

## Neue Möglichkeiten der Werkstoff- und Bauteilprüfung durch Nichtlineare Akustik

Nils Krohn\*; Klaus Pfeleiderer, Gerd Busse, Institut für Kunststoffprüfung, Universität Stuttgart

### 1. Einleitung

Die Schwingungsanalyse ist ein seit vielen Jahren bewährtes Verfahren der Zerstörungsfreien Prüfung. Hierbei wird der Zustand eines Prüfkörpers durch seine lineare mechanische Übertragungsfunktion entweder gehörmäßig (Klangprüfung) oder messtechnisch (Vibrometrie) charakterisiert. Veränderungen der Resonanzen, die durch einen Defekt hervorgerufen werden, sind durch den Vergleich mit denen des intakten Bauteils zu erkennen. Diese Eigenschwingungen hängen aber auch wesentlich von der Geometrie eines Bauteils ab. Eine Variation der Abmessungen ist jedoch häufig produktionstechnisch nicht vermeidbar, so dass eine unbedeutende Fertigungstoleranz und ein kritischer Schaden dasselbe Messergebnis hervorrufen können.

Zur Vermeidung dieser Problematik wurde daher untersucht, ob sich lokal nichtlineares, also geometrieunabhängiges, Verhalten als Merkmal zur Zerstörungsfreien Prüfung eignet.

Akustische Nichtlinearität tritt überall dort auf, wo einander berührende Grenzflächen zu einer Relativbewegung angeregt werden können. Hierbei ist zwischen einer tangentialen (Reibung) und einer normalen Bewegung („Klappern“) zu unterscheiden. Da die meisten in der Praxis relevanten Defekte solche zusätzlichen Grenzflächen aufweisen, lässt sich der Ort des Schadens an der lokalen Erzeugung höherer Harmonischer erkennen [1]. Hierzu ist die Probe mit monofrequentem Leistungsumschall zu beaufschlagen, um dann die resultierende Schwingung an der Probenoberfläche hinsichtlich ihres Frequenzspektrums zu analysieren. Im intakten Bereich ist nur die Anregungsfrequenz nachweisbar, am Ort des Schadens allerdings entstehen zusätzlich höhere Harmonische.

Verwendet man das Messsignal dieser Harmonischen als bildgebende Größe, so liefert die defektfreie Umgebung keinen Betrag zum Messsignal: Ein defektselektives Abbild der Probe entsteht.

### 2. Akustische Anregung nichtlinearen Verhaltens

Neben integrierten und applizierten piezokeramischen Aktoren erwiesen sich vor allem Schweiß-Ultraschallgeneratoren (Abb. 1) als geeignete Anregungsquellen, um Nichtlinearitäten in einem Bauteil anzuregen. Ein Problem ergibt sich allerdings aus dem Anpressen des elektroakustischen Konverters an das Bauteil (Abb. 2): Bei geringem Anpressdruck verhält sich diese akustische Verbindung wie ein mechanischer Gleichrichter: Zugkräfte werden nur bis zur Anpresskraft übertragen, aber Schubkräfte unbegrenzt. Die Anpresskraft ist jedoch durch die Bauteileigenschaften eingeschränkt, da die Oberfläche der Probe bei einem zu hohen Druck beschädigt werden könnte.

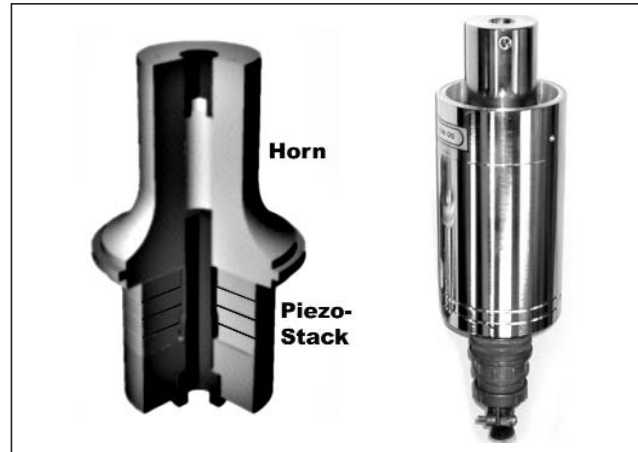


Abb. 1: Aufbau eines Leistungs-Ultraschallkonverters (Fa. Branson)

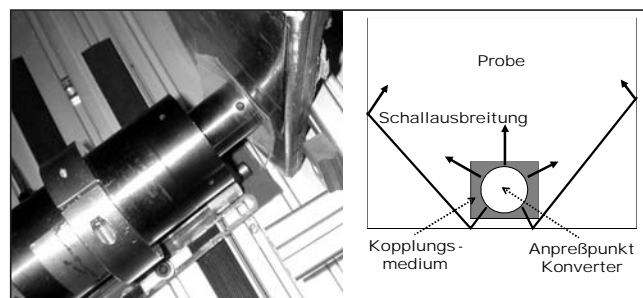


Abb. 2: Versuchsaufbau zur Einkopplung von Leistungsumschall

Ein Ausweg ist die Verwendung eines weichen Koppelmediums, das sich der Oberflächenrauigkeit und -kontur des Bauteils anpasst und dadurch Druckspitzen vermeidet.

