

EddyTherm - ein Rissprüfverfahren vor der Serienreife

Günter Zenzinger, Joachim Bamberg und Melanie Dumm, MTU Aero Engines München

Einführung

In vielen Industriezweigen ist die Rissprüfung eine der wichtigsten zerstörungsfreien Prüfmethoden, so auch bei Triebwerksbauteilen, welche oft komplexe Geometrien aufweisen, thermisch und mechanisch hochbelastet sind und sehr hohen Sicherheitsanforderungen genügen müssen. Es besteht daher zunehmend ein Bedarf an leistungsfähigen, wirtschaftlichen Rissprüfverfahren.

Hierbei hat in den letzten Jahren die Thermografie immer mehr an Bedeutung gewonnen. Eine gezielte Weiterentwicklung und die Kombination mit der Wirbelstromprüfung führte zu dem Verfahren „EddyTherm“.

In Ausgabe 68 Dezember 1999 dieser Zeitschrift wurden Grundlagen und Vorteile des EddyTherm-Verfahrens vorgestellt und erste Ergebnisse diskutiert. Inzwischen konnte das Verfahren durch schnellere PC-Systeme, verbesserte Hochfrequenzgeneratoren und neue optimierte Auswertalgorithmen weiterentwickelt werden, so dass heute eine automatisierte Serienprüfung möglich wird.

Bisher wird die induktive Erwärmung hauptsächlich zur Werkstoffbearbeitung, zum Beispiel beim Härten oder Induktionsschweißen, genutzt. Die dabei eingesetzten Hochfrequenzgeneratoren erzeugen über die Induktionsspulen für relativ lange Zeiträume magnetische Wechselfelder, die den Stromfluss und damit eine starke Erwärmung der Bauteile hervorrufen. Die Idee bei EddyTherm ist, dass mit kurzen Hochfrequenzimpulsen zwischen 50 und 200ms nur eine geringe, definierte Gesamterwärmung des Bauteils erzeugt wird. Risse stören hierbei den Verlauf der induzierten Ströme und verändern dadurch die Temperaturverteilung an der Bauteiloberfläche, so dass sie mit Hilfe einer geeigneten Thermografiekamera sichtbar gemacht werden können. Abb. 1 zeigt einen Probekörper mit Riss. Oben ist schematisch der Stromverlauf und dessen Änderung an der Fehlstelle dargestellt. Unten erkennt man die resultierende Temperaturerhöhung an den Rissspitzen sowie entsprechende kältere Bereiche an den Rissflanken.

Ein wichtiger Aspekt, der bei allen induktiven Verfahren eine Rolle spielt, ist der so genannte Skin-Effekt. Abhängig

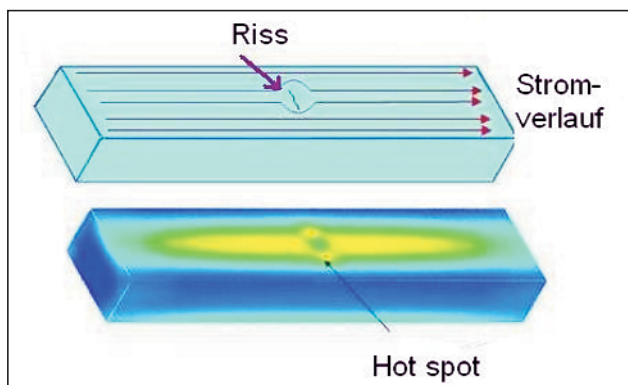


Abb.1: Verfahrensprinzip EddyTherm

von der Frequenz des Magnetfeldes und der relativen Permeabilität des geprüften Werkstoffes ändert sich die Eindringtiefe des induzierten Stromes in das Material:

Eindringtiefe	$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$
Kreisfrequenz	$\omega = 2\pi f$
Permeabilität	$\mu = \mu_0\mu_r$
Spez. Widerstand	ρ

Für den Nachweis kleiner Risse ist eine geringe Eindringtiefe von Vorteil, da dann ein großer Anteil des induzierten Stroms den Riss umfließt und die Stromdichteänderungen und damit die Temperaturunterschiede maximal werden. Einen starken Einfluss hat hier auch die Permeabilitätszahl (μ_r) des Werkstoffes. Bei paramagnetischen Materialien ist diese praktisch 1, während bei ferromagnetischen Werkstoffen Werte von 50 - 80000 erreicht werden.

