

**G. Mook Prof. Dr.-Ing. habil., J. Pohl Prof. Dr.-Ing. habil., F. Michel Dr.-Ing.,
J. Simonin Dipl.-Ing.**
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Werkstoff- und Füge-technik

HOCHAUFLÖSENDE VERFAHREN ZUR ZERSTÖRUNGSFREIEN PRÜFUNG

Аннотация: В докладе раскрываются некоторые направления неразрушающего контроля в самолетостроительной, автомобильной и химической индустриях. Для обнаружения поверхностных трещин, включений карбида вольфрама и перегрева компонентов турбин из сплава никеля и титана был исследован вихретоковый метод контроля. При помощи высокочастотных датчиков были визуализированы, а затем интерпретированы локальные изменения электрической проводимости и магнитной проницаемости. В самолетостроении все более широкое применение находят углепластики. Вихретоковый метод способен определить ориентацию волокон и ошибки слоев. Для контроля теплообменников в химических установках проведены базовые исследования по использованию вихретокового контроля ферромагнитных и неферромагнитных труб с визуализацией результатов контроля.

Следующее поколение самолетов на основе углепластиков должно обладать самоконтролем (Structural Health Monitoring). Для этого подходят поверхностные акустические волны Лемба возникающие в тонких платах, которые могут быть получены с помощью интегрированных или наклеенных пьезоэлементов. Для исследования их взаимодействия используется лазерный сканирующий виброметр.

Abstract: The paper presents some concepts for non-destructive inspection of aeronautic, automotive and energetic components. Eddy current techniques are investigated to detect surface cracks, tungsten carbide inclusions and overheating of aircraft engines components from titanium and nickel alloys. High frequency sensors are able to visualize local variations of conductivity and magnetic permeability ready for interpretation. In aviation carbon fibre-reinforced plastics increasingly become popular for fuselage applications. Eddy currents can estimate the fibre orientation and gaps between the tapes resulting from manufacturing. In automotive industry eddy current sensor arrays provide visual information about hidden cavities and oxide inclusions in aluminium castings. For the inspection of heat exchanger tubing in the chemical industry imaging eddy current probes are under progress also providing information from the back side of the tube wall.

Future aircrafts should be able for structural health monitoring. One of the favourite techniques is sending Lamb wave along the thin walled fuselage interacting with possible defects. These waves can be generated by integrated or applied piezo-electric transducers directly on the component under inspection. The paper demonstrates some encouraging results obtained by scanning laser vibrometry.

1. Prüfung von Triebwerkskomponenten

Während der Fertigung von Triebwerkskomponenten können durch Werkzeugsplitter oder Werkzeugbruch Einschlüsse entstehen, von denen unter Umständen eine Gefahr für das Bauteil ausgeht [1, 2]. Solche Einschlüsse sind zu detektieren und zu charakterisieren.

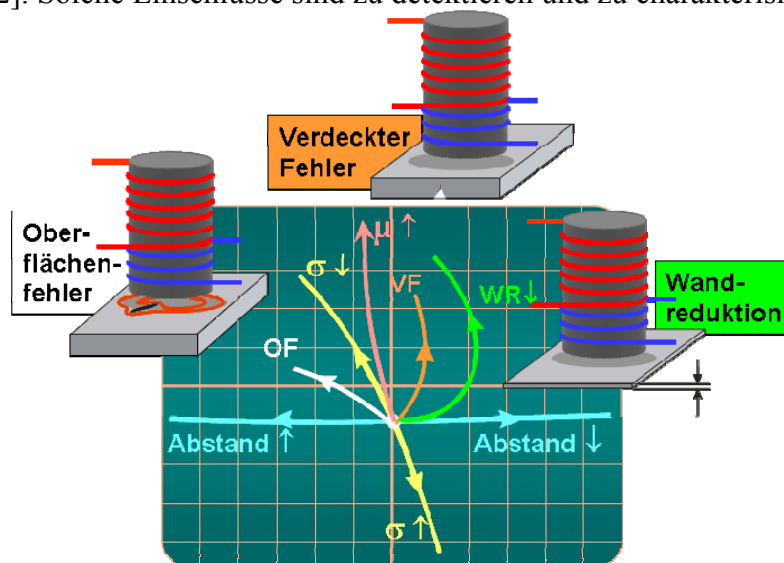


Bild 1: Wirbelstromsignale eines Tastsensors an nicht ferromagnetischem Material

Das Wirbelstromverfahren liefert umfangreiche Informationen über stoffliche und geometrische Eigenschaften des Prüfobjekts. Bild 1 zeigt die Veränderung des Messsignals eines Wirbelstromsensors in Abhängigkeit von bestimmten Eigenschaftsänderungen des Objektes. Der Defektnachweis basiert auf lokalen Leitfähigkeit- und Permeabilitätsänderungen. Der Werkstoff der nachzuweisenden Einschlüsse ist Wolframkarbid. Auf Grund des üblichen Kobaltbinders ist dieser Werkstoff ferromagnetisch. Das Prüfobjekt besteht entweder aus einer Titan- oder einer Nickellegierung, die beide bei Raumtemperatur nicht ferromagnetisch sind. Somit bestehen gute Aussichten, diese Einschlüsse anhand der lokal veränderten Permeabilität zu detektieren.

Um den Fehleranteil im Wechselwirkungsvolumen groß zu halten, wurden für diese Untersuchungen kleine Sensoren verwendet. Bild 2 zeigt vier Sensorarten und deren Abbildungseigenschaften. In der ersten Zeile ist ein Spaltsensor dargestellt, der berührend über die Bauteiloberfläche geführt wird. Das Bild stammt von zwei Bohrlöchern mit 0,4 und 0,8 mm Durchmesser und zwei erodierten vertikalen Schlitzen von 0,4 und 0,8 mm Länge und 0,2 bzw. 0,4 mm Tiefe in einer ebenen Titanprobe. Die zweite und die dritte Zeile zeigen Zylinderkernsensoren vom Absolut- und Differenztyp. Der Multidifferenzsensor in der letzten Zeile liefert die kompliziertesten Bilder.

