Mehrfrequenz-Wirbelstrom-Prüfsystem zur quantitativen Bestimmung der Schädigungstiefe durch Ermüdungsrisse in Flugzeugstrukturen

M. SCHULZE[*], D. JONEIT[*], H. HEUER[*], S. GOLDBACH[**], G. KAISER[**], R. FRANKE[**], M. NADLER[***], Ch. SIEWEK[***], W. GÖHLER[***], R. SELIGMANN[****]

[*]Fraunhofer IZFP, Maria-Reiche-Straße 2, 01109 Dresden
[**]IMA Dresden, Wilhelmine-Reichard-Ring 4, 01109 Dresden
[***]HTS GmbH, Am Glaswerg 6, 01640 Coswig
[****]DELTEC electronic GmbH, Heidelberger Straße 18, 01189 Dresden

Kurzfassung

Ziel des Vorhabens waren grundlegende Untersuchungen zur Entwicklung eines Mehrfrequenz-Wirbelstrom-Verfahrens mit zugehöriger Geräte- und Sensortechnik zur quantitativen Risstiefenmessung in Flugzeug-Komponenten aus Metall. Mit der zu entwickelnden Wirbelstrom-Prüftechnologie soll die Geometrie eines Risses, insbesondere für zur Oberfläche geneigte Risse erfassbar und damit eine korrekte Bewertung der Schädigungstiefe möglich sein.

Ein von der HTS GmbH Coswig aufgebauter Experimentator zur Erprobung wurde im Laufe des Projektes systematisch weiterentwickelt und optimiert. Vom Fraunhofer IZFP Dresden erfolgte die Entwicklung und Erprobung numerischer Algorithmen zur automatisierten Berechnung der Risstiefe sowie Kalibrierroutinen für Wirbelstromprüfgeräte anhand der aquirierten Mehrfrequenzmessdaten. Zum Aufbau der benötigten Arraysensoren mussten ein neues Spulendesign und die fertigungstechnische Umsetzung von DELTEC electronic GmbH Dresden entwickelt werden.

Dabei sollten folgende Aspekte realisiert werden:

- Erreichung einer Prüfaussagen-Sicherheit (u. a. der Detektionswahrscheinlichkeit) durch die Entwicklung anwendungsoptimierter Sensorik und neuer effizienter Signalverarbeitungstechniken.
- Reduktion der erforderlichen Prüfzeiten und folglich der Prüfkosten durch die Entwicklung von Array-Sensoren.
- Entwurf und Vorbereitung einer Gerätelösung für den industriellen Einsatz im „Prüfalltag“.

Im Rahmen des Projektes wurden von der IMA Dresden Probekörper mit definierten Anrissen (künstlich und natürlich) hergestellt und mit dem entwickelten Prüfsystem geprüft. An der

Lizenz: http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de

IMA Dresden wurde auf der Basis konventioneller Einfrequenzprüfungen ein Scansystem aufgebaut, um die Grundlagenuntersuchungen des Fraunhofer IZFP Dresden zu unterstützen und das entwickelte System zusätzlich zu metallographischen Untersuchungen zu verifizieren. Mit der Prüfmethodik soll es möglich sein, die Geometrie eines aufgefundenen Risses zu beschreiben, um so die Schräglage und deren Tiefe zu ermitteln. An der Entwicklung eines derartigen Algorithmus wird weiter gearbeitet. Die Validierung des Prüfsystems erfolgte an Proben mit Ermüdungsrissen.

Das Projekt wurde aus Mitteln der Europäischen Union und des Freistaates Sachsen durch die Sächsische Aufbaubank finanziert.

