

Wie bringt man Farbe in die Thermografie?

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

* Siemens AG, CT T DE HW 2, Otto-Hahn-Ring 6, 81739 München,
konstantin.eisler.ext@siemens.com, matthias.goldammer@siemens.com,
max.rothenfusser@siemens.com, christian.homma@siemens.com

** Universität des Saarlandes, Fachrichtung Materialwissenschaften und Werkstofftechnik,
Campus D 2.2, 66123 Saarbrücken

Kurzfassung. Die Erweiterung der bildgebenden Infrarot-Messtechnik durch die infrarot-optische Spektralinformation eines ausgewählten Werkstoffes stellt einen neuen wesentlichen Schritt dar – sowohl für die zuverlässige Materialcharakterisierung, als auch für die Erkennung von Fehlern auf Oberflächen und in Volumina. Insbesondere Kunststoffe und Keramiken zeigen eine ausgeprägte Wellenlängenabhängigkeit der Emissivität im MWIR- und LWIR-Bereich. Eine Nutzungsmöglichkeit ist, den Einfluss von Reflexionen, Oberflächenverschmutzungen und stark variierenden Beschichtungen zum Beispiel bei Schweißverbindungen oder Strukturverklebungen zu eliminieren. Der jeweilige Spektralbereich kann mit Hilfe von dielektrischen MWIR-Filtern exakt ausgewählt werden. Allerdings müssen im Gegensatz zu einer Dualband-IR-Kamera die Messungen seriell durchgeführt werden, dadurch dass nacheinander Bildsequenzen mit verschiedenen Filtern aufgenommen werden und nachträglich miteinander verarbeitet werden. In diesem Zusammenhang müssen folgende Probleme gelöst werden: Filterausrichtung und Positionierbarkeit, Objektiveinfluss, Kamertemperaturstabilität. Des Weiteren soll anhand der Spektren ausgewählter Materialien der Weg zur spektral auflösenden Thermografie erläutert werden. Durch die Fusion einer solchen „Farb-Infrarotkamera“ mit anderen Techniken der aktiven Thermografie kann man ein schnelles, bildgebendes Verfahren mit neuartigen Prüfeigenschaften für die Produktion und die In-Service-Prüfung bereitstellen.

1 Einführung

Die etablierten Verfahren der aktiven Thermografie nutzen einen Wellenlängenbereich abseits des sichtbaren Spektrums, der nur mit aufwändiger Kameratechnik zugänglich ist. Dadurch kann die Wärmestrahlung genutzt werden, die ein Bauteil bereits bei Raumtemperatur abgibt. Durch die breite Vielfalt an Techniken zur Anregung kann eine ebensolche Vielfalt an Mess- und Prüfaufgaben bewältigt werden. Doch auch wenn die Kameras farbenfrohe Bilder liefern, bleiben es Falschfarbendarstellungen, denen letztlich nur ein Graustufenbild zugrunde liegt. Bei diesem wird die spektrale Verteilung der emittierten Strahlungsleistung über den Empfindlichkeitsbereich der Kamera zu einer einzigen Zahl pro Pixel integriert. Doch auch mit der verfügbaren Technik ist diese zusätzliche Dimension der Farbe nicht dem sichtbaren Licht vorbehalten: Neben Dualband- oder Zweiwellenlängen- („Dualwavelength“-) Kameras [1] kann man sich bereits mit einer einfachen MWIR-Kamera (mittleres Infrarot, 3–5 μm) oder LWIR-Kamera (langwelliges Infrarot, 7–13 μm) und einem Satz von Bandpassfiltern die spektrale Information zugänglich machen [2]. Und während die „Schwarz-Weiß“-Thermografie auf der Annahme

beruht, dass sich vor der Linse ein grauer Strahler befindet, sehen Kameras mit spektraler Auflösung was die meisten Materialien auch im Infrarotlicht besitzen: „Farbe“.

Diese Wellenlängenabhängigkeit der Emissivität im Nahinfrarotbereich wird bereits intensiv genutzt, um Materialien zu identifizieren und zu charakterisieren [3]. Im MWIR- und LWIR-Bereich können ähnliche Vorgehensweisen verwendet werden, um Materialien zu erkennen [4]. Aber auch im Bereich der aktiven Thermografie können weitere Anwendungsbereiche erschlossen werden. So kann man z. B. bei Materialien, die im IR-Bereich wellenlängenabhängig teiltransparent sind, die Eindringtiefe bzw. Sichttiefe der Infrarotstrahlung gezielt nutzen. Und nicht zuletzt sollte sich bei bekannter spektraler Emissivitätsverteilung die Temperatur eines Körpers besser als mit der Zweifarbenpyrometrie [5] bestimmen lassen.

Eine andere Möglichkeit „Farbe“ in die Thermografie zu bringen ist die Kombination einer IR-Kamera mit einer RGB-Kamera. Solche Systeme sind von kommerziellen Anbietern erhältlich [6], doch bestehen sie aus zwei nebeneinander angeordneten Kameras und weisen deshalb einen Parallaxenfehler aufgrund der unterschiedlichen Blickwinkel beider Kameras auf das Objekt auf. Das hier vorgestellte hybride Kamerasystem besteht hingegen aus einer MWIR-Kamera, einer RGB-Farbkamera und einem Strahlteiler und ermöglicht damit die koaxiale Abbildung des infraroten und des sichtbaren Wellenlängenbereiches, was eine Vielzahl von praktischen Anwendungen mit sich bringt.

