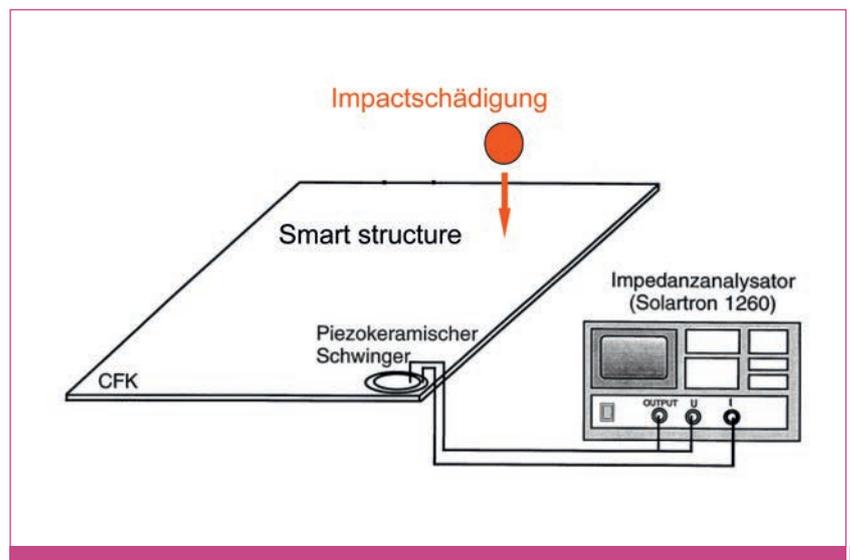
5. Ergebnisvergleich von ZFP-Verfahren

Besonders spannend ist der Vergleich der bisher beschriebenen ZFP-Verfahren am folgenden Beispiel einer Stringerablösung am Landeklappensegment eines Airbus A 320 (06). Die CFK-Schale hat nicht überall dieselbe Dicke, darum zeigt die OLT-Messung bei 0,025 Hz, die bis zur Bauteilrückseite reicht, vor allem den Dickenkontrast und kaum die Stringerablösung, während die höherfrequente Lockin-Thermografie mit optischer oder induktiver Anregung (OLT bei 0,25 Hz und ILT) den Defekt und zugleich die Orientierung der CFK-Rovings darstellen. Letztere wird nur dann unterdrückt, wenn mechanisch angeregt oder die mechanische Auslenkung gemessen wird. Während ultraschallangeregte Lockin-Thermografie (ULT) und optisch oder induktiv angeregte Interferometrie (OLI und ILI) die Stringerablösung zusammen mit der intakten Stringerstruktur zeigen, erscheinen die Defekte mit nicht-linearer Vibrometrie und mit Ultraschall-Burst-Shearografie (UBS) praktisch hintergrundfrei, eine ideale Voraussetzung für automatisierte Inspektion bei Fertigung und Wartung.

6. Adaptive Strukturen

Wer bei Flugreisen hinter den Tragflächen seines Fliegers sitzt, kann die Bewegung von Landeklappen und Querrudern verfolgen. Diese sind mechanisch beweglich gelagert. Erstrebenswert wäre es, statt Gestängen, Anlenkhebeln, Führungen und Gelenken „adaptive Strukturen“ („smart structures“) zu verwenden, d.h. geeignet eingebaute piezokeramische Verformungsgeber („Aktoren“), die das Tragflächenprofil schneller und ohne Störung der Luftströmung verändern. Die Wunschvorstellung ist also eine Verstellbarkeit des Profils wie beim Vogelflügel. Mit eingebetteter Piezokeramik lassen sich aber derzeit noch keine großen Verstellwege erzielen, hier besteht noch Forschungsbedarf.

Im SFB 409 „Adaptive Strukturen im Flugzeugbau und Leichtbau“ haben wir eingebettete Aktoren nicht nur zum Verstellen benutzt, sondern wir haben sie auch als interne hochfrequente Schwingungsgeber zweckentfremdet und damit die oben erwähnten extern angekoppelten Ultraschallgeber ersetzt [15]. Ein Anwendungs-