Fraunhofer IZFP
Jun. Prof. H. Heuer, Dr. D. Joneit, M. Schulze
Fraunhofer IZFP, Dresden
Martin.Schulze@izfp-d.fraunhofer.de

IMA DRESDEN
Prof. Franke, S. Goldbach, G. Kaiser
IMA GmbH, Dresden
Sabine.Goldbach@ima-dresden.de

P24
[Mo.4.A]

HTS
M. Nadler, Ch. Siewek, Dr. W. Göhler
HTS GmbH, Coswig
Michael.Nadler@htsdd.de

DELTEC electronic
R. Seligmann
DELTEC GmbH, Dresden
Seligmann@deltec.de

DACH Jahrestagung 2012, Graz
DGZiP · DGZfP · SSNT ASENDI SGZP

Wirbelstrom-Prüfsystem zur quantitativen Bestimmung der Schädigungstiefe durch Ermüdungsrisse in Flugzeugstrukturen

SAB-Fördernummer: 13158...61/2223

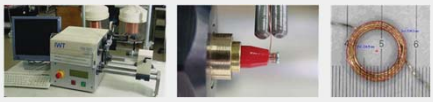
Zielstellung

Ziel des Vorhabens waren grundlegende Untersuchungen zur Entwicklung eines Mehrfrequenz-Wirbelstrom-Verfahrens mit zugehöriger Geräte- und Sensortechnik zur quantitativen Risstiefenmessung in Flugzeugkomponenten aus Metall. Mit der zu entwickelnden Wirbelstrom-Prüftechnologie soll die Geometrie eines Risses, insbesondere für zur Oberfläche geneigte Risse erfassbar und damit eine korrekte Bewertung der Schädigungstiefe möglich sein.

Das Projekt wurde aus Mitteln der Europäischen Union und des Freistaates Sachsen vertreten durch die Sächsische Aufbaubank (SAB) finanziert.

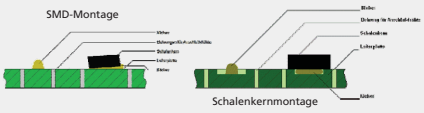
Sensorik

Zur schnellen Datenaufnahme wurden Sensorarrays entwickelt. Die elektrischen Parameter wurden aus entsprechenden Einzelsensorkonfigurationen übernommen.

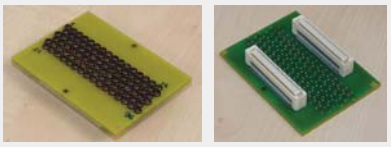


Backlackdraht wird mittels einer speziell für kleine Spulen mit dünnen Drähten optimierte Tischwickelmaschine IWT F020 gefertigt.

Die mittlere Spulenindukivität mit Ferritkernhälfte Typ P3,3x2,6 (K1) beträgt 8µH



Das Prinzip der Standard SMD-Bestückung konnte aufgrund von Planaritätsanforderungen nicht angewandt werden. Kavitäten für den Kleber stellen sicher, dass die Schalenkernhälfte planar bestückt werden kann.

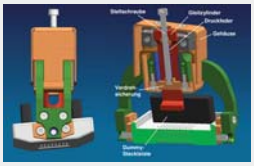


Links: Bestücktes Wirbelstromarray mit 96 Einzelspulen

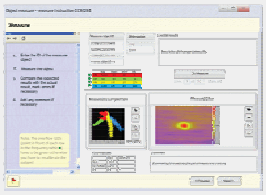
Rechts: Rückseite der 2 lagigen Leiterplatte

Maße: 60x45mm

Sensormanipulatorik und Prüfsystem



- Sensorhalterung mit integrierter mechanischer Höhen- und Neigungsanpassung, die eine tangentiale Führung mit minimalem Lift-Off garantiert.
- ist als universelles Modul ausgelegt, welches alternativ auch an anderen Prüfanlagen sowie mit verschiedenen Sensortypen betrieben werden kann

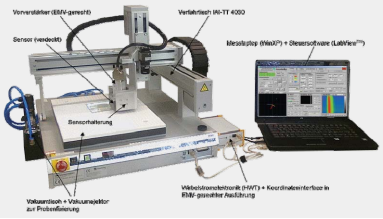


- Im Rahmen des Projekts wurde ein übergreifenden Softwarekonzept für das Wirbelstromprüfsystem erarbeitet.
- Pflichtenheft für die Bedienung und Steuerung
- Konzept zur Integration der Algorithmen zur automatischen Risprüfung mit Auswertung, Anzeige und Ausgabe
- Kalibrierroutine > Messanweisung > Messung > Archivierung und Report > Explorer für vorhergegangene Messungen