2 Spektrale Verschmutzungserkennung auf Werkstücken

2.1 Motivation

Bei der aktiven Thermografie stößt man häufig auf das Problem, dass Verschmutzungen des Bauteils zu Scheinanzeigen im Infrarotbild führen. Diese können dann je nach Form, Größe und Position fälschlicherweise für Defekte gehalten werden. Nur manchmal ist eine Unterscheidung durch das zeitliche Verhalten der Temperaturentwicklung möglich, weshalb eine einfache und robuste Methode der Verschmutzungserkennung wünschenswert ist.

2.2 Grundlagen

Wird eine IR-Kamera mit Bandpassfiltern ausgerüstet, so eröffnet sich die Möglichkeit mittels aktiver Thermografie die spektralen Eigenschaften von Materialien auszunutzen. Die spektrale Verschmutzungserkennung beruht auf der Idee, dass aufgrund des materialabhängigen Emissivitätsverlaufs $\varepsilon(\lambda)$ die messbare Strahlungsleistung wellenlängenabhängig ist. Dies betrifft nicht nur den stationären Fall in dem der Probenkörper mit seiner Umgebung im thermischen Gleichgewicht ist, sondern auch den Fall, in dem man aktiv Wärme in den Körper einbringt und nur die zeitliche Strahlungsänderung betrachtet. Der wellenlängenabhängige Emissivitätsverlauf ermöglicht ein IR-graues (spektral nicht-selektives) Material von einem IR-farbigen (spektral selektiven) Material zu unterscheiden. Spektral nicht-selektive Materialien sind in diesem Zusammenhang sogenannte „graue Strahler“ mit $\varepsilon(\lambda) = \text{const.} < 1$. Diese Näherung wird für die meisten Metalle in dem hier betrachteten Wellenlängenbereich angenommen. Spektral selektive Materialien sind sogenannte „farbige Strahler“ mit $\varepsilon(\lambda) \neq \text{const.}$ Dies ist der allgemeine Fall, welcher in der Realität am schwierigsten zu handhaben ist. Spektral farbige Strahler können z. B. Kunststoffe, Keramiken, Fette und Farben sein.

Mit der spektralen Kenntnis über ein Material lassen sich in der zerstörungsfreien Prüftechnik vor allem organische Verschmutzungen auf metallischen Objekten erkennen. So kann nach einer aktiven Blitzthermografie der IR-graue Werkstoff von einer IR-farbigen Verschmutzung unterschieden werden oder umgekehrt. Zudem lassen sich nach einer blitzthermografischen Untersuchung spektral nicht selektive Schichtdicken- und Wandstärkenunterschiede von Verschmutzungen unterscheiden. Denn oftmals erhält man Signale von verschiedenen Störeinflüssen wie einer unterschiedlichen Beschichtungsdicke, oberflächlichen Verschmutzungen oder Reflexionen aus der Umgebung.

Weiterhin kann mit Hilfe dieses spektralen Ansatzes eine Voruntersuchung für eine andere aktive Thermografiemessung durchgeführt werden: bei der akustischen Thermografie [7–10] erwärmen sich Verschmutzungen wie Fette oder Kleberückstände durch Dämpfung des Ultraschalls und erscheinen so als Scheinanzeigen neben echten Defekten, die sich über Reibung erwärmen. Eine vorgeschaltete spektrale Blitzthermografie [11] kann dann helfen, diese Verschmutzungen zu erkennen und auszublenden.

2.3 Messaufbau

Um der MWIR-Kamera vom Typ CMT 256 M HS des Herstellers Thermosensorik zu ermöglichen farbig zu sehen, wurde ihr ein Filtrerrad mit sechs Filterpositionen eingebaut (siehe Abbildung 1, rechts). Dieses Filtrerrad ermöglicht eine hohe Positionierbarkeit der IR-Filter. Die benutzten vier IR-Filter (siehe Abbildung 1, links) haben alle das gleiche Substrat Saphir, um Bildhebungen durch unterschiedliche Brechungszahlen zu vermeiden. Die Bandbreiten der IR-Filter wurden so gewählt, dass sie den gesamten spezifizierten Spektralbereich der Kamera von 3,4 μm bis 5,1 μm abdecken. Außerdem wurde versucht die Bandbreite zu kürzeren Wellenlängen hin größer zu wählen, um bei Temperaturen nahe der Raumtemperatur in den strahlungsleistungsschwachen kurzen Wellenlängen mehr Strahlungsleistung zu messen. Aus herstellungstechnischen Gründen ist der letzte Punkt allerdings nur bedingt realisierbar.

