

# Aktive und passive Thermographie mit einer Dual-Band Kamera für das mittlere und langwellige Infrarot

# Mohammed ABUHAMAD<sup>\*</sup>, Udo NETZELMANN<sup>\*</sup>, Christian REUSS<sup>\*\*</sup> <sup>\*</sup>Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Campus E3 1, 66123 Saarbrücken <sup>\*\*</sup>Thermosensorik GmbH, Am Weichselgarten 7 91058 Erlangen

Kurzfassung. Mit einer Dual-Band Infrarotkamera für die Bereiche 4,4-5,2 µm und 7,8-8,8 µm wurden infrarottransparente Werkstoffe mit optisch angeregter Impulsthermographie untersucht. Proben waren yttriumteilstabilisierte Zirkonoxidbeschichtungen auf Stahl und PVC-Platten mit künstlichen Fehlern. Es ergeben sich vom Spektralband abhängige Abklingkurven der Temperatur mit unterschiedlichen Zeiten für das Auftreten eines Fehlerkontrasts. Dies kann zu Fehlern bei der Bestimmung der Schichtdicke bzw. der Fehlertiefe führen. Die experimentellen Ergebnisse werden für die Keramikschichten von einem Modell beschrieben. Weiterhin wurde das Prinzip der Zweikanalpyrometrie auf die Dual-Band Kamera zur Rekonstruktion von Temperatur- und Emissivitätsbildern übertragen. Angewendet auf eine Stahlprobe mit unterschiedlichen Oberflächenzuständen konnte eine bessere Trennung von Temperatur- und Emissivitätskontrast erreicht werden. Zum Vergleich wurde die Rekonstruktion an der Stahlprobe auch innerhalb des mittleren Infrarot mit Hilfe von Spektralfiltern durchgeführt. Hierbei wurden noch bessere Ergebnisse erzielt.

# 1.Einleitung

Seit einigen Jahren sind Infrarotkameras verfügbar, die mit einem Detektor simultan in zwei Wellenlängenbereichen aufzeichnen. Für die Zukunft sind Kameras mit drei oder mehr spektralen Bereichen zu erwarten. Die bisherigen Infrarot "Schwarz/weiss" Kameras werden durch echte "Farbkameras" ergänzt werden. Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit der aktiven und passiven Thermographie mit einer Dual-Band Kamera mit zwei spektralen Kanälen im mittleren Infrarot (mid-wave infrared, MWIR, 3-8  $\mu$ m) und im langwelligen Infrarot (long wave infrared, LWIR, 8-15  $\mu$ m) und der Anwendung in der zerstörungsfreien Prüfung und der Temperaturmesstechnik.

Bei der Signalanalyse in der aktiven Thermographie wird oft von einer reinen Oberflächenemission der thermischen Strahlung ausgegangen. Dabei zeichnen sich viele Werkstoffe und biologische Systeme durch eine relative hohe Transparenz im Infrarotbereich aus, die zudem oft deutlich wellenlängenabhängig ist. Abb. 1 zeigt für die optisch angeregte aktive Thermographie Fälle von im Sichtbaren bzw. im Infraroten teiltransparenten Prüfobjekten. Ein Beispiel für Fall a) sind Metalle, für Fall b) manche Gläser, für Fall c) manche Halbleiter und für Fall d) Polymere und Keramiken. Im Folgenden wird besonders der Fall d) behandelt.





Abb. 1: Schema der optischen Absorption von Strahlung sowie der Infrarotemission bei verschiedenen Werkstoffen oder Wellenlängen: a) optisch und im Infraroten nicht transparent, b) optisch transparent und im Infraroten nicht transparent, c) optisch nicht transparent und im Infraroten transparent, c) optisch und im Infraroten transparent.