- Labordemonstrator zur Evaluation des Verfahrens an planaren Proben
- Wahlweise mit Einzelsensor oder Wirbelstromarray nutzbar
- Laborsoftware zur einfachen Parametrierung
- Auch als Universalwirbelstromgerät zu verwenden

Technische Daten:

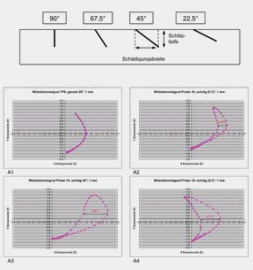
Frequenzbereich	100 kHz - 1000 kHz
Anzahl Frequenzen	1 - 4
AC Verstärkung	0 - 44,5 dB
Abtastrate	2000 Samples/s
Max. Scanfläche	200 x 200 mm
Min. Schrittweite	0,025 mm
Fahrgeschwindigkeit	300 mm/s
Topographiemessung (Höhe)	100 mm (axial), 50 mm (gepaart)
Wirbelstromsensoren	on the Measurepfade eingesetzt.
Videokamera	1 Megapixel



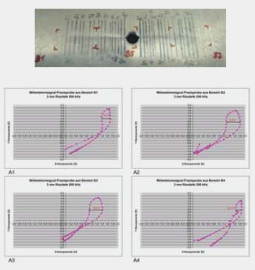
Voruntersuchungen mit Einzelfrequenzen

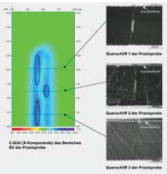
Es wurden Probekörper mit definierten Anrissen (künstlich und natürlich) hergestellt und auf der Basis konventioneller Einfrequenzprüfungen ein Scansystem aufgebaut, um die Grundlagenuntersuchungen des Fraunhofer IZFP Dresden zu unterstützen und das entwickelte System zusätzlich zu den metallografischen Untersuchungen zu verifizieren.

Proben mit Erodierschnitten mit unterschiedlichen Risslagen

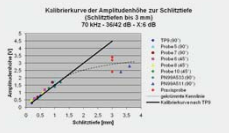


Probe mit natürlichen Ermüdungsrissen





Aus den Wirbelstromuntersuchungen von Rissen in Aluminiumblechen geht hervor, dass die Parameter „Amplitude", „Phasenwinkel" und der neu gefundene Parameter „Ausbauchung" als Messgrößen für eine Bewertung der Rissausbreitungsrichtung in das Materialinnere und zur Tiefenbestimmung von Rissen herangezogen werden können.
Die Auswertung über die Ausbauchung der WS-Signale lässt sich für eine Tiefenbestimmung schräger Schlitze verwenden.



Mit dem entwickelten Aufzeichnungsverfahren lässt sich zusätzlich die Risswachstumsrichtung schräger Risse in das Material ermitteln. Dies ist durch unterschiedliches Abfahren der WS-Signalschleife eines schrägen Risses zu erkennen. Die andere Variante eine Risschräglage festzustellen, ist die Signalsymmetrie in den C-Scans.

Die Untersuchungen zeigen auch die Grenzen der Einfrequenztechnik auf. Mit nur einer Frequenz ist es schwierig, gleichzeitig die erforderlichen Eindringtiefen der Wirbelströme und eine auswertbare Signaldarstellung zu gewährleisten. Für die Vergleichbarkeit der WS-Signale unterschiedlicher Schlitztiefen ist die Verwendung gleicher Parameter wie Frequenz, Verstärkung und Phase wichtig. Es erweist sich als schwierig, mit den gleichen Parametern unterschiedliche Schlitztiefen zu erfassen und noch als ein eindeutiges Fehlersignal anzuzeigen. Die Untersuchungen haben bei der Einfrequenztechnik zwar gezeigt, dass es möglich ist die Risslage bzw. die Schräge des Risses zu bestimmen, jedoch ist dies nur bis zu der zur Prüffrequenz gehörigen WS-Eindringtiefe möglich.

