

# Parallaxenfreie Bildfusion des infraroten und des sichtbaren Spektralbereichs ohne Kenntnis der 3D-Oberflächeninformation

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

\*Siemens AG, CT T GTF NDE, 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 neuartige parallaxenfreie Bildfusion ermöglicht die simultane Betrachtung eines Prüfobjekts durch Farbkamera und IR-Kamera aus dem gleichen Blickwinkel. Dadurch kann die Farbinformation auch ohne Kenntnis der 3D-Oberflächeninformation des Objekts pixelgenau mit der IR-Information zu einem Bild überlagert werden, was gerade für komplex geformte Prüfobjekte von großem Vorteil ist. Außerdem ergeben sich aus der Technik erweiterte Segmentierungs- und Maskierungsmöglichkeiten. Weiterhin werden nicht nur zwei Spektralbereiche miteinander kombiniert, sondern auch zwei unterschiedliche Prüftechniken. Die industriell eingesetzte Technik im visuellen Spektralbereich kann sich auf eine lange Erfahrung, ausgeklügelte Bildbearbeitungsalgorithmen und hochauflösende schnelle Kameratechnik für jeden Anwendungsbereich von einer Vielzahl von Anbietern berufen. Dabei ermöglichen bestehende technische Standards die einfache Integration in bereits existierende Infrastrukturen. Die industrielle Infrarotmesstechnik erfordert oft den Einsatz von teuren gekühlten IR-Kameras und je nach Applikation auch Hochgeschwindigkeits-IR-Kameras im Wellenlängenbereich von 3–5  $\mu\text{m}$  oder auch 7–13  $\mu\text{m}$ . Diese liegen selbst bei den im Vergleich zu industriellen Farbkameras geringen Auflösungen von 640×512 Pixel bei einem vielfachen Preis.

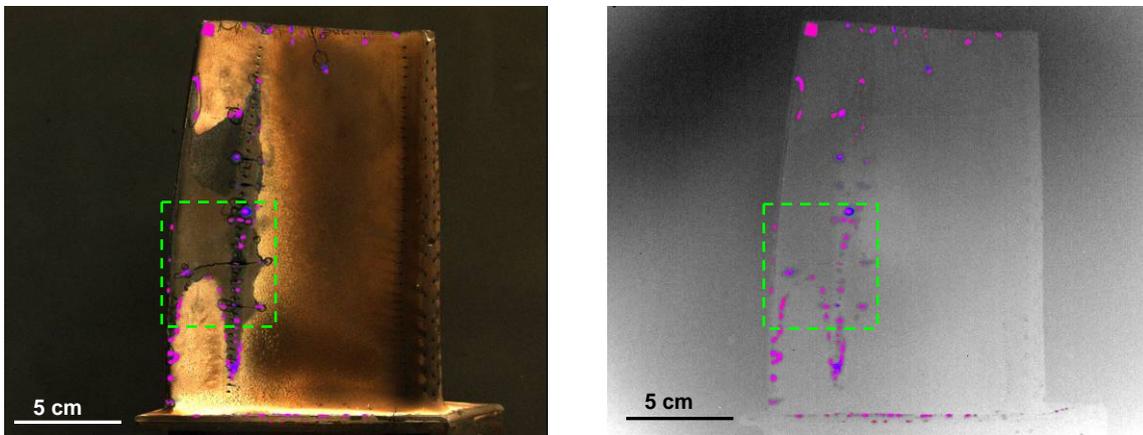
Deshalb ist gerade die Erweiterung eines IR-Kameraprüfsystems mit einer RGB-Farbkamera eine kostengünstige und einfach zu implementierende Variante, die sowohl die serielle als auch die parallele Bilderfassung parallaxenfrei, also ohne Bildversatz, ermöglicht. Daraus ergeben sich eine Vielzahl von neuen Anwendungen, wie der erweiterten, optimierten Interpretation von Infrarotbildern sowie die vereinfachte Dokumentation von Prüfteilen und die Raum- oder Prozessüberwachung. Die hier gezeigte Fusion verschiedener Prüftechniken könnte als Beispiel für zukünftige Kombinationen von Prüftechniken zu weiteren integrierten Prüfsystemen führen.

