

Nutzung der multispektralen Eigenschaften von Materialien zur Qualifizierung und zerstörungsfreien Prüfung von Komponenten

Konstantin EISLER^{*}, Matthias GOLDAMMER^{*}, Max ROTHENFUSSER^{*},
Walter ARNOLD^{**}, Christian HOMMA^{*}

^{*} Siemens AG, GTF Nondestructive Evaluation, Otto-Hahn-Ring 6, 81739 München,
konstantin.eisler.ext@siemens.com, matthias.goldammer@siemens.com,
max.rothenfusser@siemens.com, christian.homma@siemens.com

^{**} 1. Physikalisches Institut, Universität Göttingen und Fachrichtung
Materialwissenschaften und Werkstofftechnik, Universität des Saarlandes, Campus D 2.2,
66123 Saarbrücken

Kurzfassung. Die spektrale IR-Thermografie lässt sich nutzen, um abbildend Materialien zu bestimmen oder zu unterscheiden. Durch den Miteinbezug des sichtbaren Spektralbereichs kann man Thermografiemessungen durch eine vereinfachte Darstellung besser bewerten.

Für die reine thermografische Analyse kann z. B. durch Blitzanregung die Oberfläche eines Prüfobjektes homogen erwärmt und das detektierte Infrarotsignal hinsichtlich der spektralen Information analysiert werden. Bisher ist beim Einsatz von IR-Filtern im Wellenlängenbereich von 3,4–5,1 μm das verbleibende Signal gerade bei kurzen Wellenlängen für eine zuverlässige Interpretation der Messdaten oft zu schwach. Doch durch geschickte Auswertung, z. B. über Filteralgorithmen, können insbesondere IR-farbige Materialien wie beispielsweise Verschmutzungen robust von IR-grauen unterschieden werden. Die Methode kann etwa herangezogen werden, um die bei Ultraschallanregung durch Verschmutzung auftretenden Scheinanzeigen von Defekten zu unterscheiden.

Um IR-Messungen besser interpretieren zu können, ist die zusätzliche Verwendung des visuellen Spektralbereichs gerade dann vorteilhaft, wenn das Prüfteil für eine Nachbegutachtung nicht mehr vorliegt. Durch eine parallaxenfreie Bildfusion mittels eines im Infraroten transparenten und im Sichtbaren reflektierenden Strahlteilers können simultan Farb- und IR-Kamerainformationen zu einem neuen Bild überlagert werden. Ein Vorteil dieser Anwendung ist insbesondere bei komplex geformten Prüfteilen gegeben aufgrund des identischen Blickwinkels beider Kameras auf das Prüfteil. Durch die Bildinformationen aus dem sichtbaren und infraroten Spektralbereich ergeben sich vielfältige Möglichkeiten, Prüfobjekte zu bewerten: So können Scheinanzeigen einer thermografischen Messung mit Hilfe eines Farbbildes höherer Auflösung zuverlässiger identifiziert werden. Auch die Auffindung von Defekten auf dem Prüfteil wird vereinfacht durch die selektive Einblendung von Informationen aus dem Sichtbaren in ein IR-Bild.

Des Weiteren ergeben sich auch für die Raumüberwachung neue Möglichkeiten. So kann man durch gezieltes Setzen von Schwellen und geeigneter Kombination der Bildinformationen wichtige Bildinhalte hervorheben bzw. unwichtige unterdrücken.

1. Einführung

Bis jetzt haben IR-Kameras den jeweiligen Empfindlichkeitsbereich nur integral gemessen und nicht wie eine Farbkamera unter Zuhilfenahme von spektralen Banden. Lösungen wie Dualband-Kameras, welche simultan im mittelwelligen Infraroten (MWIR) und langwelligen Infraroten (LWIR) oder Dual-Wellenlängen-Kameras, welche in zwei engen spektralen Banden im MWIR arbeiten sind aufgrund ihrer geringen Stückzahlen und den seltenen Anwendungen noch sehr teuer. Die nächste Generation der IR-Kamera ist eine Kombination aus einem Fourier-Transform-Infrarot-Spektrometer (FTIR Spektrometer) und einer IR-Kamera [1,2], wodurch pro Detektorspalte ein komplettes Spektrum gemessen werden kann.

Dem Autor sind bislang noch keine Anwendungen bekannt, welche mit Hilfe der spektralen Information von Materialien Scheinanzeigen in einer Blitzthermografie reduzieren oder Materialeigenschaften im MWIR nutzen, um bestehende Systeme robuster für eine Prüfteilqualifizierung zu machen. Diese Lücke versuchen die zwei folgenden Ansätze zu füllen. Einerseits wird eine Hybrid-Kamera vorgestellt, die mittels eines im IR transparenten und im Sichtbaren (RGB – Rot Grün Blau) reflektierenden Strahlteilers die Bilder einer IR-Kamera mit den Bildern einer RGB-Kamera zu einem neuen Bild kombiniert. Dabei haben durch den parallaxenfreien Ansatz beide Kameras denselben Blickwinkel auf das Prüfobjekt, wodurch kürzeste Arbeitsabstände ohne Parallaxenfehler realisiert werden können. Die bereits verfügbaren Kamerasysteme arbeiten mit zwei nebeneinander aufgebauten Kameras und haben deshalb einen unterschiedlichen Blickwinkel auf das Prüfobjekt [3,4], da sie keinen Strahlteiler benutzen.

