

# Automatische Rissprüfung mit induktiv angeregter Thermografie

V. Carl, T-ZfP Carl Messtechnik, Dinslaken  
G. Zenzinger, MTU Aero Engines, München

## Zusammenfassung

Die aktive Thermografie als Verfahren in der zerstörungsfreien Prüftechnik benutzt unterschiedliche, thermische Anregungstechniken, um gezielt Wärmeflüsse in ein Bauteil einzubringen. Auf diese Weise können je nach Anregungsart verschiedene Fehlertypen in einem Bauteil oberflächennah nachgewiesen werden. Dieser Beitrag befasst sich mit der induktiven Anregung. Hierbei wird durch einen gepulsten oder kontinuierlichen Wirbelstrom, Wärme in das Bauteil eingebracht. Im Fokus dieser Technik stehen oberflächennahe Risse, die durch ihre Orientierung im Bauteil den induzierten Stromverlauf verändern und dadurch auch zu einer lokalen Temperaturänderung führen. Die Temperaturerhöhungen werden mit hochempfindlichen Wärmebildkameras detektiert und mit speziell entwickelten Algorithmen ausgewertet. Der Vorteil dieser Anregungstechnik liegt in der kurzen Inspektionszeit und der hohen Nachweisempfindlichkeit. Risse unter der Oberfläche können auf diese Weise ebenso detektiert werden. Die Prüfparameter werden vornehmlich durch Spulengeometrie, Frequenz und Leistung bestimmt.

Mit Hilfe Finiter Elemente Methoden (FEM) lassen sich diese Einstellparameter durch Variations- und Simulationsrechnungen optimieren. Der Beitrag geht auf unterschiedliche Einstellparameter und deren Einfluss auf das Messsignal ein. Es wird ein System vorgestellt, das zur Rissinspektion an Triebwerks-Verdichterschaufeln aufgebaut wurde. Dabei übernimmt ein Roboter die vollautomatische Handhabung der Einzelkomponenten. Mit Hilfe von optimierten Bildverarbeitungsalgorithmen wird auch die Bewertung der Bauteile und das Aussortieren fehlerhafter Schaufeln vollautomatisch durchgeführt.

## Funktionsweise der induktiv angeregten Thermografie

Bei der induktiv angeregten Thermografie wird einem elektrisch leitenden Prüfteil induktiv ein oberflächennaher Wirbelstrom aufgeprägt. Die daraus resultierende Erwärmung des Bauteils kann mit einer Infrarotkamera sichtbar gemacht werden. Risse stören den Stromverlauf und beeinflussen dadurch auch die Temperaturentwicklung im Prüfteil. Abbildung 1 zeigt das Schnittbild eines runden Prüfteils, um dessen Umfang herum eine Spule angeordnet ist. Wird diese Spule mit einem Wechselstrom bestimmter Frequenz angeregt, so wird in Abhängigkeit der Anregungsfrequenz in einer bestimmten Tiefenlage normal zur Oberfläche ein Strom induziert. Die Stromlinien verlaufen dabei konzentrisch und werden im Falle einer Störung, z.B. eines Risses, um den Riss herum geleitet. Dadurch erhöht sich die Stromdichte an der Risspitze. Die daraus resultierende lokale Temperaturerhöhung kann mit einer entsprechenden Thermografiekamera sichtbar gemacht werden.