Bei einer Anregungsfrequenz von 100 kHz beträgt die Strom-Eindringtiefe für eine paramagnetische Titanlegierung ca. 1,0 mm, gegenüber 0,1 mm für ferromagnetisches Eisen.

FEM-Simulation

Durch den Bearbeitungsprozess Schleifen können in den Flanken der Füße von Turbinenschaufeln (Abb. 2) Risse entstehen, die dann sicher detektiert werden müssen. Wegen der komplexen Geometrie dieser Strukturen bietet sich zur Optimierung der Prüfkörper-Spulenordnung die FEM-Simulation des induktiven Erwärmungsprozesses an, hier am Beispiel einer CF6-Turbinenschaufel vorgestellt.

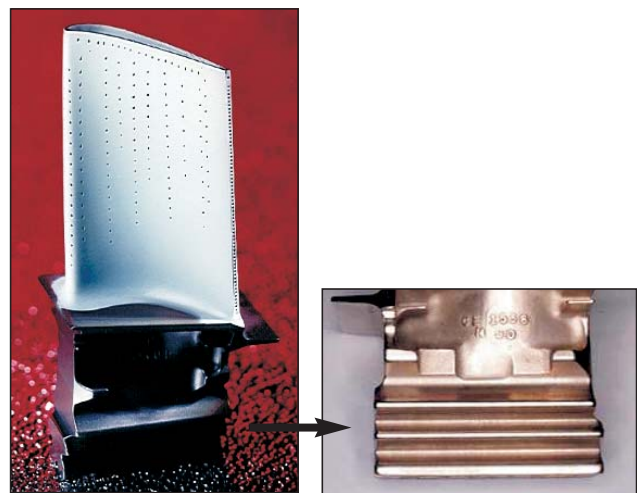


Abb.2: CF6-Turbinenschaufel mit Detailansicht vom Schaufelfuß

Die Vernetzung der Prüfanordnung und das berechnete Temperatursignal an einem Riss mit einer Gesamtlänge von 2 mm sind in Abb. 3 dargestellt. Zusätzlich zur Vernetzung der Volumina von Turbinenschaufel und Spule wurde für die korrekte Beschreibung der umgebenden Luft ein kugelförmiges Volumen modelliert und vernetzt.

Deutlich ist rechts das veränderte Temperaturprofil in der Umgebung des Risses zu erkennen.

Prüfaufbau:

Die zu untersuchenden Bauteile befinden sich innerhalb einer Induktionsspule, die über einen Trafo mit dem Hochfrequenzgenerator verbunden ist. Die Kamera hat zwischen den Spulenwindungen freien Blick auf die Bauteiloberfläche (Abb. 4).