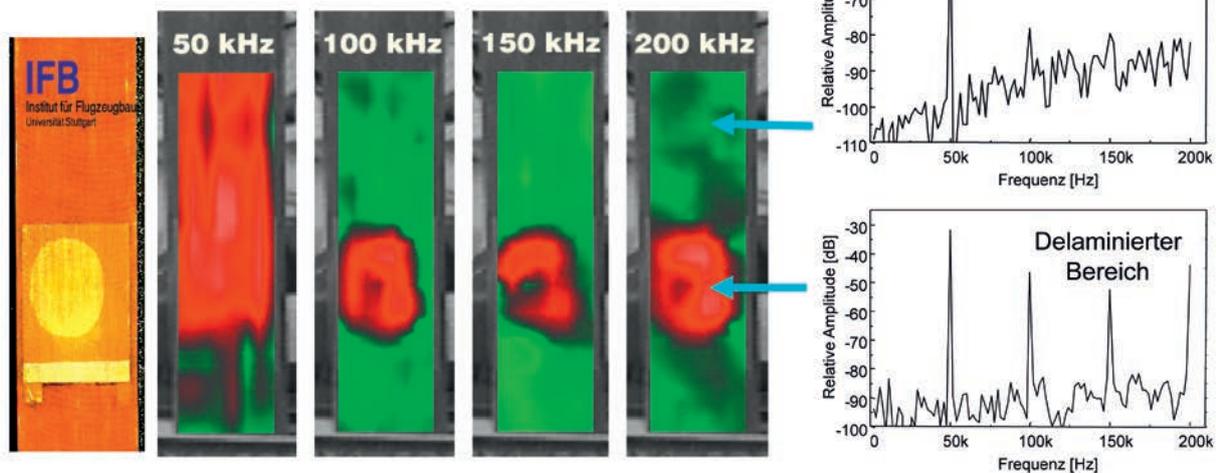


beispiel ist die Messung des Resonanzspektrums der Aktorik mit einem elektronischen Impedanzanalysator, also einem einfachen Standardmessgerät (07). Die Aktorik kann auf diese Weise bei der Bauteilfertigung ihre eigene Ankopplungsveränderung an das CFK-Laminat während des Aushärtvorgangs überwachen. Hierbei findet nämlich eine Frequenzverschiebung statt, deren Geschwindigkeit von der Aushärtetemperatur abhängt. Die interne Vibrometrie der adaptiven Struktur zeigt durch das Einbiegen in die Asymptote, wie schnell die Aushärtung abläuft und wann sie abgeschlossen ist.

Führt man diese eingebettete Vibrometrie an einer adaptiven CFK-Struktur wie in (07) durch, die zunehmend durch Impact geschädigt wurde, so scheinen sich die Eigenfrequenzen dabei nicht zu ändern. Die Anwendung von Korrelationsmathematik setzt jedoch diese kleinen Veränderungen in einen Kennwert („Korrelationskoeffizient“) um, der die Ähnlichkeit mit dem ursprünglichen Spektrum beschreibt. Hierbei sind Impactschäden mit einer Energie ab zwei Joule zuverlässig nachweisbar [15]. Von praktischem Interesse ist auch, dass das Spektrum nach der ersten Impactschädigung als Referenz für die zweite Schädigungsreihe verwendbar war und dass dabei mit hoher Reproduzierbarkeit derselbe Verlauf des Korrelationskoeffizienten entsteht. Das ergibt eine einfache Reset-Möglichkeit für Strukturüberwachungsaufgaben.

Vibrometrie zeigt nur integrale Veränderungen gegenüber einem Referenzzustand an. Sie macht damit als einfach durchzufüh-

Adaptive Struktur als integrierter Schwingungsgeber: Impedanzspektroskopie der Aktorik für Vibrometriemessungen.



08

Defektselektive Erkennung einer Delamination in adaptiver GFK-Struktur mittels lokaler Obertonanalyse. Anregung des Aktors mit $20 V_{ss}$ bei 50 kHz. Die adaptive Struktur wurde vom IFB hergestellt.

render Screening-Test (Gut-Schlecht-Sortierung) im Rahmen von regelmäßigen Inspektionen das aufwändige Abrastern intakter Bauteile überflüssig. Dieses Prinzip der Erkennung mechanischer Veränderungen mittels eingebauter Schwingungsgeber wird mittlerweile an verschiedenen Stellen als „Structural health monitoring“ weitergehend untersucht.

