# Nachweis von lokalen Schädigungen an Hochleistungsbauteilen mit Hochfrequenz Wirbelstromtechniken und Induktions-Thermografie

# Wilfried REIMCHE<sup>\*</sup>, Wojciech FRACKOWIAK<sup>\*</sup>, Oliver BRUCHWALD<sup>\*</sup>, Vera BÖHM<sup>\*</sup>, Fr.-Wilhelm BACH<sup>\*</sup>

\* Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover An der Universität 2, D-30823 Garbsen Tel.: +49 (0)511 762 9861, E-Mail: reimche@iw.uni-hannover.de

**Kurzfassung**. Moderne Flugtriebwerke bestehen aus einer Vielzahl komplexer Hochleistungsbauteile, die teils extremen Belastungen ausgesetzt sind. Die Hockdruckturbinenschaufeln der ersten Stufe nach der Brennkammer sind sowohl thermisch und mechanisch, als auch chemisch hoch belastet und daher mit mehreren Schutzsystemen ausgestattet um die Lebensdauer und Zuverlässigkeit der eingesetzten Beschaufelung aus Hochtemperaturwerkstoffen zu verbessern. Eine keramische Wärmedämmschicht isoliert die innen- und filmgekühlten Schaufeln zusätzlich gegenüber der Heißgasumströmung, während die darunterliegende Heißgaskorrosionsschutzschicht (PtAl, MCrAIY) den Grundwerkstoff vor korrosiven Angriffen und Oxidation schützt.

Um den Zustand der einzelnen Beschichtungen im Mehrschichtsystem der Hochdruckturbinenschaufel mit Schichtdicken von 20 ... 150 µm zerstörungsfrei und getrennt vom Grundwerkstoffs zu erfassen sind aufgrund der geringen elektrischen Leitfähigkeit der verwendeten Werkstoffe konventionelle Wirbelstromund Thermografietechniken nur bedingt geeignet. Mit Hilfe der Mehrparameter-Hochfrequenz-Wirbelstromtechnik und der Hochfrequenz-Induktionsthermografie mit gepulster Anregung lassen sich hingegen die Wirbelströme bei Prüffrequenzen bis 100 MHz auf die oberflächennahen Bereiche begrenzen und Standardeindringtiefen von <50 µm realisieren, was eine differenzierte Betrachtung von Schicht- und Grundwerkstoff ermöglicht. Ziel der Untersuchungen ist die zerstörungsfreie Zustandserfassung der Beschichtungen, die Schichtcharakterisierung Schichtdickenbestimmung. und sowie die Zustandserfassung des Grundwerkstoffs und der empfindliche Nachweis lokaler Schädigungen und Defekte.

# 1. Einführung

Die steigenden Anforderungen, die an Hochleistungsbauteile gestellt werden, erfordern prozess- und einsatzbegleitend zunehmend geeignete zerstörungsfreie Prüftechniken, um in der Fertigung und im Lebenszyklus der Bauteile eine Qualitätssicherung zu erreichen. Am Beispiel des Flugtriebwerks werden im Rahmen des SFB 871 - Regeneration komplexer Investitionsgüter - Verfahren entwickelt, um hochwertige und hochbelastete Bauteile zuverlässig und zerstörungsfrei hinsichtlich ihres Zustandes und auf lokale Schädigungen hin zu überprüfen.



### 1.1. Hochleistungsbauteil Turbinenschaufel

Die Hochdruckturbinenbeschaufelung der ersten Stufe nach der Brennkammer an Stator und Rotor zählt zu den am höchsten belasteten Bauteilen in einem Flugtriebwerk. Die Rotorschaufeln, mit Neupreisen von mehr als 10.000 \$ pro Schaufel, werden unter anderem durch die hohen Turbineneintrittstemperaturen thermisch, die im Heißgas enthaltenden korrosiven Bestandteile chemisch und die wirkenden Fliehkräfte mechanisch extrem stark beansprucht. Die thermische Belastung der Beschaufelung hat mittlerweile soweit zugenommen, dass die Turbineneintrittstemperatur, deren Erhöhung wesentlich zur Effizienz eines Triebwerkes beiträgt, über der Schmelztemperatur der Schaufelmaterialien liegt. Als Konsequenz werden innen- und filmgekühlte Turbinenschaufeln eingesetzt, die zusätzlich mit einer elektrisch nicht leitfähigen keramischen Wärmedämmschicht (Thermal Barrier Coating - TBC) aus Yttrium-stabilisiertem Zirkondioxid (ZrO<sub>2</sub>, Yt.-stab.) versehen sind, um den Grundwerkstoff zu kühlen und gegenüber dem Heißgas zu isolieren [1], [2].