Das weiche Kopplungsmedium stellt jedoch eine erhebliche Impedanzbarriere dar, so dass effektiv nur ein kleiner Teil (je nach Medium < 5%) der im Konverter erzeugten akustischen Energie tatsächlich in die Probe übergeht. Die im Folgenden angegebenen Leistungen beziehen sich daher nur auf die Leistungsaufnahme des Konverters und nicht auf die resultierende akustische Leistung.

Von besonderer Bedeutung ist, dass die Anregungsfrequenz nicht einer Resonanz der Probe entspricht. Dies würde zu einer Detektionsunempfindlichkeit an Knoten führen. Ist die Anregungsfrequenz nicht frei wählbar (wie zum Beispiel bei Verwendung eines Kunststoffschweiß-Konverters), so kann eine Frequenzmodulation bzw. eine schmalbandige Anregung durch Terzbandrauschen zu einer homogeneren Empfindlichkeitsverteilung führen [2].

### Detektion nichtlinearer Schwingungen und Anwendungsbeispiele

Die resultierende Schwingung der Bauteiloberfläche kann mittelbar über Luftschall oder direkt über Körperschall ermittelt werden. Mikrofone stellen eine preiswerte Möglich-

\* Der Autor ist Träger des Bertholdpreises der DGZfP 2004

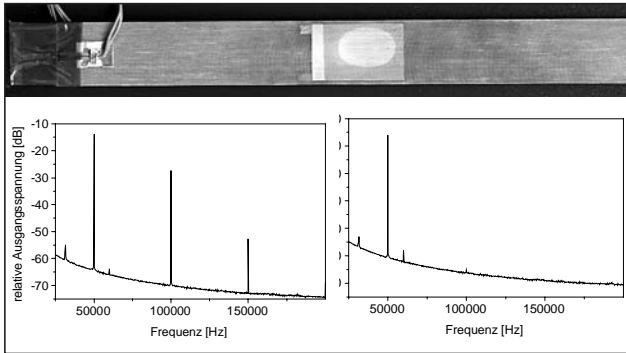


Abb. 3: Vergleich der Luftschallspektren einer delaminierten (links) mit einer intakten (rechts) aktiven Struktur (Bild oben)

keit dar, den Luftschall schnell und präzise zu erfassen; sie reagieren aber auch empfindlich auf Umgebungsgeräusche und liefern nur eine integrale Information des Bauteilzustands.

Zur direkten Körperschalldetektion eignen sich Laservibrometer aufgrund ihrer großen Bandbreite und Empfindlichkeit besonders gut. Herkömmliche Beschleunigungsaufnehmer sind aufgrund ihrer geringen Grenzfrequenz nur in Ausnahmefällen verwendbar.

#### Integrale Erkennung nichtlinearen Materialverhaltens durch Luftschall

Moderne Faserverbundstrukturen gewinnen zunehmend als Konstruktionswerkstoff im Leichtbau an Bedeutung, da sie ein außergewöhnlich günstiges Festigkeits/Gewichtsverhältnis aufweisen. Sie lassen sich außerdem mit einer Aktorik ausstatten, die eine dynamische Anpassung mechanischer Kennwerte bzw. die aktive Unterdrückung von Schwingungen ermöglicht.

Abb. 3 (oben) zeigt eine Probe aus unidirektionalem glasfaserverstärktem Kunststoff, in die ein piezokeramischer Aktor einlaminiert wurde.

Durch eine Dauerschwingbelastung wurde an der Oberfläche der Piezokeramik eine Enthaftung zum umgebenden Epoxydharz verursacht (heller ovaler Bereich). In dieser Region wird eine monofrequente Anregung des Aktors bei 50 kHz ( $20 V_{eff}$ ) durch die Interaktion der beweglichen Delaminationsgrenzflächen so verzerrt, dass im von einem Mikrofon aufgenommenen Spektrum höhere Harmonische mit erheblicher Amplitude auftreten (Abb. 3, links unten) [3]. Eine intakte Vergleichsprobe strahlt hingegen das Anregungssignal unverzerrt ab (Abb. 3, rechts unten).

#### Bildgebende Detektion nichtlinearer Schwingungen

Bei hochwertigen Bauteilen oder zu Diagnosezwecken ist oft auch der Ort eines Schadens bzw. Fertigungsfehlers zu bestimmen, was durch eine lokale Analyse nichtlinearer Schwingungen möglich ist. Hierzu wird die schwingende Oberfläche von einem scannenden Laservibrometer (Polytec PSV300) abgetastet und an jedem Messpunkt ein Amplitudenspektrum berechnet (Abb. 4).