Die lineare Vibrometrie liefert also primär keine Information über den Ort des Defektes. Die eingebetteten Piezokeramikelemente eignen sich aber auch als Schallquellen für defektselektive Ultraschall-Lockin-Thermografie sowie für nichtlineare Vibrometrie, wobei das lokale Oberwellenspektrum Fügefehler beim Einbetten der Piezokeramik zuverlässig charakterisiert. In der folgenden (08) wurde der Aktor mit 50 kHz und geringer Spannungsamplitude angeregt. Bei dieser nichtresonanten Frequenz schwingt die ganze adaptive Struktur, und im intakten Bereich zeigt das Spektrum nur diese eine Frequenz. Auf dem abgelösten Bereich findet das Vibrometer hingegen auch die Obertöne. Die Bilder bei 100, 150 und 200 kHz, die mit den Amplituden der Obertöne rot eingefärbt wurden, stellen deswegen selektiv den abgelösten Bereich der Aktorik dar. Die nichtlineare Vibrometrie eignet sich somit zur zuverlässigen und gut automatisierbaren Überprüfung der Ankopplung der Aktorik an die Struktur. Das gilt für die Fertigung und auch später für Wartungsinspektionen.

7. Delaminationen und Impactschäden

Die Fasern sind optimal eingesetzt, wenn sie geradlinig entlang der Belastungsrichtung verlaufen. Wenn diese nicht eindeutig ist, koppelt man unterschiedliche Faserrichtungen miteinander. Hierzu werden unidirektionale Lagen unterschiedlicher Orientierung zu einem Laminat verarbeitet. Die einzelnen Lagen des Laminats reagieren auf mechanische oder thermische Last unterschiedlich, dabei kann es zu Grenzflächenbeanspruchung mit potentiell Versagen kommen, z.B. in Form einer „Delamination“. Dann kann zwar noch lokale Formschlüssigkeit vorliegen, aber keine Kraftschlüssigkeit. Die Erkennung eines solchen versteckten Festigkeitsverlustes ist wie bei den oben gezeigten Fügeverbindungen wichtig für den sicheren Betrieb von Luftfahrzeugen.

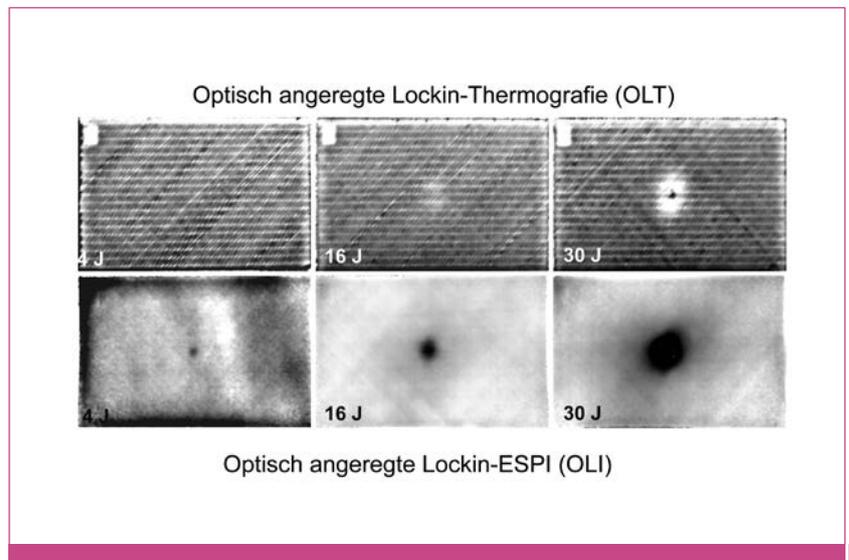
Eine besondere Schädigungsart ist der „Impact“, ein Schlagschaden aufgrund einer lokalen kurzzeitigen Strukturbelastung. Eine Metallstruktur bekommt in einem solchen Fall meistens eine sichtbare Beule. Wenn keine Beule entstanden ist, besteht kein Grund zur Sorge. Anders ist es bei Laminaten: In einem zylindrischen Bereich unterhalb des Einschlags kommt es zu unkritischer Druckbelastung, aber wegen der schichtweise anisotropen mechanischen Eigenschaften des Laminats kann es in einem näherungsweise kegelförmigen Bereich um diesen Zylinder herum zu