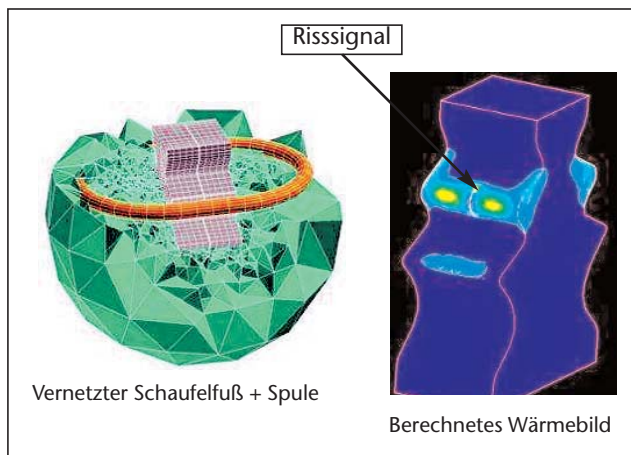


Abb. 3: FEM-Simulation Turbinenschaufelfuß

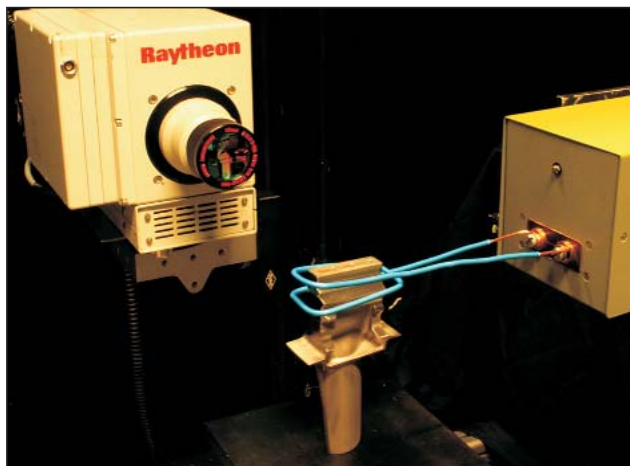


Abb 4: Prüfaufbau mit IR-Kamera, Turbinenschaufel und Anpassungstrafo mit Spule (blau)

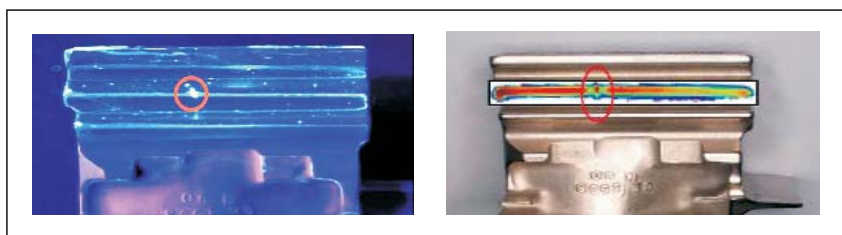


Abb 5: FPI-Bild Schaufelfuß mit Riss (links) EddyTherm-Bild (rechts)

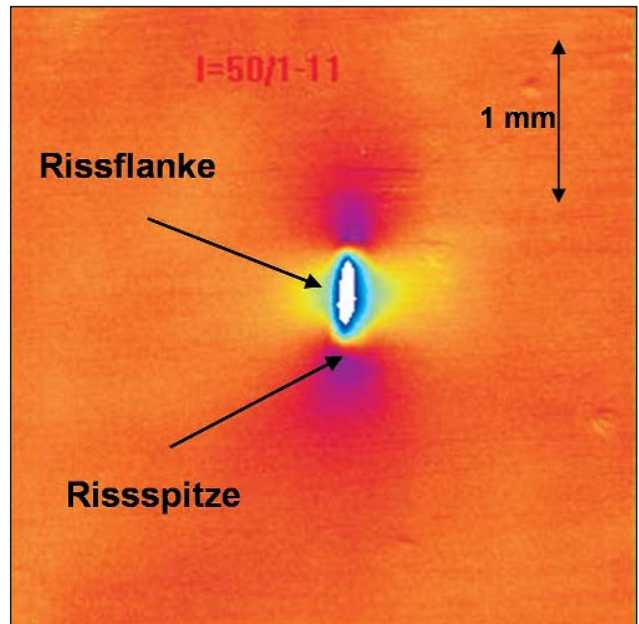


Abb 6: EddyTherm-Bild erodierter Riss Länge 0,4 mm / Tiefe 0,2 mm

Über einen PC werden sowohl HF-Generator als auch Kamera gesteuert. Die Auswertung der Thermografie-Bildsequenzen erfolgt mittels einer geeigneten Bildverarbeitungssoftware. Die Bereitstellung der Bilddaten in der Software erfolgt nahezu in Echtzeit, so dass die Zeit für eine Prüfung nur wenige Sekunden in Anspruch nimmt. Alle hier vorgestellten Ergebnisse wurden an Proben oder Bauteilen ohne Schwärzung durchgeführt.

Das Prüfergebn am Fuß einer Turbinenschaufel mit Riss ist dem der Farbeindringprüfung gegenüber gestellt (Abb. 5). Mit beiden Verfahren ist der Riss eindeutig nachweisbar. Zur besseren Zuordnung wurde das EddyTherm-Bild über ein Foto des Schaufelfußes projiziert.