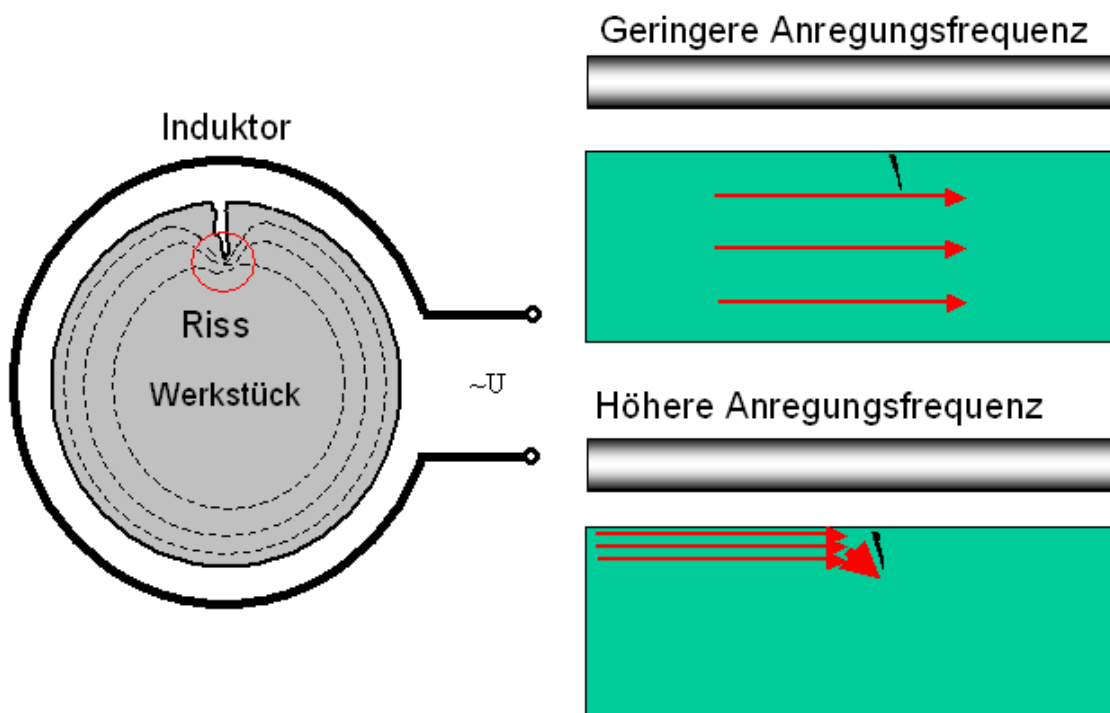


Abbildung 1: Zum Prinzip der wirbelstromangeregten Thermografie

Der sogenannte Skineffekt muß für die Bestimmung der Fehlernachweisgrenze berücksichtigt werden. Ist die Anregungsfrequenz beispielsweise zu gering, wo wird ein Fehler vom Strom unterlaufen und eine Temperaturerhöhung findet nicht statt. Erst bei höheren Anregungsfrequenzen ist die Eindringtiefe so gering, das der Fehler die gewünschte Umlenkung der Stromlinien bewirkt. Außer von der Anregungsfrequenz ist die Eindringtiefe entscheidend vom Material abhängig. Die Prüfmethode ist nur für elektrisch leitende Werkstoffe einsetzbar. Abbildung 2 zeigt dabei die funktionale Abhängigkeit der Eindringtiefe von der Anregungsfrequenz und unterscheidet dabei in einem weiteren Parameter die Eigenschaften *magnetisch* und *nicht magnetisch*

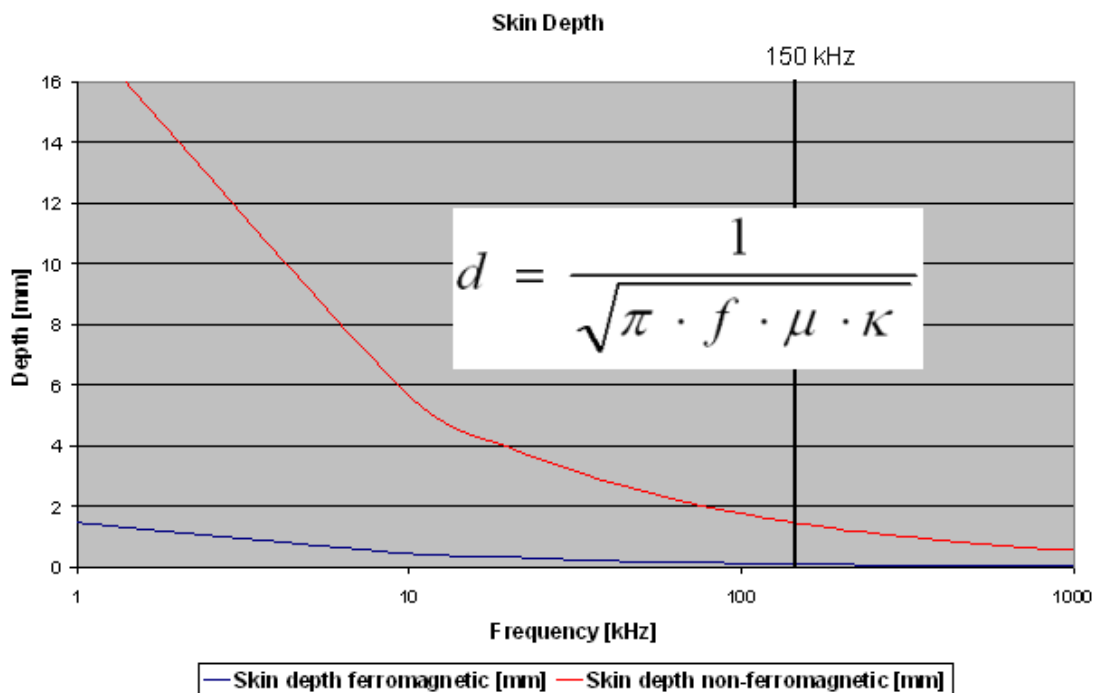


Abbildung 2: Die Eindringtiefe wird durch den Skineffekt beschrieben

Die Hardware, die bei der induktiv angeregten Thermografie zum Einsatz kommt, ist in Abbildung 3 dargestellt. Es handelt sich hierbei um einen handelsüblichen Hochfrequenzprozessor der Firma Hüttinger mit Induktor.