Grenzflächenversagen kommen, das je nach Impactenergie sogar zur Aufspaltung der einschlagabgewandten Laminatrückseite führen kann. An der Einschlagstelle selbst ist hingegen typischerweise nur eine wenige Mikrometer tiefe kleine glänzende Vertiefung zu sehen, die optisch unauffällig und entsprechend mühsam zu finden ist. Auf der abgewandten Seite wäre die Absplitterung nicht zu übersehen, aber dazu müsste das Flugzeuginnere freigelegt werden, und diesen immensen Zeitaufwand versucht man zu vermeiden. Darum besteht an der zuverlässigen Impacterkennung an der Einschlagseite ein großes Interesse. In (09a) sind mit OLT und OLI berührungslos erhaltene Bilder von Impactschäden zu erkennen, aufgenommen auf der Impactseite. Mit OLT zeigt sich im Zentrum des 30 Joule Schadens der kompressionsgeschädigte Bereich und um diesen herum der konusartige Delaminationsbereich. Mit OLI wird hingegen nur die modulierte Aufbeulung abgebildet. Der Impact erscheint daher als Fleck und nicht als Ring, dafür aber ohne die von den Kohlenstofffasern verursachte störende thermische Struktur, die bei OLT den vier Joule Impactschaden verdeckt. Deswegen ist der Zusammenhang zwischen Schadensfläche und Impactenergie mit OLI klarer als mit OLT (09b). Die Schadensfläche ist mit der Restfestigkeit des Laminats unter Druckbelastung korrelierbar [15]. Nach entsprechender Kalibrierung sollte sich die Aussage umkehren lassen, um die Restfestigkeit aus den berührungslosen OLI-Befunden vorhersagen zu können.

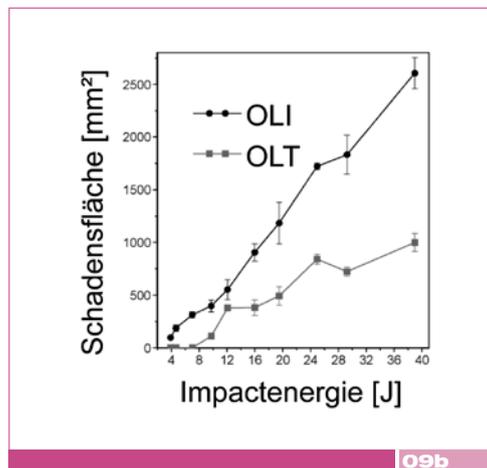
An adaptiven Strukturen sind solche Untersuchungen besonders einfach, da der Verlauf des Korrelationskoeffizienten bei dieser intern angeregten Vibrometrie nach Kalibrierung eine Abschätzung der Impactenergie ermöglicht. Zur Lokalisierung des Impactschadens eignen sich dann die oben erwähnten defektselektiven Verfahren, wobei die eingebaute Piezoaktorik auch hier als Schwingungsgeber fungiert [1].

8. Alterungseffekte, Ermüdung

Alterung und Ermüdung betreffen nicht nur Menschen und andere Lebewesen, sondern auch Werkstoffe: Frühere Be- oder Überlastungen hinterlassen Spuren, die die Leistungsfähigkeit unter weiterer Belastung verringern, bis irgendwann eine Grenze unterschritten wird und Versagen

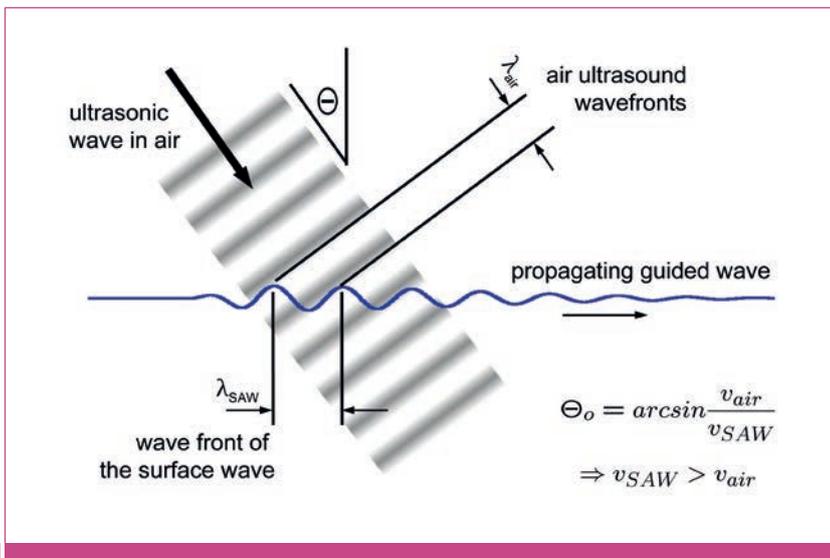


Vergleichende Charakterisierung impactgeschädigter CFK-Platten: Phasenbilder der Einschlagseite bei 0,1 Hz.