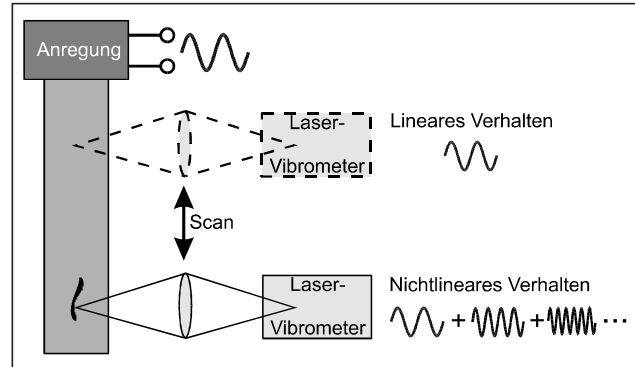


Abb. 4: Prinzip der bildgebenden nichtlinearen Vibrometrie

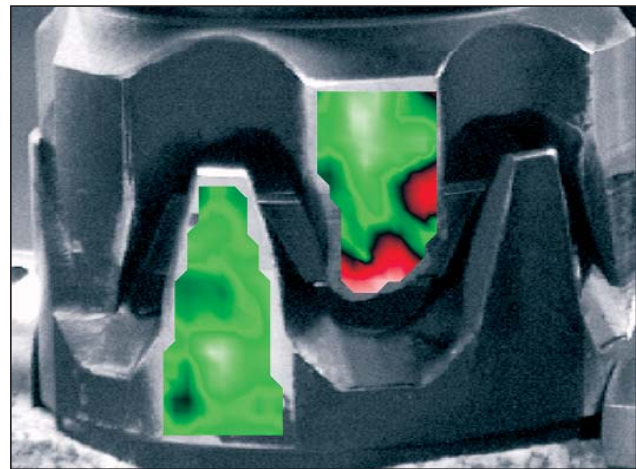


Abb. 5: Hartlötfehler an Generatoranker, Amplitudenbild der 4. Harmonischen, 80 kHz

Die farbkodierte Amplitude einer (oder mehrerer) höherer Harmonischer lässt sich zur defektselektiven Abbildung nutzen.

Abb. 5 zeigt den Klauenpol-Anker eines Generators, dessen Klauen durch Hartlöten an der Basisstruktur, dem eigentlichen Spulenträger, befestigt sind. Wegen der auf die Klauen wirkenden zentrifugalen Kräfte muss die Verbindung flächig und mit hoher Leitfähigkeit erfolgen. Ein vielleicht sogar geschwindigkeitsabhängiger Spalt würde neben der mechanischen Schwächung die Form des elektromagnetischen Feldes beeinflussen, was zu einem ineffizienteren Betrieb bzw. zu einem unrunder Lauf führen würde.

Dieses Bauteil wurde mit einer Frequenz von 20 kHz (600 W) akustisch angeregt. Die 4. Harmonische (80 kHz) ist an den Stellen der Enthaftung nachweisbar und markiert den Defekt deutlich (rote Bereiche).

Massive metallische Verbundstrukturen sind aufgrund ihrer Stabilität und der geringen Dämpfung mit nahezu beliebigen Leistungen anregbar. Lötverbindungen der Elektronik sind allerdings sehr viel anfälliger gegenüber großen Schwingungsamplituden. Hier wären Frequenzen der Größenordnung einiger hundert kHz erfolversprechender.

In nicht zu großen Bauteilen aus schwach dämpfenden Materialien bildet sich bei der Anregungsfrequenz ein Schallfeld aus, das durch praktisch konstante Amplituden-