Die Auswirkung der Infrarottransparenz kann durch Schwärzen der Probe vermieden werden, ansonsten wurde sie bei biologischen Anwendungen [1,2] oder bei Farb- oder Halbleiterschichten auch berücksichtigt [3,4]. In der Spektralanalytik ist die transiente Emissionsspektroskopie [5,6,7] bekannt, bei der spektrale Eigenschaften durch eine kurze oberflächennahe Erwärmung hervorgehoben werden. In den zitierten Arbeiten wurden Infrarot-Einzeldetektoren eingesetzt. Für die aktive Thermographie standen bisher Kameras mit nur einem einzelnen festen Spektralbereich zur Verfügung. Bei keramischen Wärmedämmschichten für Turbinenschaufeln ist schon länger bekannt, dass sie ein deutlich unterschiedliches Transmissionsverhalten im LWIR als im MWIR aufweisen [8,9,10] und sich im LWIR leichter auf Schichtdicke prüfen lassen [9]. Das Transmissionsverhalten von Schaufelbeschichtungen im MWIR ist insofern interessant, als es sich mit der Schichtalterung ändert [8]. Auch Polymere weisen oft starke spektrale Signaturen im Infrarotspektrum auf.

Eine weitere Anwendung spektral aufgelöster Thermographie liegt in der abbildenden Temperaturmessung. Bei der Thermographie lässt sich nur die spezifische Ausstrahlung eines Messobjektes bestimmen, die außer von der Temperatur auch von den Emissions- und Reflektionseigenschaften dieses Objekts abhängig ist. Nur bei bekannten Emissionsgraden und bei bekanntem Reflexionsanteil können aus den Strahlungsmesswerten direkt Temperaturen berechnet werden. Dieser Sachverhalt erschwert die Charakterisierung von metallischen Oberflächen sowohl bei der aktiven Thermographie als auch bei der passiven berührungslosen Temperaturmessung. Daher gibt es schon seit langem intensive Anstrengungen, eine vom Emissionsgrad unabhängige Temperaturmessung zu ermöglichen [11-15]. Bei diesen Arbeiten wurden meist mit Hilfe von schmalbandigen IR-Einzeldetektoren im nahen Infrarot bei hohen Temperaturen und Vernachlässigung unter der Umgebungsstrahlung die Möglichkeiten zur emissionsgradunabhängigen Temperaturmessung untersucht. Des Weiteren gab es bei höheren Temperaturen auch örtlich aufgelöste Untersuchungen mit unterschiedlichen Ansätzen für den spektralen Emissionsgradverlauf [16,17]. In diesem Beitrag wird die spektrale Information in der Thermographie genutzt, um zu einer örtlich aufgelösten Rekonstruktion von Temperatur und Emissivitätbildern metallischer Oberflächen im Bereich zwischen 50 und 100°C zu gelangen. Dazu werden die erwähnte Dual-Band Infrarotkamera sowie eine MWIR Infrarotkamera mit Spektralfiltern eingesetzt.

## 2. Experimentelles

#### 2.1 Spektrale Empfindlichkeit der eingesetzten Kameras

Bei den verwendeten Kameras handelt es sich zum einen um den Typ QWIP 384 Dual-Band der Fa. Thermosensorik GmbH, Erlangen. Die Kamera arbeitet simultan im MWIR Bereich von 5  $\mu$ m und im LWIR Bereich um 8  $\mu$ m. Abb. 2 zeigt die spektrale Empfindlichkeit der Kamera. Vorteil dieser Kamera ist, dass zeit- und ortsgleich in den beiden Spektralbereichen gemessen wird. Es wurde weiterhin eine Cedip/FLIR 480 M Kamera für das MWIR im Bereich 3,6-5  $\mu$ m mit vier Spektralfiltern von je etwa 0,4  $\mu$ m Bandbreite eingesetzt. Die Transmissionskurven der Filter, die auf einem motorgesteuerten Filterrad installiert sind, sind in Abb. 2 dargestellt. Mit Hilfe eines schwarzen Strahlers wurden die Kameras temperaturkalibriert, so dass die Rohdaten in scheinbare Temperaturen umgerechnet werden konnten.