Leistung = 10kW  
 Frequenz = 450kHz (variabel)  
 Pulsdauer > 50ms  
 Wassergekühlte Spulen



Generator z.B. als Tischgerät



Trafo mit Induktorspule

Abbildung 3: Die verwendete Hardware

## Simulation der induktiv angeregten Thermografie

Um experimentelle Messungen im Vorfeld auf die physikalischen Abläufe hin zu untersuchen, ist es sinnvoll Simulationsrechnungen durchzuführen. Der Vorteil einer Simulation besteht darin, dass sämtliche Versuchsparameter einer Messung variiert werden können. Auf Grund dieser Variationen können dann die Auswirkungen auf das Messergebnis näher untersucht und die Resultate zur Optimierung und Entwicklung von Auswertestrategien verwendet werden.

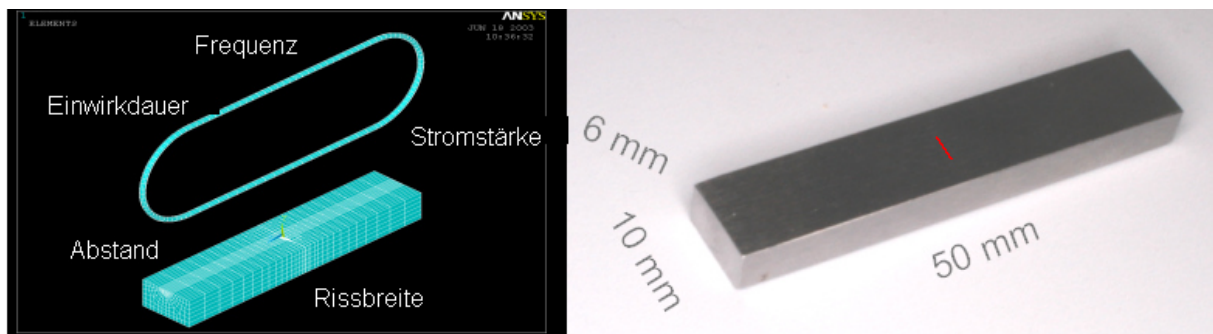


Abbildung 4: Simulation eines einfach geometrischen Körpers

Der in Abbildung 4 dargestellte Körper hat eine einfache Geometrie mit einem definierten Riss und dient zum einen zur Nachbildung eines finiten Elemente Modells und zum anderen zur Verifikation der gewonnenen Simulationsergebnisse mit experimentell gewonnenen Daten.