## 1. Einführung

In der aktiven IR-Messtechnik wird oftmals von den Kameras erwartet, dass sie schnelle Diffusionsprozesse wie in Metallen, dünnen metallischen Verbindungen oder dünnen Kunststoffen zeitlich auflösen können, um Schichtablösungen, Verbindungsfehler oder Risse auf und unterhalb der Oberfläche nachweisen zu können. Deshalb werden hohe Bildfrequenzen >100 Hz benötigt, um die geringen zeitlichen Signalunterschiede zwischen

Defekt- und Gutteil aufzulösen. Andererseits ist gleichzeitig eine hohe räumliche Bildauflösung gefordert, um kleinste Defekte gut aufzulösen und um diese auf dem Bauteil mit Hilfe des IR-Bildes besser aufzufinden. Beide Kriterien fordern, dass die Bildübertragungsrate hoch genug ist, um die Bilder ohne Datenverlust abzuspeichern. Ein derzeit häufig genutzter Standard ist GEV (GigE Vision), durch den bis zu 1 GBit/s übertragen werden können und bei dem sich die Kamerahersteller auf einheitliche Standards geeinigt haben, um eine Plug-and-Play Funktionalität zu unterstützen. Schneller sind 10-Gigabit-Ethernet, USB 3.0 und FireWire S3200, welche ohne Framegrabber zwischen Kamera und PC auskommen. Noch schneller ist der CameraLink Standard, bei dem bis zu 6,5 GBit/s übertragen werden können. Allerdings wird hierbei auf PC-Seite ein eigener Framegrabber benötigt [1]. Die Ausnutzung der Bildübertragungsraten wird aber nicht allein durch die Datenübertragungsrate eingegrenzt, sondern auch durch die Tatsache, dass die Kamera-Chips nicht schneller ausgelesen werden können.

Eine andere Möglichkeit besteht aus der Kombination aus schnellen IR-Kameras mit hochauflösenden Farbkameras. Der Vorteil ist, dass man ein thermografisches Ergebnisbild mit der hohen Bildfrequenz einer IR-Kamera erzeugen kann. Danach wird dieses Ergebnisbild mit dem Bild einer Farbkamera überlagert. Bei letzterem Schritt wird nicht mehr die hohe Bildfrequenz benötigt, sondern lediglich die Auflösung, so dass man auf jeden Fall bei der Datenübertragung mit GigE auskommen kann. Denn für das Live-Bild einer Farbkamera werden für eine flüssige Darstellung lediglich >15 Hz benötigt. An dieser Stelle setzt die Hybrid-Kamera [2] an. Des Weiteren lässt sich die Anzahl der Datenübertragungs- und Netzkabel durch den Einsatz von GigE-tauglichen Switches kleiner Bauform und den Anschluss von Geräten gleicher Betriebsspannung an ein leistungsstarkes Netzteil minimieren. Dadurch sind Hand gehaltene und einfach zu transportierende Systeme weiterhin realisierbar.

