

Weltweite Einführung eines thermographischen Inspektionssystems für Gasturbinenkomponenten

Matthias GOLDAMMER¹, Cristian POPOVSKI², Tristan SCZEPUREK³,
Sudesh SHANBOGUE², Helmuth EULER¹, Stephanie STINELLI², James LANDY²

¹ Siemens AG Corporate Technology, München

² Siemens Energy, Inc., Orlando FL, USA

³ Siemens AG Power Generation, Berlin

Kurzfassung. Für einige Prüfaufgaben bei Gasturbinenschaufeln gibt es fast keine Alternative zur Thermografie: Das führte zu frühen Einführung der neuen Technik – weit vor der Verfügbarkeit von Normen und Ausbildungsangeboten. Für die Prüfung der Keramikbeschichtungen von Gas- oder Flugturbinen wurden bereits vor über 10 Jahren erste automatisierte Prüfsystemen eingeführt, doch die Nutzung blieb in der Regel punktuell und auf einzelne Standorte beschränkt. Bei der Siemens AG wurde vor wenigen Jahren ein Prüfsystem eingeführt, dass die Voraussetzungen erfüllt, an allen Standorten genutzt zu werden und von denen weltweit bereits 10 Geräte im Einsatz sind. Im Vortrag wird dieses Prüfsystem vorgestellt und die Aufgaben, die damit adressiert werden. Neben der Methodik und der Datenaufbereitung wird auch die Automatisierung des Arbeitsablaufs dargestellt, von der Positionierung der Komponenten bis hin zur automatischen Ablage des Prüfprotokolls. Schließlich wird noch auf einige praktische Aspekte der weltweiten Einführung eingegangen wie z.B. Aspekte der Exportkontrolle.

Einleitung

Die Einführung einer neuen Prüfmethode wie der Thermografie in die Fertigung betrifft immer mehrere Ebenen: Neben den technischen Vorbedingungen wie der Prüfausrüstung und der Festlegung von Prüfablauf und Bewertungskriterien müssen auch die administrativen Voraussetzungen erfüllt werden. Dazu gehört die Validierung des Verfahrens für die Prüfaufgabe, Erstellung und Inkraftsetzen der Prüfanweisungen bis hin zu Ausbildung und Zertifizierung des Personals.

Noch vor wenigen Jahren bereits die Verfügbarkeit von Prüfsystemen bereits eine wesentliche Hürde für die Nutzung der Thermografie, da es keine Anbieter mit nennenswerter Erfahrung im industriellen Umfeld gab. Zu Beginn des Betriebes musste daher eine längere Phase der Inbetriebnahme einkalkuliert werden, da in einer Reihe von Fällen die Haltbarkeit der Einzelkomponenten für den Dauereinsatz nicht ausreichend war. Für die Standardverfahren der Thermografie wie z.B. der Blitzthermografie hat sich diese Situation deutlich entspannt: Es kann heute nicht nur auf zuverlässige Einzelkomponenten wie Blitzgeräte zugegriffen werden, sondern es stehen auch mehrere Systemanbieter zur Auswahl, die vollständige Systeme entweder in Standardkonfiguration oder angepasst an die Prüfaufgabe einschließlich des notwendigen Services anbieten.



Eine ähnliche Bewegung ist auch in der Normierung und Zertifizierung abzulesen: Fehlten vor kurzem noch jegliche Normen, so dass selbst die Ausbildungsnorm DIN EN 473 Thermografie als Verfahren nicht vorsah, sind inzwischen nationale Normen entstanden, die Zug um Zug um die einzelnen Verfahren der aktiven Thermografie erweitert werden. Durch den Übergang in der Ausbildung zur ISO 9712 wurde die Thermografie auch in der Ausbildung erfasst. Diesen Normen ist derzeit gemeinsam, dass viele Details der täglichen Prüfung noch nicht erfasst werden, so dass dennoch ein nicht unerheblicher Aufwand für die Validierung des Prüfverfahrens für den Praxiseinsatz notwendig ist. Im Gegensatz zu z.B. Ultraschall- oder Röntgenverfahren, die für Standardanwendungen mit geringem Aufwand umgesetzt werden können, erfordert die Thermografie, dass in der Vorbereitung umfangreiche Testreihen durchgeführt werden müssen, um die Prüfparameter festzulegen und die Anwendbarkeit des Verfahrens zu zeigen.