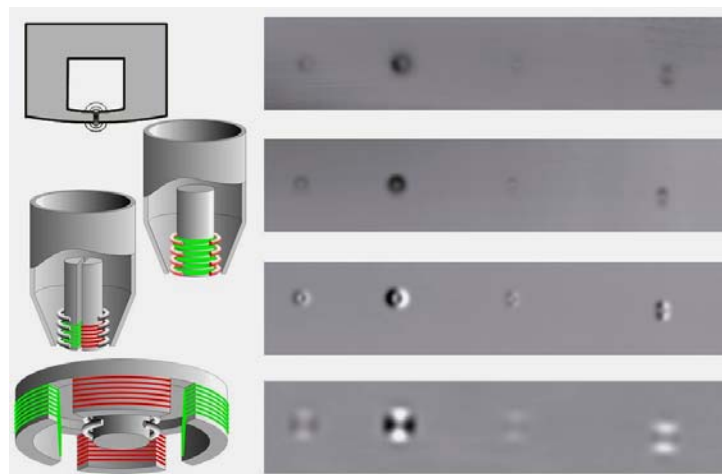


Bild 2: Wirbelstromsensoren und deren Abbildungseigenschaften an TiAl6V4.

Links: Spaltsensor, koaxialer Absolutsensor, Differenzsensor, Multidifferenzsensor.

Rechts: Wirbelstromsignale dieser Sensoren an Bohrungen mit 0,4 und 0,8 mm Durchmesser und Schlitzen der Länge 0,4 und 0,8 mm mit Tiefen von 0,2 und 0,4 mm

Im Folgenden werden Ergebnisse von Messungen mit dem ersten und dem zweiten Sensor vorgestellt, die im Frequenzbereich von 600 kHz bis 4 MHz betrieben wurden.

Bild 3 zeigt eine Probe aus TiAl6V4, in die Splitter einer Wolframcarbid-schneidplatte als Einschlüsse inkorporiert sind. Die Wirbelstromergebnisse in 3b stellen das Bild des Realteils (EC-X) und das Bild des Imaginärteils (EC-Y) des komplexwertigen Messsignals dar. Die geometrische Auflösung des Sensors ist besser als 0,3 mm. Bei einer Prüffrequenz von 3 MHz wurde das Abhebesignal horizontal justiert, so dass kleine Oberflächenverformungen, die ebenfalls durch Werkzeugpartikel verursacht werden können, weitgehend waagerechte Signale liefern. Oberflächennahe Wolframcarbideinschlüsse führen auf Grund ihrer höheren Permeabilität zu vorwiegend vertikalen Signalen. Das EC-Y-Bild gibt die Einschlüsse als helle Punkte wieder, die dunklen Punkte im EC-X-Bild repräsentieren lokale Oberflächenverformungen.

Damit ist nachgewiesen, dass die Wirbelstrommethode zur Detektion und Bewertung kleiner ferromagnetische Partikel in einer nicht ferromagnetischen Umgebung bzw. den von ihnen verursachten Geometriestörungen im Grundmaterial geeignet ist.

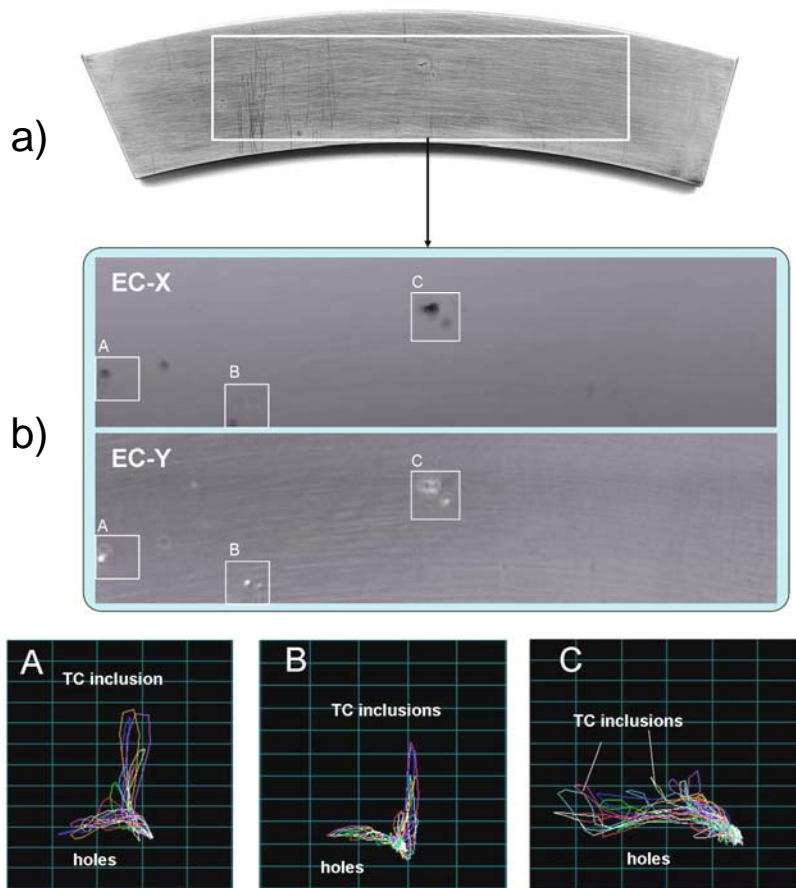


Bild 3: Ausschnitt einer Triebwerkscheibe aus TiAl6V4: a) Fotografie, b) Wirbelstromsignale und deren Analyse in den Bereichen A, B und C