Schadensflächengröße mit OLT u. OLI.

eintritt. So sind auch Bauteile in der Lebensdauer beschränkt, und die Ermittlung von Lebensdauerverbrauch und Restlebensdauer ist von großem praktischem Interesse. Seit langem ist bekannt, dass Bauteile unter periodischer Belastung Wärme entwickeln (davon macht auch die oben besprochene ULT Gebrauch) und dass die am stärksten geschädigten Bereiche ihr bevorstehendes Versagen durch lokale Temperatursteigerungen („hot spots“) ankündigen, deren Entstehung und Weiterentwicklung unter Last thermografisch gut verfolgbar sind. Bildgebende Größe ist hier (wie auch bei OLT) der lokal erhöhte mechanische Verlustwinkel als Lebensdauerindikator, der besonders gut kurz vor dem Versagen anspricht. Von größerem praktischem Interesse ist die Veränderung der Steifigkeit während des gesamten Belastungsablaufs. Untersuchungen hierzu führen wir mit luftultraschallerzeugten Grenzflächenwellen durch [17].



10a

Erzeugung von Oberflächenwellen mit Ultraschall bei optimalem Winkel.

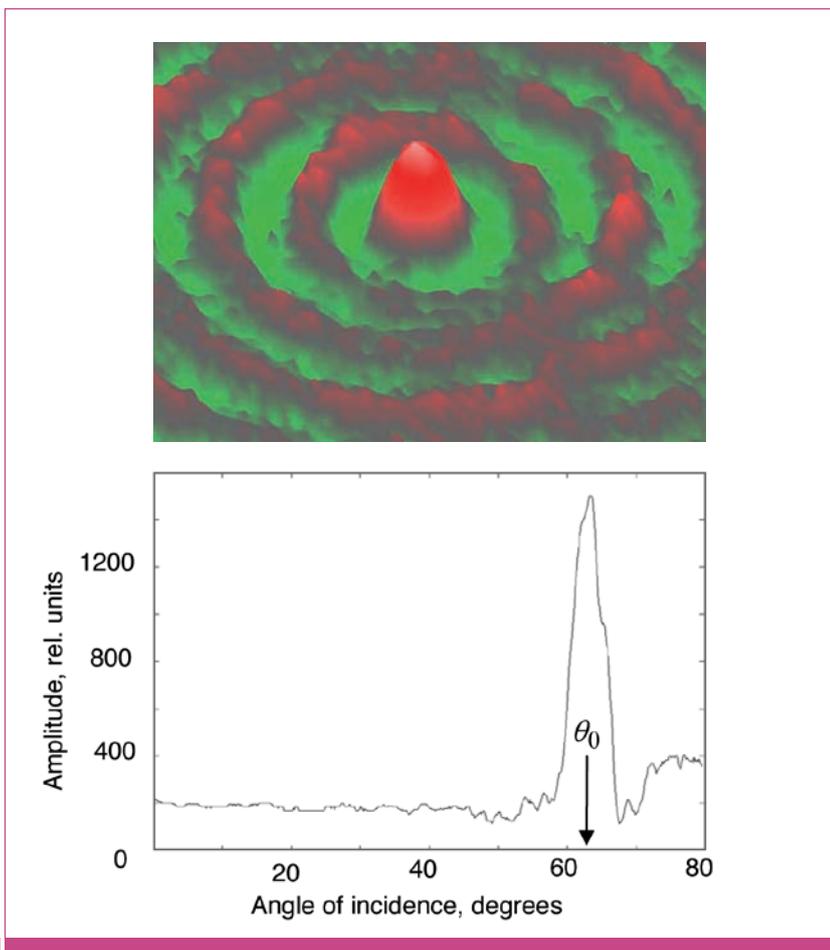
Wer sich schon mit Ultraschall medizinisch untersuchen ließ, erinnert sich an die Paste, mit der die akustische Kopplung zwischen Messkopf und Körperoberfläche hergestellt wird. Der technische Ultraschall verwendet die Kopplung mit Wasser

(Immersions- und Squirtertechnik). Beides hat sich im Metallbereich bewährt, ist aber an FKV nicht immer anwendbar, z.B. wenn Aushärtungsverläufe verfolgt oder hochspannungsfeste adaptive Strukturen untersucht werden sollen. Bei der Untersuchung mit luftgekoppeltem Ultraschall bleibt das Bauteil trocken. Häufig wird es dabei senkrecht zur Oberfläche durchschallt, wie man es von wassergekoppeltem Ultraschall gewohnt ist. Solche Messungen liefern den Elastizitätsmodul senkrecht zur Bauteiloberfläche.