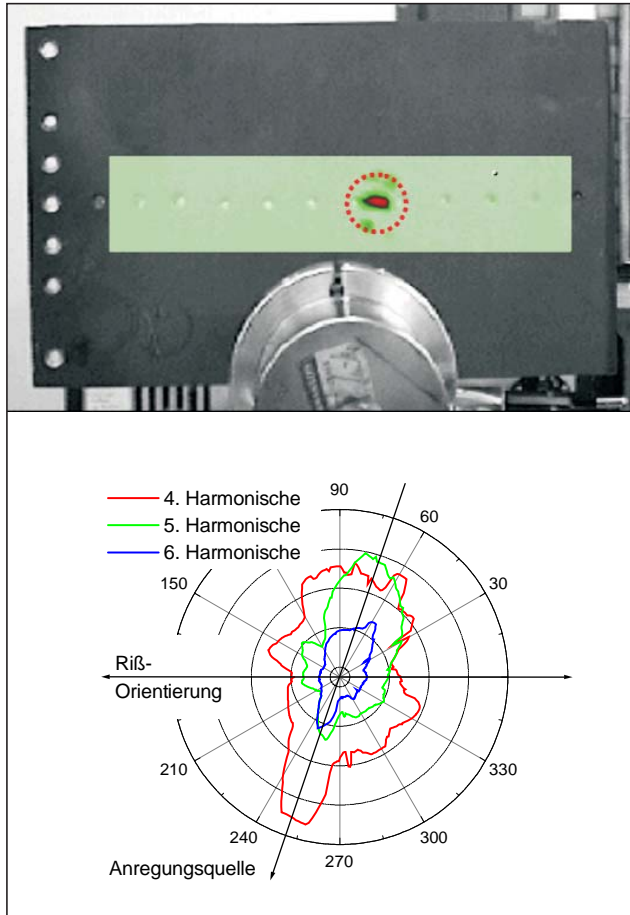


Abb. 6: Rissdetektion in Nietreihe durch Amplitudenbild der 4. Harmonischen (80 kHz, oben), Schallfeld höherer Harmonischer um Defekt (unten)

verteilung und fehlende Vorzugsrichtung der Schallausbreitung charakterisiert ist. Dieses Schallfeld bietet ideale Voraussetzungen, Defekte anzuregen, die eine bestimmte (meist aber leider unbekannt) Richtung der Beschallung erfordern, um erkannt zu werden: Risse.

Die vernietete Aluminiumprobe in Abb. 6 besitzt einen Ermüdungsriss zwischen dem 7. und 8. Nietloch (v.l.n.r.), der zwar optisch nicht erkennbar, aber durch Wirbelstrom nachweisbar ist. Die Niete wurden allerdings vor der Messung entfernt. Auch hier liefert das Amplitudenbild der 4. Harmonischen ein klar lokalisiertes Bild des Defektes.

An diesem Beispiel ließ sich zudem auch das Schallfeld der durch die Grenzflächeninteraktion hervorgerufenen höheren Harmonischen untersuchen. Hierzu wurden der Bereich um den Riss abgetastet und die lokalen Amplituden bestimmt (siehe roter Kreis). Erwartungsgemäß verhielt sich der Riss hierbei wie eine Linienschallquelle [4], da die über die Risslänge verteilten virtuellen Punktquellen phasenkorrelierte Sender darstellen (wie an einem Beugungsgitter in der Optik).

Neben lokalisierten makroskopischen Defekten mit Grenzflächen können auch mikroskopische Effekte, die über eine Fläche verteilt sind, eine akustische Welle messbar verzerren, was hier am Beispiel einer korrodierten Oberfläche gezeigt wird.

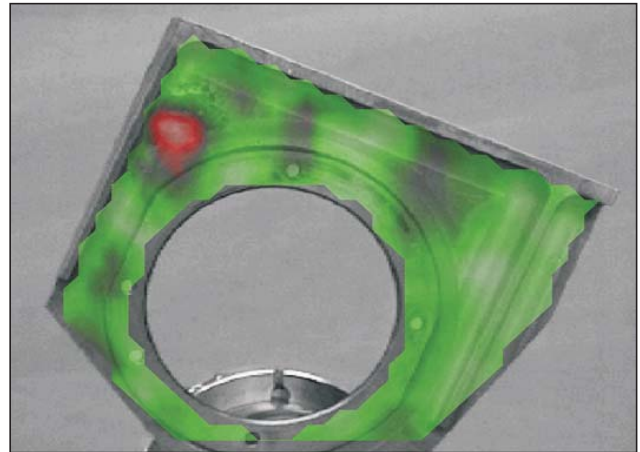


Abb. 7: Akustische Nichtlinearität an korrodierten Al-Oberfläche, Amplitudenbild der 3. Harmonischen (60 kHz)

Da Korrosion neben der reinen Flächenkorrosion bevorzugt an Korngrenzen und Spalten in das Material eindringt, entstehen oft schuppenartige Partikel verschiedenster Größe. Diese besitzen noch einen Kern aus Metall, der mit der Oberfläche verbunden ist. Ultraschall wird häufig zur Entfernung derartiger korrosiver Schichten benutzt, da die hierbei auftretenden hohen Beschleunigungen ausreichend sind, die Partikel von der Oberfläche zu trennen. Geringere Amplituden hingegen regen lediglich eine Relativbewegung der Metalloxidpartikel gegenüber der Oberfläche an. Es kann hierbei sowohl zu tangentialer (Reibung) als auch zu normaler Bewegung (Klappern) kommen, was sich thermisch und durch nichtlineares Verhalten äußern muss.