Auf der anderen Seite wurde eine IR-Kamera mit einem positionierbaren Filterrad nachgerüstet und mit IR-Filtern ausgestattet, um bei einer aktiven Blitzthermografie die Materialeigenschaften zu nutzen, um so zwischen spektral aktiven (IR-farbigen) und spektral nicht aktiven (IR-grauen) Materialien zu unterscheiden [5]. Dafür wird die Wellenlängenabhängigkeit der Emissivität ausgenutzt.

2. RGB – IR kombinierende Hybrid-Kamera

2.1 Aufbau und Vorteil für existierende Thermografie Systeme

Die vorgestellte Hybrid-Kamera kombiniert mittels Strahlteiler den RGB- und den IR-Wellenlängenbereich. Dadurch haben beide Kameras eine parallaxenfreie Sicht auf das Prüfobjekt, was insbesondere bei Prüfobjekten mit komplexer Geometrie oder kleinen Prüfobjekten und geringem Arbeitsabstand von Vorteil ist. Die Hybrid-Kamera in Abbildung 1 links besitzt eine Farbkamera, die gegenüber der IR-Kamera mehr als die doppelte Auflösung hat. Des Weiteren kann die optische Achse der RGB-Kamera mittels fünf Freiheitsgraden zur optischen Achse der IR-Kamera ausgerichtet werden, um durch Nachfokussierung der Festbrennweitenobjektive unterschiedliche Arbeitsabstände leicht realisieren zu können. Durch die Vielzahl an verfügbaren RGB-Kameras und entsprechenden Objektiven kann die Farbkamera auf die jeweiligen Bedürfnisse abgestimmt werden, wodurch entweder schnellere Hybrid-Kameras oder Systeme mit höherer Auflösung der RGB-Kamera realisiert werden können. Durch die kompakte Bauform und einen integrierten Hub entstand ein kompaktes portables Kamerasystem, das mit einem Netzkabel als einziger Verbindung auch von einem Laptop aus gesteuert werden kann. Im Vergleich mit den bestehenden Thermografiemesssystemen verfügt das Ergebnisbild der Hybrid-Kamera (Abbildung 1 rechts) über eine höhere Detailschärfe, die Farbinformation aus dem sichtbaren Spektralbereich und ebenso die vollständige

Defektinformation durch die IR-Kamera. Wegen der Möglichkeit der bildsynchronen Darstellung lassen sich die Ergebnisbilder auf dem Bildschirm einfach mit dem Prüfobjekt durch den Prüfer vergleichen, indem er z. B. mit einem Markierstift den Defekt einkreist, was gleichzeitig auf dem Bildschirm zu sehen ist.

In Abbildung 2 links sieht man die gute Passgenauigkeit von IR- zu RGB-Bild. Dadurch lassen sich Defekte leichter auf dem Prüfteil auffinden. Wegen der höheren Auflösung der RGB-Kamera gewinnt man auch bei der Auswertung von Detailansichten wie in Abbildung 2 rechts einen Vorteil.

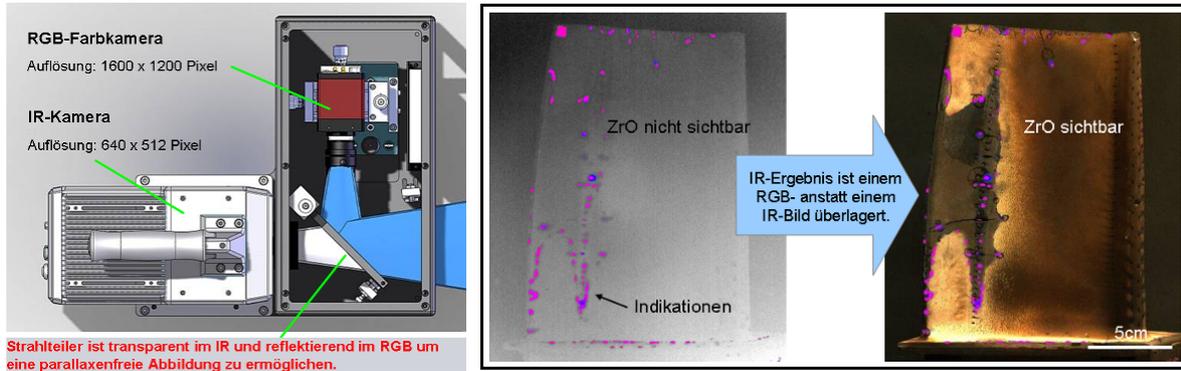


Abbildung 1. Links: Schematische Darstellung der Hybrid-Kamera mit Strahlteiler, IR- und RGB-Kamera. Rechts: Vergleich der heute erreichbaren Darstellungsmöglichkeiten der IR-Technologie, bei der das Ergebnis einer Ultraschallthermografie in Magenta und Blau einem IR-Bild überlagert ist. Der Sprung zur Hybrid-Technologie ermöglicht, dass das IR-Ergebnisbild einem Farbkamerabild überlagert ist, in dem Zustand der Beschichtung, Grad der Verschmutzung, Risse und Kühlluftbohrungen erkennbar sind.

Der Vergleich der Hybridbilder mit den IR-Bildern in Abbildung 2 rechts zeigt den Vorteil der RGB-Kamera mit höherer Auflösung und besserem Kontrast im Vergleich zur Benutzung von lediglich der IR-Kamera. Die IR-Kamera kann zwar die entstandene Wärme detektieren, allerdings erhält man nur eine geringe Information über Quelle und Ort der Entstehung. Das Hybridbild hingegen kann selbst noch den Riss auflösen, der sich in der Turbinenschaufel befindet. Dies kann nur durch den parallaxenfreien Aufbau erreicht werden, der die Passgenauigkeit und die Detailschärfe liefert, um Risserwärmungsmechanismen [6,7,8] gerade an kleinen Bauteilen mit komplexer Geometrie zu überprüfen.