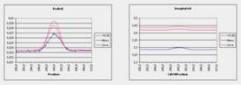
Algorithmen und Multiplexerelektronik

Modellierung der Prüflösung

Grundlage für die Modellierung sind Simulationsrechnungen der Prüfaufgabe. Sie erfolgen mit den Programmen VICID und CIVA. Die Simulationsergebnisse müssen durch Messergebnisse validiert werden.
Die Ergebnisse von Simulationsrechnungen können aber nicht direkt mit Messergebnissen verglichen werden.

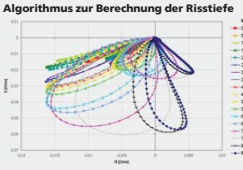
Eliminierte Störgrößen um Vergleichbarkeit herzustellen:

- Verfälschter Eingangswiderstand durch transformatorische Kopplung
- Laufzeitfehler durch Kabellänge (Phasen- und Frequenzangermittlung)
- Korrektur der Phasenverschiebung zwischen Spulenstrom und Spannung
- Korrektur der Einflüsse des Skineffektes



Die Abbildungen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung von Simulation und Messung.
f=500kHz, Scan über Riss 0,2mm breit, 1mm tief, 90° Risseinlauf

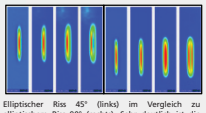
Algorithmus zur Berechnung der Risstiefe



- Die Abbildung zeigt die Änderung von Real- und Imaginärteil (Simulation) beim Scan mit 200kHz über einen Riss mit 0,2mm Breite und 1mm Tiefe (VICID)
- Aus Phasenlage und Ausbauchung müsste der Risswinkel gut bestimmt werden können. Da einerseits die Risstiefe konstant 1mm war, andererseits die Schleifenmaxima sehr unterschiedlich sind, kann man schlussfolgern, dass die Risstiefe nur winkelabhängig ermittelt werden kann.

Ansatz für Algorithmus:

- Aus Phasenwinkel und Ausbauchung den Risswinkel bestimmen.
- Danach winkelabhängig aus dem Schleifenmaximum die Risstiefe ermitteln.
- Mehrdeutigkeiten werden durch die Nutzung von mehreren Frequenzen eliminiert.



Elliptischer Riss 45° (links) im Vergleich zu elliptischem Riss 90° (rechts). Sehr deutlich ist die Wirkung der „Bauchigkeit" bei 166,50° und 179,75° am 45° Riss zu sehen.

Multiplexerelektronik

Bis zu 6 Multiplexer können übereinander gestapelt aufgebaut werden und ermöglichen so den universellen Einsatz an beliebig konfigurierten Wirbelstromarrays.
Die Multiplexer arbeiten nach dem Master-Slave Prinzip. Via RS232 können beliebige Sende-Empfangskombinationen durchgesteuert werden und somit auch parallel zur Verfahrrichtung liegende Risse detektiert werden.

Das Multiplexerprinzip wurde an einem Vormuster der frei parametrierbaren Sensorzeile mit 16 statisch angeordneten Sensorpaaren demonstriert. Hierbei musste besonderes Augenmaß auf die Kalibrierung der einzelnen Sensoren zueinander gelegt werden, da selbst geringste Induktivitäts- sowie Höhenvariationen einen nicht zu vernachlässigbaren Offset verursachen.

Zusammenfassung und Ausblick

Das entwickelte Prüfsystem kann in weitere Anwendungsbereiche überführt und dort vermarktet werden, z.B. im Service-Bereich der Luftfahrtindustrie zur Minimierung des Wartungs- und Reparaturaufwandes. Der Markt für eine quantifizierbare Risstiefenbestimmung wird als sehr groß eingeschätzt, so dass die Absicherung des wirtschaftlichen Erfolgs des Projektes auf eine breite Basis gestellt wird. Gleichzeitig kann die Prüfmethode durch die HTS GmbH Dresden und durch das Fraunhofer IZFP als Prüfverfahren für industrielle Anwendungen angeboten und an ähnliche Prüfaufgaben – auch in anderen Applikationsfeldern wie Fahrzeugbau, Anlagenbau, Energietechnik – adaptiert werden.