

Ausnutzung von spektralen Banden im Sichtbaren und Infraroten zur thermografischen Prüfteilqualifizierung

Dissertation

zur Erlangung des Grades des

Doktors der Ingenieurwissenschaften

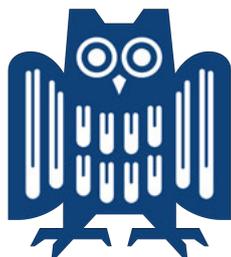
der

Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät III

Chemie, Pharmazie, Bio- und Werkstoffwissenschaften

der

Universität des Saarlandes



**UNIVERSITÄT
DES
SAARLANDES**

von

Dipl.-Phys. Konstantin Eisler

Saarbrücken

2012

Tag des Kolloquiums: 01. Juni 2012

Dekan:	Prof. Dr. W. F. Maier
Vorsitzender:	Prof. Dr. H. Vehoff
Berichterstatter:	Prof. Dr. W. Arnold
	Prof. Dr. R. Clasen
Akademischer Mitarbeiter:	Dr.-Ing. F. Aubertin

Kurzfassung

Zur Nutzung der spektralen Materialeigenschaften in der Thermografie werden in dieser Arbeit zwei Wege besprochen: Zum Einen wird das Sichtbare (RGB) mit dem Infraroten (IR) kombiniert und zum Anderen werden IR-Filter eingesetzt, um den Spektralbereich im IR aufzuteilen.

Für eine bessere Interpretation von IR-Messungen speziell bei Objekten mit komplexer Geometrie oder kleinen Abmessungen ist ein passgenaues Farbbild aus dem gleichen Blickwinkel wie bei der IR-Kamera von Vorteil. Die vorgestellte Hybrid-Kamera kombiniert mittels Strahlteiler den RGB- und IR-Spektralbereich zu einem neuen Hybrid-Bild. Die Applikationen reichen von der Lokalisierung und der Identifizierung von Fehlindikationen über die Gewinnung der 3D-Oberflächeninformation einschließlich überlagertem Hybrid-Bild mit Defektindikation und der Filterung eines Markierungslasers zur Darstellung im IR-Bild bis zur Raum- und Prozessüberwachung.

Für die Erkennung von Kontaminationen wird das detektierte IR-Signal in Bezug auf die enthaltene spektrale Information analysiert. Wegen des geringen Signals durch den Einsatz von Spektralfiltern wird ein Algorithmus angewendet, mit dessen Hilfe spektral aktive von nicht aktiven Materialien unterschieden werden. Das Ergebnis wird genutzt, um in einer Ultraschall-Thermografie Fehlindikationen, verursacht durch oberflächliche Verschmutzungen, zu maskieren.

In der Materialerkennung werden die in den IR-Spektralbereichen detektierten Signale in Bezug auf deren absolute und relative Intensität ausgewertet, um sie so einem hinterlegten Material in einer Datenbank zuzuordnen.

Abstract

This thesis is concerned with the utilization of the spectral material properties in thermography. Two approaches are under investigation. The first combines the visible (VIS) with the infrared (IR) and the second uses IR-filters to split the mid wave infrared into several bands.

For better assessment of IR measurements especially on objects with complex geometry or small dimensions, an accurately fitting VIS picture of the same angle of view as the IR camera is beneficial. The presented hybrid camera uses a beam splitter to combine the VIS and the IR wavelength regions to a new hybrid image. The applications range from the localization and identification of false indications over the retrieval of 3D surface information with overlaid hybrid image with defect indications and the filtering of a marking laser for being displayed in the IR image to area and process monitoring.

For flash thermography the detected IR signal is analyzed with regard to the spectral material information. By using IR filters, the remaining signal is often too weak and therefore fitting algorithms are used to distinguish spectrally active from not active materials. The result is used to mask false indications resulting from dirt in an ultrasound thermography.

For material identification the IR signals detected in the individual spectral bands are evaluated with respect to their absolute and relative intensity to assign the spectral signature to a certain material in a database.