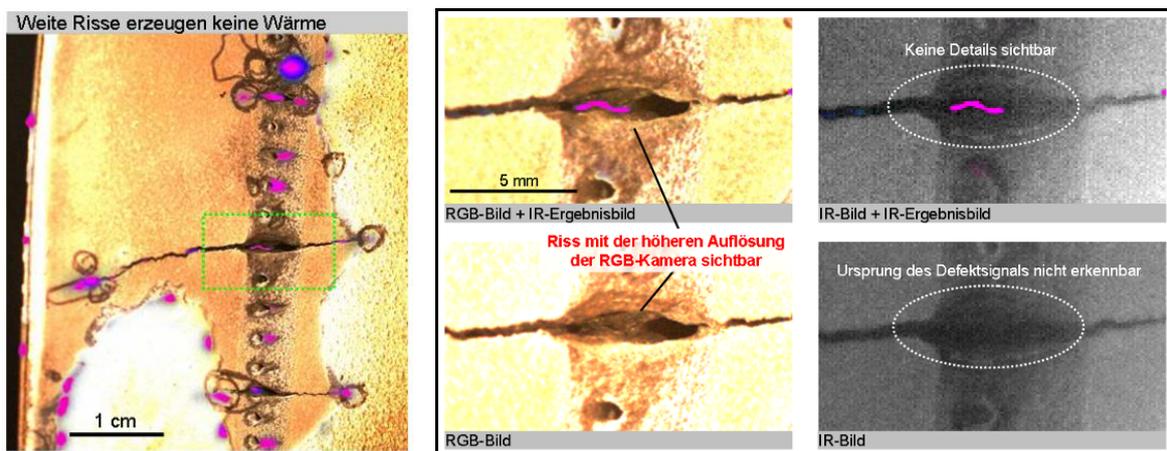


Abbildung 2. Links: IR-Ergebnisbild dem RGB-Bild überlagert. Die gute Passgenauigkeit beider Bilder zueinander ermöglicht die direkte Auswertung der Messung auf dem Bildschirm ohne einen weiteren Abgleich mit dem Prüfteil zu machen. Rechts: Vergleich des Hybrid-Bildes, in dem zu erkennen ist, dass die Wärme durch die Ultraschallanregung an einer Berührfläche tief im Innern eines Risses in der Turbinenschaufel entstand. Im reinen RGB-Bild ist selbst der Riss zu erkennen, wohingegen mit dem reinen IR-Bild keine hilfreiche Information gewonnen wird.

2.2 Benutzung der RGB-Information für die verbesserte Qualifizierung von Prüfteilen

Wegen der guten Passgenauigkeit von IR- zu RGB-Bild lässt sich die Information des sichtbaren Spektralbereichs nutzen, um Informationen im IR-Spektralbereich zu unterdrücken oder zu akzentuieren. Umgekehrt ist das auch möglich. Das nächste Beispiel bezieht sich auf den ersten Fall.

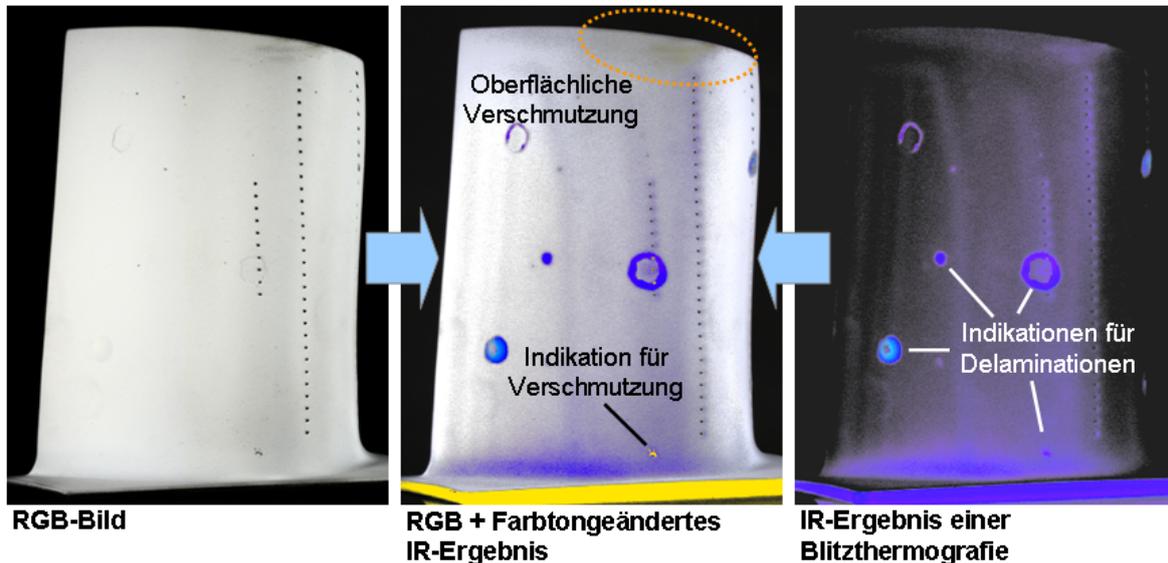


Abbildung 3. Links: RGB-Bild einer neuen mit Zirkoniumoxid (ZrO) beschichteten mit Defekten präparierten Inconel-Gasturbinenschaufel mit Kühlluftbohrungen. Mitte: Hybrid-Endergebnisbild, bei dem das mit Hilfe des RGB-Bildes nachbearbeitete Blitzthermografie-Ergebnisbild dem unbearbeiteten RGB-Bild überlagert ist. Rechts: Ergebnisbild einer Blitzthermografie, in dem Delaminationen blau angezeigt werden.