Um den Schaufelwerkstoff vor möglicher Korrosion, unter anderem durch Meersalzbestandteile wie Natriumsulfate oder die in den verwendeten Brennstoffen enthaltenden schwefelhaltigen Verbindungen, sowie vor Oxidation zu schützen, kommt eine Korrosionsschutzschicht zum Einsatz, die gleichzeitig als Haftvermittlerschicht zwischen Grundwerkstoff und Wärmedämmschicht dient. Diese Haftvermittler- und Korrosionsschutzschicht kann als Diffusionsschicht (PtAl) oder Auflageschicht (MCrAlY, M = Ni, Co) ausgeführt sein, wobei das Aluminium als Oxidbildner dient. Unter thermischer Belastung findet zum einen eine zunehmende Diffusion zwischen Schicht und Grundwerkstoff statt, zum Anderen können Aluminiumoxidschichten abplatzen, wenn sie eine kritische Dicke überschreiten. Beides führt zu einer kontinuierlichen Verarmung der Korrosionsschutzschicht an Aluminium. Als Grundwerkstoff kommen Kobalt- oder Nickelbasissuperlegierungen zum Einsatz, die sich durch eine hohe Warm- und Kriechfestigkeit auszeichnen. Um die mechanischen Eigenschaften der im Feinguss hergestellten Turbinenschaufeln dem Anforderungsprofil anzupassen und die Korrosionsbeständigkeit weiter zu erhöhen werden zunehmend gerichtet oder einkristallin erstarrte Turbinenschaufeln eingesetzt [1], [2], [3].

# 1.2. Zielsetzung

Zielsetzung ist die zerstörungsfreie Zustandserfassung von dünnen Beschichtungen im Mehrschichtsystem der Hochdruckturbinenschaufeln, die Schichtcharakterisierung und Schichtdickenbestimmung, sowie die Zustandserfassung des Grundwerkstoffs und der empfindliche Nachweis lokaler Schädigungen und Defekte. Eingesetzt werden hierzu sowohl die Hochfrequenzwirbelstromtechnik mit Prüffrequenzen bis 100 MHz zur Begrenzung der Wirbelstromeindringtiefe auf den oberflächennahen Schichtbereich <100  $\mu$ m, als auch die Induktions-Thermographie mit gepulster hochfrequenter induktiver Anregung von 3 MHz.

Es werden im Folgenden die Ergebnisse von Untersuchungen an Hochdruckturbinenschaufeln der ersten Stufe aus dem Grundwerkstoff René 142 mit PtAl-Beschichtung, sowie Hochdruckturbinenschaufeln der zweiten Stufe aus dem Werkstoff MCrAlY-Beschichtung **TBC-Beschichtung** PWA1426 mit sowie teilweise in unterschiedlichen Belastungs- und Schichtzuständen vorgestellt.

# 2. Hochfrequenz-Wirbelstromtechnik

# 2.1. Prüfaufgabe und -durchführung

Die Ermittlung der Wärmedämmschichtdicke basiert, ebenso wie die konventionelle Bestimmung der Schichtdicke elektrisch nichtleitfähiger Schichten auf metallischem Grundwerkstoff mittels Wirbelstromtechnik, auf dem Abstands- bzw. Abhebeeffekt und wird unter anderem bei der (KFZ-)Lackdickenmessung oder auch in der industriellen Fertigung vielfach erfolgreich eingesetzt [4]. Die Materialcharakterisierung und Durchführung von Verwechslungsprüfungen mit Hilfe der Wirbelstromtechnik wird bei Prüffrequenzen im Bereich bis 1 MHz ebenfalls bereits erfolgreich eingesetzt.