2. Zerstörungsfreie Charakterisierung von carbonfaserverstärkten Kompositen

Die elektrische Leitfähigkeit von carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) ist um zwei bis drei Größenordnungen geringer als die von Metallen. Darüber hinaus tritt eine ausgeprägte Anisotropie auf [4-8]. Zusätzlich wirken kapazitive Kopplungen zwischen den Fasern, die bei hohen Prüffrequenzen zum Tragen kommen. Die geringe Leitfähigkeit hat große Wirbelstrom Eindringtiefen zur Folge, so dass Volumenprüfungen möglich werden. Der nutzbare Frequenzbereich beginnt bei ca. 500 kHz und wird nach oben durch die in kommerziellen Wirbelstromgeräten verfügbaren 10-12 MHz begrenzt. Höhere Frequenzen sind wünschenswert aber bislang nur mit Netzwerkanalysatoren erreichbar.

Das Leistungspotential des Wirbelstromverfahrens kann mit dem Versuchsaufbau in Bild 4 abgeschätzt werden. Es zeigt das Ergebnis eines Versuches zur Ermittlung der Wirbelstromausbreitung in unidirektionalem CFK. Eine Sendespule unterhalb des Materials induziert im Laminat Ringspannungen, in deren Folge Leitungs- und Verschiebungsströme auftreten. Die Leitungsströme sind weitgehend an die Kohlefasern und deren Kontakte untereinander gebunden. Die Verschiebungsstromdichte hängt dagegen von der Prüffrequenz, den dielektrischen Eigenschaften der Matrix, dem Faserdurchmesser und dem Faserabstand ab und äußert sich als kapazitive Komponente im Messsignal. Da die Stromdichte in Faserrichtung größer ist als quer dazu, sollten sich verzerrte Wirbelstromfelder im Material einstellen, deren größte Ausdehnung lagenabhängig in Faserrichtung weist.

Im Versuchsaufbau scannt eine kleine Messspule den Wirkbereich des elektromagnetischen Feldes oberhalb der Probe ab. Von der ermittelten Feldverteilung wird die Feldvertei-

lung ohne Probe subtrahiert, so dass nur die durch das Material bewirkten Feldänderungen dargestellt werden. Links im Bild 4 ist das stark elliptisch verformte Feld zu erkennen, von dem auf die Wirbelstromverteilung geschlossen werden kann. Die Vektordarstellung zeigt die lokale Stromdichte und -richtung eines Probenausschnitts.

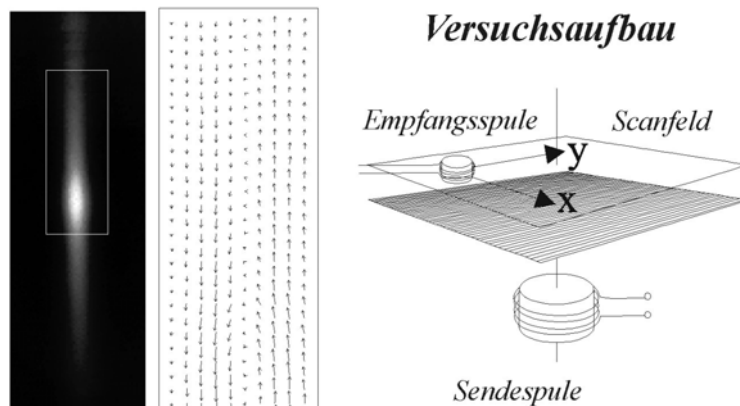


Bild 4: Rechts: Versuchsaufbau, links: Magnetfeld- und Wirbelstromverteilung in unidirektionalem CFK

Sollen die anisotropen elektrischen Eigenschaften zur Materialcharakterisierung herangezogen werden, müssen Sensoren mit richtungsempfindlichen Eigenschaften benutzt werden. Dazu bieten sich azentrische kolineare Sende-Empfangssysteme an, die z. B. als Halbtransmissionssensoren bekannt geworden sind [10].

Faserorientierung: Wird ein solcher Sensor über dem Laminat gedreht, zeigt sich die elektrische Anisotropie sehr deutlich im Messsignal. Eine Zuordnung zu den lokalen Eigenschaften des Laminates gelingt am besten über ein Polardiagramm [12]. Bild 5 stellt die Wirbelstromsignale auf unidirektionalem (links) und multidirektionalem (rechts) Material vor. Die Maxima der Signalschleifen korrelieren mit der Richtung der größten elektrischen Leitfähigkeit. Mit Hilfe spezieller Sensoren kann die Faserorientierung auf weniger als $0,5^\circ$ genau bestimmt werden.

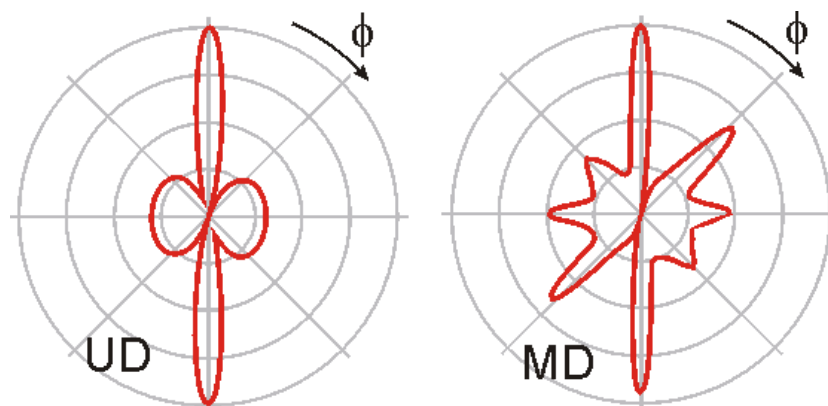


Bild 5: Polardiagramme kollinearer Wirbelstromsensoren zeigen die Anisotropie der Leitfähigkeit von unidirektionalem (UD) und multidirektionalem (MD) CFK.