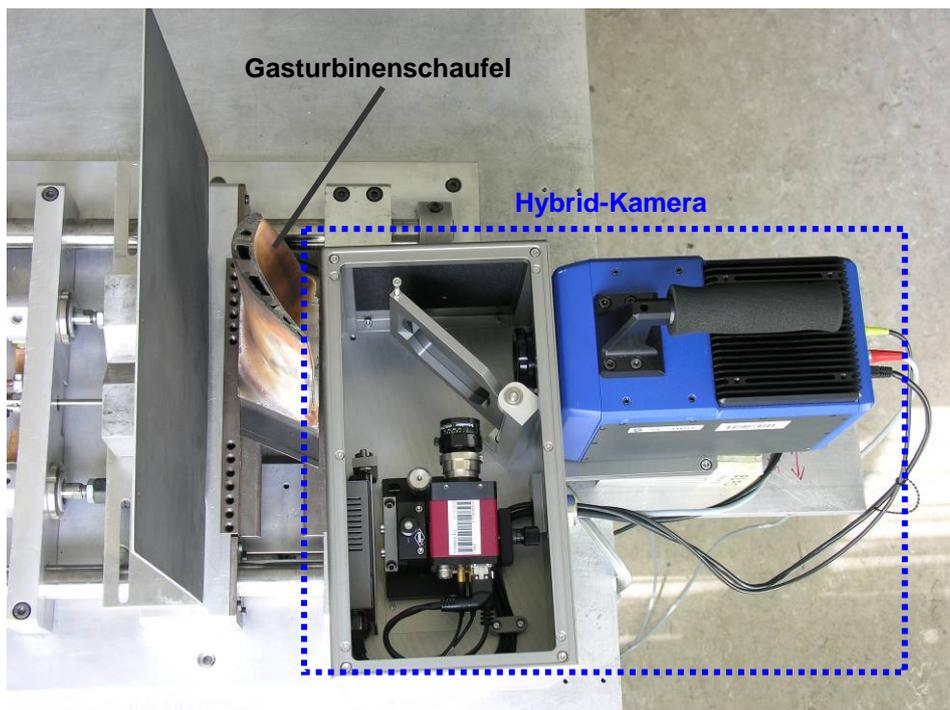


**Abbildung 1:** Links: Bildfusion eines RGB-Farbkamerabildes mit 1600×1400 Pixel Auflösung mit dem IR-Ergebnisbild (640×512 Pixel) einer aktiven Ultraschallthermografiemessung. Die rosa bis blauen Flecken kennzeichnen die Positionen von Delaminationen und Rissen. Rissflanken, die sich nicht berühren, können sich nicht erwärmen und tragen deshalb nicht zum Defektsignal bei. Rechts: Konventionelle Darstellung, in der das IR-Ergebnisbild dem IR-Bild überlagert wird. Auf die Detailansichten der grün gestrichelten Rahmen wird in Abbildung 3 eingegangen.

## 2. Parallaxenfreie IR-RGB-Bildfusion mit der Hybrid-Kamera

### 2.1 Grundlagen

Die bereits in [2] vorgestellte Hybrid-Kamera ermöglicht die synchrone parallaxenfreie Datenerfassung des sichtbaren und des infraroten Spektralbereichs. Dabei sind wie in Abbildung 2 gezeigt, IR-Kamera und RGB-Kamera mittels eines im Infraroten transparenten und im Sichtbaren reflektierenden Strahlteilers kombiniert. Durch die gleichzeitige Datenerfassung von IR- und RGB-Bildern können beide Informationen über entsprechende Bildbearbeitungsalgorithmen zu einem Ergebnisbild kombiniert werden, in dem der Prüfer zusätzliche wichtige Informationen über das Prüfobjekt erhält, um es besser bewerten zu können. Mit Hilfe des Farbbildes kann man sich besser in der Prüfscene ohne Hilfsmittel wie IR-reflektierende Markierungen oder Kontrast verbessernde zusätzliche IR-Strahlung zurechtfinden. Des Weiteren wird eine spätere Interpretation der Messdaten anhand der höher aufgelösten RGB-Bilder vereinfacht. Die IR-Kamera liefert mittels aktiver thermografischer Messung ein Ergebnisbild mit Indikationen für Defekte eines Prüfteils, das durch die Auswertung der Farbbildinformation für den Prüfer weiter aufbereitet wird. Für möglichst geringe Verzeichnungen und kleine Naheinstellgrenze hat sich eine Festbrennweite für die RGB-Kamera bewährt, deren Brennweite so bemessen ist, dass das erhaltene Bildfeld größer oder gleich dem der IR-Kamera ist.

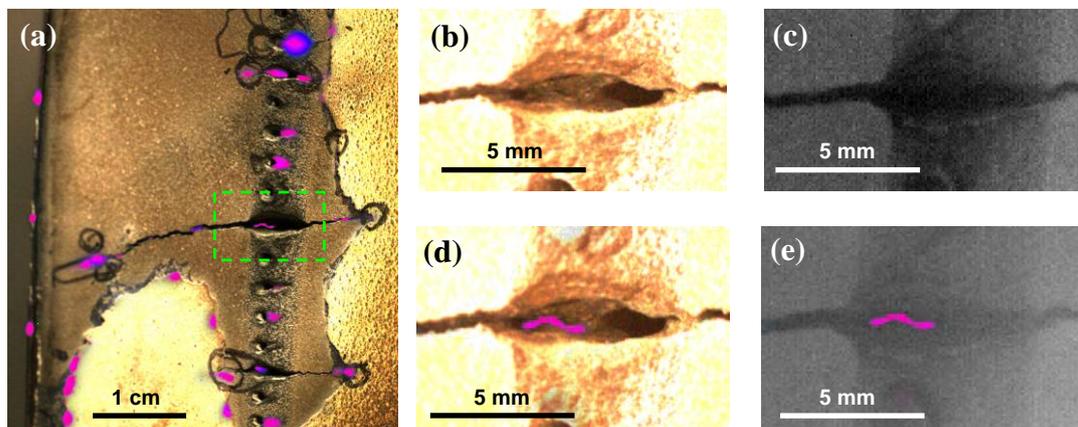


**Abbildung 2:** Ultraschallanregung mit eingespannter Gasturbinenschaufel und Hybrid-Kamera.

### 2.2 Anwendung der Hybrid-Kamera

Wie in Abbildung 1 erkennbar, erhält man durch die Kombination aus RGB- und IR-Bild eine intuitive Darstellung der Defekte auf dem Prüfteil. Durch die Ausnutzung von Farb- oder Materialunterschieden kann man sich auf diesem besser und schneller zurechtfinden, ohne dass von dem abstrakten IR-Strahlungsbild mit geringer Auflösung und schwachem