Für eine differenzierte Untersuchung des Grundwerkstoffs und der Beschichtung Hochdruckturbinenschaufeln in Flugtriebwerken ist die konventionelle von Die Schichtdicke Wirbelstromtechnik allerdings nur bedingt geeignet. der Korrosionsschutzschicht liegt im neuwertigen Zustand meist bei weniger als 80 µm und besitzt ebenso wie die eingesetzten Nickelbasislegierungen eine geringe elektrische Leitfähigkeit von 0,7...1,5 MS/m. Die Standardeindringtiefe  $\delta$  der Wirbelströme ist unter anderem von der elektrischen Leitfähigkeit  $\sigma$  und der Prüffrequenz f abhängig, sodass bei den zu untersuchenden Werkstoffen erst bei Prüffrequenzen im zweistelligen MHz-Bereich eine Begrenzung der Wirbelströme auf den oberflächennahen Bereich < 100 µm möglich wird. Die differenzierte Betrachtung dünner Schichten mit Schichtdicken im Bereich von 20 ... 150 um, wie sie im Mehrschichtsystem der Turbinenschaufelbeschichtung zu finden sind, ist daher nur mit Hilfe der Hochfrequenzwirbelstromtechnik möglich.

Die nachfolgend dargestellten Messungen wurden mit einem Hochfrequenz-Wirbelstrom-Prüfgerät bei Prüffrequenzen im zweistelligen MHz-Bereich durchgeführt, um die Schichtzustände differenziert vom Zustand des Grundwerkstoffs zu erfassen. Die Phasenlage wurde so gewählt, dass die relevanten Geometrie- und Abstandseffekte vorwiegend im Realteil der Impedanzebene liegen. Um die auftretenden Abstands- und Geometrieeinflusse auswerten und darstellen zu können, wurde der Sensor langsam an das Prüfobjekt herangeführt, was zu den charakteristischen Verläufen der Arbeitspunkte in der Impedanzebene führt.

#### 2.2. Messergebnisse TBC-Beschichtung

Abbildung 1 zeigt den Verlauf des Arbeitspunktes in der Impedanzebene, basierend auf dem Abhebeeffekt, für unterschiedliche Schichtdicken einer elektrisch nicht leitfähigen Schicht im Bereich zwischen 0 ... 200 µm, aufgetragen auf dem Grundwerkstoff René 142.



Abbildung 1: Schichtdickenbestimmung Wärmedämmschicht

Für den Schichtdickenbereich bis 100  $\mu$ m kann ein näherungsweise linearer Zusammenhang (33  $\mu$ m / 1000 Skt<sub>real</sub>) zwischen Wärmedämmschichtdicke und der Lage des Arbeitspunktes im Realteil angenommen werden.

#### 2.3. Messergebnisse PtAl-Beschichtung

Der Zustand der Haftvermittler- und Korrosionsschutzschicht hängt unter anderem von dem noch vorhandenen Aluminiumanteil ab, da das Aluminium im Lebenszeitraum der Turbinenschaufel zunehmend verbraucht wird und somit nicht mehr als Oxidbildner zum Korrosionsschutz zur Verfügung steht. Eine neuwertige PtAl-Beschichtung besitzt eine bessere elektrische Leitfähigkeit als eine Beschichtung, die sich bereits im Einsatz befunden hat, durch Oxidation Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in keramischer Form bildet und damit an metallischem Aluminium verarmt ist. Die elektrische Leitfähigkeit der Randzone einer Turbinenschaufel ist daher ein Kennwert, der zur Zustandsbeurteilung der Turbinenschaufel herangezogen werden kann und sich messtechnisch mit Hilfe der HF-WS-Technik erfassen lässt.