Schließlich stellt die Verfügbarkeit von zertifiziertem Personal ein Hindernis dar: In den meisten Fertigungen mit Bedarf für zerstörungsfreie Prüfung ist traditionell ein Personalstamm mit Erfahrung und Ausbildung zumindest in Oberflächenprüfverfahren vorhanden. Die Weiterbildung in Richtung Thermografie ist durch das wachsende Angebot an Kursen zwar problemlos möglich, doch wiederum mit Kosten verbunden.

All diese Einzelpunkte führen zu einer großen Einstiegshürde und Widerständen bei der Einführung der Thermografie als Prüfverfahren, wodurch auch bei klaren Vorteilen der Thermografie häufig den vertrauteren Verfahren den Vorzug gegeben wird. Daher bleibt in vielen Fällen das neue Verfahren auf die Fälle beschränkt, wo keine Alternative vorhanden ist. Doch auch, wenn die Entscheidung für Thermografie gefallen ist, kann die Einführung sehr lange dauern von der ersten prototypischen Anwendung bis hin zu Nutzung als Standardverfahren innerhalb eines Unternehmens, insbesondere wenn mehrere Standorte koordiniert werden müssen. Im Folgenden wird am Beispiel einer Prüfanlage zur Blitz- und Heißluftthermografie gezeigt, wie eine solche Einführung durchgeführt wurde und welche Hindernisse dabei zu überwinden waren. Nach der Vorstellung der Prüfaufgabe und der Umsetzung in ein System wird der Ablauf der weltweiten Einführung dargestellt.

2. Prüfaufgabe und Umsetzung in ein Prüfsystem

2.1 Prüfaufgabe und zu prüfende Komponente

Die hohen Wirkungsgrade moderner Gasturbinen werden erreicht, indem ein großer Temperaturhub aus der Verbrennung auch durch Turbine genutzt werden kann. Das bedeutet, dass die Anforderungen an die verwendeten Materialien sehr hoch sind und durch die oft schwer zu beherrschenden Herstellungsprozesse auch ein erheblicher Bedarf an zerstörungsfreier Prüfung der Komponenten besteht. Für zwei der zu prüfenden Eigenschaften der am stärksten belasteten Turbinenschaufeln wird Thermografie eingesetzt: Die Durchgängigkeit der Kühlluftbohrungen wird mit Heißluftanregung geprüft, während mit Blitzthermografie die keramische Beschichtung auf Delaminationen getestet wird.

Die Einführung der Blitzthermografie war für diese Prüfung unumgänglich: Da hier kein anderes zerstörungsfreies Verfahren zur Verfügung steht, wurde in diesem Bereich die Thermografie zuerst eingeführt und auch Hürden wie Normen und Zertifizierung in Kauf genommen. Nach einem ersten Prüfsystem mit sehr hohem Personal- und Servicebedarf, war der Grundstein gelegt, um ein erstes automatisiertes System einzuführen [1].



Abb. 1. Fertigung einer Gasturbine – gezeigt ist ein Ausschnitt der Brennkammer und die Laufschaufeln des Rotors

Für die Heißluftthermografie gibt es zwei alternative Verfahren: Der Pincheck – eine manuelle Prüfung mit Nadeln – und der Test mit Wasser. Beide Verfahren sind personalaufwändig und fehleranfällig, wodurch der Vorteil, den die Thermografie bietet, zu einer schnellen Amortisierung des eingesetzten Kapitals für die Prüfanlage führt. Durch die Kombination der beiden Verfahren in einem System lassen sich die Kosten noch weiter reduzieren: Zum einen fallen in einem kombinierten System die Kosten für die IR-Kamera nur einmal an, zum anderen werden zwei Prüfungen im gleichen Arbeitsschritt durchgeführt.