Kontrast auf das Prüfteil im sichtbaren Spektralbereich zurück geschlossen werden muss. Dabei muss man sich bei der parallaxenfreien Bildfusion nicht für eine der beiden Darstellungen entscheiden, da über geeignete Algorithmen eine beliebige Kombination aus beiden Information berechnet und dargestellt werden kann. Um vergleichbare Bilder mit heute üblichen Messgeräten zu erhalten kann man sich zweier Techniken bedienen: Nach einer IR-Messung wird die Kamera abgebaut und an deren Stelle eine Digitalkamera platziert, um ein Bild von der Stelle aus zu fotografieren, an der die IR-Kamera aufgestellt war, um beide Bilder später mittels Bildbearbeitungssoftware auf dem Bildschirm miteinander zu überlagern. Die Qualität der Überlagerung hängt dann von der Geschicklichkeit des Bildbearbeiters ab wie gut er das eine Bild verzerren kann, um unterschiedliche Blickwinkel auf das Prüfteil auszugleichen, was oftmals zeitraubend ist und nicht ohne weiteres auf eine Vielzahl von Bildpaaren übertragbar ist. Der andere Ansatz ist, beide Kameras neben- oder übereinander zu stellen [3, 4]. Dabei erhält man allerdings zwei nicht passgenaue Bilder, was besonders bei Nahaufnahmen deutlich wird und durch Abschattungen noch verstärkt werden kann. So wären Bilder wie in Abbildung 3 (a) und insbesondere (d) ohne den Versuchsaufbau wie in Abbildung 2 nicht möglich.



**Abbildung 3:** (a): Vergrößerter Bildausschnitt des grün gestrichelten Rahmens aus Abbildung 1. (b)-(e): Vergrößerte Ausschnitte aus (a) grün gestrichelter Rahmen. In (d) ist ein ausgeleuchteter Farbbildausschnitt mit überlagertem Messsignal gezeigt. In (b) ist dieser im reinen Farbbild ansatzweise zu erkennen. Zum Vergleich ist in (c) dem reinen IR-Bild der Riss aufgrund der fehlenden Detailschärfe nicht mehr zu erkennen. Bild (e) ist das Pendant zu (d), welches das IR-Bild mit überlagertem Ergebnisbild darstellt.

In Abbildung 3 (a) sieht man wie gut das Farbbild mit dem Ergebnisbild der ultraschallthermografischen Messung [5] zusammen passt, ohne dass beide Bilder vorher mittels Bildbearbeitungsalgorithmus entzerrt wurden. Bei den Nahaufnahmen in den Abbildungen 3 (b)-(d) wurde das Bauteil mit einer Halogenlampe ausgeleuchtet, um den im Inneren des Bauteils liegenden Riss für die Kamera sichtbar zu machen. Gut zu erkennen ist die gute Passgenauigkeit des RGB-Bildes mit dem Ergebnisbild und dass der Riss im Farbbild im Gegensatz zum IR-Bild noch erkennbar ist. Hier zeigt sich, dass der Ort der Erwärmung an einer innen liegenden Berührstelle des nach außen offen klaffenden Risses erfolgt. Dies eröffnet völlig neue Möglichkeiten, Risswärmeübertragungsmechanismen zu studieren [5, 6, 7].

Im folgenden Abschnitt wird gezeigt, wie die Farbkamera nicht nur zur besseren Visualisierung von Messergebnissen genutzt werden kann, sondern wie die zusätzliche Information genutzt wird, um Messergebnisse sicherer bewerten zu können.