Als Referenz- und Kalibrierkörper für die folgenden Messungen werden daher zwei identische Turbinenschaufeln aus dem Werkstoff René 142, einmal vollständig entschichtet und einmal mit einer neuwertigen PtAl-Beschichtung versehen, verwendet. In Abbildung 2 sind zehn Arbeitspunktverläufe in der Impedanzebene dargestellt, die den Schichtzustand der beiden Referenzschaufeln an jeweils fünf Messpositionen auf der Saugseite der Turbinenschaufeln beschreiben und damit den Messbereich zwischen neuwertiger und "verbrauchter" Beschichtung aufspannen. Wie deutlich zu erkennen ist, werden bei vollständig aufgesetztem Sensor an allen fünf Positionen jeweils vergleichbare Messwerte erreicht. Ein relevanter Einfluss der Schaufelgeometrie auf das Messergebnis tritt an diesen Messpunkten nicht auf - der Geometrieeinfluss ist hier vernachlässigbar. Deutliche Unterschiede zeigen sich allerdings beim Vergleich der Referenzschaufeln untereinander: Die Messwerte unterscheiden sich für die be- und entschichtete Hochdruckturbinenschaufel sowohl im Imaginär- als auch im Realteil. Während der Imaginärteil des Messsignals nahezu ausschließlich vom Schichtzustand der Korrosionsschutzschicht bestimmt wird, überlagern sich im Realteil die Einflüsse des Abstandseffektes und des Schichtzustandes, sodass bei der Bestimmung der Wärmedämmschichtdicke die Realteil-Komponente, die aus dem Schichtzustand resultiert, berücksichtig werden muss. Im Folgenden wird dies zunächst durch eine lineare Interpolation zwischen den beiden Referenzzuständen erreicht.



Abbildung 2: Referenzmessungen Korrosionsschutzschicht - Messbereich

Die in Abbildung 3 dargestellte Hochdruckturbinenschaufel (René 142, PtAl-Beschichtung) wurde im Einsatz stark beansprucht und weist über der Schaufelhöhe, optisch bereits gut erkennbar, Bereiche unterschiedlicher Belastung auf. Im Fußbereich ist die thermische Belastung aufgrund der Strömungsverteilung und Schaufeleinspannung weniger stark ausgeprägt als an den oberen vier Messpunkten, wo sich aufgrund einer ungleichmäßigen Anströmung und Temperaturverteilung Heißstellen gebildet haben. Der Fußbereich ist, wie anhand der Lage der blauen Kurve deutlich zu erkennen, erwartungsgemäß die am geringsten belastete Stelle der global hochbelasteten Turbinenschaufel. Die beiden Messkurven (grüne, graue Kurve) im Übergangsbereich zur Heißstelle weisen einen relativ ähnlichen Verlauf auf, liegen allerdings im Imaginärteil der Impedanzebene weiter oben. Hier ist die Schicht bereits stark an Aluminium verarmt und als verbraucht anzusehen. Im Heißstellenbereich findet zusätzlich eine signifikante Verschiebung des Arbeitspunktes im Realteil statt, die darin begründet ist, dass sich im hochbelasteten Heißstellenbereich Aluminiumoxide Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mit zunehmender Schichtdicke bilden, welche als keramische, elektrisch nicht-leitfähige Schichtanteile verbleiben und einen messbaren Abstandseffekt generieren.



Abbildung 3: Hochbelastete Turbinenschaufel

#### 2.4. Messergebnisse der kombinierten Messung von TBC- und PtAl-Beschichtung

Dass die Bestimmung des Zustandes der Korrosionsschutzschicht auch im verdeckten Zustand bei noch nicht abgetragener TBC möglich ist, zeigt Abbildung 4. Die untersuchte Turbinenschaufel (René 142, PtAl-Beschichtung, TBC) weist ebenfalls optisch erkennbar Bereiche mit hoher Belastung im Kopfbereich und niedriger Belastung im Fußbereich auf. Im Fußbereich liegen die Messwerte auf dem gleichen Niveau, wie bei der neu beschichteten Referenzschaufel, die Korrosionsschutzschicht hat sich chemisch noch nicht signifikant verändert. Durch die noch vorhandene Wärmedämmschicht findet jedoch eine Verschiebung der Messwerte im Realteil statt, die eine Aussage über die Restdicke der TBC ermöglicht. Eine vergleichbare Verschiebung im Realteil des Messsignals tritt auch in den höher belasteten Bereichen auf, was auf eine relativ gleichmäßige Wärmedämmschichtdicke über der Schaufelhöhe schließen lässt. Der Zustand der darunterliegenden Korrosionsschutzschicht kann jedoch nicht mehr als neuwertig betrachtet werden, wie sich anhand der Änderungen im Imaginärteil des Messsignals nachweisen lässt.