Lokale Inhomogenitäten: Mit Hilfe eines Scansystems kann ein Wirbelstromsensor mäanderrförmig über den interessierenden Bauteilbereich bewegt werden. Das Messsignal wird in einem herkömmlichen Wirbelstromgerät aufbereitet. Eine Komponente der Punktbe-
wegung kann in einem Polarkoordinatensystem dargestellt werden. Anhand einer verrippten CFK-Platte aus CFK-Gewebe soll die Aussagekraft von Wirbelstrombildern demonstriert werden

[11]. Bild 6a) gibt einen Gesamtüberblick über das Bauteil und lässt einen Reparaturpatch erkennen. Die dunklen senkrecht verlaufenden Linien widerspiegeln die an der Rückseite angeordneten Stringer. Im Patchbereich sind die Stringer aufgrund der höheren Materialdicke schlechter zu erkennen. Die Teilbilder b) und c) zeigen höher aufgelöste Absolutsensorbilder der gekennzeichneten Ausschnitte. In beiden ist die Gewebestruktur des CFK-Materials erkennbar. In Teilbild b) wurde durch nachträgliche Phasenrotation das Stringersignal unterdrückt, so dass die kreisrunde Inhomogenität als Schädigung charakterisiert wird.

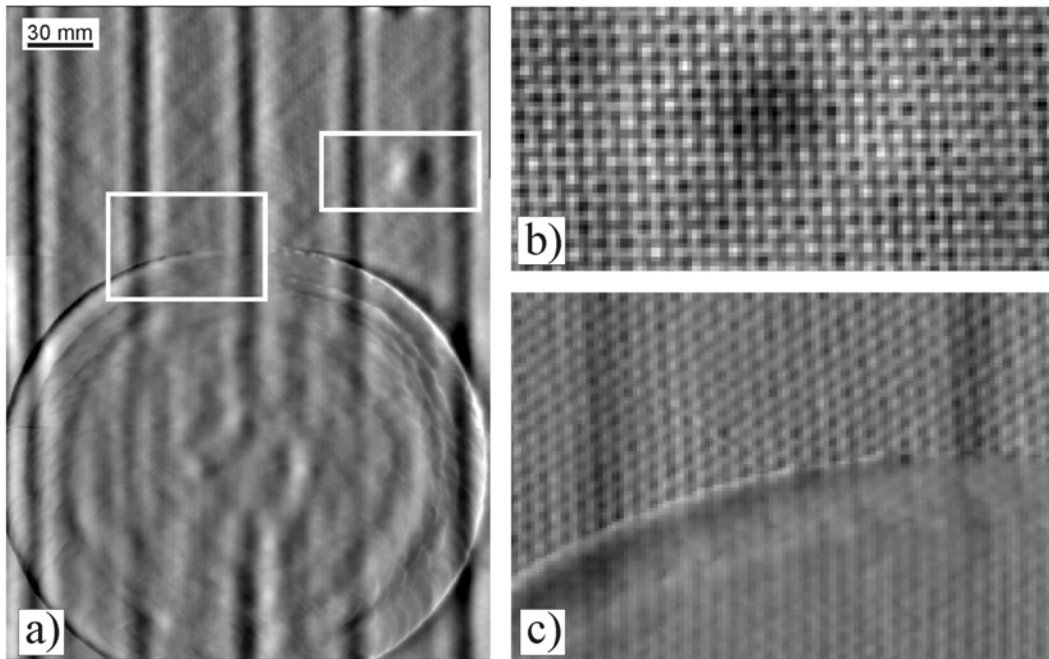


Bild 6: a) Wirbelstrombild einer CFK-Stringerplatte mit Reparaturpatch, b) rechter Ausschnitt mit nachträglicher Phasenrotation zur Unterdrückung der Stringersignale und c) Ausschnitt aus dem Randbereich des Patches

Die Untersuchungen zeigen, dass sich das Wirbelstromverfahren zur Bestimmung der lokalen Faserorientierung und zur Ermittlung lokaler Schwankungen des Fasergehaltes eignet. Weitere Fehlerarten, wie massenhafte Faserbrüche, wie sie infolge von Impactereignissen auftreten, oder Delaminationen, wenn diese zwischen Lagen unterschiedlicher Faserorientierung auftreten, sind wirbelstromtechnisch ebenfalls erfassbar [11].

3. Bildgebende Wirbelstromprüfung von Aluminiumguss

Bisherige Versuche, Wirbelstrombilder zu erzeugen, die ähnlich einem Röntgenbild Aussagen über die lokale Verteilung bestimmter physikalischer Eigenschaften zulassen, waren häufig an aufwändige Mechaniken zur Führung des Sensors gebunden. Dennoch wurden und werden solche Scanner eingesetzt, da sie hochqualitative Bilder liefern.

Als Beispiel für die hohe Aussagekraft eines Wirbelstrombildes zeigt Bild 7 einen zweilagigen Aluminiumtestkörper, in den diverse Bohrungen in die Deck- und Bodenlage eingebracht wurden. In der XY-Ebene sind alle Signalverläufe aufgezeichnet, die beim Scannen auftreten. Es gehört Wissen und Erfahrung dazu, um diese Signale richtig zu interpretieren. Das Wirbelstrombild dagegen gibt einen sofortigen Überblick über den Ort, Form und ungefähre Größe der Inhomogenität. Lediglich die Tiefeninformation, die im XY-Bild steckt, wird hier nicht wiedergegeben. Diesbezügliche Untersuchungen werden derzeit unternommen.