Abbildung 3 Mitte zeigt das Hybrid-Ergebnisbild, in dem die Delaminationen des Blitzthermografie-Ergebnisbildes blau markiert sind, allerdings zusätzlich auch einige Stellen gelb eingefärbt sind. An diesen Stellen ist die Helligkeit des RGB-Bildes unterhalb eines eingestellten Schwellwertes, was bedeutet, dass es sich um eine oberflächliche Verschmutzung handelt. Dies beruht auf der Annahme, dass die Verschmutzung dunkler als die ZrO Beschichtung ist, was in gleicher Weise auch für die Kühlluftbohrungen gilt. Allerdings erscheinen die Kühlluftbohrungen im mittleren Bild nicht in gelb, weil es an der gleichen Stelle im IR-Ergebnisbild rechts keine blaue Indikation für einen Defekt gibt. Das heißt, dass es an den gelb markierten Stellen sowohl im RGB als auch im IR-Ergebnis eine gefundene Indikation gibt. Deshalb wurde der Farbton des IR-Ergebnisbildes von blau nach gelb geändert. Das nachbearbeitete Blitzthermografieergebnisbild wird dann dem unbearbeiteten RGB-Bild überlagert. Die Farbtonänderung geschieht im Farbton/Sättigungs/Helligkeits (FSH) Farbraum, was ermöglicht, dass man nur einen Parameter ändern muss. Im RGB-Farbraum müsste man für dasselbe Ergebnis alle drei Parameter ändern.

2.3 Detailansichten des Hybrid-Bildes

In den Detailansichten in Abbildung 4 sieht man anhand zweier Beispiele die Vorteile der oben besprochenen Darstellung. Die linke Bildserie von oben nach unten in Abbildung 4 zeigt, dass es im IR-Ergebnis eine Indikation für eine Delamination und im RGB-Bild eine Indikation für eine Verschmutzung gibt. Durch die Änderung des Farbtones des IR-Ergebnisses von blau nach gelb wird diese Übereinstimmung dem Prüfer visualisiert. Mit dieser Information kann der Prüfer jetzt gezielt das Prüfteil an dieser Stelle begutachten und entscheiden, ob weitere Untersuchungen stattfinden sollen oder ob es sich um einen Defekt

von geringfügiger Relevanz handelt. Der Vergleich des Hybridergebnisbildes mit dem IR-Bildausschnitt zeigt, dass der Defekt im IR-Bild aufgrund der niedrigen Auflösung und des geringen Kontrasts bei Raumtemperatur nicht zu erkennen ist. Die Bildserie auf der rechten Seite von Abbildung 4 zeigt eine andere Situation. Hier hat die gefundene Indikation keine Übereinstimmung mit einer Verschmutzung im RGB-Bild. Allerdings ist im RGB-Bild eine kleine Verschmutzung nahe der Delamination zu erkennen. Dies kann zur einfacheren Positionsbestimmung für eine Markierung genutzt werden ohne die Verschmutzung selbst fälschlicherweise als oberflächlichen Indikator für eine Delamination zu kennzeichnen. Dadurch wird in einem Reparaturprozess die richtige Stelle bearbeitet.