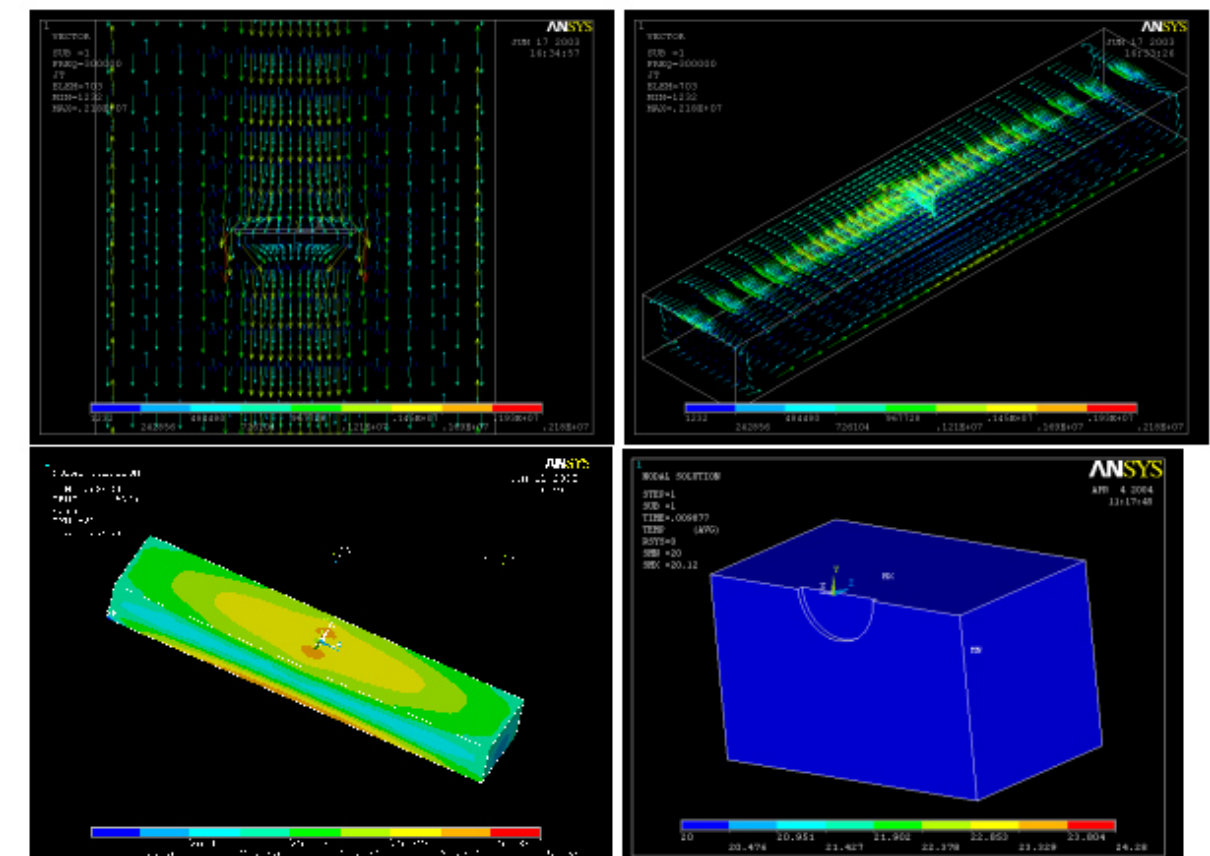


Abbildung 5: Teilergebnisse der Simulationsrechnungen

Abbildung 5 zeigt Teilergebnisse der Simulationsrechnung. Hierbei sind die Vorteile einer Simulation sofort erkennbar. Das Modell kann beliebig gedreht werden, bestimmte Detailansichten können durch Vergrößerungen gezielt untersucht werden. Die physikalischen Abläufe werden auch im Inneren sichtbar und voneinander abhängige physikalische Größen können unabhängig voneinander visualisiert werden (z.B. Magnetfeld oder elektrische Feld). Die Berechnung der induktiven Anregung erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird durch die festgelegten Randbedingungen das magnetische und elektrische Feld berechnet und in einem weiteren Schritt wird mit diesen Erkenntnissen das transiente Temperaturfeld innerhalb eines bestimmten Zeitraumes berechnet.

### Experimentelle Ergebnisse

Um die Simulationsergebnisse mit der experimentellen Messung zu vergleichen wird der zuvor beschriebene Testkörper unter den gleichen Bedingungen, wie sie auch in der Simulationsrechnung benutzt wurden, experimentell geprüft. Ergebnisse, die hierbei erzielt wurden, sind nachfolgend abgebildet.