2.2 Kombiniertes Prüfsystem für Blitz- und Heißluftthermografie

Das in [1] beschriebene Prüfsystem wurde bereits an drei Fertigungsstandorten innerhalb der Firma eingeführt und mit Erfolg eingesetzt. Damit war bereits ein Teil des Ziels erreicht, nach vergleichbaren Standards und mit austauschbaren Systemen zu prüfen. Allerdings war noch nicht die vollständige Lieferkette einbezogen: Während im Wareneingang mit Thermografiesystemen geprüft wurde, verwendeten Zulieferer noch die alternativen Methoden, was zwangsläufig zu Diskrepanzen und Nacharbeit führte. Auf Basis der Erfahrungen der ersten automatisierten Prüfsystems wurde ein neues System konzipiert, das die Voraussetzung für die weltweite Einführung in der Lieferkette erfüllte: Durch Einschränkung des zu prüfenden Bauteilumfangs und Verzicht auf die akustische Anregung konnte die Komplexität des Prüfsystems deutlich reduziert werden: Statt eines roboterbasierten Systems wird die Kamera auf Linearachsen montiert und das Bauteil auf einen Dreh-Schwenk-Tisch platziert. Als Basis diente eine bereits vorhandene Entwicklung eines optischen 3D-Scanners zur Erfassung der Form. Gegenüber dem ersten Prüfsystem konnte eine Reduktion des Bauraums auf ein Drittel erreicht werden, wobei ein zusätzliches optisches System eingeführt wurde.

Abbildung 2 und 3 zeigen den grundsätzlichen Aufbau des neuen Prüfsystems: Im vorderen Bereich befindet sich der Dreh-Schwenktisch. Der Tisch ist mit einer zweifachen Drehdurchführung für Pressluft ausgestattet: Zum einen wird hier die Heißluft für die Prüfung der Kuhlloftbohrungen hindurchgeführt, zum anderen steht Pressluft für eine pneumatische Halterung der Prüfobjekte zur Verfügung. Der Tisch kann um die Hochachse rotiert und von -20 bis 55° geschwenkt werden, was eine Prüfung von Kopfplatten und Plattform ermöglicht. Im hinteren Bereich befinden sich die visuelle und IR-Kamera und Beleuchtungseinheiten: Für die Thermografie stehen zwei Blitzröhren mit insgesamt 6kJ Blitzenergie zur Verfügung. Für die optische 3D-Prüfung stehen zwei Lichtquellen zur

Verfügung. Ein Projektor steht in definiertem Winkel zur Schwarz-Weiß-Kamera, so dass über Streifenprojektion die Oberfläche erfasst werden kann. Um die Oberfläche in Farbe zu erfassen werden LED in den Grundfarben eingesetzt, die nacheinander durchgeschaltet werden.

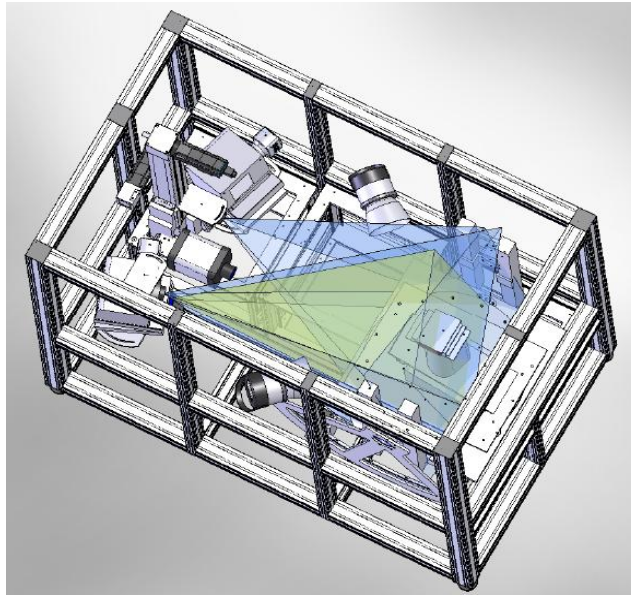


Abb. 2. Aufbau des Prüfsystems: Rechts der Drehtisch mit dem zu prüfenden Objekt, im linken Bereich die Kameras, Beleuchtungseinheiten und die dazugehörigen Strahlengänge