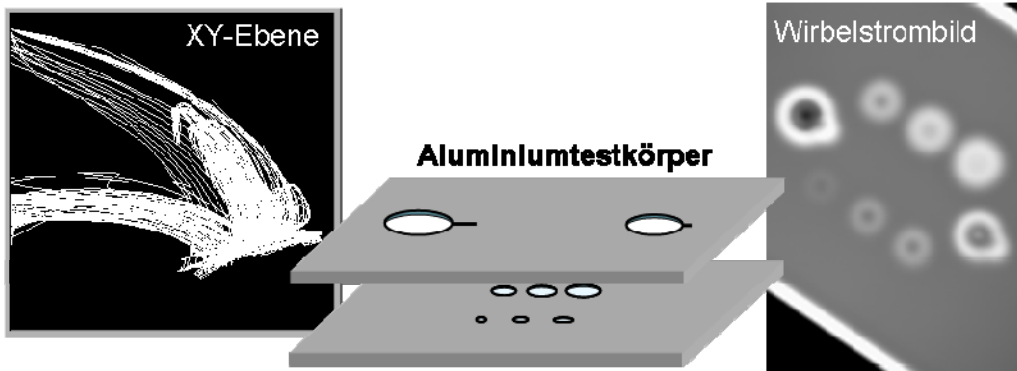


Bild 7: Wirbelstromsignale eines zweilagigen Aluminium-Testkörpers.

Die bei mechanischem Scannen entstehenden Bilder sind zwar von hoher Qualität, die Scanner jedoch meist sehr teuer, langsam und wenig flexibel. Um die aufwändige Scanmechanik zu umgehen, wurden Zeilen- und Flächensensoren entwickelt [12, 13].

Anstelle des Abtastens der Oberfläche mit einem einzigen Sensor werden mehrere Sensoren zu einem Sensorarray kombiniert, dessen Elemente durch eine geeignete Elektronik multiplex angesteuert werden [13]. Bild 8 gestattet einen Blick auf die Sensorzeilen. Zu erkennen sind die einzelnen Zylinderkernspulen und ihre Anordnung.



Bild 8: Wirbelstromsensorzeilen. Links: 32 Elemente, Breite 45 mm, rechts: 64 Elemente, Breite 61 mm

Bild 9 stellt Ergebnisse an einem Aluminiumdruckgussteil mit offenen und verdeckten Poren dar (Markierung). Die übrigen Bildelemente werden durch die Bauteilgeometrie verursacht.

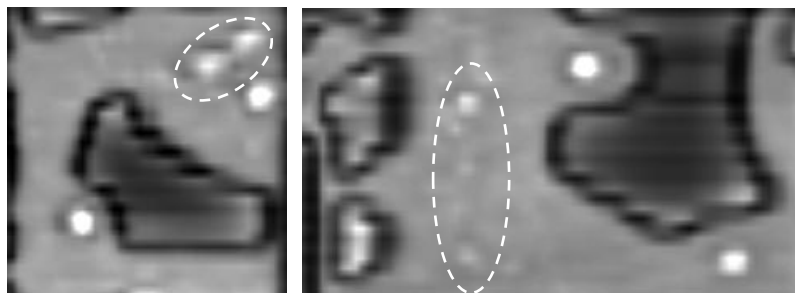


Bild 9: Wirbelstrombilder offener und verdeckter Poren in Aluminiumdruckguss

Anhand der bislang gezeigten Ergebnisse kann die Fehlerform und -größe bewertet werden, woraus sich Hinweise auf die Fehlerart ergeben. Die im Wirbelstromsignal enthaltene Phaseninformation über das Ligament (Dicke der Fehlerüberdeckung, Fehlertiefenlage) wird hier jedoch nicht dargestellt. Die Signale verschieden stark überdeckter Fehler lassen sich jedoch anhand der Amplitude und Phasenlage unterscheiden und bieten somit gute Voraussetzungen für eine Fehlerbewertung. Die Herstellung gekrümmter Sensorzeilen für konvexe Bauteilbereiche ist ebenfalls möglich.

4. Bildgebende Rohrrinnenprüfung

Zur Prüfung von Wärmetauschern werden Wirbelstrom-Innendurchlaufsensoren eingesetzt, die sehr empfindlich viele Fehlerarten detektieren und bewerten [14, 15]. Dem Vorteil einer hohen Prüfgeschwindigkeit steht der Nachteil der fehlenden Umfangsauflösung gegenüber. Falls diese erforderlich ist, können Arrays eingesetzt werden. Die Forschung konzentriert sich auf niederfrequente Arrays mit hoher Prüftiefe [16].

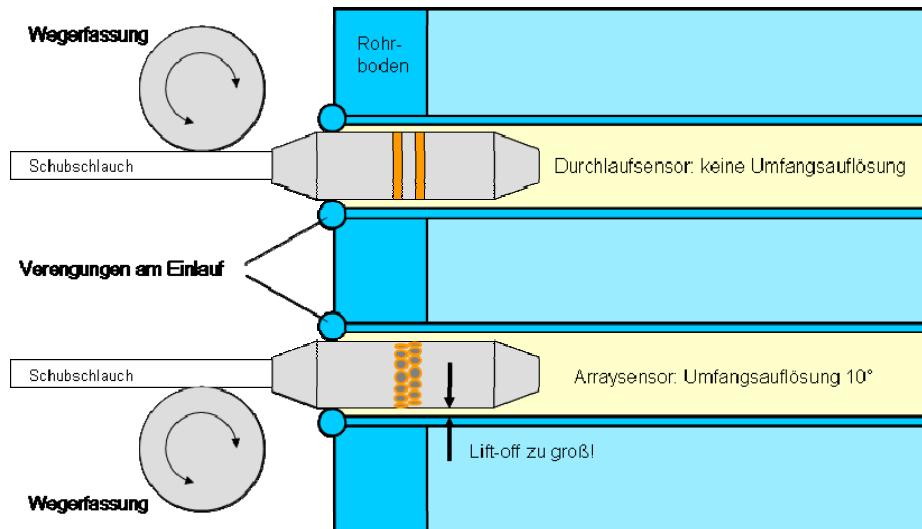


Bild 10: Durchlauf- bzw. Arraysensoren werden durch die Nadelrohre des Wärmetauschers bewegt