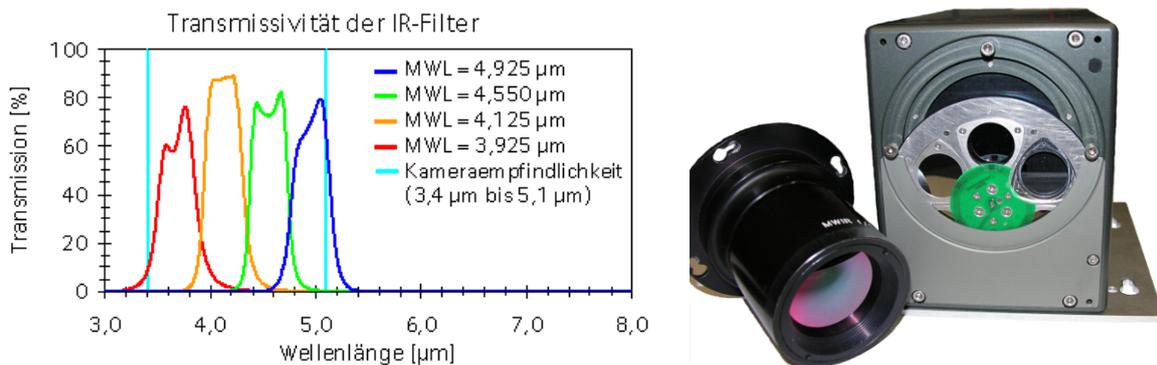


Abbildung 1: Links: Transmissionskennlinien der vier IR-Filter; MWL = 3,925 μm (BW = 10,46 %); MWL = 4,125 (BW = 9,06 %); MWL = 4,550 μm (BW = 8,26 %); MWL = 4,925 μm (BW = 7,78 %); rechts: IR-Kamera mit abgenommenem Objektiv und positionierbarem Filtrerrad

Als Prüfobjekt wurde eine Gasturbinenschaufel gewählt und mit spektral nicht selektivem Fotolack beschichtet (siehe Abbildung 2). Auf den Fotolack wurden dann verschiedene Industriefette in unterschiedlichen Dicken aufgetragen.



Abbildung 2: Mit Fotolack und verschiedenen Industriefetten beschichtete Turbinenschaufel. Von links oben nach rechts unten: Molykote (150 µm dick), Ceplattyn 300 (150 µm dick), Hochgeschwindigkeitsfett (150 µm dick), Molykote (50 µm dick), Ceplattyn 300 (50 µm dick), Hochgeschwindigkeitsfett (50 µm dick), Molykote (grob aufgetragen), Ceplattyn 300 (grob aufgetragen), Hochgeschwindigkeitsfett (grob aufgetragen)

Dieses Prüfobjekt wurde dann blitzthermografisch in den vier Spektralbereichen der oben erwähnten Filter untersucht. Die Serien wurden mit einer Bildrate von 440 Hz etwa 2 s lang aufgenommen. Da sich das Signal-Rausch-Verhältnis durch den Einsatz der dielektrischen IR-Filter verschlechtert, was im Besonderen den kurzwelligen Spektralbereich betrifft, wurden 100 Messungen gemittelt und dann pixelweise in den vier Spektralbereichen ausgewertet.

2.4 Auswertung der Messdaten

Entsprechend der Theorie klingt nach einer Blitzanregung die messbare Wärmestrahlung von der Oberfläche eines Messobjekts bei doppelt-logarithmischer Auftragung für einen halbunendlichen Körper linear mit der Steigung $-1/2$ ab [12]. Wenn das Material teiltransparent ist, also ein $\varepsilon(\lambda) \neq \text{const.}$ besitzt, ergeben sich in den unterschiedlichen Spektralbereichen auswertbare Abweichungen von dem theoretischen Verlauf [13]. Dies liegt daran, dass die Blitzanregung im sichtbaren Wellenlängenbereich anregt und so Wärme in das Prüfobjekt einbringt. Die IR-Kamera detektiert jedoch im Infraroten. So kann es sein, dass der Blitz einen von der Oberfläche ausgehenden Wärmepuls anregt, wohingegen die IR-Kamera teilweise in das Material hinein schauen kann. Das hat zur Folge, dass die IR-Kamera wellenlängenabhängig ein über die Sichttiefe integriertes Signal misst. Dies führt gegenüber einem nicht-teiltransparenten Material zu einem abweichenden Signalverlauf. Bei einem IR-farbigem Material unterscheiden sich die Signalverläufe voneinander, je nachdem in welchem Wellenlängenbereich gemessen wird. Um die Probenfläche möglichst homogen anzuregen wurde die Blitzlichtanregung gewählt. Dafür wurden zwei Broncolor Pulso F4 Blitze mit Normal-Reflektor und Plexiglasvorsatz mit einem Broncolor Grafit A4 Generator benutzt. Nach der Anregung kann man nach Subtraktion des Nullbildes die zeitliche Wärmeänderung verfolgen.

Um den Signalverlust durch das Transmissionsverhalten der IR-Filter zu kompensieren und um die Unterschiede in dem zeitlichen Signalverlauf von stark

IR-farbigen zu weniger stark IR-farbigen Materialien herauszuarbeiten wurden pixelweise Geraden an die Signalverläufe gefittet und deren Steigungen ausgewertet. Abhängig davon wie viele Zeitpunkte man in den Fit mit einbezieht streuen die Geradensteigungen noch stark, oder man verliert bereits wichtige Informationen. Durch den geringen Signalhub beim Arbeiten mit IR-Filtern fällt das auswertbare Signal schnell in die Größenordnung des Hintergrundrauschens, was zu einer starken Variation des Messsignals der Pixel führt. Diese Aussage gilt nicht nur für das Signal zeitlich gesehen, sondern für die Pixel untereinander, also bildweise betrachtet. Einerseits lässt sich das Signal-Rausch-Verhältnis durch die Mittelung von vielen Messungen verbessern und andererseits sorgt das Fitten von Geraden auch noch bei langen Auswertezeiten für eine geringe Variation der Steigung und demzufolge zu einer verbesserten Bildqualität. Deshalb lässt sich die pixelweise Untersuchung des Messobjekts in den jeweiligen Spektralbereichen besser durchführen. Mit diesem Ansatz erhält man für ein IR-graues Material in den vier Spektralbereichen vier identische Geradensteigungen. Für ein IR-farbiges Material ergeben sich je nachdem in welchen Spektralbereichen die Probe IR-farbig ist bis zu vier unterschiedliche Geradensteigungen.