Abb. 2: Links: Spektrale Empfindlichkeit der verwendeten Dual-Band Infrarotkamera Thermosensorik QWIP 384 DB. Rechts: Transmissionsspektren der verwendeten vier Filter im mittleren Infrarotbereich.

## 2.2 Untersuchte Proben

## 2.2.1 Infrarottransparente Proben

Es wurden thermisch gespritzte Schichten aus yttriumteilstabilisiertem Zirkonoxid untersucht (Siemens AG CT). Die Schichten wurden mit Schichtdicken von 400  $\mu$ m, 438  $\mu$ m, 506  $\mu$ m und 600  $\mu$ m auf einem Stahlsubstrat von 8,9 mm Dicke aufgebracht (Abb. 3). Weiterhin wurde eine 5 mm dicke Probe aus grau eingefärbtem Polyvinylchlorid mit eingebrachten Nuten der Breite 5 mm und unterschiedlichem Ligament betrachtet (Abb. 3, rechts).



Abb. 3: Links: Seitenansicht einer Zirkonoxidbeschichtung auf Stahl, Dicke 505 µm. Rechts: Skizze der untersuchten Probe aus PVC mit eingefrästen Nuten.



Abb. 4: Gemessene Infrarot-Reflexionsspektren einer untersuchten Keramikschicht. Die farbigen Balken markieren die in den thermographischen Untersuchungen verwendeten spektralen Fenster für die Dual-Band Kamera (oben) und die MWIR Kamera mit Filtern (unten).

Infrarot-Reflexionsspektren der Zirkonoxidschichten und der PVC Probe wurden mit Hilfe eines portablen FTIR-Infrarotspektrometers Exoscan (A2 Technologies) bestimmt. In Abb. 4 sind einige Spektren dargestellt.

Es zeigt sich, dass beim Reflektionsspektrum der Zirkonoxidschichten innerhalb des MWIR eine gewisse Wellenlängenabhängigkeit der Infrarotreflexion (und damit auch der Infrarottransmission) besteht. Zwischen MWIR und LWIR ist der Unterschied wesentlich größer als innerhalb des MWIR. Für eine Bestimmung der Absorption müsste zusätzlich noch die Transmission bestimmt werden. Dazu hätte die Probe jedoch zerstört werden müssen.

Das Reflexionsspektrum der PVC-Probe zeigt ebenfalls eine (geringere) Variation des Reflexionskoeffizienten sowohl innerhalb des MWIR-Bereichs als auch zwischen MWIR und LWIR.

#### 2.2.2 Proben für die Rekonstruktion von Emissivitäts- und Temperaturbildern

Die Untersuchungen wurden an zwei Stahlproben mit natürlichen und künstlich eingebrachten Inhomogenitäten des Emissionsgrads durchgeführt. Bei der Stahlprobe 1 handelt es sich bei den Inhomogenitäten um Rostflecken an der Oberfläche, und bei der Stahlprobe 2 sind zusätzlich zu den natürlichen Rostflecken noch geschwärzte, polierte und

geätzte Bereiche vorhanden (Abb. 5). Die Proben wurden mit Hilfe einer Heizplatte auf Temperaturen zwischen 40 und 90°C aufgeheizt. Desweiteren wurde eine der Proben zusätzlich lokal mit einem Laserstrahl um etwa 15°C aufgeheizt. Die Dual-Band Kamera ermöglichte bei dieser Untersuchung eine simultane Strahlungsaufnahme in den beiden Spektralbereichen während der zusätzlichen Laseranregung.