Abb. 3. Blick ins Innere des Prüfsystems: Im Vordergrund der Dreh-Schwenktisch, oben rechts der Heißluftschlauch, im Hintergrund die Kameras für den visuellen und Infrarotbereich, sowie Blitzanregung und Beleuchtung

3. Detektierbare Ungängen

Voraussetzung für höchste Wirkungsgrade einer Gasturbine ist eine möglichst hohe Eingangstemperatur des heißen Gases auf die erste Schaufelreihe. Ermöglicht wird dies durch Kühlkonzepte für die Schaufeln, die aktive und passive Elemente vereinen: Zum einen sorgt eine keramische Beschichtung für eine geringe Wärmeleitung vom Gas zur metallischen Struktur, die wiederum von innen gekühlt wird. Gleichzeitig strömt Luft über Bohrungen aus der Schaufel und bildet einen Kühlluftfilm. Sowohl die Beschichtung als auch die Bohrungen werden mit der Thermografieanlage geprüft.

3.1 Delaminationen

Der wichtigste zu prüfende Parameter ist die Haftung der Beschichtung auf dem Basismaterial. Durch den geringeren Wärmefluss können abgelösten Stellen bereits im Thermogramm erkannt werden, wobei in der Regel Pulsphasenauswertung zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses verwendet wird.

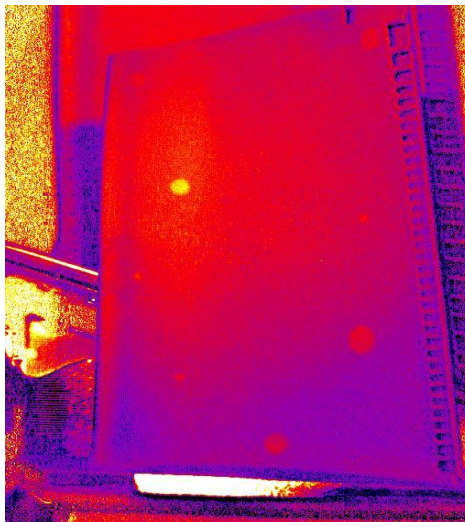


Abb. 4. Phasenbild einer Delaminationsprüfung mit Blitzthermografie

Abbildung 4 zeigt ein Phasenbild einer Testschaufel mit einer Reihe von künstlichen und einer natürlichen Delaminationen: Insbesondere die natürliche Delamination zeigt einen starken Kontrast zur Umgebung.

3.2 Verstopfte Kühlluftbohrungen

Zur Prüfung auf verstopfte Kühlluftbohrungen wird abwechselnd heiße Luft von 50-80°C und Luft bei Raumtemperatur durch die Bohrungen geleitet und der Temperaturverlauf im Lock-In-Verfahren ausgewertet. Im Amplituden- sowie im Phasenbild sind die offenen Kühlluftbohrungen deutlich sichtbar. Die Bewertung erfolgt sowohl manuell durch den Prüfer als automatisch durch Bildverarbeitung für häufig geprüfte Bauteile.

Abbildung 5 zeigt ein Amplitudenbild einer Schaufel mit vollständig geöffneten Kühlluftbohrungen. Verstopfte Bohrungen fehlen im Bild und sind als Lücke deutlich erkennbar.