### 3. Miteinbeziehung der Farbbildinformation bei einer aktiven Blitzthermografie

#### 3.1 Verbesserte Prüfteilbewertung mit IR- und RGB-Bildinformationen

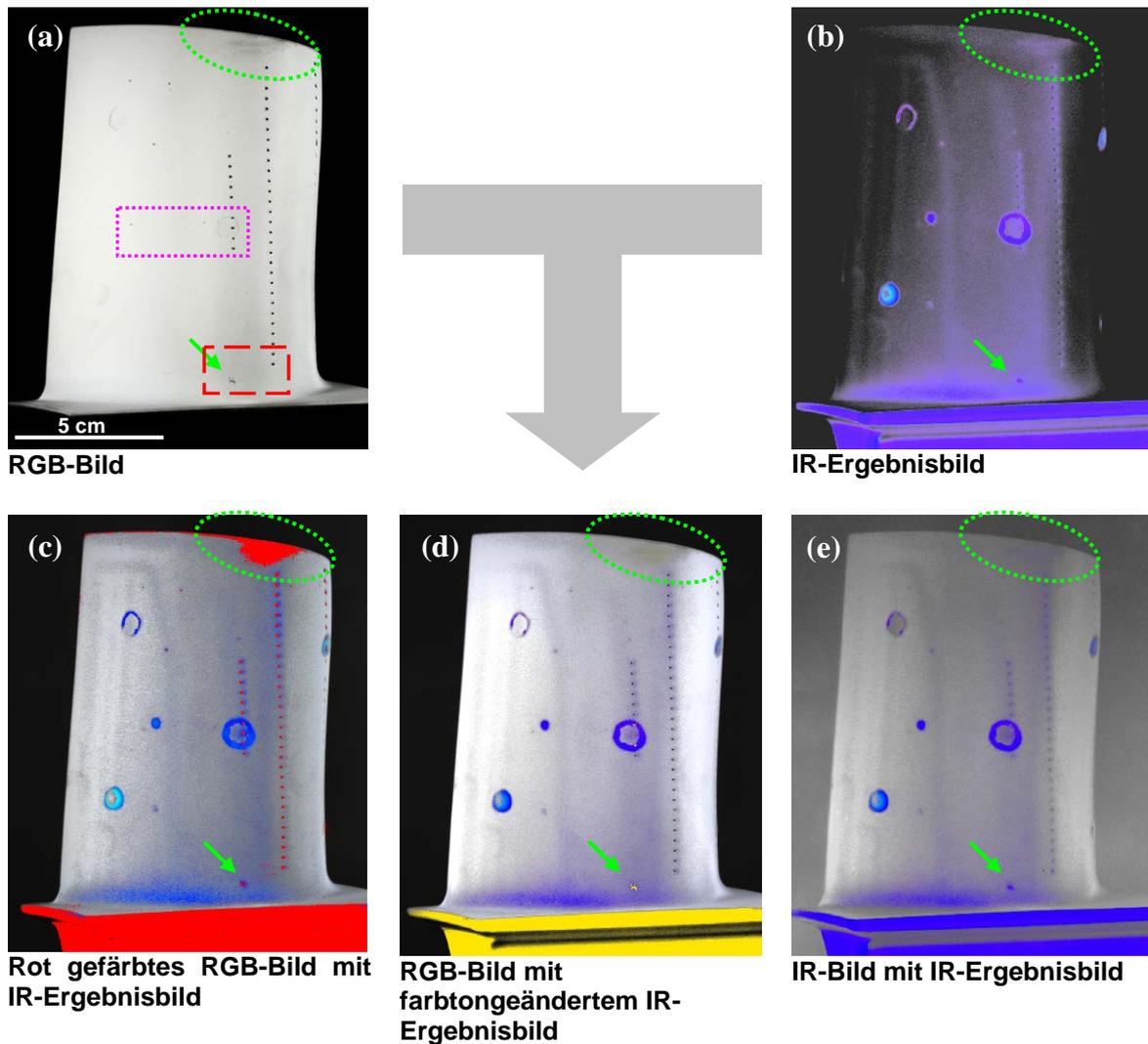
In diesem Abschnitt wird die Farbbildinformation genutzt, um das IR-Ergebnisbild farblich so anzupassen, dass in ihm oberflächliche Verschmutzungen, die hier als dunkle Stellen angenommen werden, gekennzeichnet werden. Zu diesem Zweck wird als erstes das Prüfobjekt gleichmäßig ausgeleuchtet. Anschließend setzt man einen Helligkeitsschwellwert oberhalb dessen die Beschichtung der Turbinenschaufel als weiß, also in Ordnung, erkannt wird. Pixelwerte unterhalb dieses Schwellwertes werden als dunkle oberflächliche Verschmutzungen interpretiert. In diesem Fall wird der Farbton des blitzthermografischen Ergebnisbildes geändert. Das bedeutet, dass das RGB-Bild aus Abbildung 4 (a) mit einem mit Hilfe dieses RGB-Bildes angepassten IR-Ergebnisbildes überlagert wird. Auf die Detailansichten des rosa und roten Rahmens wird im nächsten Abschnitt noch genauer eingegangen.