Abbildung 4: Bestimmung TBC-Schichtdicke und Korrosionsschutzschicht-Zustand

# 2.5. Messergebnisse MCrAlY-Beschichtung

Trotz der höheren Kosten werden zunehmend thermisch gespritzte MCrAlY-Haftvermittler- und Korrosionsschutzschichten als Ersatz für die PtAl-Beschichtung verwendet. Abbildung 5 zeigt exemplarisch die Messergebnisse von vier untersuchten Hochdruckturbinenschaufeln der zweiten Stufe aus dem Grundwerkstoffs PWA 1426 mit einer MCrAlY-Beschichtung. Die Messwerte sind kompensiert auf den Grundwerkstoff und wurden an jeweils sechs über die Schaufelhöhe verteilten Messpunkten im Hinterkantenbereich auf der Saugseite der Turbinenschaufel aufgenommen. Darstellt ist der Messwert der Imaginärteil-Komponente des Messsignals.



Abbildung 5: Zustandserfassung bei Hochdruckturbinenschaufeln mit MCrAIY-Beschichtung

Die Turbinenschaufel Nr. 1 wurde vollständig entschichtet und dient als Referenzschaufel für den Grundwerkstoff PWA 1426. Im Messergebnis zeigt sich ein gleichmäßiger Zustand über der gesamten Schaufelhöhe an allen sechs Messpositionen. Einen ebenfalls relativ gleichmäßigen Verlauf über der Höhe ist bei der Schaufel Nr. 3, mit einer nahezu neuwertigen MCrAIY-Beschichtung, zu erkennen. Wird die MCrAIY-Beschichtung stufenweise chemisch abgetragen, dann liegen die Messwerte der teilentschichteten Bereiche zwischen denen von Grundwerkstoff und neuwertiger Beschichtung, wie am Beispiel der Schaufel Nr. 2 gezeigt wird. Eine Änderung des Schichtzustandes in Folge thermischer Belastungen bewirkt bei den MCrAlY-beschichteten Turbinenschaufeln (Schaufel Nr. 4) ebenfalls eine Änderung der elektrischen Leitfähigkeit in der Schaufel-Randzone, wobei sich die elektrische Leitfähigkeit im höher belasteten Kopfbereich hier jedoch zunächst verbessert.

# **3. Induktive Thermografie mit Pulsanregung**

# 3.1. Messtechnik

Zur Fehlerprüfung und Schichtcharakterisierung leitfähiger Bauteile eignet sich aufgrund der Bauteilanregung durch eine hochfrequente Wirbelstromverteilung neben der Wirbelstromprüftechnik auch das induktive Thermografieverfahren. Im Gegensatz zur hochauflösenden lokalen Wirbelstrom-Scantechnik bietet die Thermografie eine bildgebende flächige globale Bauteilprüfung bzw. eine lokal hochauflösende mikroskopische Prüfung unter Verwendung einer speziellen Optik.

Die Standard-Eindringtiefe bei der induktiven Erwärmung unterliegt den gleichen physikalischen Gesetzen wie bei der Wirbelstromtechnik und kann anhand der elektromagnetischen Materialeigenschaften, sowie der Frequenz des Erregerstromms bestimmt werden. Aus diesem Grund erfordert die schnelle Fehlerprüfung und Werkstoffcharakterisierung dünner Schicht und Randzonenbereiche die Induktion hochfrequenter Wirbelströme im MHz-Bereich. Bei der Induktionsthermografie erfolgt die Anregung aktiv infolge einer generierten Wirbelstromverteilung im Bauteil und die Erfassung der Prüfinformation über Defekte und Inhomogenitäten in der Schicht oder im Grundwerkstoff durch die Aufnahme der Temperaturfelder auf der Oberfläche. Lange Anregungszeiten bei der Prüfung metallischer Bauteilen führen wegen der Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes zur globalen Erwärmung des Bauteils und zum Ausgleich von Temperaturunterschieden und damit zu Unschärfen in der Abbildung des dynamischen Temperaturfeldes sowie Verringerung der Messgenauigkeit [5][6].

Die Implementierung eines gesteuerten Pulsbetriebes des HF-Generators ermöglicht kurzzeitig eine lokal hohe Energieeinbringung und Temperaturentwicklung, Erhöhung der Dynamik und der Schärfe des Temperaturfeldes sowie eine Verringerung der globalen Bauteilerwärmung. Darüber hinaus erlaubt das Verfahren, neben der räumlichen Analyse des Temperaturfeldes, auch den Einsatz von Zeit- und Frequenzbereichs-Analysen des Temperatur-Zeit-Verlaufs.