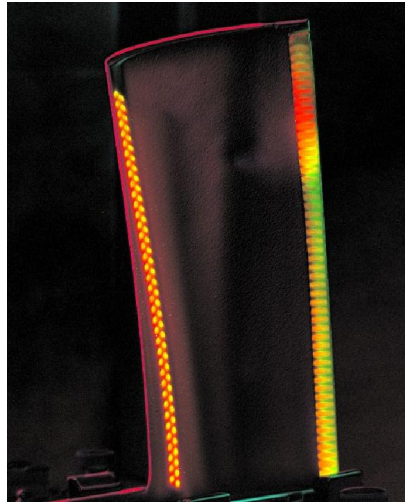


Abb. 5. Amplitudenbild für die Prüfung auf verstopfte Kühlluftbohrungen

3.3 3D-Oberfläche

Keine eigentliche Prüfung sondern eine Aufnahme zur Dokumentation stellt die 3D-Erfassung der Oberflächenform dar. Mit einer Streifenprojektionstechnik im kombinierten Gray-Code und Phasenshiftverfahren wird eine Auflösung von $50\mu\text{m}$ erreicht bei einem Arbeitsraum von 80cm Durchmesser. Durch die kalibrierte farbige Beleuchtung wird zusätzlich die Oberflächentextur erfasst. Durch die einheitliche und kalibrierte Erfassung der Schaufeln mit vergleichbaren Systemen kann so eine durchgehende Dokumentation des Schaufelzustands erreicht werden.

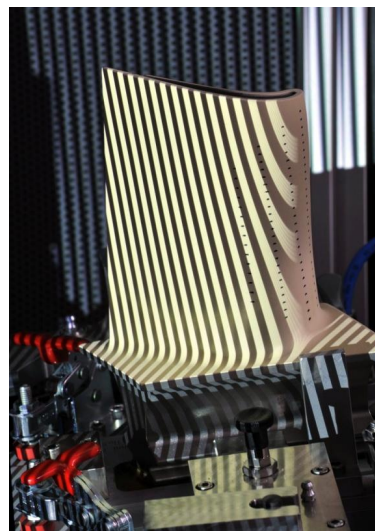


Abb. 6. Projektion von Streifen auf Turbinenschaufel zur Erfassung der 3D-Geometrie

Abbildung 6 zeigt ein Bild aus der Streifensequenz – die eigentliche Aufnahme erfolgt mit einer Schwarzweisskamera.

3.4 Kombination der Prüftechniken

Durch die Kombination der einzelnen Prüftechniken in ein System kann eine Kostenreduktion durch zwei Aspekte erreicht werden: Zum einen ist nur ein Prüfsystem für

mehrere Anwendungen notwendig, zum anderen wird der Personalaufwand reduziert. Durch die Messung in einer Anlage werden alle Daten im gleichen Koordinatensystem erfasst, wodurch es leicht möglich ist Prüfergebnisse zu kombinieren. Zum Beispiel kann das zweidimensionale Phasenbild aus der Heißluftthermografie als Textur auf das 3D-Modell gelegt werden, um zu unterscheiden, ob eine Kühlluftbohrung tatsächlich verstopft oder nur durch den Anstellwinkel nicht mehr sichtbar ist.

Die im Einsatz befindlichen Prüfsysteme wurden je nach den Bedürfnissen der Standorte in unterschiedlicher Konfiguration ausgeliefert, jedes System ist allerdings so ausgelegt, dass alle Verfahren jederzeit leicht nachgerüstet werden können. Einziger Nachteil dieser Auslegung sind die unvermeidlichen Kompromisse bei der Strahlführung der optischen Systeme: In einem reinen Blitzthermografiesystem könnte für ein verbessertes Signalrauschverhältnis der Blitz deutlich näher an das Objekt herangerückt werden. Für die durchzuführenden Prüfungen ist die Auslegung ausreichend.

3.5 Automatisierung des Ablaufs

Um den Zeitvorteil nutzen zu können, der durch die Kombination der Anregungstechniken entsteht, ist der Ablauf automatisiert: Das System fährt voreingestellte Position von Kamera und Drehtisch an, führt die Prüfungen durch und stellt pro Ansicht ein Ergebnisbild dar. Wenn möglich, wird für die Bohrungsprüfung auch die automatische Erkennung der Bohrlöcher durchgeführt und dem Benutzer dargestellt. Der Prüfer führt nun die abschließende Bewertung durch, anschließend wird automatisch ein Prüfprotokoll erzeugt und mit den Bilddaten abgelegt.

4. Flächendeckende Einführung des Prüfsystems

Ein wesentliches Ziel war die Einführung eines weltweit identischen Prüfsystems über alle Standorte einschließlich der Zulieferer: Statt einer flächendeckenden Wareneingangsprüfung der gelieferten Komponenten wird die Dokumentation vom Zulieferer erstellt und dem Bauteil beigelegt. Durch die Vereinheitlichung der Prüfsysteme ist auch eine schnelle Reaktion auf Lieferverschiebungen möglich.