Abb. 5: Fotos der Stahlproben 1 (links) und 2 (rechts)

## 3. Ergebnisse an den untersuchten infrarottransparenten Werkstoffen

Zur Anregung der Proben fand ein Ringblitz mit 3,2 kJ optischer Leistung und 5 bis 10 ms Impulsdauer Verwendung. Mit einer Bildrate von 146 Bildern/s wurden die Signale vor und nach dem Anregungsblitz aufgezeichnet. Die Daten wurden für jedes Bild über eine rechteckige Auswertefläche auf der Probe gemittelt, ein Signal vor dem Blitz wurde subtrahiert und anschließend die Temperaturdifferenz zeitabhängig doppeltlogarithmisch dargestellt (Abb. 6).

Der Vergleich der Abklingkurven in Abb. 6 zeigt, dass bei PVC zwischen MWIR und LWIR ein deutlicher Unterschied in der erzielten scheinbaren Temperaturerhöhung auftritt, wobei diese im LWIR generell größer als im MWIR ist. Wenn man die logarithmische Steigung  $s = d(\ln(dT)/d(\ln(t)))$  im Zeitbereich von 0,2 bis 1 s auswertet, so sollte sie bei -0.5 für einen Oberflächenabsorber/emitter und zwischen 0 und -0.5 für eine im Sichtbaren oder im Infraroten transparente Probe liegen. Im MWIR war die Steigung s im Betrag generell geringer als im LWIR. Über fehlerfreien Bereichen der Probe betrug sie im angegebenen Zeitbereich -0,30 im MWIR gegenüber -0,48 bei LWIR. Fehlertiefen werden bei der Impulsthermographie im Allgemeinen aus der Zeit des beginnenden Fehlerkontrasts ermittelt. In Abb. 6 sind die Zeiten des Abknickens der Abkühlungskurven durch den Wärmestau über einer ausgewählten Nut im MWIR und LWIR mit Pfeilen markiert. In Abb. 7 sind darüber hinaus diese Abknickzeiten für verschiedene Ligamente dargestellt. Man beobachtet, dass das Abknicken der Kurven zu unterschiedlichen Zeiten abhängig vom Spektralbereich auftritt. Dieses Verhalten kann zu einer falschen Fehlertiefenbestimmung führen, wenn die optischen und infrarotoptischen Eigenschaften des Werkstoffs nicht berücksichtigt werden.



Abb. 6: Thermische Abklingkurven im mittleren und langwelligen Infrarot an einer PVC-Probe über einer Nut mit 0,71 mm Ligament und an einem Referenzbereich



Abb. 7: Beginn des Fehlerkontrasts in den beiden Wellenlängenbereichen in Abhängigkeit der Fehlertiefe

Bei den Keramikbeschichtungen (Abb. 8) liegt für den Zeitbereich 0,2 bis 1 s und 500  $\mu$ m Schichtdicke die gemessene Steigung s bei -0,52 im LWIR und bei -0,42 im MWIR. Bei größeren Zeiten wird bei den keramikbeschichteten Proben der Substrateinfluss durch ein Abknicken der Abklingkurve nach oben sichtbar.

Ein Wärmediffusions- und Strahlungsmodell, das die optische Extinktion im Sichtbaren, die resultierende Temperaturverteilung und die Emission von Infrarotstrahlung sowie ihre Absorption auf dem Weg zur Oberfläche berücksichtigt, wurde für den Fall der Pulsanregung aufgestellt [18]. Infrarotstrahlung aus dem Volumen der Keramikschicht und Strahlung von der inneren Oberfläche des Stahlsubstrats müssen berücksichtigt werden. Mit dem Modell wurden die thermischen zeitlichen Signale zweier Keramikschichten der Dicke 400 µm und 500 µm auf dem Stahlsubstrat simuliert (Abb. 8).



Abb. 8: Theoretische Abklingkurven (durchgezogene Linien) des Strahlungssignals nach Pulsanregung für zwei Schichtdicken auf Stahl für im Sichtbaren wie auch im Infraroten transparente
Zirkonoxidschichten von 400 μm und 500 μm Dicke im MWIR und LWIR im Vergleich zum Experiment (gepunktete Linien).