Als erstes wird im Farbbild pixelweise entschieden, ob der Helligkeitswert des Pixels unterhalb oder oberhalb der eingestellten Schwelle ist. Falls die Pixelhelligkeit unterhalb der Schwelle liegt, wird der Farbton des entsprechenden Pixels im blitzthermografischen Ergebnisbild auf gelb geändert. Das geschieht, indem das Pixel des IR-Ergebnisbildes, welches durch rot (R), grün (G) und blau (B) definiert ist, in den HSV-Farbraum (**H**elligkeit, **S**ättigung und **F**arbton) umgerechnet wird. Dort wird alleine der Farbton des Pixels auf gelb gesetzt. Danach wird es wieder in den RGB-Farbraum umgerechnet. Dann wiederholt sich der Prozess mit dem folgenden Pixel. Für den Fall, dass das Pixel im Farbbild oberhalb der Helligkeitsschwelle ist, wird der entsprechende IR-Ergebnispixelwert ohne Änderung beibehalten. Durch die Umrechnung vom RGB-Farbraum in den HSV-Farbraum wird erreicht, dass man mit einem Parameter den Farbton des Pixels ändern kann, ohne dass Sättigung oder Helligkeit angepasst werden müssen. Im RGB-Farbraum hingegen müssten alle drei Parameter verändert werden, um das gleiche Ergebnis zu erzielen.

Wenn alle dunklen Stellen des Farbbildes, also Pixel unterhalb des eingestellten Helligkeitsschwellwertes, im IR-Ergebnisbild gelb eingeblendet werden würden, so dass nicht Helligkeit und Sättigung des originalen IR-Ergebnisbildes übernommen werden, so würden auch alle Kühlluftbohrungen gelb eingeblendet werden, was irreführend ist, da die Kühlluftbohrungen keine Defekte darstellen. Ein solches Bild ist in Abbildung 4 (c) dargestellt, in dem anstatt gelb die Farbe rot gewählt wurde, um den Effekt deutlicher zu zeigen. In diesem Zusammenhang sind in Abbildung 4 die mit einem Pfeil oder der grün gepunkteten Ellipse versehenen Verschmutzungen zu beachten. Die leichte Verschmutzung in der Ellipse aus (a) ist in (c) zu dominant eingeblendet, wodurch die übrigen Defekte in den Hintergrund treten. Das Blitzthermografieergebnisbild (b) zeigt an dieser Stelle nur eine schwache Indikation, deshalb wurde in (d) im Endergebnisbild, wie bereits beschrieben, der Farbton im IR-Ergebnisbild entsprechend der Helligkeit im Farbbild geändert und das entstandene IR-Ergebnisbild anschließend dem RGB-Bild überlagert. Auf diese Weise ist die Verschmutzung nur leicht gelblich eingeblendet, was dem geringen Grad der oberflächlichen Verschmutzung entspricht. In (e) ist der aktuelle Stand der Technik gezeigt, in dem lediglich das unbearbeitete IR-Ergebnisbild mit dem IR-Bild überlagert ist. Anders verhält es sich bei der mit dem grünen Pfeil gekennzeichneten Verschmutzung. Die Indikation in (b) deutet nicht zuletzt wegen ihrer kreisförmigen Form auf einen ernst zu nehmenden Defekt hin. Der Vergleich mit dem Farbbild (a) zeigt jedoch, dass es an dieser Stelle eine oberflächliche Verschmutzung gibt. Das heißt, dass der Farbton des IR-Ergebnisbildes an der Stelle der Verschmutzung in (a) nach gelb geändert

wird. Insgesamt kann man feststellen, dass die entscheidenden oberflächlichen Verschmutzungen mit dem entsprechenden Verschmutzungsgrad eingeblendet sind, ohne dass die eigentlichen Defekte, nämlich die Schichtablösungen, durch die Darstellung in den Hintergrund treten. Des Weiteren ist die Darstellung der Defekte im RGB-Bild sehr viel natürlicher und intuitiver als die abstrakte Darstellung im thermischen IR-Strahlungsbild.