4.1 Einführung in Europa

Da es sich um ein neues Prüfsystem handelte wurde zuerst ein System aufgebaut und in Betrieb genommen. Nach anfänglichem Probetrieb begann der Regelbetrieb am ersten Standort, wobei aus den ersten Erfahrungen bereits einige Nachbesserungen in Soft- und Hardware vorgenommen wurden. Nach einem Jahr Probetrieb wurde eine Kleinserie aufgelegt und das System europaweit an 5 Standorten eingeführt. Durch die einjährige Erfahrung mit dem Prototyp, konnte nach kurzer Einarbeitungszeit schnell ein produktiver Betrieb erreicht werden. Schulungen nach ISO 9712 waren lokal verfügbar und durch die zweisprachige Ausführung der Prüfanweisungen war der administrative Aufwand minimal.

4.2 Weltweite Einführung

Außerhalb von Europa war der Einsatz in den USA und China vorgesehen. Von technischer Seite sind die Hindernisse für die Einführung gering, da die Systeme bereits auf diesen Einsatz ausgelegt sind, allerdings sind die administrativen Hürden hier größer.

Bei Thermografiesystemen ist ein grundsätzliche Hürde die Exportkontrolle: Für die Infrarotkameras gelten je nach Herstellerland unterschiedliche Restriktionen. Bei der Auswahl der Kamera spielt neben den technischen Eigenschaften die Exportkontrolle eine

ebenso wichtige Rolle. Die Wahl fiel auf ein Kamerasystem, das mit unterschiedlichen Detektoren bei sonst identischer Ausstattung ausgeliefert wird. Für Europa und USA wurde ein InSb verbaut, der gute Performance mit angemessenem Preis verbindet. Die Lieferung dieses Detektors nach China ist nicht möglich, daher wurde für China ein MCT-Detektor französischer Produktion gewählt. Durch die Wahl eines europäischen Systemanbieters ist die Rücklieferung für die regelmäßig anfallenden Kühlerwartungen mit geringer Verzögerung möglich – bei amerikanischen Anbietern wäre der Transport nach Europa mit erheblichem bürokratischem Aufwand verbunden. Vor Ort sind jeweils Reservekameras vorhanden, um die Zeit für Reparaturen zu überbrücken.

Das zweite große Hindernis für die Einführung ist die Schulung der Mitarbeiter. Für die chinesischen Mitarbeiter ist die Verfügbarkeit von Schulungen vor Ort das größte Hindernis: Hier konnte mit einer Inhouse-Schulung unter Verzicht auf eine Zertifizierung zumindest ein Mindeststandard erreicht werden. In den USA ist die Verfügbarkeit von Schulung sehr gut, so dass letztlich nach Vereinheitlichung der Prüfanweisungen die Einführung der Methode abgeschlossen ist.

5. Ergebnis der weltweiten Einführung

Inzwischen sind weltweit 11 Systeme ausgeliefert und in unterschiedlicher Konfiguration im Einsatz und es zeigen sich bereits die Vorteile der einheitlichen Auslegung der Systeme. Neben dem offensichtlichen Einsparpotential durch die gemeinsame Beschaffung wird insbesondere der standortübergreifende Austausch zwischen den Stufe-3-Prüfern und Entwicklern deutlich vereinfacht. Prüfprogramme können direkt weitergegeben werden, so dass Optimierungen des Prüfablaufs schnell überall verfügbar sind. Auch die Einrichtung auf neue Bauteiltypen wird durch den Austausch schneller: Experten von anderen Standorten können Änderungen schnell vor Ort nachvollziehen und ihr Wissen teilen. Diese Vorteile lassen sich schwer quantifizieren, doch bereits der Kostenvorteil allein macht die Einführung der Systeme zu einem Erfolg.

Referenzen

[1] Heinrich W., Zettner J., Schreer O., Spellenberg B., Peppermüller Ch., Hierl Th., Goldammer M.: Automatisiertes System zur thermographischen Prüfung von Gasturbinenschaufeln, DGZfP-Tagungsband zur Jahrestagung 2003