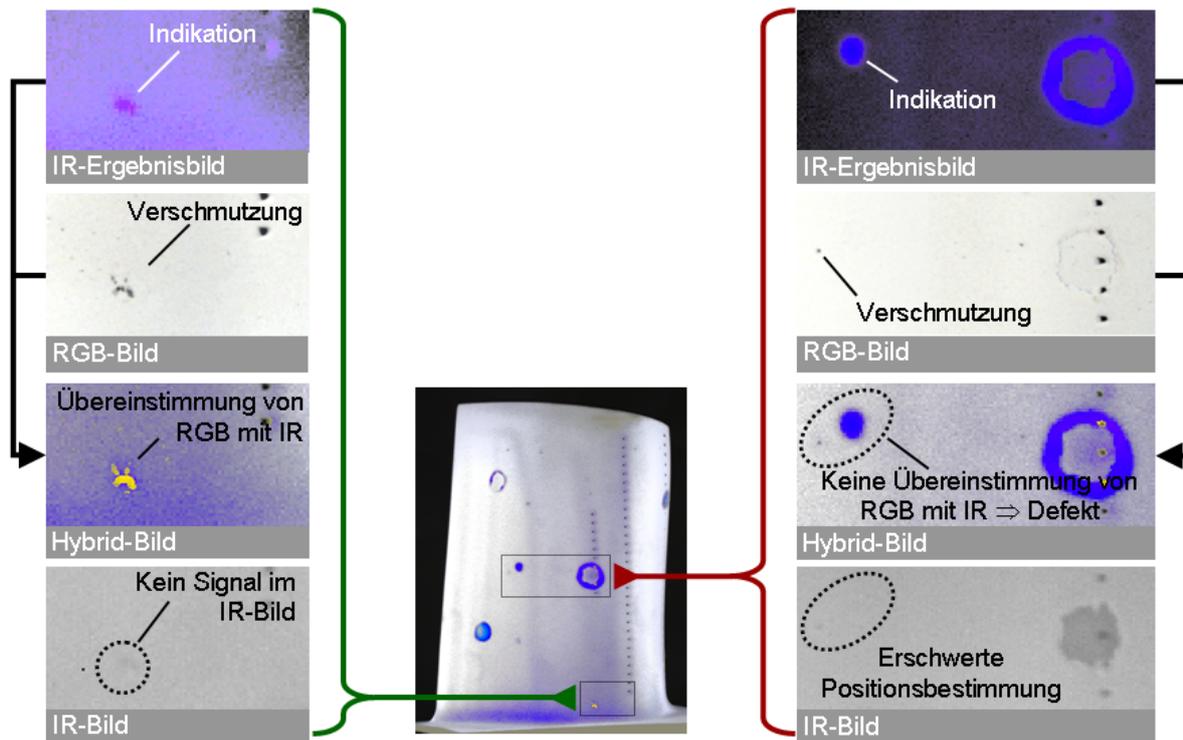


Abbildung 4. Links: Im Blitzthermografieergebnisbild wurde eine Übereinstimmung mit dem RGB-Bild gefunden, wodurch im IR-Ergebnisbild der Farbton von blau nach gelb geändert wurde. Der Vergleich mit dem IR-Bild zeigt den Vorteil der Hybrid-Kamera. Rechts: Die gefundene Indikation hat im RGB keine Übereinstimmung. Die Überlagerung des IR-Ergebnisbildes mit dem RGB-Bild zeigt, dass die oberflächliche Verschmutzung und die Delamination nah beieinander liegen, wodurch die Lokalisierung vereinfacht wird und Fehleinschätzungen vermieden werden. Das IR-Bild liefert auch in diesem Fall nicht den entscheidenden Hinweis.

Die vorausgegangenen Detailansichten haben nochmals die gute Passgenauigkeit des IR- zum RGB-Bild gezeigt, ohne die gegenseitige Benutzung der jeweiligen Spektralinformationen nicht erfolgreich wäre. Andere Kameraansätze, bei denen IR- und RGB-Kamera nebeneinander positioniert werden, erlauben diese Präzision nicht.

Eine andere Möglichkeit, die wellenlängenabhängigen Materialeigenschaften im MWIR Bereich zu nutzen, beinhaltet die Benutzung von IR-Filtern.

3. Referenzlose wellenlängenabhängige Verschmutzungserkennung im MWIR

3.1 Ausnutzung von IR-Filtern in der aktive Blitzthermografie

Um die spektralen Eigenschaften von Materialien im MWIR auszunutzen, wurde eine MWIR-Kamera mit einem positionierbaren Filtrerrad nachgerüstet (Abbildung 5 rechts) und mit IR-Filtern bestückt, die die Transmissionscharakteristiken wie in Abbildung 5 links besitzen. Bei der Messung werden Materialien mittels Blitzlicht angeregt und deren abgestrahlte Wärmestrahlung anschließend spektral detektiert. Dabei unterscheiden sich die Signalverläufe von IR-grauen Materialien in der normierten Darstellung nicht voneinander im Gegensatz zu IR-farbigen Materialien. Dieses Verhalten wird ausgenutzt, um spektral graue Materialien (wie die meisten Metalle) von IR-farbigen Materialien (wie einige Kunststoffe sowie organische Stoffe) zu unterscheiden. Dadurch lässt sich eine referenzlose Verschmutzungserkennung realisieren, die ein IR-graues Prüfteil von einer IR-farbigen Verschmutzung unterscheiden kann. Die übliche Lösung ohne die Ausnutzung der spektralen Materialeigenschaften beinhaltet eine vorangegangene Kalibrierung der Messapparatur auf das jeweilige Prüfobjekt.

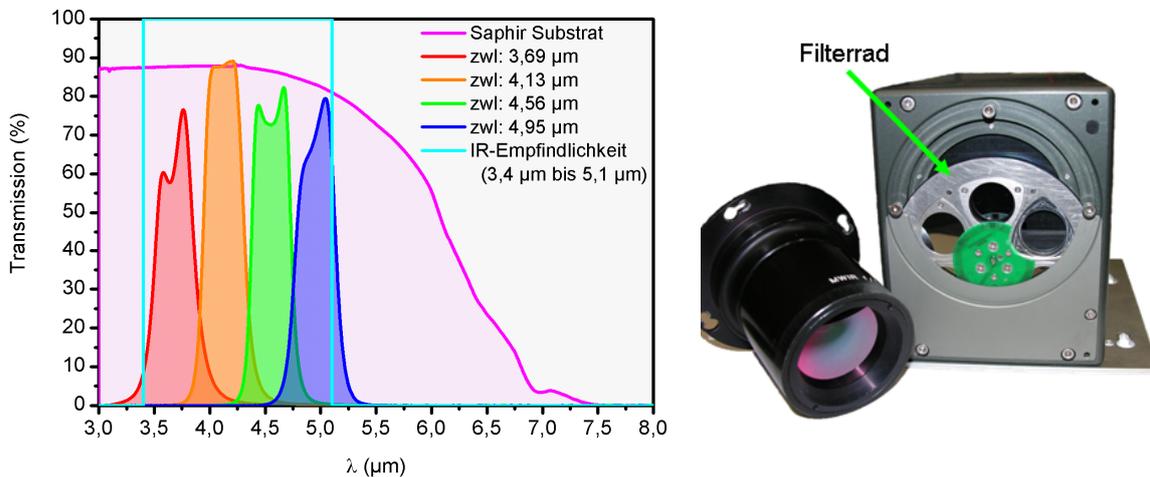


Abbildung 5. Links: Transmissionskennlinien der benutzen vier IR-Filter mit Angabe der zentralen Wellenlängen (zwl) inklusive der Darstellung des Empfindlichkeitsbereiches der IR-Kamera. Rechts: MWIR-Kamera (Hersteller: Thermosensorik GmbH; Modell: CMT256 M HS) mit integriertem positionierbarem Filtrerrad.