Fehlernachweisgrenzen

Ein wichtiges Kriterium bei der Rissprüfung sind die minimal detektierbaren Rissgrößen. Für die Optimierung des Verfahrens wurden deshalb Proben mit künstlichen (erodierten) und realen Rissen (durch zyklische mechanische Belastung) hergestellt. Die Größe des kleinsten erodierten Risses beträgt 0,4mm Länge und 0,2 mm Tiefe. Auf Grund des stark veränderten Emissionskoeffizienten in den erodierten Bereichen - kleine Spalte wirken strahlungstechnisch wie kleine Hohlraumstrahler - muss man sich bei der Auswertung der Wärmebilder auf die Rissflanken und Risspitzen beschränken. Abbildung 6 zeigt das Ergebnisbild des kleinsten Risses. Neben dem Emissionssignal des Spaltes erkennt man deutlich, dass an den Spaltenden das Probenmaterial stärker erwärmt ist als im übrigen Bereich. Die EddyTherm-typische Stromdichteerhöhung an den Risspitzen ist also vorhanden - ein Riss dieser Größe ist damit nachweisbar.

Die Aufnahme wurde mit einer geometrisch hochauflösenden Optik gemacht. Die Bildgröße beträgt ca. 3,5 mm x 3,5 mm. Mit dieser Auflösung ist eine wirtschaftliche Prüfung von größeren Bereichen nicht durchführbar.

Es wurde deshalb eine weitere Probe mit einer Bildgröße von ca. 60 mm x 60 mm geprüft.

In diese Titanprobe wurden 2 künstliche Risse mit den Abmessungen: Länge x Tiefe = 0,9 x 0,4 und 0,4 x 0,2 mm erodiert. Auch bei diesen Aufnahmebedingungen können die typischen EddyTherm-Signale der Risse erkannt werden (Abb. 7).

Die Rissanzeigen werden im EddyTherm-Bild gegenüber den tatsächlichen Rissabmessungen deutlich vergrößert dargestellt, da die Signale (Hot-Spot an der Risspitze, Cold-Spot an der Rissflanke) außerhalb des eigentlichen Risses liegen. Verstärkt wird dieser Effekt durch die Wärmequerleitung im metallischen Werkstoff.

Verdeckte Risse

Der sichere Nachweis von verdeckten, durch Bearbeitungsvorgänge zugeschmierte Risse, oder Risse unter Beschichtungen ist heute oft nicht oder nur sehr schwierig möglich.

Die bei MTU eingesetzten HF-Systeme arbeiten mit Anregungsfrequenzen von 100 kHz bis ca. 550 kHz. Dadurch werden relativ große Strom-Eindringtiefen von ca. 1 mm erreicht. Deshalb sollte mit diesen Systemen ein Nachweis von verdeckten Rissen auch unter leitfähigem Material sehr gut möglich sein.

Es wurde eine Vierpunktbiegeprobe mit realem Riss zunächst vor und dann nach einer Schleifbearbeitung untersucht. Durch das Schleifen wurde der Riss zugeschmiert und war dadurch für die Farbeindringprüfung nicht mehr