In Abb. 7 ist ein korrodiertes Aluminium-Höhenruderlager eines Reiseflugzeuges (Piper PA 28) dargestellt. In der 3. Harmonischen zeigt sich in der oberen linken Ecke ein beidseitig stark korrodiertes Bereich (rot dargestellt), der auch optisch gut erkennbar ist. Die Schalleinleitung erfolgte am gegenüberliegenden Ende der Probe mit einer elektrischen Leistung von 300 W. Das Amplitudenbild der Oberfläche zeigt aber auch kleine zusätzliche Maxima der Harmonischen an Stellen, die keine erkennbare Korrosion aufweisen. Hierbei könnte es sich um verdeckte Schädigungen (Risse etc.) oder Artefakte der Anregung handeln.

Neben der reinen Grenzflächennichtlinearität (Reibung, Klappern) kann auch das schalleitende Medium selbst nichtlineare Übertragungseigenschaften aufweisen.

Während feste Medien praktisch verzerrungsfreie Schalleiter darstellen (die Nichtlinearität der molekularen Bindungspotentiale soll hier vernachlässigt werden), weisen plastisch verformbare Werkstoffe ein hysteretisches Verhalten auf, welches zur Deformation einer sinusförmigen Anregung führt [5].

Dieser Zusammenhang lässt sich besonders gut an einem thermoplastischen Material verdeutlichen, das bei verschiedenen Temperaturen vermessen wird.

Als Probe wurde eine etwa 4 mm dicke Platte aus Polyvinylchlorid (PVC) gewählt (Abb. 8). Die elektrische Anreizleistung des Ultraschallgenerators betrug 400 W.

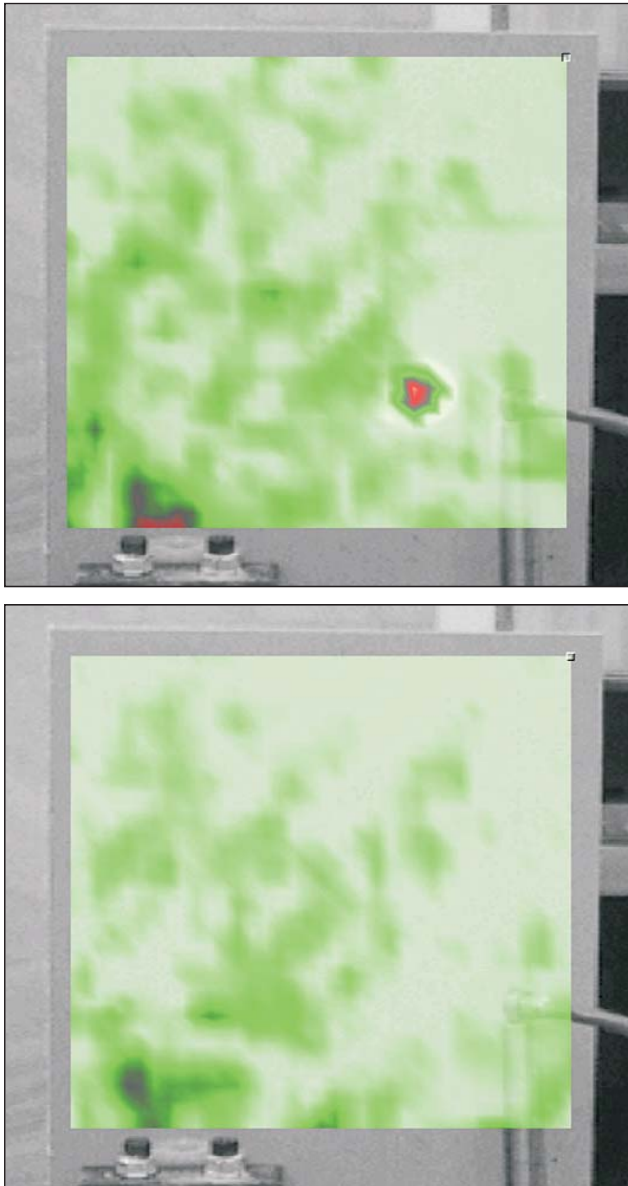


Abb. 8: Nichtlineare Hysterese in thermoplastischem Material (PVC), Amplitude der 2. Harmonischen (40 kHz)

Zunächst wurde eine Messung der lokalen Spektren während der Bestrahlung mit einem Infrarot-Diodenlaser durchgeführt. Die optische Leistung betrug 10 W bei einer Bestrahlungsdauer von wenigen Sekunden. Der Lichtleiter des Lasers wurde direkt auf die Probe gerichtet, so dass sich eine bestrahlte Fläche mit einem Durchmesser von ca. 2 cm ergab. Der erwärmte Bereich weist einen erhöhten Pegel der zweiten Harmonischen auf. Vorsichtiges manuelles Erasten ergab eine Aufweichung an dieser Position, ohne jedoch ein Fließen zur Folge zu haben. Diese Aufweichung des Materials verursacht statt des linearen, elastischen Verhaltens ein nichtlineares, viskoplastisches.