In herkömmlichen Systemen (Bild 10 oben) werden die Signale über den Schubschlauch in analoger Form zu einem separaten Wirbelstromgerät transportiert. Für Sensorarrays (Bild 10 unten) ist dieser Weg nicht gangbar, da die Signale vieler Sensoren entsprechend viele Leitungen im Schubschlauch beanspruchen würden. Aus diesem Grund werden die Signale von Sensorarrays im Sensorträger digitalisiert und multiplex über ein Netzkabel geführt.

Um das durchhängende Schweißgut am Einlauf der Nadelrohre zu überwinden, werden 4 federnde Prüfköpfe aus Titan mit jeweils 90° Abdeckung eingesetzt. Bild 11 zeigt einen der Köpfe und die entsprechende Signaldarstellung auf dem Bildschirm. Zusätzlich zum Array wurde ein größerer Schalenkernsensor zur Ermittlung der Wanddicke des Rohres eingebaut. Die Signale aller 4 Köpfe werden in einer XY-Ebene farbkodiert dargestellt.

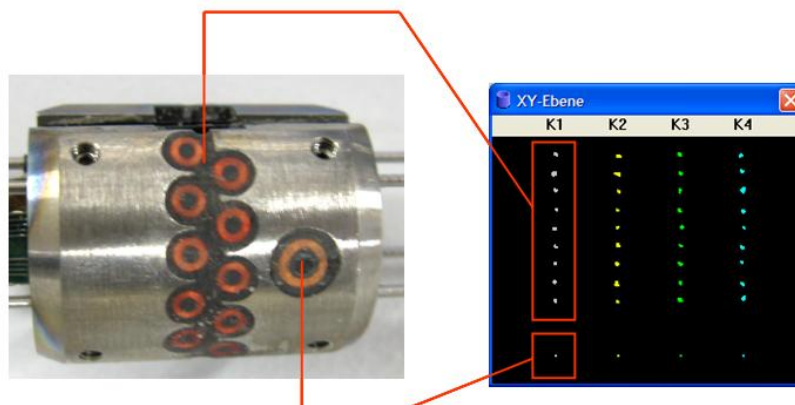


Bild 11: Links: Prüfkopf mit Sensorarray und Wandsensor. Rechts: Darstellung der Signale aller Sensoren.

5. Structural Health Monitoring

Die Zustandsüberwachung technischer Strukturen beschreitet mit der Entwicklung des „Structural Health Monitoring“ (SHM) neue Wege. Ziel ist es, eine permanente und automatische Überwachung des Zustandes von Strukturen mittels inhärenter Mittel zu gewährleisten [17, 18, 19]. Als Aufgaben stehen der Nachweis von Schädigungen und die Beanspruchungsüberwachung im Mittelpunkt. In die Struktur integrierte Sensoren (bzw. auch Aktoren) vermitteln die neue Funktionalität der Selbstüberwachung. Potentielle Anwendungsbereiche sind vielfältig und betreffen Luft- und Raumfahrt, Maschinenbau und Baukonstruktionen.

Die Funktionen, die ein SHM-System zu erfüllen hat, sind denen der konventionellen zerstörungsfreien Prüfung analog: Neben dem Defektnachweis sind Ortung, Bestimmung von Art und Größe sowie die Bewertung weitere Schritte. Wünschenswert ist die Bewertung im Sinne einer Ermittlung der Restlebensdauer. Unter den verschiedenen Möglichkeiten, eine derartige Überwachung zu realisieren, ist die Anwendung von Lamb-Wellen besonders attraktiv [17, 18, 19]. Lamb-Wellen breiten sich großflächig in dünnen plattenartigen Strukturen aus. Damit eignen sie sich insbesondere für Leichtbaukonstruktionen aus Faserverbundwerkstoffen. Ihre Interaktionen mit Defekten eröffnen gute Chancen einer Strukturüberwachung entsprechend des SHM.

Auf Lamb-Wellen basierende SHM-Systeme können passiv oder aktiv ausgeführt sein. Als passives System verfügt die Struktur über Sensoren, die durch das Schadensereignis selbst (z.B. Impactereignis) oder Defektentstehung bzw. -wachstum (z. B. Risswachstum) generierte Lamb-Wellensignale detektieren und auswerten können. Aktive Systeme erzeugen die diagnostischen Lamb-Wellensignale mittels zusätzlicher in die Struktur integrierter Aktoren. In beiden Fällen können piezoelektrische Wandler vorteilhaft als Empfänger und/oder Sender von Lamb-Wellen genutzt werden. Durch ein Netzwerk aus piezoelektrischen Wandlern lassen sich so komplexe Bauteile im Einsatzzustand überwachen.