Die experimentell gefundenen zeitlichen Verläufe der Signale stimmen mit den simulierten Verläufen gut überein. Mit diesem Modell können die Schichtdicken und Fehlertiefen unter Berücksichtigung der optischen Eigenschaften der Materie bestimmt werden.

#### 4. Ergebnisse der Rekonstruktion von Emissivitäts und Temperaturbildern

Die orts- und zeitsynchrone Messung in zwei Spektralbereichen legt nahe, die Dual-Band Kamera für eine Temperaturmessung schnell zeitlich veränderlicher Prozesse nach dem Prinzip der Zweikanalpyrometrie einzusetzen. Das Prinzip sei zunächst noch einmal kurz dargestellt. Die detektierte Abstrahlungsdichte eines Objektes der Temperatur T in zwei engen Spektralbereichen ist und unter Vernachlässigung der Umgebungsstrahlung gegeben durch:

$$S_1 = \varepsilon_{\lambda_1} \cdot \frac{c_1}{\lambda_1^5 \cdot [\exp(\frac{c_2}{\lambda_1 \cdot T}) - 1]} , \qquad S_2 = \varepsilon_{\lambda_2} \cdot \frac{c_1}{\lambda_2^5 \cdot [\exp(\frac{c_2}{\lambda_2 \cdot T}) - 1]} , \qquad (1)$$

wobei  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  die beiden Wellenlängen,  $\varepsilon_{\lambda 1}$  und  $\varepsilon_{\lambda 2}$  die Emissivitäten bei diesen Wellenlängen und  $c_1$  und  $c_2$  Konstanten aus dem Planck´schen Strahlungsetz sind.

Durch Division von S<sub>1</sub> und S<sub>2</sub> unter der Annahme, dass  $\varepsilon_{\lambda 1} = \varepsilon_{\lambda 2}$  ist, erhält man die wahre Temperatur des Objektes:

$$T = \frac{c_2 \cdot (\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot Ln(\frac{S_1 \cdot \lambda_1^5}{S_2 \cdot \lambda_2^5})}$$
(2)

Dieses Prinzip wurde auf ein abbildendes System übertragen und erweitert. Dazu gehörte die Berücksichtigung endlich großer Spektralbereiche der Detektoren. Zusätzlich bestand die Aufgabe darin, Objekttemperaturen nicht weit oberhalb der Raumtemperatur zu messen. Damit musste der Einfluss der Umgebungsstrahlung in die Rechnung aufgenommen werden, wobei zunächst von einer homogenen Umgebungsstrahlung nahe Raumtemperatur ausgegangen wurde. Weiterhin ist bei der Rekonstruktion von Temperatur- und Emissivitätsbildern die Annahme wellenlängenunabhängiger Emissivitäten schon bei der Kamera mit Filtern innerhalb des MWIR fraglich, bei der Dual-Band Kamera mit Annahmen über die Emissivitätsverhältnisse  $\varepsilon_v = \varepsilon_{\lambda 1}/\varepsilon_{\lambda 2}$  gerechnet.



4.1 Rekonstruktion von Temperatur- und Emissivitätsbildern mit der Dual-Band Kamera

Abb. 9: Oben: Rohdaten der Stahlprobe 1 in beiden Spektralbereichen der Dual-Band Kamera in Einheiten von Digitalisierungsstufen (digital levels, DL) bei einer Probentemperatur von ca. 47°C mit zusätzlicher lokaler Laseraufheizung in der Probenmitte. Unten: Aus den Rohdaten berechnetes Temperaturbild (links) und Emissivitätsbild im MWIR (rechts). Unten mitte: Foto der Probe zum Vergleich.