Wenn man jetzt die mit einer Farbpalette bunt dargestellten Steigungsbilder für einen Fit bis zu einem Zeitpunkt $t < 0,1$ s aus jedem Spektralbereich heraus nimmt (siehe Abbildungen 3) und direkt miteinander vergleicht, so sieht man, dass einige der Verschmutzungen auf dem Fotolack in den unterschiedlichen Spektralbereichen eine andere Farbe haben, wohingegen der Fotolack in den Spektralbereichen an den gleichen Positionen immer die gleiche Farbe hat. Farbunterschiede auf dem Fotolack ergeben sich durch Schichtdickenunterschiede der Lackschicht. Die spektrale Information erhält man in dem man die vier Abbildungen untereinander vergleicht. Man sieht, dass die spektralen Unterschiede bei bestimmten Materialien stärker ausgeprägt sind als bei anderen. Außerdem sieht man auch, dass ein teiltransparentes Material eine gewisse Schichtdicke braucht, damit der Effekt gut messbar ist. So verhalten sich z. B. das Molykote (150 μm dick) und das Hochgeschwindigkeitsfett (150 μm dick) gegenüber der 50 μm dicken Auftragung spektral selektiver, was durch die unterschiedlichen bzw. gleichen Farben in den Spektralbereichen erkennbar ist.

Beim Vergleich der Signalverläufe zu den in Abbildung 3 dargestellten ROIs (Region of Interest) sieht man den Unterschied von IR-grauen (Abbildung 4, rechts) zu IR-farbigen Material (Abbildung 4, links). Man erkennt auch die Unterschiede der gefitteten Geradensteigungen. Die Geraden wurden in den Signalverlauf bis zu einer Zeit $t < 0,1$ s mit freiem y-Achsenabschnitt gefittet. Für das spektral selektive Material ergibt sich eine große Streuung der Geradensteigungen, wohingegen die Geraden für den Fotolack in guter Näherung aufeinander liegen.