3.2 Von der Auswertung bis zum Endergebnis der spektralen Blitzthermografie

Die Amplitude eines IR-Signals nimmt nach einer Dirac-förmigen Puls-Blitzanregung eines halbumendlichen opaken Körpers in doppelt-logarithmischer Auftragung gemäß einer Geraden mit Steigung $-(1/2)$ ab. Vorausgesetzt, dass das betrachtete Material keine wellenlängenabhängige Emissivität oder Teiltransparenz besitzt, folgt das Signal für jeden betrachteten Wellenlängenbereich der gleichen Geraden (siehe Abbildung 6 links oben). Im Gegensatz dazu unterscheidet sich das IR-Signal von spektral aktiven Materialien wie in Abbildung 6 links und rechts unten zu sehen ist. Es soll hier die spektrale Streuung der vier Signale ausgewertet werden, um zwischen spektral grauen und farbigen Materialien zu unterscheiden. Da sich allerdings das Signal-Rausch Verhältnis bei der Benutzung von IR-Filtern verschlechtert, was sowohl an der Transmissionsintensität als auch an der Signalintensität in dem jeweiligen Spektralbereich liegt, kann das Rohsignal für eine zuverlässige Auswertung nicht genutzt werden. Deshalb werden zur Auswertung Geraden

an den Signalverlauf gefittet. Anschließend wird die Streuung der Geradensteigungen ausgewertet. Durch das Auswerten der Steigung der gefitteten Geraden wird der Einfluss von stark schwankenden Messwerten unterdrückt. Je größer die Streuung der Geradensteigungen ist, desto IR-farbiger ist das Material oder in dem betrachteten Beispiel die Verschmutzung. Im umgekehrten Fall: je geringer die Streuung ist, desto IR-grauer ist das Material, was dem verwendeten Fotolack entsprechen würde.

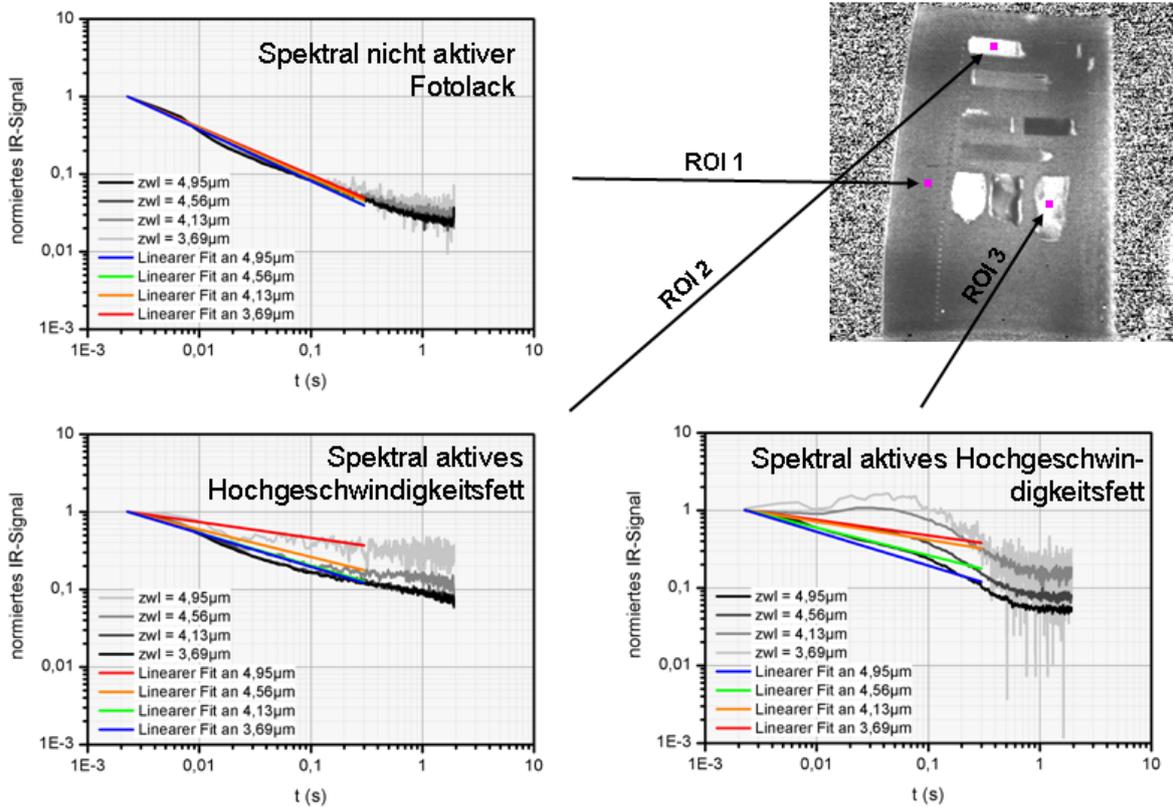


Abbildung 6. Rechts oben: IR-Bild einer mit Fotolack beschichteten Turbinenschaufel nach Blitzanregung, auf welche unterschiedliche Materialien in unterschiedlichen Schichtdicken aufgebracht wurden. Übrige Grafen: IR-Signalverlauf nach einer Blitzthermografie mit den vier IR-Filtern aufgenommen. Der spektrale Signalverlauf für jede *region of interest* (ROI) unterscheidet sich lediglich aufgrund der spektralen Eigenschaften der betrachteten Materialien.