Lamb-Wellen zeichnen sich durch multimodalen Charakter und Dispersion aus. Bei jeder Anregungsfrequenz sind prinzipiell mindestens zwei Moden ausbreitungsfähig. Bei Nutzung transients Signale wird durch die Dispersion eine zusätzliche Amplitudenminderung bewirkt, so dass die Auswahl dispersionsarmer Bereiche vorteilhaft ist. Die Kenntnis des Dispersionsverhaltens trägt weiterhin zur besseren Modenidentifikation bei und ist eine Entscheidungsgrundlage für die optimale Positionierung der Wandler im Netzwerk. Die experimentelle Bestimmung der Dispersionscharakteristik gestattet die Verifizierung berechneter Dispersionsdiagramme bzw. ermöglicht durch Inversion die genauere Ermittlung elastischer Materialparameter [20].

Mit Hilfe eines Scanning-Laser-Vibrometers werden die mechanischen Schwingungen und Wellen [21, 22] berührungslos aufgezeichnet. Durch punktweise Erfassung von Teilchengeschwindigkeit oder -weg kann die Gesamtheit der Wellenausbreitung an der Oberfläche eines Objektes dargestellt werden. Das Bild 12 zeigt den Aufbau des Messsystems.

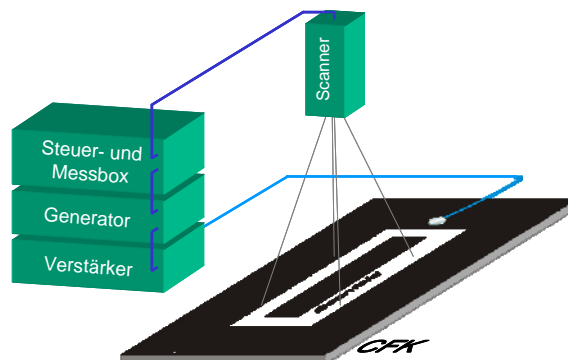


Bild 12 : Scanning-Laser-Vibrometer-Messsystem

Die Steuer- und Messbox realisiert die laservibrometrische Erfassung der Signale der vom Scanner punktweise abgetasteten Oberfläche. Der interne Generator erzeugt die Signalformen, mit denen der an der Oberfläche des zu untersuchenden Objektes applizierte Piezowandler versorgt wird. Als Wandler zur Anregung von Lamb-Wellen wurden kreisrunde piezokeramische Scheiben der Firma PI Ceramic verwendet. Ein Breitbandverstärker sorgte für die erforderliche Leistung der erzeugten Wellen.

Für die Aufnahme von Dispersionsdiagrammen wurde als Anregung ein breitbandiges Chirpsignal genutzt. Durch eine zweifache Fouriertransformation (zeitlich und räumlich) der Daten [23, 24] erhält man Dispersionsdiagramme der Wellenzahl k , die dann zu den typischen Darstellungen der Dispersionsdiagramme als Geschwindigkeit über der Frequenz umgeformt werden. Bild 13 zeigt schematisch den Weg von den aufgenommenen Wellenfeldern zum Dispersionsdiagramm.

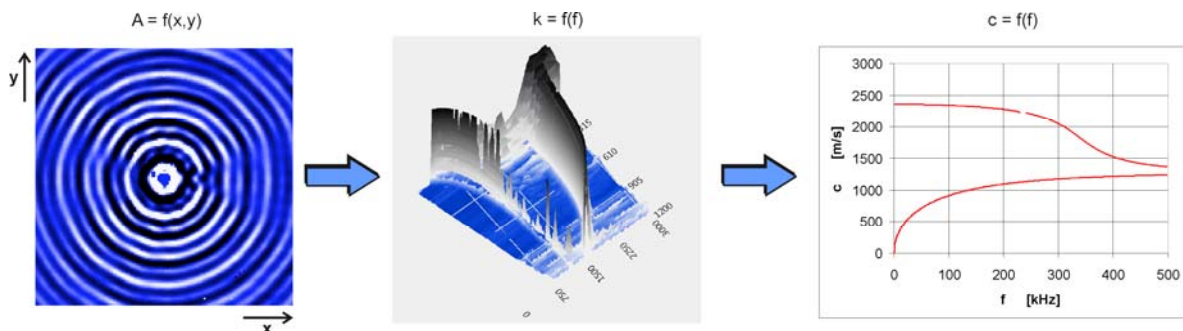


Bild 13: Verarbeitung von Wellenfeldern zu Dispersionsdiagrammen

Zum Nachweis von Impactschäden kann eine monofrequente Anregung genutzt werden. In Bild 14 ist zu erkennen, wie der vom Piezoaktor ausgehende symmetrische Wellenmode mit den geschädigten Bereichen interagiert. An den Schäden kommt es zur Modekonversion in den antisymmetrischen Wellenmode, der wegen seiner geringeren Ausbreitungsgeschwindigkeit kürzere Wellen hervorruft [25].

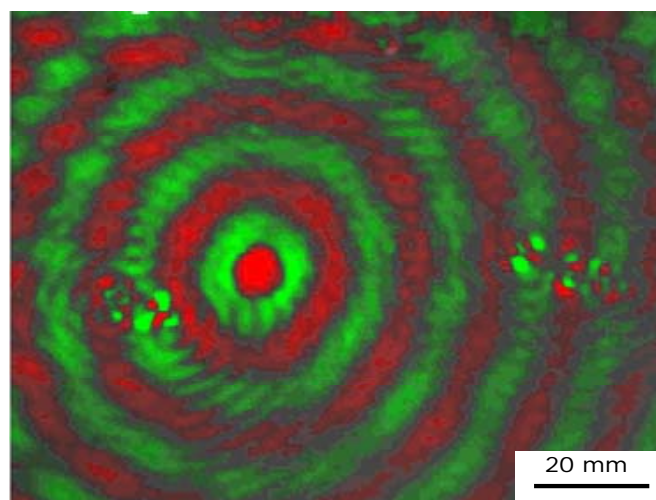


Bild 14: Wechselwirkung von Lamb-Wellen mit Impactschäden

Gegenwärtig werden diese Wechselwirkungen quantitativ beschrieben und Methoden zur Bestimmung von Schädigungsindikatoren gesucht.