Abb. 9 zeigt die Rohdaten der Stahlprobe 1, die auf eine Temperatur von ca. 47°C homogen aufgeheizt und zusätzlich in der Mitte lokal mit einem Laser beheizt wurde, für beide Spektralbereiche der Dual-Band Kamera. Weiterhin sind die Ergebnisse der Rekonstruktion von Emissivität und Temperatur dargestellt. Die dargestellten Ergebnisse in

Abb. 9 wurden unter der Annahme eines Emissivitätsverhältnisses von 1,17 für alle Pixel der Oberfläche erzielt. Es ist zu erkennen, dass diese Methode bereits zu einer guten Trennung zwischen Emissions- und Temperaturkontrasten führt. Die Temperaturspanne beträgt in diesem Fall ca. 15 °C, wobei diese 15 °C die Summe aus der Temperaturerhöhung durch die Laseranregung und durch den Temperaturfehler bei der Rekonstruktion darstellt. Im Emissivitätsbild ist noch ein schwacher Restkontrast der Temperatur zu beobachten.



Abb. 10: Oben: Rohdaten der Stahlprobe 2 in beiden Spektralbereichen der Dual-Band Kamera bei einer Probentemperatur von ca. 82°C. Unten: Aus den Rohdaten berechnetes Temperaturbild (links) und Emissivitätsbild im MWIR (rechts). Unten mitte: Foto der Probe zum Vergleich.

In Abb. 10 sind die Rohdaten der Stahlprobe 2 für beiden Spektralbereiche der Dual-Band Kamera in Grauwerten dargestellt. Die Stahlprobe 2 wurde auf eine Temperatur von ca. 82°C mittels einer Heizplatte möglichst homogen aufgeheizt. Die Ergebnisse der Rekonstruktion von Emissivität und Temperatur sind in Abb. 10 unten dargestellt.

Abb. 10 zeigt, dass auch bei der Stahlprobe 2 mit extremen Oberflächeninhomogenitäten eine Trennung von Temperatur- und Emissivitätskontrasten bei dem Einsatz der Dual-Band Kamera erreicht werden konnte. Es verbleiben aber Kontraste der Emissivität im Temperaturbild, die zu einer scheinbaren Temperaturspanne von ca. 10°C führen. Besonders problematisch ist wie zu erwarten die polierte Stelle. Eine Fehleranalyse zeigt im Einklang mit Ergebnissen aus der Literatur, dass die pauschale Annahme eines festen Emissivitätsverhältnisses für alle Pixel sehr kritisch ist. Eine bessere Strategie wäre es, jedem Pixel einzeln ein Emissivitätsverhältnis zuzuordnen.

# 4.2 Rekonstruktion von Temperatur- und Emissivitätsbildern mit der MWIR Kamera mit Spektralfiltern

Die Rekonstruktion von Temperatur- und Emissivitätsbildern an den beiden Stahlproben wurde auch mit Hilfe der mit vier Spektralfiltern ausgerüsteten MWIR Kamera CEDIP 480 M durchgeführt. Dabei wurden die beiden benachbarten Spektralbereiche 4,3-4,7  $\mu$ m und 4,7-5,1  $\mu$ m verwendet.

Da die Spektralfilter innerhalb des MWIR im Vergleich zu den Bändern der Dual-Band Kamera nahe bei einander liegen, wurde bei der Rekonstruktion angenommen, dass das Emissivitätsverhältnis der Oberfläche in zwei benachbarten Spektralbereichen gleich 1 ist. Wie oben beschrieben, wurde für diese Untersuchungen die Stahlprobe 1 homogen auf ca. 47°C und die Stahlprobe 2 mit auf ca. 82°C aufgeheizt.



Abb. 11: Oben: Rohdaten der Stahlprobe 1 in beiden Spektralbereichen des Filters 3 (4,3 bis 4,7 μm) und des Filters 4 (4,7 bis 5,1 μm) bei einer Probentemperatur von ca. 47°C. Unten: Aus den Rohdaten berechnetes Temperaturbild (links) und Emissivitätsbild (rechts). Unten mitte: Foto der Probe zum Vergleich.