Das Ergebnisbild in der Schwellwertdarstellung der spektralen Streuung ist in Abbildung 7 links zu sehen. Abbildung 7 rechts zeigt ein Foto des Testobjektes.

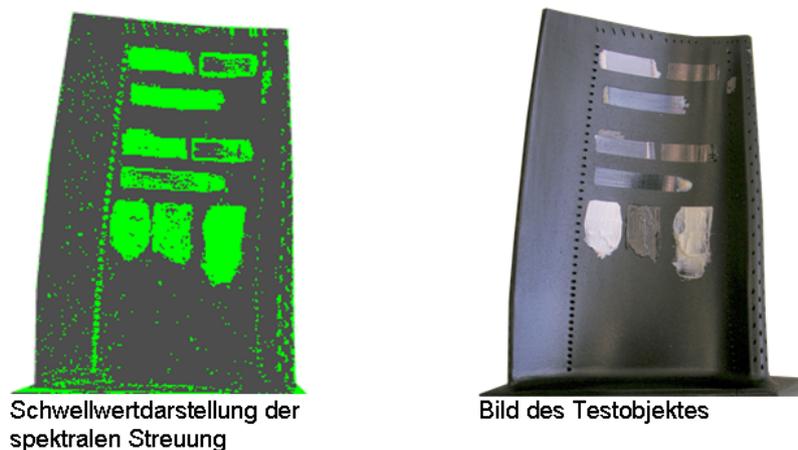


Abbildung 7. Links Schwellwertdarstellung der spektralen Streuung. In grün die IR-farbenen Verschmutzungen und grau der IR-graue Fotolack. Rechts: Das entsprechende Foto des Testobjektes.

Die Verschmutzungen konnten größtenteils von dem spektral grauen Fotolack unterschieden werden. Allerdings wurden alle Ecken und Ränder des lackierten Prüfteils als spektral aktiv erkannt, was auf die geringfügige Bildverschiebung zurückzuführen ist, die durch den Filterwechsel entsteht. Die Verschmutzungen, die nicht vollständig erkannt wurden, haben entweder keine spektrale Aktivität oder eine zu geringe spektrale Aktivität bei gleichzeitig zu dünner Schichtdicke, um sich spektral signifikant von dem Fotolack zu unterscheiden.

3.3 Spektrale Kontaminationserkennung an einer gebrauchten Turbinenschaufel

In dem folgenden Abschnitt wird die spektral detektierende Blitzthermografie wie bereits eingeführt an einer gebrauchten ZrO-beschichteten Gasturbinenschaufel durchgeführt. Bei diesem Prüfteil ist teilweise Fett in die poröse keramische Beschichtung diffundiert, was mit dem bloßen Auge nicht zu erkennen ist (siehe Abbildung 8 Mitte oben). Der Vergleich des Blitzthermografiebildes, das ohne Filter aufgenommen wurde, mit den vier Blitzthermografiebildern, die mit IR-Bildern (siehe Abbildung 8 unten) aufgenommen wurden, zeigt, dass insbesondere mit dem kurzwelligen IR-Filter das eindiffundierte Fett gut zu erkennen ist. Die Detektierbarkeit des Fettes sinkt mit steigender zwl des benutzten IR-Filters, was die spektrale Aktivität der Verschmutzung zeigt.