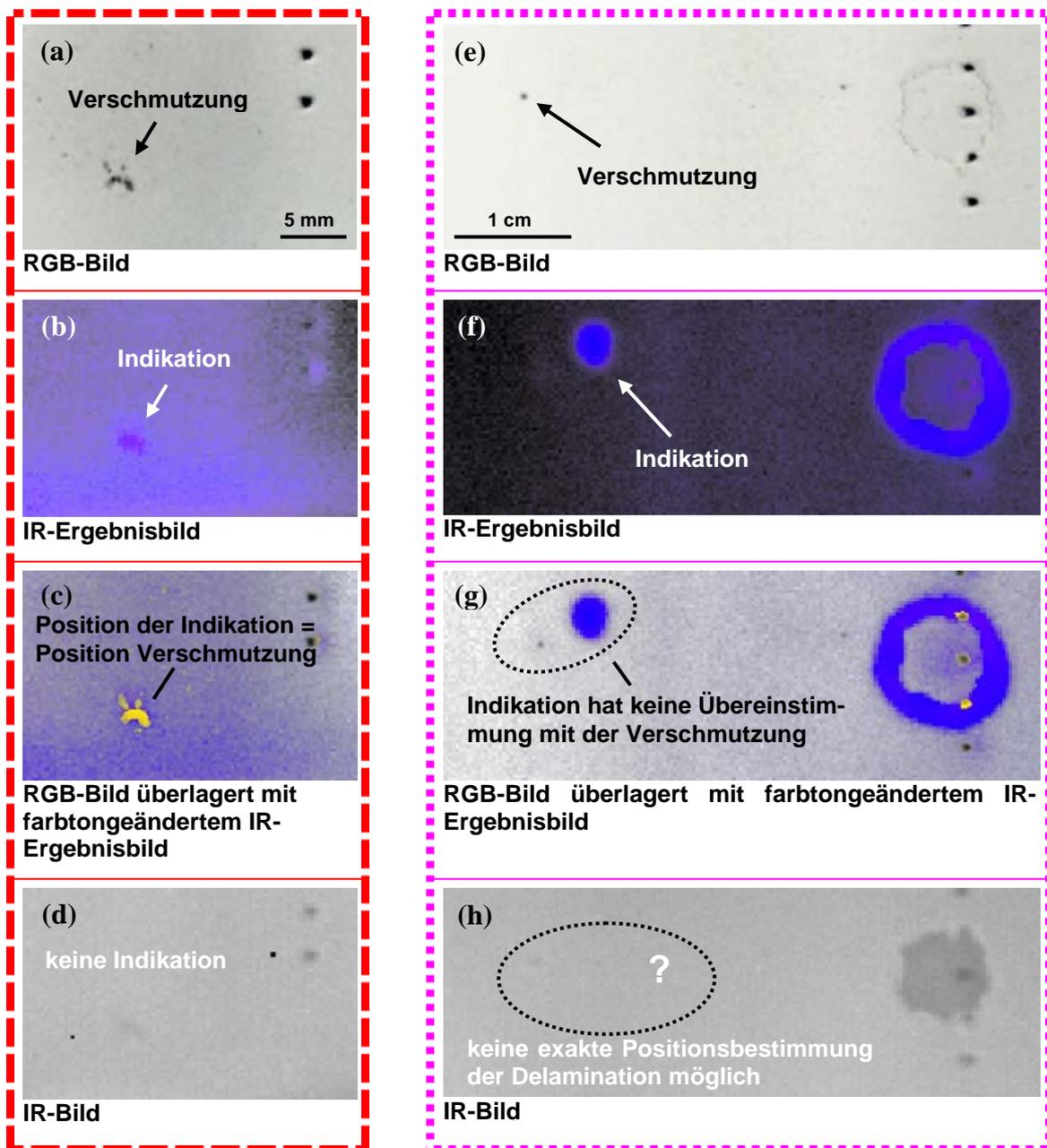
Um zu verdeutlichen, dass diese Technik sehr sensibel für kleinste Defekte und geringe Helligkeitsunterschiede funktioniert, was ohne die erreichte Passgenauigkeit von RGB- mit IR-Bild nicht möglich wäre, wird im Folgenden anhand von Detailansichten der in Abbildung 4 (a) eingezeichneten rosa gepunkteten und rot gestrichelten Rahmen weiter eingegangen.



**Abbildung 4:** (a): Farbbild einer mit Defekten präparierten neuen Turbinenschaufel. (b): IR-Ergebnisbild einer Blitzthermografiemessung. In blau sind die Defekte gekennzeichnet. (c): Das RGB-Bild ist mit dem Ergebnisbild überlagert und dort wo der Helligkeitswerte des Farbbildes unterhalb einer Schwelle ist wird das Bild rot eingefärbt. (d): Bildüberlagertes Farbbild mit dem IR-Ergebnisbild der Blitzthermografie in dem der Farbton an den Stellen auf gelb geändert wurde, an denen das Farbbild dunkel ist, was charakteristisch für eine Verschmutzung ist. (e): Bisheriger Stand der Technik bei dem das IR-Bild (nicht dargestellt) mit dem Ergebnisbild überlagert ist.

### 3.2 Verbesserte Auffindung und Einstufung von Defektindikationen

In Abbildung 5 (a)-(d) wird gezeigt, dass das RGB-Bild (a) eine dunkle Verschmutzung aufweist, dort wo auch das IR-Ergebnisbild eine Indikation hat. Deshalb ist in (c) das IR-Ergebnisbild, wie im vorherigen Abschnitt erklärt, durch die Einbeziehung der Farbbildinformation gelb eingefärbt. Zum Vergleich ist in (d) der entsprechende IR-Bildausschnitt gezeigt, in dem die Verschmutzung nicht erkennbar ist. Mit der reinen Information des IR-Bildes könnte man fälschlicherweise folgern, dass die Indikation aus (b) eine tatsächliche Schichtablösung ist. Nur durch den Abgleich mit dem Farbbild aus (a) wird klar, dass die Indikation in (b) auf eine oberflächliche Verschmutzung zurückzuführen ist.