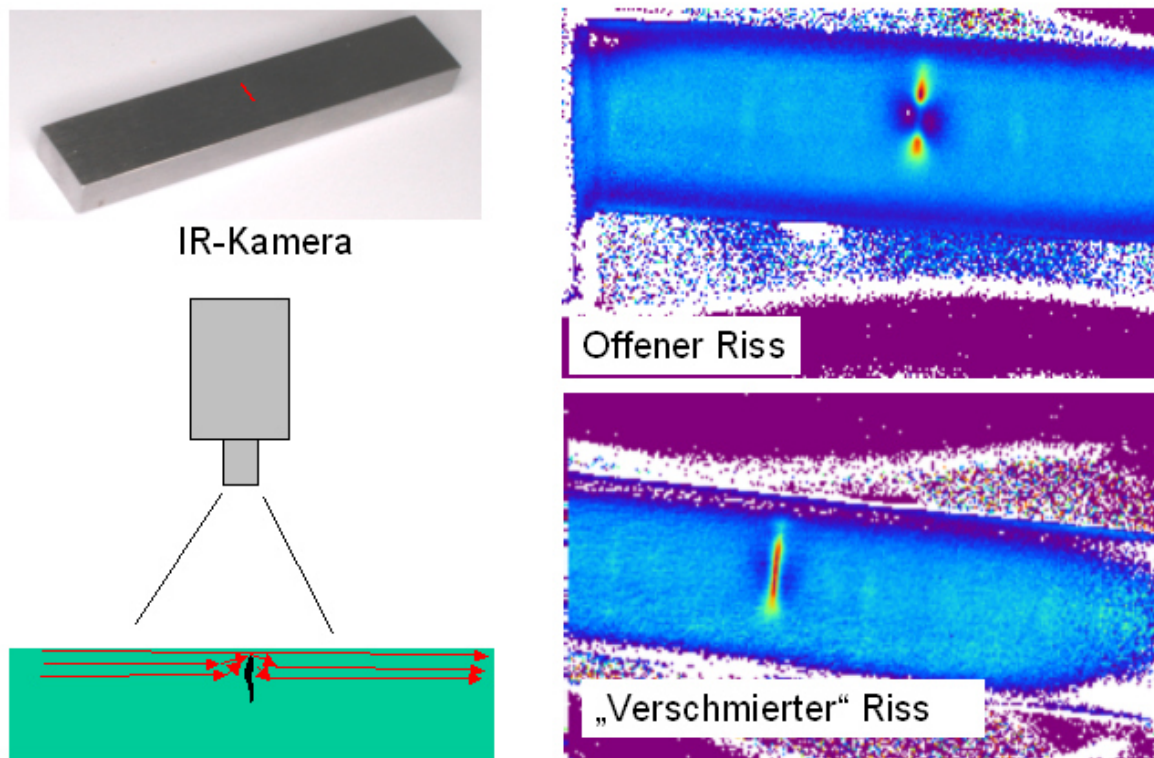


Abbildung 6: Ergebnisse an der Testprobe

Die Ergebnisbilder in Abbildung 6 zeigen zwei mögliche Fehlermechanismen, die bei einem Riss mit der induktiv angeregten Thermografie meßbar sind. Oben das erwartete Ergebnis für einen offenen Riss. Hierbei verlaufen die induzierten Stromlinien um den Riss herum und bilden in etwa der Mitte des Risses eine geringe Wärmesenke. Das Ergebnis ist hier eine deutliche Temperaturerhöhung an den Rissspitzen und eine Temperaturabsenkung an den Rissflanken. Das Bild darunter zeigt das Ergebnis bei einem überschleiftenem Riss. Das Schleifgut führt zu einer leitenden Brücke an der Rissoberfläche, so dass der induzierte Strom über die (dünne) Brücke fließt und auf Grund des Widerstandes in diesem Bereich zu einer Temperaturerhöhung führt. Um detektierbare Mindestfehlergrößen abschätzen zu

können sind Testkörper angefertigt worden, die definierte Fehlergrößen aufweisen. Abbildung 7 zeigt solch eine Probe.

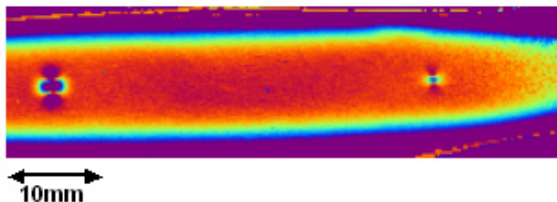


Fehlergrößen:

Länge / Tiefe / Breite

L:0,8 T:0,3 B:0,1mm

L:0,4 T:0,12 B:0,08mm



Ergebnisbild

Generator: 10 kW

Frequenz: 350 kHz

Abbildung 7: Probe zur Bestimmung von Fehlermindestgrößen

Für die verwendete Hardware mit dem HF Generator mit einer Leistung von 10 KW war auch der kleinere der beiden Fehler nachweisbar. Bemerkenswert hierbei ist, das trotz der verwendeten Kameraoptik mit einem relativ großen Field of View (FOV) der kleine Fehler nachweisbar ist. Die Fehler (Risse) erzeugen einen sehr hohen Temperaturgradienten an den Rissspitzen. Dadurch setzt ein lateraler Wärmefluss an diesen Bereichen ein. Der Bereich mit verändertem thermischen Verhalten wird dadurch deutlich größer als der eigentliche Riss. So tritt gewissermaßen eine *Ortsverstärkung* auf.

Zur Kontrollen des Rissnachweises wurde an einer Turbinenschaufel zusätzlich das Farbeindringverfahren durchgeführt.