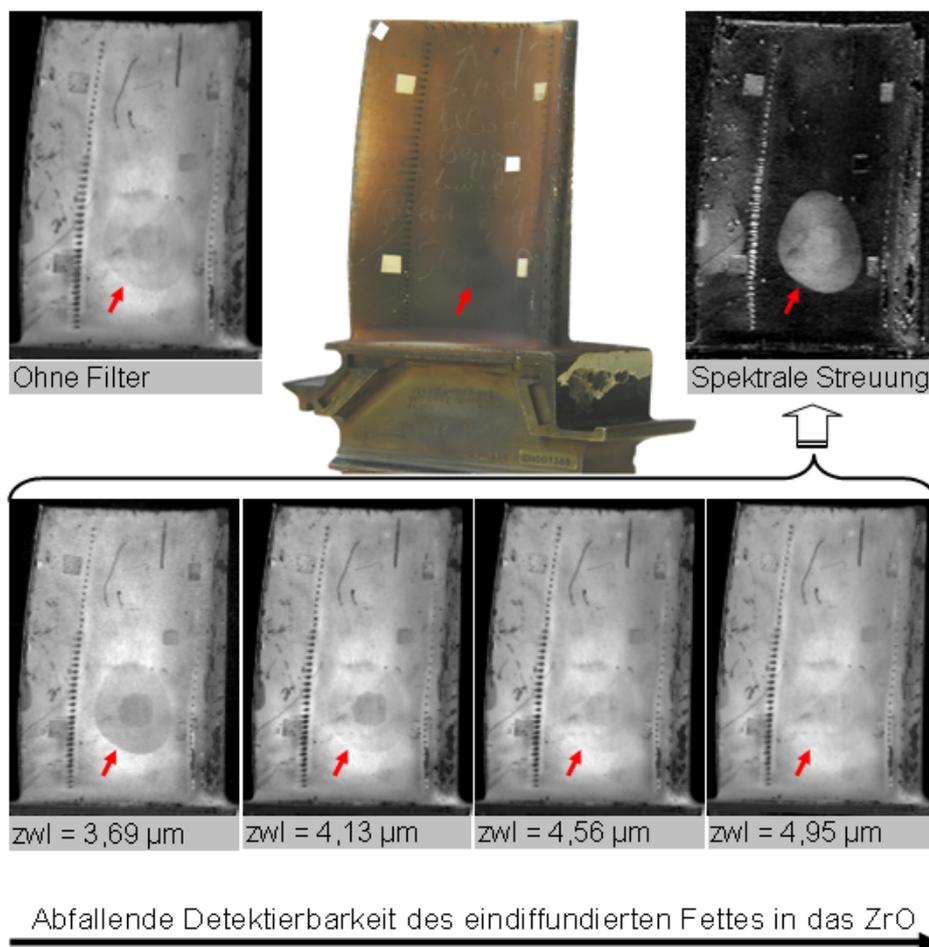


Abbildung 8. Mitte oben: Bild des Prüfobjektes. Links oben: Blitzthermografiebild ohne IR Filter aufgenommen. Unten links nach rechts: Blitzthermografiebilder mit den vier IR-Filtern aufgenommen. Rechts oben: Spektral ausgewertetes IR-Ergebnisbild.

Die Berechnung der spektralen Streuung der an den jeweiligen Signalverlauf gefitteten Geradensteigungen ergibt das Ergebnisbild in Abbildung 8 rechts oben in der

Grauwertdarstellung. Die Erkennbarkeit des eindiffundierten Fettes wurde signifikant gesteigert im Vergleich zu dem Bild, das ohne Filter aufgenommen wurde. Darüber hinaus ist im Ergebnisbild auf der Höhe der Verschmutzung am linken Rand der Turbinenschaufel eine weitere auffällige Verschmutzung erkennbar. Allerdings wäre eine Schwellwertdarstellung des Ergebnisbildes nicht so eindeutig, wie das Ergebnis aus Abbildung 7 links, da auch die ZrO Beschichtung durch den Alterungsprozess in der Gasturbine lokal IR-farbig geworden ist. Das hat zur Folge, dass die Beschichtung selbst nicht mehr eindeutig von einer spektral aktiven Verschmutzung unterschieden werden kann.

4. Zusammenfassung

Zwei Möglichkeiten wurden vorgestellt, wie man spektrale Farbe in die aktive IR-Thermografie einbringen kann. Der erste vorgestellte Weg kombiniert mittels Strahlteiler den sichtbaren mit dem infraroten Spektralbereich. Die parallaxenfreie bildsynchrone Aufnahme beider Spektralbereiche ermöglicht kürzeste Arbeitsabstände für kleine Prüfobjekte mit komplexer Geometrie. Dabei kann durch die geeignete Wahl der RGB-Kamera die Hybrid-Kamera entweder für eine schnelle bildsynchrone oder eine hochauflösende Einzelbildanwendung optimiert werden. Der zweite vorgestellte Weg teilt den Empfindlichkeitsbereich der IR-Kamera mittels IR-Filter gleichmäßig auf, um die IR-Farbigkeit von Materialien im MWIR-Bereich zu nutzen. Das ermöglicht die referenzlose Unterscheidung von spektral grauen und farbigen Materialien.

Referenzen

- [1] TELOPS, <http://www.telops.com/>, Industrial Hyper-Cam (July 27, 2011)
- [2] SPECIM, <http://www.specim.fi/>, Hyperspectral Cores – Imaging Spectrographs (July 27, 2011)
- [3] FLIR, <http://www.flir.com/cvs/eurasia/de/>, FLIR Commercial Vision Systems (July 27, 2011)
- [4] FLUKE, <http://www.fluke.com/>, Thermal Imaging – Smart View (July 27, 2011)
- [5] K. Eisler, M. Goldammer, M. Rothenfusser, W. Arnold, C. Homma, “Wie bringt man Farbe in die Thermografie?“, DGZfP-Jahrestagung 2010: ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung: Zerstörungsfreie Materialprüfung, Berlin: Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), *DGZfP-Berichtsband BB 122-CD*. - ISBN 978-3-940283-26-9, Poster 38
- [6] C. Homma, “Untersuchungen zu Mechanismus und technischer Umsetzung der akustischen Thermographie“, Dissertation, Fakultät 8, Universität des Saarlandes, Deutschland (2007)
- [7] M. Rothenfusser, C. Homma, Acoustic Thermography: Vibrational Modes of Cracks and the Mechanisms of Heat Generation, in *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, edited by D.O. Thompson und D.E. Chimenti (AIP Conference Proceedings **760**), 24, pp. 624–631 (2005)
- [8] C. Homma, M. Rothenfusser, J. Baumann, R. E. Shannon, Study of Heat Generation Mechanisms in Acoustic Thermography, in *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, edited by D.O. Thompson and D.E. Chimenti (AIP Conference Proceedings **820**), **25**, pp. 566–573, (2006)