Bei schräger Einschallung wird die Oberfläche periodisch von den Druckfronten der Schallwelle „eingebeult“ (**10a**), und die fortschreitende Bewegung der Schallfronten beim seitlichen Überstreichen des Bauteils bewirkt eine entsprechende wellenartige Bewegung der Beulenstruktur z.B. als „Oberflächenwelle“ oder als „Plattenwelle“ (**10b**). Dieser Effekt setzt einen bestimmten Einschallwinkel voraus, weil Wellenlänge und Geschwindigkeit dieser Wellen (über eine bestimmte Strecke gemessen) (**10c**) zusammenhängen, wobei z.B. der Elastizitätsmodul entlang der Oberfläche eine Rolle spielt.

Da Luftultraschallmessungen nicht von den Unwägbarkeiten einer mechanischen Ankopplung abhängen, lässt sich damit die Veränderung der Steifigkeit während der Ermüdungsbelastung erfassen. Nach einem anfänglich steilen Verlauf des Steifigkeitsverlustes zeigen alle Proben einen gut verfolgbar stetigen Abfall, aus dem man umgekehrt die Zyklenzahl und damit die Restlebensdauer abschätzen könnte.

Zuletzt soll in diesem Zusammenhang eine weitere Ultraschallmethode erwähnt werden, nämlich die berührend messende Ultraschalldoppelbrechung, die wie in der Optik auf geringe Unterschiede im Richtungsverhalten der Werkstoffeigenschaften anspricht. Hiermit lässt sich z.B. die Undulation, also eine Abweichung der Faserrichtung von der Sollrichtung, ortsabhängig verfolgen. Die hierbei erreichbare Genauigkeit liegt im Bereich von 1-2 Grad. Versuchsweise wurde mit dieser Methode auch die Anisotropie eines ursprünglich quasi isotropen Laminates bei Ermüdung unter zyklischer Zugschwellbelastung untersucht. Die stetige Änderung der Steifigkeitsanisotropie während des Ermüdungsversuchs lässt vermuten, dass sich die Ultraschalldoppelbrechung als Indikator für den Lebensdauerverbrauch eignen könnte [18].



10b

Plattenwellenfeld und involvierte mechanische Eigenschaften.

9. Fazit

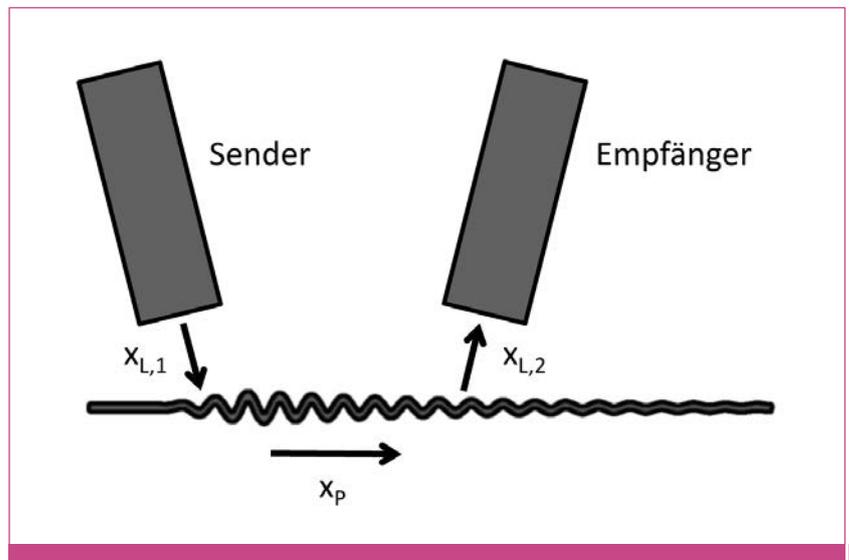
Wo stehen wir derzeit? Mit der Vielfalt unserer werkstoffangepassten innovativen ZFP-Verfahren können wir unterschiedliche Fehler in FKV schon mit großer Zuverlässigkeit auffinden, schnell großflächig bildhaft darstellen und somit charakterisieren. Durch Verbesserung der Charakterisierung lassen sich Sicherheit und Ausnutzungsgrad erhöhen und dadurch Gewicht und Energieverbrauch absenken. Die Beurteilung der Fehlerrelevanz ist aber ein anderes Problem. Die Abschätzung der Restlebensdauer ist zwar bereits an definierten einfachen Bauteilen (z.B. Rohre, Zugproben) unter definierten Belastungen möglich, an Realteilen aber noch nicht. Wir sollten uns also über die Zuverlässigkeit von Prognosen aus ZFP-Befunden keine großen Illusionen machen, da liegt noch ein weiter Weg vor uns. Die Luftfahrt wird noch einige Zeit mit hohen Sicherheitsfaktoren und entsprechenden Überdimensionierungen leben müssen, die viel Gewicht kosten.