**Abbildung 5:** (a)-(d): Eine Indikation wird als oberflächliche Verschmutzung erkannt. Indikation ist deshalb nicht eindeutig als Schichtablösung klassifizierbar. (e)-(h): Vermeidung der Fehleinschätzung, dass eine Indikation im RGB-Bild automatisch mit einer Schichtablösung übereinstimmt.

In den Abbildungen 5 (e)–(h) wird gezeigt, dass im RGB-Bild selbst kleinste Verschmutzungen mit der höheren Auflösung der RGB-Kamera von 1600×1200 Pixel auflösbar sind. Beim Vergleich von (e) mit (f) sieht man, dass die Stelle der Indikation eines Defekts nicht mit der Position der oberflächlichen Verschmutzung übereinstimmt. Beim Vergleich mit dem IR-Bild (h) erkennt man die Verschmutzung nicht. Erst durch den Vergleich des IR-Ergebnisbildes (f) mit dem RGB-Bild (e) kann die Indikation eindeutig als Schichtablösung eingestuft werden und die Position der Delamination kann mit Hilfe des Farbbildes besser bestimmt werden. Ohne das Farbbild könnte der Prüfer fälschlicherweise die Position der Verschmutzung als Ort des Defektes markieren oder die Schichtablösung als oberflächliche Verschmutzung interpretieren. Insbesondere besteht das Potenzial für fehlerhafte Bewertungen dann, wenn das Bauteil zum Markieren von der Prüfposition entfernt wird und somit keine direkter Vergleich des IR-Ergebnisbild mit Hilfe des Live-Bildes der IR-Kamera möglich ist. Allerdings kann durch den Miteinbezug des abgespeicherten Farbbildes die Position auch noch nachträglich eindeutig bestimmt werden, was durch die reine IR-Information nicht möglich ist. Per Fernüberwachung könnten auch weit entfernte Mitarbeiter in Einzelfällen um Rat gefragt werden.

#### 4. Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Miteinbezug einer RGB-Kamera bei der Bauteilbewertung lohnend ist, da der Prüfer bei der Bewertung auf mögliche Probleme in der Blitzthermografie durch oberflächliche Verschmutzungen hingewiesen wird. Auch die nachträgliche Bewertung von Prüfteilen am PC wird vereinfacht, dadurch dass man das IR-Ergebnisbild bei zweifelhaften Ergebnissen nicht mehr vor Ort mit dem Bauteil abgleichen muss. Auch zu Dokumentationszwecken ist diese Technik vorteilhaft, da schließlich auch oberflächliche Verschmutzungen gerade bei Gasturbinenschaufeln, die extremen Temperaturbelastungen ausgesetzt sind, unter Umständen zum Versagen der keramischen Wärmedämmschicht führen können [8].

Darüber hinaus können mit dem Einsatz der Hybrid-Kameratechnik Risserwärmungsmechanismen mit Infrarotbildern untersucht werden, die dann zur Begutachtung mit einem Farbbild höherer Auflösung überlagert werden.

#### Referenzen

- [1] Stemmer Imaging, [www.stemmer-imaging.ch](http://www.stemmer-imaging.ch), „Datenübertragung: Standards im Vergleich“, Visions Systems, Aktuelle Technik 5/10
- [2] 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
- [3] FLIR, <http://www.flir.com/cvs/eurasia/de/>, FLIR Commercial Vision Systems
- [4] FLUKE, <http://www.fluke.com/fluke/dede/Waermebildkamera/Fluke-Ti50-Series.htm?PID=56188>
- [5] C. Homma, Untersuchungen zu Mechanismus und technischer Umsetzung der akustischen Thermographie, Dissertation, Fakultät 8, Universität des Saarlandes, Deutschland (2007)
- [6] 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
- [7] C. Homma, M. Rothenfusser, J. Baumann, R. E. Shannon, Study of Heat Generation Mechanisms in Acoustic Thermography, Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, edited by D.O. Thompson and D.E. Chimenti (AIP Conference Proceedings **820**), **25** pp. 566–573, (2006)
- [8] R. Kurz and K. Brun, “Maintenance and operating practices effects on degradation and life”, Proceedings of the thirty-sixth turbomachinery symposium (2007), pp. 176–179