Die Schallwellen werden hier also in ihrer Form verzerrt, und es entstehen Partialtöne höherer Frequenz.

Nach dem Abkühlen der Probe auf Raumtemperatur wurde die Messung wiederholt, und das Gebiet nichtlinearen Verhaltens war erwartungsgemäß verschwunden.

Es ist außerdem bemerkenswert, dass im Bild nur während der Laserbestrahlung Nichtlinearitäten der Konverteran-Kopplung zu erkennen sind (Abb. 8 unten, linke untere Ecke des Meßbereichs).

In der Annahme, bei einem weichen Material wie PVC auf ein Kopplungsmedium verzichten zu können, wurde eine direkte Ankopplung gewählt. Dies führte zunächst zu einer Erzeugung höherer Harmonischer. Nach einer gewissen Betriebszeit trat offenbar eine Anpassung der Probenoberfläche an die des Konverters auf, die vermutlich durch eine Erwärmung der Kontaktfläche hervorgerufen wurde.

Nach dem Ausspannen der Probe waren Spuren der Ankopplung am Kunststoff sichtbar.

### Aktuelle Forschungsschwerpunkte

Die oben vorgestellten Höherharmonischen, die sich bei ausreichend starker Anregungsleistung zur Defektcharakterisierung eignen, entstehen durch die Interaktion eines Defektes mit einer sinusförmigen Anregungsschwingung. Geht man zu einer multifrequenten Anregung über, dann kommt es außerdem im Defektbereich zu einer nichtlinearen Superposition der Anregungen. Da außerhalb des Defektbereiches die beiden Anregungsfrequenzen weiter bestehen, ist eine Lokalisierung des Defekts mit Hilfe der Kombinationsfrequenzen möglich.

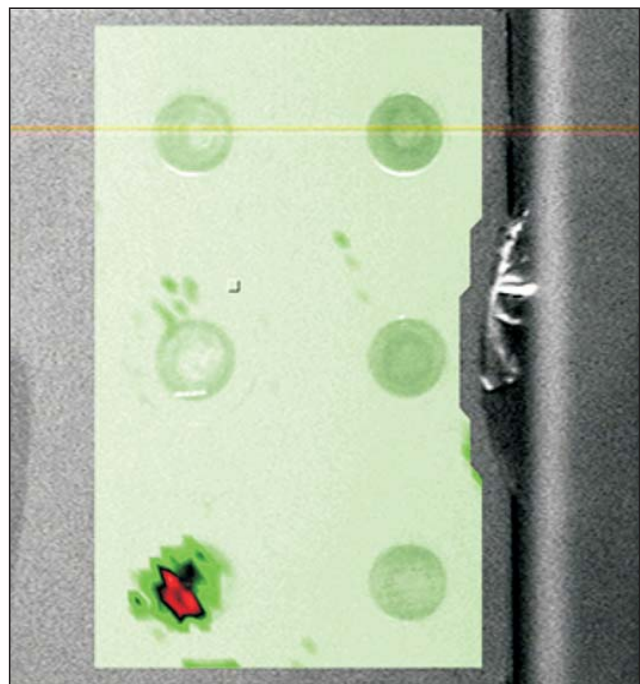


Abb. 9: Wellenmodulation an einer genieteten Aluminium-Struktur aus dem Luftfahrtbereich

Abb. 9 zeigt die Beaufschlagung einer Aluminium-Nietprobe mittels zweier elastischer Wellen (zwei Piezoaktoren, 20 und 27 kHz). Erwartungsgemäß kommt es im Defektbereich zu einer Intermodulation der Steifigkeiten, die lokal verschiedene Frequenzkombinationen durch Wellenmischen entstehen lässt und den fehlerhaften Niet unten links im gescannten Bild markiert.

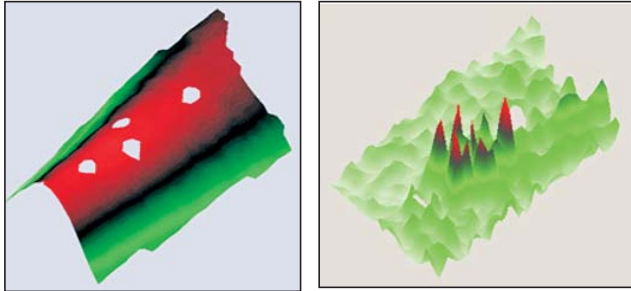


Abb. 10: links: Biegeschwingung des Bauteils (1350 Hz); rechts: Defektresonanz bei 81 kHz