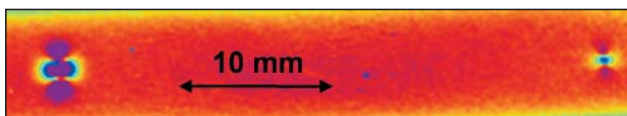


Abb 7: Titanprobe mit künstlichen Rissen

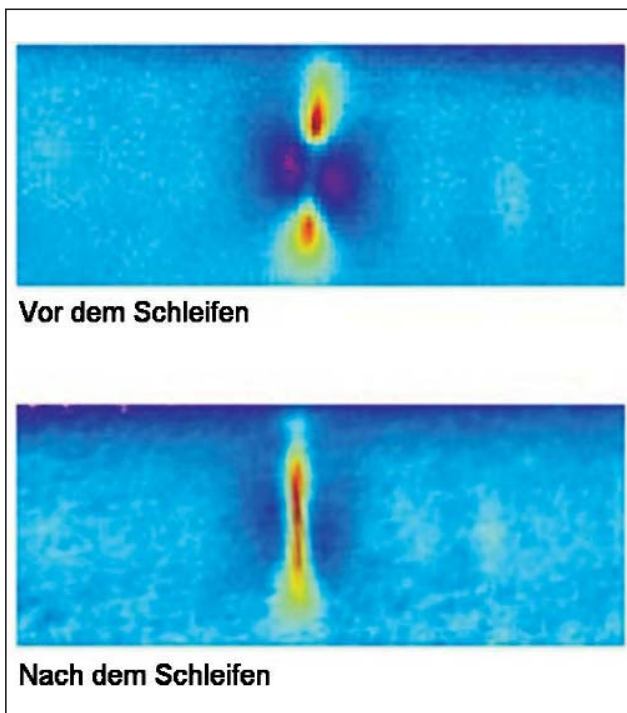


Abb. 8: Riss in Vierpunktbiegeprobe



Abb.9: Gasturbinenschaufel, Markierung entspricht Prüfbereich

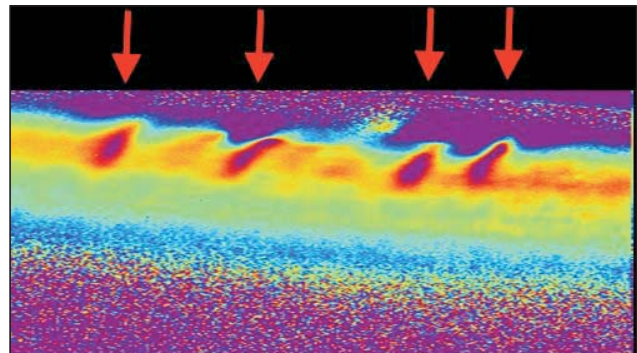


Abb10: EddyTherm-Bild Gasturbinenschaufel mit 4 Rissanzeigen

detektierbar. Abb. 8 oben zeigt das bekannte EddyTherm-Signal des noch offenen Risses. Im unteren Bild ist jedoch die komplette Risslänge zu erkennen. Hier fließt der Strom durch das aufgeschmierte Material über den Riss hinweg und verursacht somit eine gleichmäßige Erwärmung über die Risslänge. Der Riss bleibt für EddyTherm somit nachweisbar.

Eine erste reale Prüfaufgabe für das Verfahren EddyTherm war die Untersuchung einer beschichteten Gasturbinenschaufel. Beim Plasmaspritzen der metallischen Korrosionsschutzschicht war ein Fehler aufgetreten, so dass der Brenner die Schaufel lokal stärker erwärmte. Es war nun zu untersuchen, ob an dieser Stelle Risse im Grundmaterial aufgetreten waren. Da die Schicht unversehrt war, konnte mit der Farbeindringtechnik nicht geprüft werden. Aufgrund von hoher Rauigkeit, großer Schichtdicke von 0,2 mm, und stark gekrümmter Bauteilgeometrie war auch mit einer Wirbelstromtastsonde keine zuverlässige Prüfung möglich.

Mit EddyTherm wurde eine Anregungsfrequenz von 200 kHz und eine Pulsdauer von 100 ms gewählt. Das EddyTherm-Bild (Abb. 10) zeigt 4 deutliche Anzeigen im fraglichen Bereich.

Zur Überprüfung der EddyTherm-Ergebnisse wurde die Schicht im Prüfbereich entfernt und zur Sichtbarmachung die Schaufeloberfläche angeätzt. Alle Anzeigen des EddyTherm-Verfahrens wurden als Risse im Grundwerkstoff bestätigt (Abb 11).

Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass das thermografische Rissprüfverfahren EddyTherm ein erhebliches Anwendungspotenzial hat.