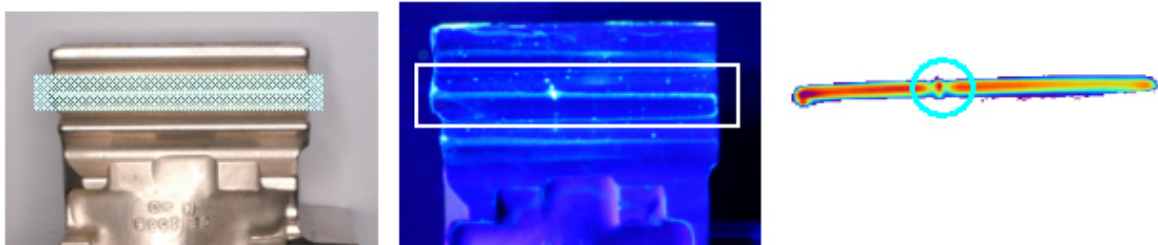


Abbildung 8: Vergleich von FPI und induktiv angeregter Thermografie

Beide Prüfverfahren zeigen ein eindeutigen Nachweiss des Risses.

### Einige Anwendungsfälle

Das Verfahren ist vor allem dort von Interesse, wo der Rissnachweis mit konventionellen Verfahren, wie Farbeindringprüfung oder mit der Wirbelstromtastsonde, schwierig oder nicht möglich ist. Ein Beispiel dieser Art zeigt die nachfolgend dargestellte Turbinenschaufel aus einer stationären Gasturbine. Unter der Korrosionsschutzschicht wurden Risse vermutet. Da die Schicht nicht beschädigt war, aber auch wegen der hohen Rauigkeit der Schicht und der schwierigen geometrischen Situation, waren die Standard Rissprüfverfahren nicht anwendbar.

Das Ergebnis der Induktionsthermografie und der metallografischen Nachuntersuchung sind in Abb. 9 dargestellt. Das Schliffbild zeigt die Risse an gleicher Stelle wie das Auswertethermogramm der Induktionsthermografie.

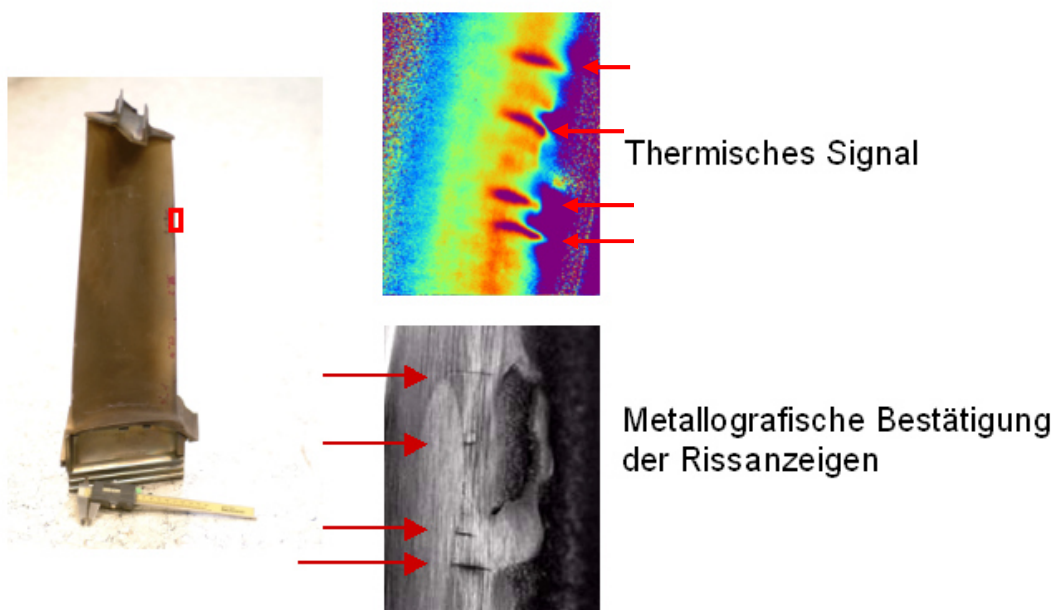
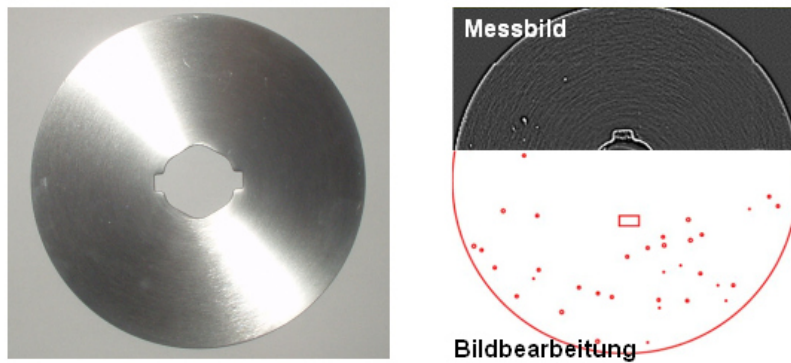