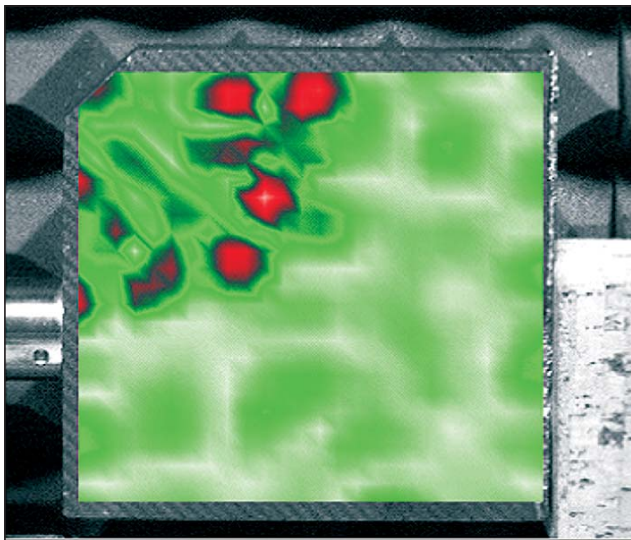


Abb. 11: Subharmonische der Anregung  $3/2 \omega = 30\text{kHz}$ , Material: C/C-SiC-Probe mit Delamination

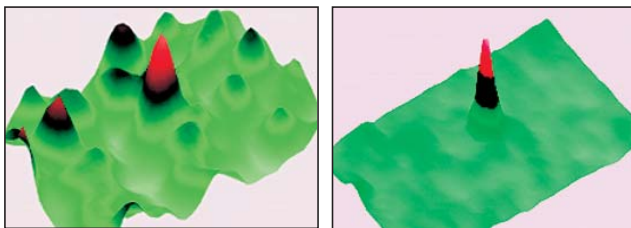


Abb. 12: links: 4. Harmonische von 20kHz; rechts: Seitenband

Nimmt man des weiteren Resonanzeigenschaften eines nichtlinearen Defektbereiches an, so kann es zu einer Kombination der Anregungsfrequenz mit einer Defektresonanz kommen. Die Folge davon sind die Entstehung verschiede-

ner nichtlinearer Resonanzphänomene, wie Subharmonische, Seitenfrequenzen etc., die schon bei sehr geringer Anregungsamplitude und damit geringer Belastung des Prüflings zur Defektmarkierung genutzt werden können.

Der Nachweis resonanten Defektverhaltens wurde mittels eines Frequenzweeps der Anregung geführt.

Bild 10 zeigt die Amplitudenscans faserverstärkter Keramikbauteile bei zwei verschiedenen Frequenzen. Links ist bei 1350 Hz eine lineare Resonanz der Gesamtstruktur (Biegeschwingung) zu sehen, während bei 81 kHz Anregungsfrequenz (rechts) nur der Defektbereich resonant schwingt.

Ein weiteres Merkmal einer nichtlinearen Resonanz ist eine Eigenfrequenz-Verschiebung bei Variation der Anregungsamplitude.

Das erste, bereits bei sehr niedriger Anregungsamplitude auftretende, nichtlineare Resonanzphänomen ist das schwellwertabhängige Entstehen von Subharmonischen, vorgestellt am Beispiel einer C/C-SiC-Probe mit Delamination. Der Bereich oben links in Abb. 11 markiert die Ablösung.

Nimmt man an, dass mehrere Eigenfrequenzen des Defektbereiches existieren, so kann es bei bestimmten Frequenzkonstellationen zum Entstehen von Kombinationen aus Anregung und Eigenfrequenzen kommen: den Seitenfrequenzen. Dies lässt sich auch durch ein „Zerfallen“ der Subharmonischen in Seitenfrequenzen bei bestimmten Anregungsfrequenzen veranschaulichen.

Abb. 12 zeigt die Detektion eines Impactschadens in einer textilen Glasfaserverbundstruktur. Im linken Bild ist die 4. Harmonische die bildgebende Größe, im rechten hingegen ein Seitenband mit einem wesentlich besseren Fehlerkontrast.

Im Gegensatz zur linearen Schwingungsanalyse, bei der Defektinformationen, falls vorhanden, meist nur singulär (z.B. Halbwertsbreite des Resonanzpeaks) auftreten, ist im nichtlinearen Fall die gesuchte Information auf einige bestimmte Frequenzbänder verteilt. Zur zuverlässigen Extraktion der Information sind bisher solide theoretische und praktische Kenntnis des Prüfers bei der Messung und auch bei der späteren Analyse der Messwerte notwendig.

Um das Verfahren anwendungsorientierter zu gestalten, können verschiedene Bildverarbeitungsoperationen, wie z. B. die Summierung defektrelevanter Frequenzbänder, angewandt und die Aussagekraft der Defektabbildungen erhöht werden. Motivation für diese Untersuchungen ist zum einen kurzfristig eine Verbesserung der Abbildungsschärfe und langfristig eine Automatisierung der Bildanalyse.