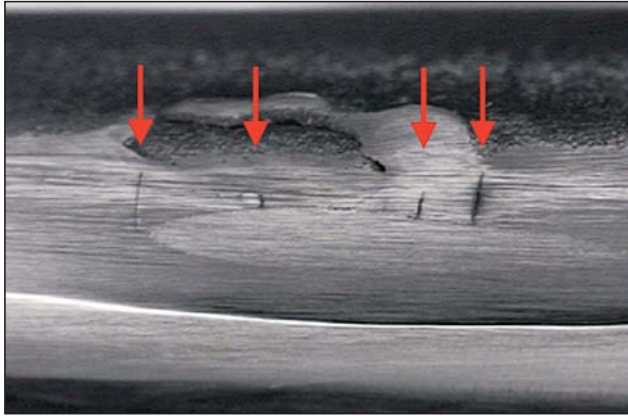


Abb. 11: Foto der Rissanzeigen

Die aufgezeigte Fehlernachweisgrenze liegt in der gleichen Größenordnung (Risslänge x Tiefe = 0,4 x 0,12 mm) wie bei den bekannten Verfahren. Alle Prüfungen wurden an ungeschwärzten, metallisch blanken oder teilweise sogar leicht verschmutzten Bauteilen durchgeführt. Das bedeutet, dass für EddyTherm keine aufwendige Vorbehandlung oder Reinigung notwendig ist. Dies kann vor allem bei der Prüfung im Rahmen von Inspektions- oder Wartungsarbeiten ein entscheidender wirtschaftlicher Aspekt sein.

Ein weiterer wichtiger Vorteil ist der Nachweis von verdeckten Rissen bzw. von Rissen unter Beschichtungen und zwar nahezu unabhängig von der Oberflächenstruktur. Dies stellt einen erheblichen Fortschritt der ZfP-Technik dar.

Als Beispiel sei hier die Prüfung von gelaufenen Triebwerksschaufeln genannt. Teilweise werden diese im Rahmen der Inspektion entschichtet, rissgeprüft und wiederbeschichtet. Die hierbei entstehenden Kosten könnten durch den Einsatz von EddyTherm erheblich reduziert werden.

Weiterhin besteht die Möglichkeit zur Automatisierung. Sowohl bei der Durchführung, als auch bei der Auswertung von Prüfungen kann EddyTherm schon in naher Zukunft hinsichtlich Einsatzfähigkeit, Schnelligkeit und Zuverlässigkeit ein interessantes Rissprüfverfahren im Serieneinsatz sein.

Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Förderprojekts "KombiTherm" bei MTU Aero Engines erzielt.

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Rahmenkonzeptes „Forschung für die Produktion von morgen“, Förderkennzeichen 02PD2200, gefördert und vom Projektträger Produktion und Fertigungstechnologien, Forschungszentrum Karlsruhe betreut.

Die Autoren

Günter Zenzinger Dipl.-Ing. (FH), Jahrgang 1962, Abitur, Studium der Oberflächentechnik und Werkstoffkunde an der FH Aalen, seit 1987 bei MTU Aero Engines in München im Center Entwicklung zuständig für ZfP-Technik, Thermografie Prüf- und Messverfahren

Joachim Bamberg, Dr. rer. nat., Jahrgang 1957, Abitur, Studium der technischen Physik an der Universität Saarbrücken, seit 1988 bei MTU Aero Engines zuständig für ZfP-Technik, Wirbelstrom, Ultraschall, Neue Prüfverfahren

Melanie Dumm, Jahrgang 1980, Abitur, Maschinenbaustudium an der TU München, derzeit Diplomandin bei MTU Aero Engines im Fachbereich Thermografieprüftechnik



Gute Gründe, DGZfP-Mitglied zu werden:

- Sie sind immer aktuell informiert.
- Sie sparen Geld durch Ermäßigungen, z. B. bei Kursus- und Tagungsteilnahmen und beim Erwerb von DGZfP-Publikationen.
- Sie können etwas bewegen: Ihr Fachwissen wird gefordert bei aktiver Mitarbeit in unseren Ausschüssen und in den DGZfP-Arbeitskreisen.
- Der regelmäßige Bezug der ZfP-Zeitung ist im Mitgliederbeitrag enthalten.
- Wir veröffentlichen Ihre in der ZfP-Zeitung geschaltete Stellenanzeige auch im Internet.

Ein weiterer Grund: Die DGZfP vertritt die Interessen der in der ZfP beschäftigten Menschen!

Wenn Sie sich jetzt für eine Mitgliedschaft entscheiden und dies auf der Anmeldung für eine DGZfP-Veranstaltung vermerken, gelten für Sie sofort die Mitgliederermäßigungen.

Wir freuen uns auf Ihre aktive Mitarbeit als unser Mitglied.