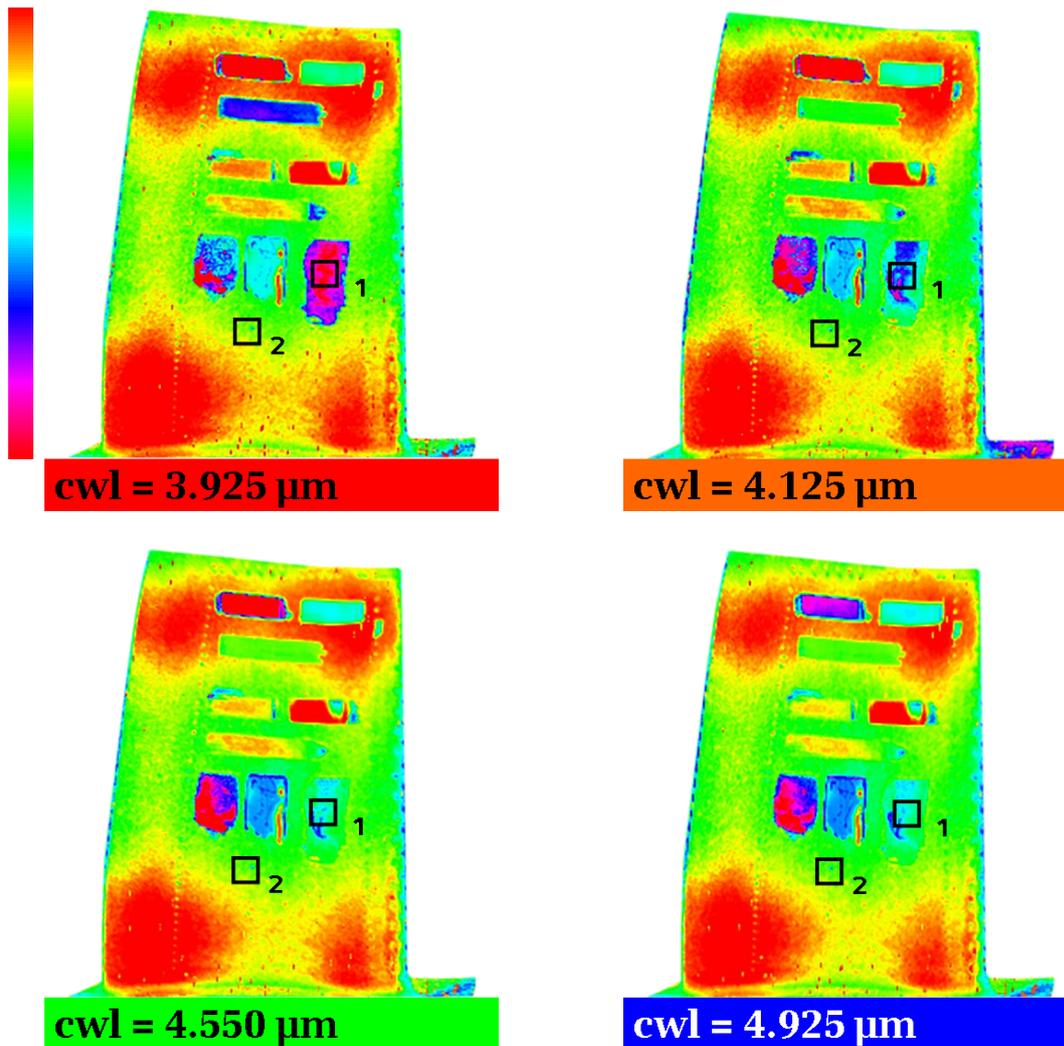


Abbildung 3: Links oben: IR-Filter MWL = 3,92 μm , BW = 10,46 %; rechts oben: IR-Filter MWL = 4,125 μm , BW = 9,06 % ,links unten: IR-Filter MWL 4,550 μm , BW = 8,26 %; rechts unten: IR-Filter MWL 4,925 μm , BW = 7,78 %

Im zweiten Schritt wurde nun pixelweise die Standardabweichung der Geradensteigungen in den vier Spektralbereichen zur gemittelten Geradensteigung in den vier Spektralbereichen bestimmt. Bei einer großen Streuung handelt es sich um ein spektral selektiveres Material als es der Fotolack ist. Beim Fotolack ist die Streuung der Geradensteigungen derart gering, dass er sehr gut von den Verschmutzungen auf der Turbinenschaufel unterschieden werden kann. Die Beschichtung der Turbinenschaufel mit Fotolack ergibt geringe Abweichungen von einer idealen Geraden im doppelt-logarithmischen für die Temperaturänderung. Dies spielt allerdings bei dieser Art der Auswertung keine Rolle, da dieses Verhalten in jedem der vier betrachteten Spektralbereiche identisch ist.

Das Ergebnisbild im Vergleich mit dem Digitalkamerabild zeigt Abbildung 5. Die grauen Bereiche entsprechen hier geringen Streuungen, die grünen hohen.

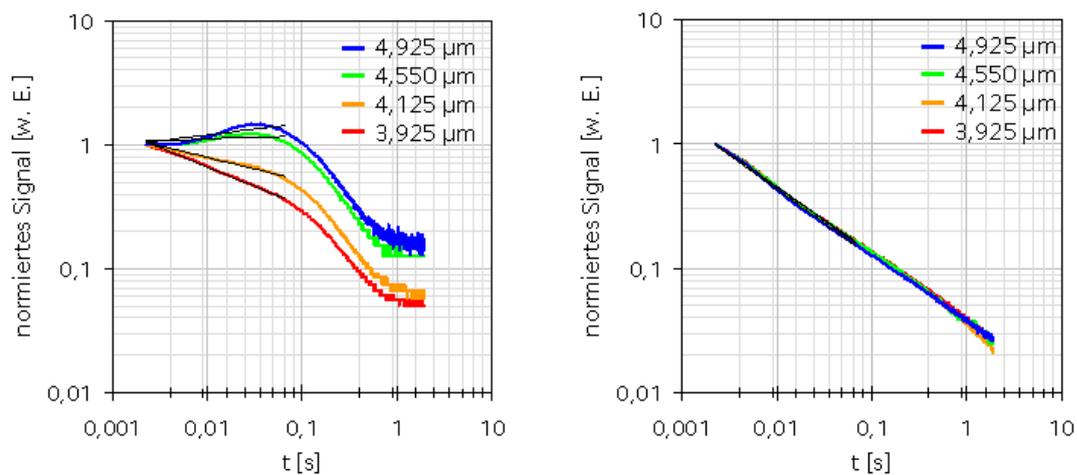


Abbildung 4: Links: Spektrol selektives Hochgeschwindigkeitsfett auf der Turbinenschaufel (Position 1); rechts: Mit Fotolack beschichtete Turbinenschaufel (Position 2)