Abbildung 9: Rissnachweis unter einer Beschichtung

Die bisher dargestellten Prüfkörper wurden mit einem Einzel-Impuls angeregt. Das Verfahren eignet sich aber auch hervorragend bei kontinuierlicher Anregung im Falle von sich entweder drehenden oder translatorisch bewegten Bauteilen. In diesem Fall ist die Anregung mit einem Impuls vergleichbar, da der Anregungsort aufgrund seiner Bewegung an der Anregung (an der Spule) kurz vorbei gleitet. Der Messprozess ist in diesem Falle ebenfalls kontinuierlich und Fehler die im Bauteil vorhanden sind, können durch Temperaturspots identifiziert werden. In Abbildung 10 ist eine rotationssymmetrische Scheibe dargestellt, bei der oberflächennahe Poren identifiziert werden sollen. Die am dichtesten unter der Oberfläche liegenden Poren zeigen hierbei das deutlichste Signal, da aufgrund der geringen Restwandstärke der elektrische Widerstand und damit die Wärmeentwicklung zunimmt.

Beste Bedingungen bei rotationssymmetrischen Prüfkörpern...



z.B. kreisrunde Prüfkörper mit Lunkern dicht unter der Oberfläche

Abbildung 10: Prüfung Rotationssymmetrischer Bauteile

### Automatisierung der Prüfung

Anhand der nachfolgend dargestellten Flugzeug Triebwerksschaufel soll ein automatisierter Prüfprozess die Vorteile der induktiven Anregung verdeutlichen.

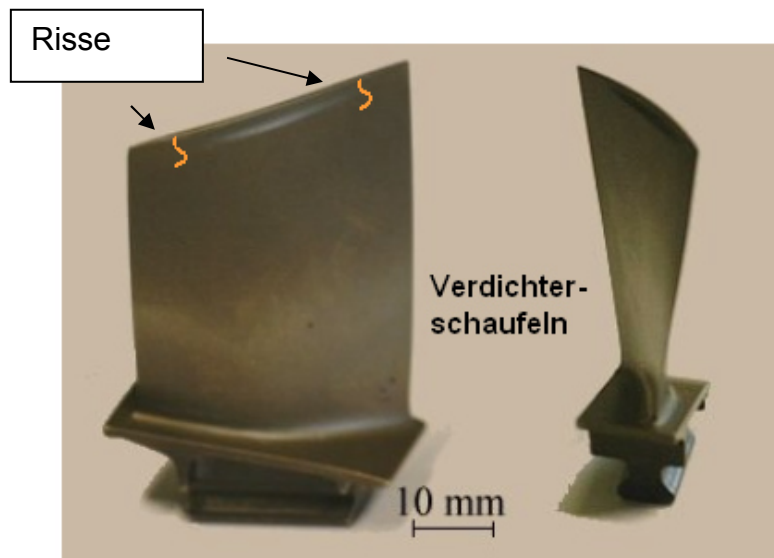


Abbildung 11: Verdichterschaufel mit Rissen

Die Prüfung der Schaufeln sieht sowohl eine automatisierte Handhabung der Bauteile, als auch eine vollautomatische Auswertung der Bilddaten vor. Abbildung 12



zeigt schematisch den Prüfablauf. Die Schaufeln werden einzeln aus einem Magazin entnommen und vor der Induktorschleife positioniert. Die Induktorschleife umrahmt dabei das Schaufelblatt, um Risse im Randbereich zu detektieren. Nach der Positionierung erfolgt die Prüfung, die etwa eine Sekunde dauert. Direkt im Anschluß an den Induktionspuls erfolgt die automatisierte Auswertung, so dass das Bauteil entweder als Schlecht- oder Gutteil im entsprechenden Magazin abgesetzt wird und die nächste Prüfung erfolgen kann.