Die nacheinander folgenden Anregungspulse, Heiz- und Abkühlphasen, generieren im Bauteil eine thermische Antwort, die für jeden Bildpunkt als Temperatur-Zeit-Diagramm dargestellt werden kann. In der Praxis haben sich eine Anregungs- und Pausendauer 50 ms als sinnvoll herausgestellt. Dies von entspricht einer Impulsanregungsfrequenz von 10 Hz und einem Tastgrad von 50%. Die Aufnahme von dynamischen Temperaturänderungen bei der kurzzeitigen pulsartigen Anregung erfordert eine geeignete, empfindliche und schnelle Thermografiekamera. Ihre Bildrate muss hoch genug sein, um dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem zu genügen und mit der geringen Energieeinbringung und Temperaturentwicklung im Bauteil während der sehr kurzen Heizphase auskommen.

Der Verlauf der Temperaturkurve an einem Bildpunkt hängt von der Wirbelstromverteilung an der betrachteten Stelle des Bauteils ab. Die Wirbelstromverteilung wird hauptsächlich durch die Materialeigenschaften, Fehler und Inhomogenitäten in der Materialstruktur, die Entfernung des angeregten Bereichs vom Induktor sowie der Geometrie des Bauteils bestimmt. Die größten Temperaturänderungen entstehen in den Fehlerbereichen und scharfen Material- und Konturübergängen. Die thermische Antwort auf die Pulsanregung im homogenen Werkstoffbereich und der glatten Bauteiloberfläche charakterisiert sich durch mäßige Temperaturänderungen. Bereiche außerhalb der direkten Induktionszone werden nahezu linear durch Wärmeleiteffekte erwärmt, siehe Abbildung. 6 [7].



#### Abbildung 6 Induktive Thermografie mit Pulsanregung - Funktionsprinzip

Als Messeffekt wird hier die relative Temperaturänderung als thermische Antwort auf die kurzzeitige Pulsanregung betrachtet. Der große Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass die unterschiedlichen Emissionskoeffizienten, die sich unter anderem aus den Verfärbungen der Oberfläche, Krümmungen der Bauteilgeometrie, sowie den Reflektionen der Objekte aus der Umgebung ergeben, als konstanter Offset der Temperaturkurve erscheinen und somit leicht zu eliminieren sind. Analyseergebnisse, wie die Summe der Temperaturdifferenzen und die zweite Ableitung der Temperatur (1) nach der Zeit liefern bereits zufriedenstellende Ergebnisbilder zum Nachweis von Oberflächenfehlern und verdeckten Fehlern, die aus dem direkten Infrarotbild nicht zu erkennen sind.

$$P_1(i,j) = \sum_{t=1}^n T_{i,j}(t) - T_{i,j}(t-1); \quad P_2(i,j) = \sum_{t=1}^n T_{i,j}(t) - 2T_{i,j}(t-1) + T_{i,j}(t-2)$$
(1)

 $\begin{array}{l} P_1, P_2-\text{aus dem Temperatur-Zeitverlauf resultierende Pixelwerte des Ergebnisbildes, n-Bildanzahl,} \\ T_{i,j}-\text{Temperatur am Bildpunkt}\left(i,j\right), t-\text{Zeitindex} \end{array}$ 

#### 3.2 Messergebnisse

Im Rahmen des SFB 871 werden unterschiedliche Defekte in der keramischen. Wärmedämmschicht, MCrAlY-Korrosionsschutzschicht sowie im Grundwerkstoff PWA 1490, PWA 1426 und René 142 der belasteten Hochdruckturbinenschaufeln mittels hochfrequenter Induktionsthermografie mit kurzzeitiger gepulster Anregung untersucht. Der Schwerpunkt der Untersuchungen mit dem induktiven Thermografieverfahren liegt beim Nachweis von kritischen Fehlern wie Ausbrüchen, Abplatzungen und Delaminationen der Wärmedämmschicht sowie Delaminationen und Schichtzustandsbeurteilungen der Korrosionsschutzschicht Weiterhin werden Risse Inhomogenitäten und im Mehrschichtsystem und im Grundwerkstoff bei den belasteten und instandgesetzten Turbinenschaufeln untersucht.