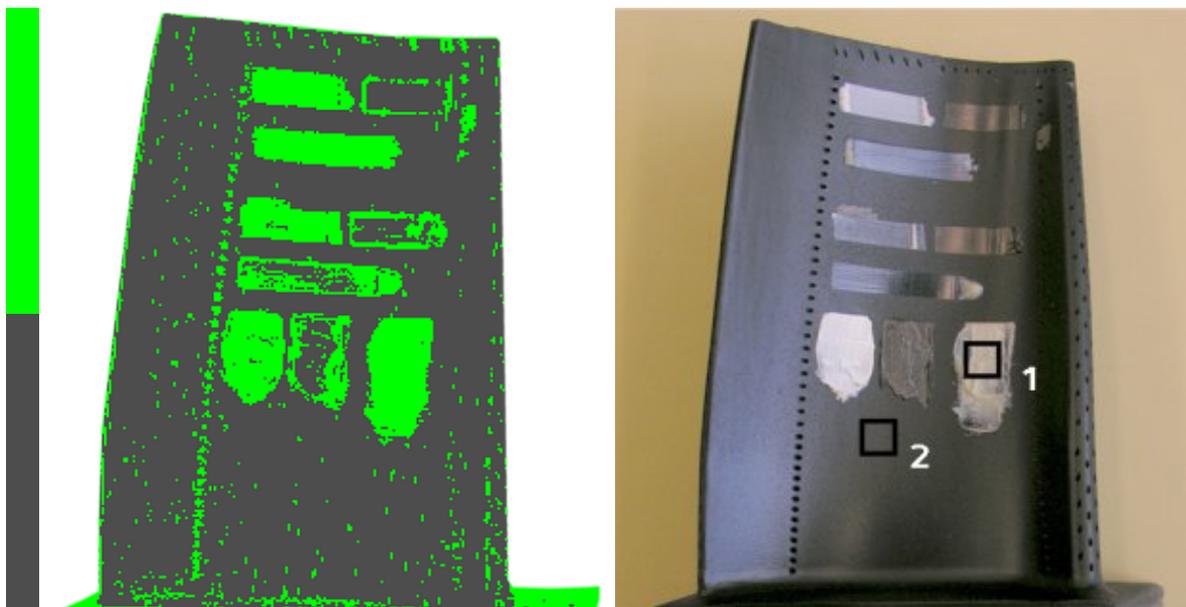


Abbildung 5: Links: Darstellung der spektralen Streuung der gefetteten Geradensteigungen in der Zweifarbandarstellung. Grau: spektral nicht selektives Material; Grün: spektral selektive Verschmutzungen; rechts: Bild des präparierten Probenkörpers

Wie in Abbildung 5 (links) erkennbar kann man Verschmutzungen gut von der Turbinenschaufel unterscheiden. Die Kühlluftbohrungen sind spektral aktiv, weil sich in ihnen Reste der weggeätzten Keramikbeschichtung befinden. Außerdem ist der Rand der Kühlluftbohrungen und der Verschmutzungen spektral selektiv, weil die Abbildung des Objekts nach einem Filterwechsel nicht absolut pixelgenau ist. Man erkennt auch, dass sich der Einfluss der unterschiedlichen Fotolackschichtdicken auf das Ergebnis nicht ausgewirkt hat. Dies liegt in der über den Spektralbereich relativ konstanten Emissivität für den Fotolack. Außerdem erkennt man, dass man das Hochgeschwindigkeitsfett mit einer Dicke von 150 µm besser maskieren kann als das mit einer Dicke von 50 µm. Dies liegt daran, dass das Material erst ab einer bestimmten Schichtdicke ein ausgeprägtes messbares spektrales Verhalten zeigt. Das Ceplattyn Fett wird über den spektralen Ansatz kaum

detektiert, da es kein IR-farbiges Material ist. Hier ist es sinnvoller, das Material über die vom Fotolack abweichende zeitliche Temperaturänderung zu maskieren.

Bisher wurde gezeigt, wie man Farbe in die Thermografie bringen kann, in dem man den Spektralbereich einer MWIR-Kamera mittels IR-Filtern aufteilt. Eine andere Möglichkeit Farbe in die Thermografie zu bringen besteht darin, einen ganz anderen Wellenlängenbereich – nämlich den sichtbaren – mit der IR-Kamera zu fusionieren.

3 Koaxiale Hybrid-Kamera

3.1 Grundlagen

Die Hybrid-Kamera, wie sie in Abbildung 6 dargestellt ist, fusioniert den sichtbaren mit dem mittelwelleninfraroten Spektralbereich. Dieses System hat gegenüber bereits existierenden käuflichen Systemen den Vorteil, dass die Bilder der IR-Kamera gegenüber denen der RGB-Kamera keinen Parallaxenfehler haben. Dies ist möglich durch den im Infraroten transparenten und im Sichtbaren reflektierenden Strahlteiler. Durch diesen Aufbau lassen sich Objektinformationen im sichtbaren und im infraroten Wellenlängenbereich simultan erfassen. Es ergeben sich eine ganze Reihe von Anwendungen: In der aktiven Thermografie lassen sich die zusätzlichen Informationen aus dem Sichtbaren zur Interpretation des Prüfbildes (z. B. Erkennung von Verschmutzungen) und Lokalisierung der Anzeigen nutzen. Darüber hinaus ist das RGB-Bild höher aufgelöst, was die Evaluierung einer IR-Anzeige erleichtert. Schließlich kann das System auch bei der passiven Thermografie zum Beispiel zur Raumüberwachung eingesetzt werden, bei der das IR-Bild warme Objekte, z. B. Personen, im RGB-Bild maskieren kann.