In den Abbildungen 11 und 12 sind jeweils oben die Rohdaten der Stahlproben 1 und 2 in zwei Spektralbereichen in Grauwerten dargestellt. Die Ergebnisse der Rekonstruktion in Abb. 11 und Abb. 12 zeigen in beiden Fällen eine gute Trennung von Temperatur und Emissivität. Die Temperaturbilder beinhalten so gut wie keine restlichen Emissivitätskontraste. Die Temperaturspanne von 10°C in Abb. 11 und von 17°C in Abb. 12 sind auf eine mangelnde Präzision bei der Positionierung des Filterrades zurückzuführen. Zum Beispiel bewirkt eine leichte Verkippung des Filterrades bei der Drehung, dass die Pixel in den Spektralbereichen nicht mehr genau korrelieren. Dies führt zu schattenähnlichen Strukturen in den Temperaturbildern. Kameras anderer Hersteller lindern dieses Problem durch ein präziser gefertigtes Stahlfilterrad. Das Emissivitätsbild beinhaltet die visuell sichtbaren, aber auch einige visuell kaum erkennbare Inhomogenitäten an der Oberfläche der Stahlprobe. Die Rostflecken an der Stahlprobe 1 sowie die polierten und geschwärzten Bereiche bei der Stahlprobe 2 sind gut in den Emissivitätsbildern zu erkennen.



Abb. 12: Oben: Rohdaten der Stahlprobe 2 in beiden Spektralbereichen des Filters 3 (4,3 bis 4,7 μm) und des Filters 4 (4,7 bis 5,1 μm) bei einer Probentemperatur von ca. 82°C. Unten: Aus den Rohdaten berechnetes Temperaturbild (links) und Emissivitätsbild. Unten mitte: Foto der Probe zum Vergleich.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Infrarottransparenz von keramischen und Polymerwerkstoffen führt zu klar nachweisbaren spektral abhängigen Effekten bei der optisch angeregten Impulsthermographie. Dies konnte mit Hilfe der Dual-Band Infrarotkamera demonstriert werden.

Die Arbeit mit Spektralfiltern erfordert sequenzielles Messen in den Spektralbereichen und führt zu hohen Anforderungen an die Stabilität der Kamera und der Anregung. Hier stellen die nun verfügbaren Mehrband- und Mehrfarbkameras einen großen Fortschritt dar.

Die durch die Infrarottransparenz hervorgerufenen Messeffekte sind einerseits Störgrößen bei der Bestimmung von Schichtdicken oder Fehlertiefen, bieten aber auch den Zugang zu weiteren optischen Schichteigenschaften, die z. B. mit Alterung oder Schädigung korrelieren. Dies kann der Zukunft zu neuen Prüfmöglichkeiten führen.

Die Rekonstruktion von Temperatur- und Emissivitätsbildern aufbauend auf dem Prinzip der Zweikanalpyrometrie wurde sowohl mit der Dual-Band Kamera als auch mit einer MWIR Kamera mit Spektralfiltern durchgeführt und lieferte zufriedenstellende Ergebnisse an den untersuchten Proben. Die Berücksichtigung der effektiven Umgebungsstrahlung verbesserte dabei die erzielten Ergebnisse. Erstmals konnte so der Temperaturbereich unter 100°C erschlossen werden. Die Experimente mit Einsatz von Spektralfiltern im MWIR führten, vermutlich wegen der besseren Gültigkeit der getroffenen Annahmen über die Wellenlängenabhängigkeit der Emissivität, zu einer noch besseren Trennung von Emissionsgradverteilung und Temperaturbild. Ein Problem bei der Arbeit mit Spektralfiltern liegt jedoch in den Effekten durch Verkippung (zumindest bei dem eingesetzten System) und in dem geringeren Signal. Der Störeffekt der Filterverkippung konnte durch Einsatz von Bildverarbeitungstechniken noch teilweise korrigiert werden. Die Dual-Band Kamera hat das Potenzial, auch zeitlich schnell variierende Temperatur und Oberflächenzustände zu analysieren. Die Herausforderung besteht weiterhin darin, die fehlende Information über die Wellenlängenabhängigkeit der Emissivität ohne zuviel a priori Annahmen zu beschaffen. Dann eignet sich die Technik sehr gut für Temperaturüberwachung in Prozessen.