Das Induktions-Thermografie-Messsystem besteht aus einem Hochfrequenz-Generator mit einer Anregungsfrequenz des Induktionsstroms von ca. 3 MHz und einer frei einstellbaren Pulsanregung zwischen 1 und 50 Hz mit variablem Tastgrad. Die Thermografiekamera verfügt über einen InSb-Infrarotsensor mit der Temperaturempfindlichkeit NETD von 20 mK und einer Bildrate von 100 Hz bei voller Auflösung von 640x512 Pixeln. Durch den Einsatz eines Wechsel-Makroobjektives sind mikroskopische Vergrößerungen bis 15 µm pro Pixel möglich.

Die Untersuchungen an den Schaufeln mit keramischer Beschichtung haben gezeigt, Ausbrüche von 500 der Wärmedämmschicht dass μm in durch das Induktionsthermografieverfahren gut aufgelöst und nachgewiesen werden können. Abbildung 7 zeigt ein ausgewertetes Thermografiebild nach dem Berechnungsverfahren (1) und eine entsprechende mikroskopische Aufnahme des Ausbruchs. Im Bereich einer abgeplatzten Keramikschicht ist die resultierende Temperaturänderung hoch weil die Wärme ungehindert von der Oberfläche der Korrosionsschutzschicht abgestrahlt wird. Im Übergangsbereich einer dünnen Keramikschicht gelangt die Wärme verzögert zur Oberfläche und erreicht kleinere Temperaturdifferenzen. Bei einer intakten Keramikschicht wird die Temperaturschwingung gedämpft und nimmt einen nahezu linearen Temperaturverlauf an.



Abbildung 7 Abplatzung der Wärmedämmschicht ZrO<sub>2</sub> – Yt.-stab.

Zum Nachweis von Delaminationen der Korrosionsschutzschicht wurde eine speziell präparierte Turbinenschaufel mit einer künstlichen Delamination der MCrAlY-Beschichtung untersucht (Abb. 8).



Thermografische Aufnahme - Defekte in Schaufelstruktur

Abbildung 8 Künstliche Delamination (links). Defekte im Tip-Bereich (rechts)

Thermografische Aufnahme

Durch das Fehlen der Materialverbindung zwischen Schicht und Grundwerkstoff wird sowohl die Wärmeableitung von der Schicht in die Tiefe des Bauteils gestört, als auch die Wirbelstromverteilung im Bereich der Delaminationen verändert. Dies führt zu amplitudenstarken Temperaturschwingungen, welche thermografisch signifikant nachweisbar sind.

Die induktive Thermografie eignet sich gut zur Detektion von offenen und verdeckten Rissen bei der Bauteilprüfung metallischer Werkstoffe und findet Anwendung im industriellen Bereich [6]. Mit dem Einsatz eines Makroobjektivs können hohe lokale Auflösungen erreicht und auch feine Gefügeschädigungen nachgewiesen werden, die bei einer großflächigen Bauteilprüfung aufgrund der großen Fläche pro Pixel nicht detektiert werden können. Abbildung 9 zeigt feine Gefügetrennungen im Kopfbereich einer instandgesetzten Hochdruckturbinenschaufel.



Werkstoff PWA 1426 Abbildung 9 Charakterisierung der MCrAIY-Schicht

Eine stufenweise entschichtete Hochdruckturbinenschaufel-Schaufel aus dem Werkstoff PWA 1426, dient als Probekörper zur Schichtcharakterisierung von MCrAlY-Beschichtungen. Die Bereiche mit unterschiedlichen Schichtdicken haben bei den verwendeten Prüfparametern nahezu einen ähnlichen Temperatur-Zeit-Verlauf. Unter diesen Bedienungen lassen sich Rückschüsse auf den Schichtzustand nur schwer ziehen. Die Übergangsbereiche zwischen den unterschiedlichen Schichtdicken sind dagegen gut zu erkennen und erlauben eine quantitative Aussage über Homogenitäten der betrachteten Schicht.

# 4. Zusammenfassung

vorgestellten Prüfverfahren Hochfrequenz-Wirbelstromtechnik Die und induktive Thermografie mit Pulsanregung, wurden im Rahmen des SFB 871 zur Durchführung von Hochdruckturbinenschaufeln Untersuchungen an eingesetzt und erprobt. Die Messergebnisse zeigen, dass eine differenzierte Betrachtung von Schichtund Grundwerkstoff sowie eine zerstörungsfreie Zustandserfassung, Schichtcharakterisierung und der empfindlicher Nachweis lokaler Defekte mit Hilfe der HF-Wirbelstromtechnik und -Induktionsthermografie möglich sind.