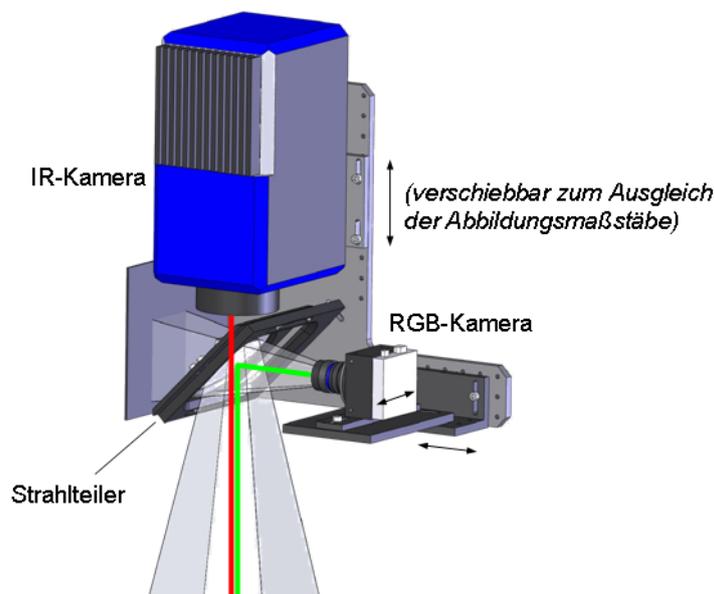


Abbildung 6: Hybrid-Kamera mit IR-Kamera, RGB-Kamera und Strahlteiler. Die parallaxenfreie Abbildung des Prüfobjekts ermöglicht eine einfache Überlagerung beider Spektralbereiche zu einem Bild, wodurch die Anzahl der Bewertungskriterien vervielfacht werden.

3.2 Auswertung der Messdaten

Im Folgenden sollen anhand eines Beispiels die Vorteile der Hybrid-Kamera aufgezeigt werden. In Abbildung 7 (links oben) ist eine mit Puls-Phasen-Analyse ausgewertete ultraschallangeregte aktive Thermografiemessung zu sehen. Die im Prüfteil eingebrachten Defekte wurden erkannt und sind farbig dargestellt. Der Rest des Prüfteils ist in Graustufen dargestellt, wodurch es schwierig ist, sich auf dem Bauteil zurechtzufinden, um die Defekte eindeutig zu identifizieren. Dadurch, dass man jetzt aber simultan die sichtbare Kamerainformation (Abbildung 7, rechts oben) aus dem gleichen Blickwinkel aufgenommen hat kann man beide Bilder mit wenig Aufwand überlagern. Das fertige Ergebnisbild mit Informationen aus beiden Spektralbereichen ist in Abbildung 7 (unten) dargestellt. Durch die zusätzliche Farbinformation kann man sich besser auf der Turbinenschaufel zurechtfinden und erhält einen weiteren Eindruck über den Zustand des Prüfobjektes. Auf diese Weise lassen sich zum Beispiel baugleiche Proben besser den Infrarotbildern zuordnen. Ein besonderer Vorteil des koaxialen Aufbaus ergibt sich bei kleineren Prüfteilen komplexer Geometrie. Denn oftmals will man zu einer Turbinenschaufel ein Referenzbild haben und zwar aus der gleichen Perspektive wie sie die IR-Kamera hat um bei der Überlagerung der Bilder den direkten Vergleich zu haben. Dafür muss man die IR-Kamera gegen eine Digitalkamera austauschen und das für jedes Prüfobjekt. Das ist zeitaufwendig und führt oft nicht zum gewünschten Erfolg bei der nachträglichen Überlagerung, da Kühlluftbohrungen, Ecken, Kanten und Krümmungen die gewünschte Präzision bei der Ausrichtung der Bilder zueinander erschweren. Ein anderer Vorteil ist die Bewertung von Langzeitversuchen. In der Autoindustrie werden Motorenblöcke unter Belastung getestet. Hierbei ist es interessant, ob sich die Temperatur von Bauteilen aufgrund einer Fehlfunktion erhöht oder durch die Tatsache, dass die Bauteile altern also unter Hitzeinfluss oxidieren und somit durch die erhöhte Emissivität eine scheinbare Temperaturerhöhung gemessen wird.