Danksagung: Diese Arbeit wurde im Rahmen des BMBF-Projekts "InfraSpek", FKZ 02PU2501, gefördert.

#### Referenzen

- [1] R. Imhof, D. Birch, F. Thornley J. Gilchrist and T. Stivens, Sci. Instrum. 17 (1984) 521-525
- [2] C. Schmitz, T. G. Hantzko, S. Lohmann, H. Lubatschowski, and W. Ertmer, 'Pulsed photothermal radiometric investigations of optical and thermal properties', Proc. SPIE **2923**, 12
- [3] H. G. Walther, U. Seidel, W. Karpen, and G. Busse, 'Application of modulated photothermal radiometry to infrared transparent samples', Rev. Sci. Instrum. **63**, 5479 (1992)
- [4] S. Paolini and H. G. Walther, 'Photothermal radiometry of infrared translucent materials', J. Appl. Phys. **82**, 101 (1992)
- [5] R. E. Imhof, C. J. Whitters, D. J. Birch, and F. R. Thornley, 'New opto-thermal radiometry technique using wavelength selective detection', J. Phys. E **21**, (1988) 115-117
- [6] R. W. Jones and J. F. McClelland, 'Transient Infrared Emission Spectroscopy', Anal. Chem. **61**, 650 (1989)
- [7] I. Notingher, R. E. Imhof, P. Xiao, and F. C. Pascut, 'Near-surface depth resolved midinfrared emission spectroscopy', Rev. Sci. Instr. **74**, (2003) 346-348
- [8] J. I. Eldridge, C. M. Spuckler, and R. E. Martin, Int. J. Appl. Ceram. Technol. **3** (2006) 94-104
- [9] S. Shepard, Y. Hou, J. Lhota, D. Wang and T. Ahmed, "Thermographic measurement of thermal barrier coating thickness", Thermosense XXVII, Proc. SPIE **5782** (2005) 407-410
- [10] A. Stuke, Diss., Ruhr-Universität Bochum 2007
- [11] Gardner, J.L: Computer Modelling of a multiwavelength pyrometer for measuring true surface temperature . High Tempertures- High Prssures **12** (1980), S. 699-705
- [12] Gardner, J.L., Trebor, P.J., Davies, M.R.: A six-wavelength radiation pyrometer. High Tempertures-High Pressures **13** (1981), S. 459-466
- [13] Oertel, H.: Entwicklung eines Meßsystem und Bestimmung spektraler Emissionsgrade von Metallen für die Berechnung der Strahlungswärmeübertragung und die Pyrometrie in wärmetechnischen Anlagen. Dissertation, Technische Universität Clausthal, 1997
- [14] Nagel, H.: Mehrkanalpyrometrische Temperaturmessung auf metallischen Oberflächen im Niedertemperaturbereich unter Berücksichtigung ihrer Strahlungseigenschaften. Dissertation, Technische Universität Dresden, 1994
- [15] Fiessler, L.: Möglichkeiten und Grenzen der Mehrwellenlängenpyrometrie als emissionsgradunabhängiges Temperaturmessverfahren. Dissertation, Universität Stuttgart, 1991
- [16] Vetterlein, T.; Meyendorf, N.; Walle, G.: Multi-Channel Pyrometry and Thermography A Non-Contact Method for the Determination of the Spectral Emissivity of High-Temperature Materials. In: Greem. R.E. (Hrsg.): Nondestructive Characterization of Materials VIII. New York: Plenum Press, 1998, 377-382.
- [17] Rosenbaum T.: Thermographische Messung der Temperatur metallischer Oberflächen. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2007
- [18] M. Abuhamad and U. Netzelmann, 'Dual-band active thermography on infrared transparent materials', QIRT Journal, submitted