Mit Hilfe der Wirbelstromtechnik lassen sich sowohl die Schichtdicke der Wärmedämmschicht, als auch der Zustand der verdeckten Haftvermittler- und Korrosionsschutzschicht auf PtAl- oder MCrAlY-Basis infolge thermischer Überbeanspruchung und chemischer Veränderung bestimmen. Aufgrund der hohen Prüffrequenzen von bis zu 100 MHz und der daraus resultierenden geringen Wirbelstrom-Eindringtiefe von  $< 50 \ \mu$ m, lässt sich der Prüfbereich dabei auf die äußere Beschichtung begrenzen, sodass der Zustand des Grundwerkstoffs nur einen geringen Einfluss auf das Messergebnis besitzt.

Der Einsatz von hohen Anregungsfrequenz im Bereich bis 3 MHz beim induktiven Thermografieverfahren reduziert die Wirbelstromeindringtiefe auf den oberflächennahen Bereich bei beschichteten Hochdruckturbinenschaufeln und ermöglicht den Nachweis von Fehlern wie Delaminationen und Abplatzungen im Schichtsystem der Turbinenschaufel, sowie von offenen und verdeckten Rissen im Grund- und metallischen Schichtwerkstoff. Durch den gesteuerten Pulsbetrieb der Induktionsanlage bleibt die Temperatur des angeregten Bauteils global auf einem niedrigen Niveau. Weiterhin werden Störfaktoren wie unterschiedliche Emissionskoeffizienten und Reflektionen auf der Oberfläche des Bauteils durch eine separate Auswertung einzelner Bildpunkte unter Betrachtung der lokalen zeitlichen Temperaturschwingung reduziert und das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert.

Die erzielten Ergebnisse sind eine gute Basis zur Weiterentwicklung der Sensorund Handhabungstechnik zur Steigerung des Auflösungsvermögens und der Messgenauigkeit des Wirbelstromsystems. Desweiteren ist eine Erweiterung des Thermografiesystems um neue Auswerte- und Klassifizierungsverfahren, sowie eine Optimierung der Prüfparameter zu erwarten.

#### 5. Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse entstanden im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 871 "Regeneration komplexer Investitionsgüter" im Teilprojekt A1 "Zerstörungsfreie Charakterisierung von Beschichtungen und Werkstoffzuständen Hochbeanspruchter Triebwerksbauteile". Unser Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Förderung dieses Projektes.

#### 6. Referenzen

- [1] Bräunling, W.: *Flugzeugtriebwerke* 3. Aufl., Springer-Verlag, 2009
- [2] Cosack, T.: *Schutzschichten auf Turbinenschaufeln im Flugtriebwerk* MTU Aero Engines Publikation, 2009
- [3] Lechner, C.; Seume, J.: Stationäre Gasturbinen
  - 2. Aufl., Springer-Verlag, 2010
- [4] Scheer, C.; Reimche, W.; Möhwald, K.; Bach, Fr.-W.: Entwicklung einer Online-Schichtdickenmessung für das Plasmaspritzen von Keramik auf Basis einer Wirbelstromsensorik. Schweissen und Schneiden, Vol. 60, Nr. 6, S. 331-336, 2008
- [5] Reimche, W.; Bernard, M.; Bombosch, S.; Scheer, Ch.; Bach, Fr.-W.: *Nachweis von Anrissen in der Randzone von Hochleistungsbauteilen mit Wirbelstromtechnik und induktiv angeregter Thermographie*
- HTM Journal of Heat Treatment and Materials, Nr. 5, S. 284-297, 2008
  [6] Mooshofer , H.; Goldammer, M.; Rothenfusser, M.; Bass, J.; Lombardo, E.; Vrana, J.: Induktionsthermografie zur automatischen Prüfung von Generatorkomponenten DGZfP-Jahrestagung 2009 – Mi.2.C.2
- [7] Vrana J.: Grundlagen und Anwendungen der aktiven Thermographie mit elektromagnetischer Anregung Induktions- und Konduktionsthermographie Saarbrücken 2008, Universität des Saarlandes, Dissertation