Literatur

- [1] Feist, W. D.; Mook, G.; Taylor, S.; Söderberg, H.; Mikic, A.; Stepinski, T.: Non-destructive evaluation of manufacturing anomalies in aero-engine rotor disk. 16th World conference on non-destructive testing, Montreal, 30.8.-3.9.1994, Paper 45
- [2] Feist, W. D.; Mook, G.; Hinken, J. H.; Simonin, J.; Wrobel, H.: Electromagnetic detection and characterization of tungsten carbide inclusions in non-ferromagnetic alloys, *Advanced Engineering Materials* 7 (2005) 9, pp 841-846
- [3] Hinken, J.; Mook, G.; Feist, W.-D.; Wrobel, H.; Simonin, J.: Detektion und Charakterisierung ferromagnetischer Einschlüsse in nicht-ferromagnetischen Legierungen. DACH-Tagung der DGZfP, ÖGfZP und SGZP, Salzburg, 17.-19.5.2004, Bericht-CD, P26
- [4] Prakash, R.; Owston, C.N.: Eddy-current method for the determination of lay-up order in cross-plyed CFRP laminates, *Composites*, 7, (1976), S. 88-92
- [5] Vernon, S.N.: A Single-Sided Eddy Current Method to Measure Electrical Resistivity. *Mat. Eval.*, 46, (1988) S. 1581-1587
- [6] Valteau, A.R.: Eddy Current Nondestructive Testing of Graphite Composite Materials. *Mat. Eval.*, 48, (1990), S. 230-239
- [7] de Goeje, M.P.; Wapenaar, K.E.D.: Non-Destructive Inspection of Carbon Fibre-Reinforced Plastics Using Eddy Current Methods. *Composites*, 23, (1992) S. 147-157
- [8] Khandetskii, V.: Eddy Current Evaluation of Lamination Parameters in Carbon Fibres Composites. World Conf. on NDT, Sao Paulo, 1992, pp. 295-299
- [9] Mook, G.; Bauke, H.; Uchanin, V.: Wirbelstromprüfung mit hohen Eindringtiefen – Theorie und Praxis., DACH-Tagung der DGZfP, ÖGfZP und SGZP, 2000, Innsbruck, BB 73 Band1, S. 145-154
- [10] Lange, R. and Mook, G.: Structural Analysis of CFRP using Eddy-current Methods. *NDT&E int.*, 27 (1994), S. 241-248
- [11] Mook, G.; Lange, R.; Koeser O.: Non-destructive characterisation of carbon-fibre-reinforced plastics by means of eddy-currents. *Composites Science and Technology* 61 (6) (2001) S. 865-873
- [12] Scholz, A.: Sondenmatte - neuer Weg für die Oberflächenprüfung mit Wirbelstrom. Proc. DGZfP Annl. Conf. Trier May 1990. pp. 218-22.
- [13] Mook, G.: Randschichtprüfung mit bildgebenden Wirbelstromverfahren - Neue Wege zur Fehlerdetektion und -bewertung. DGZfP-Jahrestagung, Erfurt, 10.-12.5.2010, Mo.2.A.3
- [14] Sullivan, S.P.; Cecco, V.S.; Obrutsky, L.S.; Lakhan, J.R.; Park, A.H.: Validating Eddy Current Array Probes for Inspecting Steam Generator Tubes. *NDTnet* 1998 January, Vol 3 No.1
- [15] Benson, J.: Eddy Current Data Qualify Parameters for Inspection of Steam Generator Tubes. Vol. 4 Array Probes, EPRI-Report, October 2002
- [16] Mook, G.; Rost, P.; Michel, F.; Simonin, J.: Niederfrequente Wirbelstrom-Arrays mit Videotakt. DGZfP-Jahrestagung, Erfurt, 10.-12.5.2010, Mo.3.A.2
- [17] Boller, C.; Chang, F.-K.; Fujino, Y.: *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. Wiley & Sons, Chichester, 2009
- [18] Su, Z.; Ye, L.; Lu, Y.: Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review. *J. of Sound and Vibration*, Vol. 295, 2006, 753-780
- [19] Giurgiutiu, V.: *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors*. Academic Press, 2008
- [20] Pohl, J.; Szwieczek, A.; Hillger, W.; Mook, G.: Ermittlung der Dispersion von Lamb-Wellen zur Zustandsüberwachung in anisotropen Bauteilen. DGZfP-Jahrestagung, Erfurt, 10.-12.5.2010, Di.3.C
- [21] Köhler, B.: Dispersion Relations in Plate Structures Studied with a Scanning Laser Vibrometer. 9th European NDT Conference, ECNDT, Berlin, 2006, Mo.2.1.4
- [22] Staszewski, W.J.; Lee, B.; Mallet, K.; Scarpa, F.: Structural health monitoring using scanning laser vibrometry; I. Lamb wave sensing. *Smart Materials and Structures* 14, 2004 (2), 251-260
- [23] Alleyne, D.; Cawley, P.: A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals. *J. Acoust. Soc. Am.* Volume 89, Issue 3, 1991, 1159-1168
- [24] Li, J.; Liu, S.: The Application of Time-Frequency Transform in Mode Identification of Lamb Waves. 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct. 2008, Shanghai, China
- [25] Krüger, M.; Mook, G.: Schadensdetektion adaptiver CFK-Piezokeramik-Verbunde mit Hilfe der Scanning Laser Vibrometrie. DGZfP-Jahrestagung, Rostock 2005, Bericht-CD, paper 30