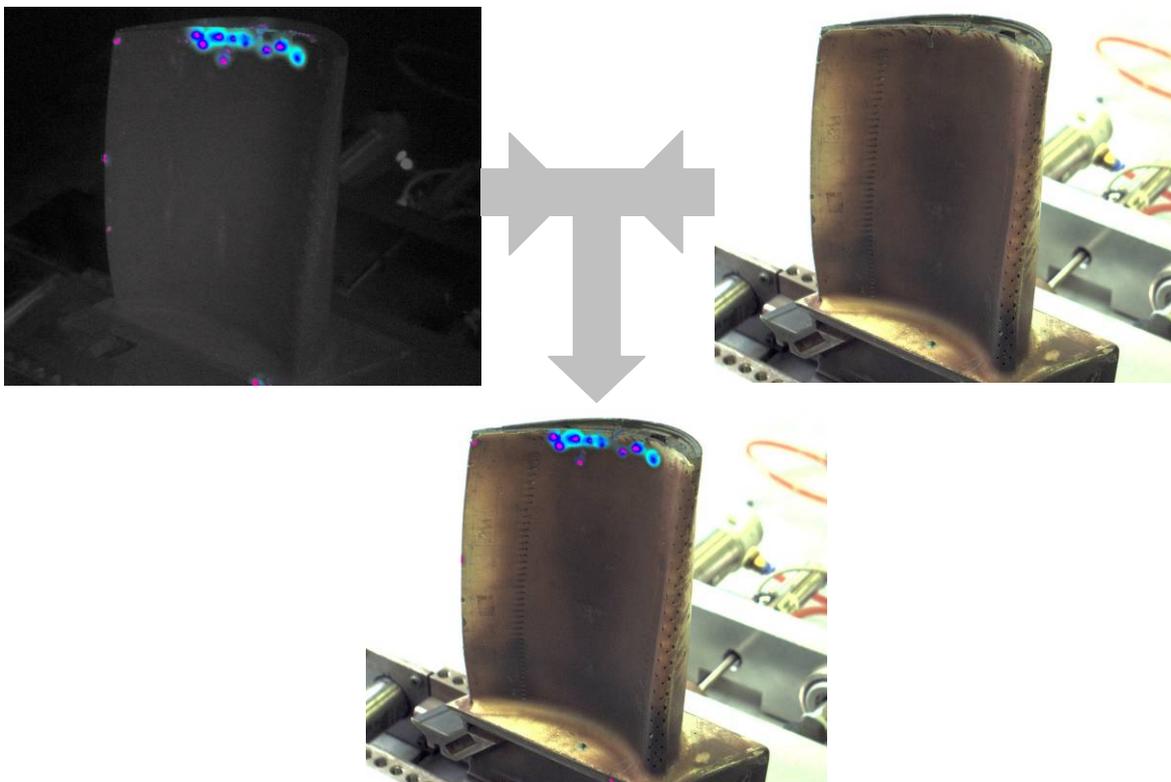


Abbildung 7: Links oben: Ausgewertete ultraschallangeregte aktive Thermografiemessung; rechts oben: RGB-Kamerabild; Mitte unten: Überlagerung mit der Hybrid-Kamera des RGB-Bildes mit dem Ergebnis der Ultraschallanregung

4. Zusammenfassung

Für die Thermografie bieten sich durch die Fusion mehrere Spektralbereiche die Möglichkeiten, mehr über die Materialeigenschaften des Prüfobjektes zu erfahren. Auf der einen Seite kann mittels Filterrad die Technik erweitert werden, um Verschmutzungen auf Prüfteilen zu maskieren, um damit das Ergebnis einer darauf folgenden Ultraschallthermografie besser bewerten zu können. Auf der anderen Seite wird mittels der Fusion mit einem weiteren Spektralbereich ein vollkommen anderer Spektralbereich in den Prüfteilbewertungsprozess mit einbezogen, welcher die Möglichkeit bietet die infraroten Materialeigenschaften in direktem Zusammenhang mit den Materialeigenschaften im Sichtbaren zu vergleichen. Denn von den Oberflächeneigenschaften im Sichtbaren kann man nicht zwangsläufig auf die Materialeigenschaften im Infraroten schließen, was zum Beispiel für die Lackierung von Heizkörpern oder die Keramikbeschichtung von Turbinenschaufeln zutrifft.

Referenzen

- [1] Fa. Thermosensorik, Erlangen, www.thermosensorik.de, QWIP 384 Dualband
- [2] O. Schreer, J. Zettner, B. Spellenberg, U. Schmidt, A. Danner, Ch. Peppermüller, M. López Sáenz, Th. Hierl, „Multispectral high-speed midwave infrared imaging system“, Infrared Technology and Application XXX, Bjørn F. Andresen, Gabor F. Fulop (eds), Proc Of SPIE Vol. 5406 (SPIE, Bellingham, WA, 2004) p. 249
- [3] LLA Instruments GmbH, <http://www.lla.de/index.php/content/view/25/53/>, 2D-NIR-Spektrometer KUSTA MSI, Berlin
- [4] M. Goldammer, K. Eisler, H. Mooshofer, M. Rothenfusser, C. Homma, „Wie bringt man Farbe in die Thermografie?“, Thermographie-Kolloquium 2009 – Vortrag 01
- [5] H. Pauly, „Digitale Pyrometer mit verbesserter Auflösung“, tm-Technisches Messen 66, 33-337 (1999)
- [6] FLIR, <http://www.flir.com/cvs/eurasia/de/>, FLIR Commercial Vision Systems
- [7] M. Rothenfusser, C. Homma, Acoustic Thermography: Vibrational Modes of Cracks and the Mechanisms of Heat Generation, Review of Quantitative Nondestructive Evaluation 24 (2005), pp. 624–631
- [8] C. Homma, M. Rothenfusser, J. Baumann, R. E. Shannon, Study of Heat Generation Mechanisms in Acoustic Thermography, Review of Quantitative Nondestructive Evaluation 25 (2006), pp. 566–573
- [9] C. Homma, Untersuchungen zu Mechanismus und technischer Umsetzung der akustischen Thermographie, Dissertation, Saarbrücken, Deutschland (2007)
- [10] C. Homma, SIEMAT for SGT-600 blades, Internal presentation at the NDE council in Munich (2007)
- [11] W. Heinrich, J. Zettner, M. Goldammer, „Automatisiertes System zur thermographischen Prüfung von Gasturbinenschaufeln“, DGZfP-Jahrestagung 2003, Lebensdauerüberwachung und Zuverlässigkeit II
- [12] Xavier P. V. Maldague: Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing; John Wiley & Sons, Inc.; New York 2001
- [13] M. Abuhamad, U. Netzelmann, „Impuls- und Lock-in Thermographie an infrarottransparenten Werkstoffen“, Thermographie-Kolloquium 2009 – Vortrag 02