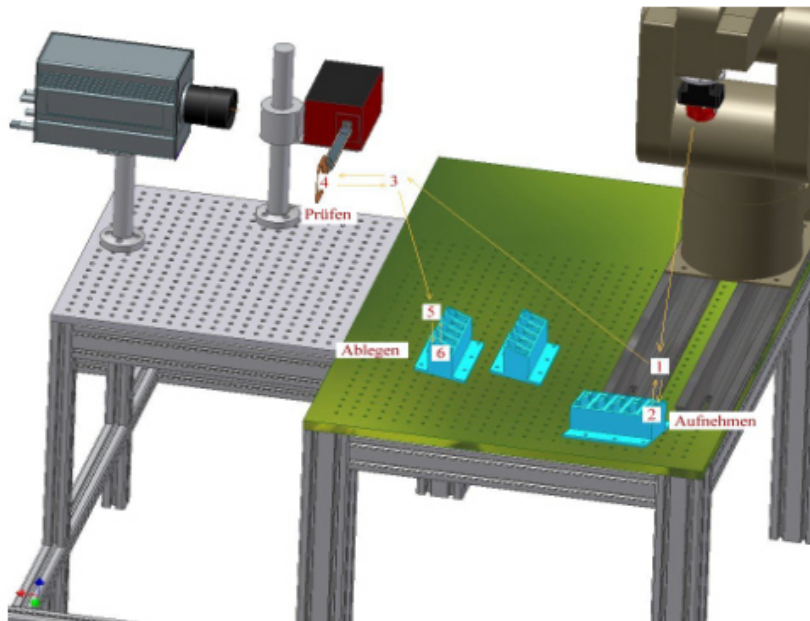


Abbildung 12: Schematischer Aufbau der automatisierten Prüfung



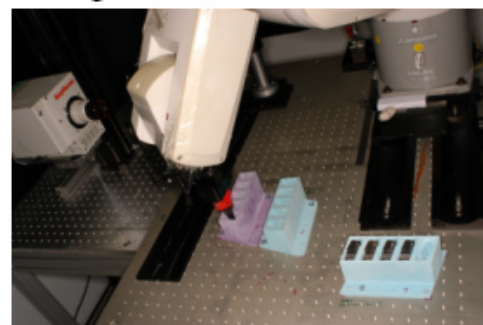
Entnahme



Passgenaues Greifen

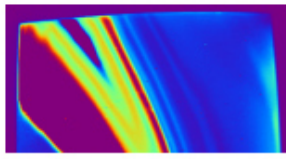


Anfahren der Prüfposition

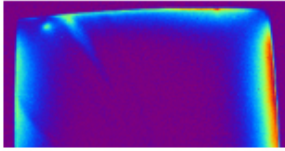


Sortiertes Absetzen

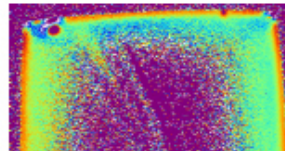
Abbildung 13: Detaillierte Ansichten der Einzelpositionen



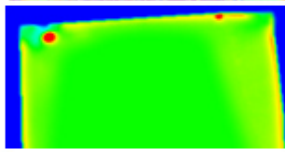
Gemessenes Temperaturbild...



...abzüglich Referenzbild...



Berechnung Phasenbild



Herausfiltern von „Randdaten“



→ Endgültiges Auswertebild mit eindeutiger Fehlerrausage

Abbildung 14: Automatisierte Auswertung der Prüfung. Die Risse sind im endgültigen Auswertebild als weisse Puknkte zu erkennen.

## Zusammenfassung

Die Induktionsthermografie ist ein neues Verfahren zum Nachweis von Rissen in elektrisch leitenden Bauteilen.

Die induktive Anregung bietet im Gegensatz zu anderen Anregungstechniken den Vorteil, gegenüber Strahlungs- oder Emissionsunterschieden auf einer Prüboberfläche unempfindlicher zu sein, da die Wärme direkt im Prüfteil entsteht. Außerdem ist das erzeugte Temperatursignal zumeist so hoch, dass geringe Emissionsgrade sich nicht nachteilig auswirken. Diese „hohen“ Temperaturen (Gradienten) erzeugen außerdem laterale Wärmeströme, die zu einer Erwärmung des näheren Umfeldes führen. Dadurch erzeugen auch sehr kleine Fehler noch eine meßbare Wirkung. Die Reproduzierbarkeit ist aufgrund immer gleich ablaufender physikalischer Effekte im Bauteilinneren sehr hoch. Es können *kurze Bauteile* im Impulsbetrieb und *lange Bauteile* im kontinuierlichen Betrieb angeregt werden. Der Messeffekt ist in beiden Fällen ähnlich. Bei der experimentellen Umsetzung hat sich gezeigt, das die Spulengeometrie meist sehr einfach gehalten werden ohne das Ergebnis zu verfälschen. Bei der Untersuchung zur Nachweisbarkeit von Rissen hat sich als besonderer Vorteil herausgestellt, dass auch verdeckte, durch Schleifvorgänge zugeschmierte Risse oder Risse unter der Oberfläche nachgewiesen werden können und auch sehr raue Oberflächen prüfbar sind.