Anzeige



[www.interflux.de](http://www.interflux.de)

Bestellen auch Sie  
schnell & bequem in unserem  
Interflux-Internet-Shop

Alles für MP & FE

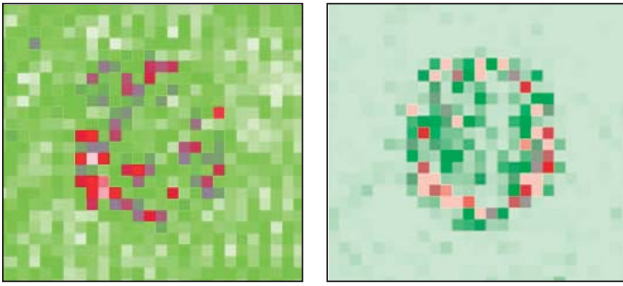


Abb. 13: links: Abbildung der 5. Höherharmonischen; rechts: (Bildverarbeitung) aus 5 ermittelten Frequenzbändern berechnete Defektdarstellung

Abb. 13 (links) zeigt eine repräsentative Höherharmonische. Um die Abbildungsschärfe zu erhöhen wurden die gemessenen Frequenzbänder mit einer Anzahl künstlicher Matrizen korreliert und das Korrelationsspektrum mit der höchsten Übereinstimmung ausgewählt.

Die Multiplikation von Frequenzbänder aus diesem Spektrum mit der höchsten Übereinstimmung (Korrelationsfaktor) führt zu einer deutlichen Erhöhung des Fehlerkontrastes (Abb.13 rechts).

### Zusammenfassung

Die nichtlineare Akustik besitzt ein großes Potenzial, Defekte schnell und zuverlässig zu erkennen. Außerdem werden die Nachteile herkömmlicher Resonanz-Vibrometrie (wie Geometrieabhängigkeit) vermieden. Die Messzeiten können hierbei sehr kurz sein ( $\ll 1$  s pro Messpunkt), da weder eine vollständige Impulsantwort aufgenommen, noch ein Sweep durchgeführt werden muss.

Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, nicht nur eine schnelle integrale IO/NIO Entscheidung zu treffen, sondern auch Defekte zu lokalisieren und den Schädigungsgrad abschätzen zu können.

Die Belastung der Probe durch Leistungultraschall lässt sich durch die Ausnutzung von Intermodulations- und Defektrezonanzeffekten minimieren und die Erkennungsleistung gleichzeitig steigern.

### Danksagung

Die Autoren danken dem Land Baden-Württemberg für die Förderung der Entwicklung dieses Verfahrens im Rahmen eines Landesforschungsschwerpunkt-Projektes. Das Bauteil in Abb. 5 wurde freundlicherweise von Herrn Dr. E. Zabler (Robert Bosch GmbH) und die Probe in Abb. 6 von der Luftwaffenwerft 13 (Erding) zur Verfügung gestellt.

### Literatur

- [1] Zheng, Y.; Maev, R.; Solodov, I.Yu.: Nonlinear acoustic applications for material characterization: A review. *Can. J. of Physics*, Vol. 77, Nr. 12 (1999), S. 927-967
- [2] Krohn N.; Busse G.: Defect Selective Imaging by Scanning Laser Vibrometry, In: Thompson D.O.; Chimenti D.E. (ed.): 28th Annual: Review of Progress in Quantitative NDE Vol. 21. (2001) S. 772-779
- [3] Krohn, N.; Dillenz, A.; Nixdorf, K.; Voit-Nitschmann, R.; Busse, G.: NDT of shape adaptive structures. *NDT&E international* 34 (2001), S. 269 – 276
- [4] Krohn, N.; Stoessel, R.; Busse, G.: Acoustic nonlinearity for defect selective imaging. In: *Ultrasonics* 40 (2002), Elsevier, Amsterdam, pp. 633-637, ISSN 0041-624X
- [5] McCall, K.R.; Guyer, R.A.: Equation of state and wave propagation in hysteretic nonlinear elastic materials. *J. Geophys. Research* 99: 23 (1994), S. 887-897

### Der Autor

Nils Krohn, geboren 1970 in Lüneburg, studierte an der Universität Hamburg Physik, Nebenfach Informatik.

Von 1993 bis 2002 war er selbständig im Bereich Entwicklung und Herstellung elektroakustischer Systeme tätig.



1998 - 2002 arbeitete er als wissenschaftlicher Angestellter am IKP in Stuttgart, Abteilung ZfP, und promovierte hier zum Dr.-Ing.

Seit 2002 ist er Mitarbeiter der DaimlerChrysler AG in der Produktions- und Werkstofftechnik, Abteilung Verfahrensentwicklung, Prüftechnik, akustische und multisensorielle Qualitätstechnik.

Dr. Krohn ist Berthold-Preisträger 2004.