Wichtig wäre ergänzend zur Fehlerfindung eine verbesserte Fehlervermeidungsstrategie, die durch intensivere Einbeziehung der zerstörungsfreien Prüftechnik in die Fertigungsabläufe erzielbar wäre. Dazu müssten wir aber mehr über die Entstehungsgeschichte relevanter Fehler wissen. Modellvorstellungen über die Weiterentwicklung von Schäden und ihre Relevanzgrenze erfordern eine verbesserte Kommunikation zwischen Konstrukteuren, Prüfern und Modellierern. Durch das Zusammenschalten von Kompetenzen müssen das häufig noch bestehende Kästchendenken in engen fachlichen Grenzen und daraus resultierende Eitelkeiten besser überwunden werden. Ein wichtiges Teilziel als Mindestforderung wäre erreicht, wenn die Konstrukteure wüßten, welche ZFP-Methoden es gibt und wie man prüfbar konstruiert. Wir sehen eine wichtige Aufgabe in unserer Forschung und Lehre darin, auch an dieser Horizonterweiterung im Bereich von Bauteilentwurf, Fertigung, Prüfung und Inspektion zu arbeiten. •

Gerhard Busse, Igor Solodov

Danksagung

Ohne die wirksame Unterstützung unserer Forschungsarbeit durch die Deutsche For-



10c

Messung der Plattenwellengeschwindigkeit über die Laufstrecke x_p .

schungsgemeinschaft (DFG) wären die vorgestellten Messergebnisse nicht möglich gewesen (z.B. SFB 381, SFB 409, PAK 267 sowie Normalverfahren). Gerade die Verbindung der Grundlagenarbeit mit der Umsetzung wurde vom Land Baden-Württemberg und von der Universität Stuttgart finanziell unterstützt (z.B. im Projekt DLR@UniST). Unsere Industriepartner (z.B. Eurocopter, Airbus, Lufthansa Technik) konfrontierten uns immer wieder mit praktischen Fragestellungen als Herausforderungen und versorgten uns mit Prüfobjekten. Dafür bedanken wir uns herzlich.

Ganz besonderer Dank gebührt unseren Doktoranden, Diplomanden, Studienarbeitern und wissenschaftlichen Hilfskräften, die sich mit Kreativität, Geduld und Fleiß der Lösung unserer vielen Aufgaben stellten. Es ist sehr erfreulich und ermutigend, dass viele dieser Arbeiten durch Preise gewürdigt wurden.

Literatur

- [1] Busse, G.; Kröplin, B.; Wittel, F.: *Damage and its evolution in fiber-composite materials: Simulation and non-destructive evaluation*. Book on demand, 2006, ISBN 3-930683-90-3.
- [2] Summerscales, J.: *Non-destructive testing of fibre-reinforced plastics composites*, Elsevier Appl. Science, London and New York, I (1987), II (1990).
- [3] Busse, G.: *Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal*. Appl. Phys. Lett. Vol. 35 (1979): p 759–760.
- [4] Carlomagno, G.M.; Berardi, P.G.: *Unsteady thermotopography in non-destructive testing*, Proc.

- 3rd Biannual Information Exchange, Aug. 24–26, St. Louis USA, (1976): p 33–39.
- [5] Beaudoin J. L.; Merienne, E.; Danjoux, R.; Egee, M.: *Numerical system for infrared scanners and application to the subsurface control of materials by photothermal radiometry*. Infrared Technology and Applications SPIE Vol. 590 (1985): p 287.
- [6] Kuo, P.K.; Feng, Z.J.; Ahmed, T.; Favro, L.D.; Thomas, R.L.; Hartikainen, J.: *Parallel thermal wave imaging using a vector lock-in video technique*. Photoacoustic and Photo-thermal Phenomena, ed. P. Hess and J. Pelzl. Heidelberg: Springer-Verlag (1987): p 415–418.
- [7] Busse, G.; Wu, D.: *Verfahren zur phasenempfindlichen Darstellung eines effektmodulierten Gegenstandes*. Patentschrift P 42 03 272.5 (1992).
- [8] Wu, D.; Salerno, A.; Malter, U.; Aoki, R.; Kochendörfer, R.; Kächele, P.K.; Woithe, K.; Pfister, K.; Busse, G.: *Inspection of aircraft structural components using lockin-thermography*. Busse, G.; Balageas, D.; Carlomagno, G.M. (Hrsg.): *Quantitative infrared thermography, QIRT 96*, Stuttgart, Edizione ETS, Pisa (1997), S. 251–256, ISBN 88-467-0089-9.
- [9] Menner, P.; Busse, G.: *Lockin-interferometric imaging of thermal waves for non-destructive testing*. Proceed. SPIE Optical Metrology, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection, München, 2011.
- [10] www.ifb.uni-stuttgart.de/e-genius.
- [11] Hennecke, E.G.; Reifsnider, K.L.; Stinchcomb, W.W.: *Thermography – An NDI method for damage detection*. J. of Metals (Sept. 1979) p 11–15.
- [12] Rantala, J.; Wu, D.; Busse, G.: *Amplitude modulated lock-in vibrothermography for NDE of polymers and composites*. Res. Nondestr. Eval. (1996) 7, S. 215–228.
- [13] Stoessel, R.; Dillenz, A.; Krohn, N.; Busse, G.: *Defektselektives Abbildungsverfahren*. Materialprüfung 42, Nr.1/2 (2000), S. 38–44.
- [14] Solodov, I.; Döring, D.; Busse, G.: *Air-coupled laser vibrometry: Analysis and applications*, Applied Optics, V. 48, N 7, pp. C33–C37, 2009.
- [15] Universität Stuttgart: *Adaptive Strukturen im Flugzeugbau und Leichtbau*. Ergebnisbericht DFG SFB 409 für 1998–2000. S. 370–371.
- [16] Hufenbach, W. (Hrsg.): *Textile Verbundbauweisen und Fertigungstechnologien für Leichtbaustrukturen des Maschinen- und Fahrzeugbaus*. Bericht SPP 1123. SDV – Die Medien AG (2007) ISBN 978-3-00-022109-5.
- [17] Rheinfurth, M.; Kosmann, N.; Sauer, D.; Busse, G.; Schulte, K.: *Lamb waves for non-contact fatigue state evaluation of composites under various mechanical loading conditions*. Composites Part A, 43, 1203–11, 2012.
- [18] Rheinfurth, M.; Fey, P.; Allinger, S.; Busse, G.: *Ultrasonic birefringence as a measure of mechanically induced fatigue damage in laminated composites*. International Journal of Fatigue (im Druck).

DIE AUTOREN

PROF. DR. GERHARD BUSSE UND PROF. DR. IGOR SOLODOV



Die zerstörungsfreie Prüfung ist ein Forschungsgebiet am Institut für Kunststofftechnik (IKT), das 1989 mit der Berufung von Prof. Dr. Gerhard Busse zur Einrichtung der Abteilung „Zerstörungsfreie Prüfung“ am IKT (damals IKP) führte, in der Ingenieure, Materialwissenschaftler, Physiker und Mathematiker interdisziplinär zusammenarbeiten. Mit Prof. Dr. Igor Solodov von der Lomonosov-Universität Moskau konnte das ZFP-Team einen international führenden Wissenschaftler im Bereich elastischer Wellen gewinnen. Der SFB 381 „Charakterisierung des Schädigungsverlaufs von Faserverbundwerkstoffen mittels zerstörungsfreier Prüfung“ mit seiner Laufdauer von 12 Jahren war für Entwicklung und Anwendung innovativer zerstörungsfreier Prüfverfahren ein sehr wichtiger Nährboden. Zu den in diesem Artikel vorgestellten Resultaten haben über die vergangenen Jahre viele Mitglieder des ZFP-Teams beigetragen, in chronologischer Reihenfolge: Werner Karpen, Klaus Nixdorf, Datong Wu, Gernot Riegert, Alexander Dillenz, Thomas Zweschper, Christian Spiessberger, Henry Gerhard, Klaus Pfeleiderer, Nils Krohn, Christoph Döttinger, Rainer Stössel, Andreas Gleiter, Daniel Döring, Philipp Menner, Niels Holtmann, Peter Fey, Markus Rahammer, Martin Rheinfurth, Sebastian Allinger, Dorothee Sauer und Tatjana Bubeck.



Kontakt

Universität Stuttgart, Institut für Kunststofftechnik, Zerstörungsfreie Prüfung
Pfaffenwaldring 32, D–70569 Stuttgart, Tel. +49 (0) 711/685-62626, Fax +49 (0) 711/685-59712
E-Mail: gerhard.busse@ikt.uni-stuttgart.de, Internet: www.zfp.uni-stuttgart.de