Verzeichnis der verwendeten Symbole, Naturkonstanten und Abkürzungen

Symbole

Symbol	Name
A	Flächenelement (m^2)
α_{Diff}	Thermische Diffusivität ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
$\alpha(\lambda, T, \theta, \phi)$	Absorption ($0 \leq \alpha \leq 1$)
$c_G(\lambda, T)$	Übertragungsfunktion
c_P	Spezifische Wärmekapazität ($\text{Ws kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
d	Beschichtungsdicke (m)
ΔI	IR-Signalhub nach der thermischen Anregung (14 Bit)
e_{th}	Thermische Effusivität ($\text{W} \sqrt{\text{s}} \text{m}^2 \text{K}$)
$\varepsilon(\lambda, T, \theta', \phi')$	Emissivität ($0 \leq \varepsilon \leq 1$)
f	Frequenz (Hz)
f_M	Mischungsfaktor ($0 \leq f_M \leq 1$)
$I_G(\lambda, T)$	Messwerte für Grafit (IR-Signaleinheiten)
\hat{I}_{IR}	Schwellwert im IR-Rohbild (14 Bit)
$I_{\text{IR-roh}}$	Pixelwert des IR-Kamerarohbildes (14 Bit)
$I_s(\lambda, T)$	Berechnete Planck-Kurve
k_P	Thermische Leitfähigkeit ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
$L'(\lambda, \theta', \phi')$	Emittierte spektrale Strahlungsdichte ($\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$)
$L'_s(\lambda, T)$	Strahlungsdichte des schwarzen Strahlers ($\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$)
$L_\lambda(\lambda, T)$	Plancksches Strahlungsgesetz ($\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$)
λ	Wellenlänge (μm)
$M'(T)$	Totale Abstrahlungsleistung (W m^{-2})
$M'(\lambda)$	Gesamte Abstrahlungsleistung ($\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$)
μ_e	Effektive thermische Diffusionslänge (m)
μ_{IR}	Thermische Diffusionslänge (m)
μ_{RGB}	Eindringtiefe der sichtbaren Strahlung (m)
P'_E	Emittierte Strahlungsleistung (W m^{-2})
P_{IR}	Pixelwert des IR-Bildes in Falschfarbendarstellung (24 Bit)
$P_{\text{IR-B}}$	Blauer Kanal des IR-Bildes (8 Bit)

Symbol	Name
$P_{\text{IR-G}}$	Grüner Kanal des IR-Bildes (8 Bit)
$P_{\text{IR-R}}$	Roter Kanal des IR-Bildes (8 Bit)
P_{Laser}	Signal des gefilterten roten Lasers (24 Bit)
P_{M}	Pixelwert des zusammengeführten Bildes (24 Bit)
P'_{R}	Reflektierte Strahlungsleistung (W m^{-2})
P_{RGB}	Pixelwert des RGB-Bildes (24 Bit)
$P_{\text{RGB-B}}$	Blauer Kanal des RGB-Bildes (8 Bit)
$P_{\text{RGB-G}}$	Grüner Kanal des RGB-Bildes (8 Bit)
$P_{\text{RGB-R}}$	Roter Kanal des RGB-Bildes (8 Bit)
$P'(\lambda_1, \lambda_2)$	Abgestrahlte Strahlungsleistung (W m^{-2})
ϕ	Azimutwinkel (rad)
Φ_{A}	Absorbierter Strahlungsfluss (W)
Φ_{E}	Einfallender Strahlungsfluss (W)
Φ'_{R}	Reflektierter Strahlungsfluss (W)
Φ_{T}	Transmittierter Strahlungsfluss (W)
Q_0	Intensität der Anregungsquelle ($\text{Ws m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
r	Radius (m)
ρ_{D}	Dichte (kg m^{-3})
$\rho(\lambda, \theta, \phi, \theta', \phi')$	Reflektivität ($0 \leq \rho \leq 1$)
S_{RB}	Schwellwert für die Differenz zwischen RGB-R und RGB-B (8 Bit)
S_{RG}	Schwellwert für die Differenz zwischen RGB-R und RGB-G (8 Bit)
σ	Streuung
T	Temperatur (K)
$\tau(\lambda, \theta, \phi, 2\pi)$	Transmissivität ($0 \leq \tau \leq 1$)
θ	Polarwinkel (rad)

Naturkonstanten

Konstante	Name
c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum: $2,9979 \times 10^8 \text{ (m s}^{-1}\text{)}$
c_1	1. Planck-Strahlungskonstante: $1,910 \times 10^{-16} \text{ (W m}^2\text{)}$
c_2	2. Planck-Strahlungskonstante: $1,4388 \times 10^4 \text{ (}\mu\text{m K)}$
h	Planck-Konstante: $6,6261 \times 10^{-34} \text{ (J s)}$
k_{B}	Boltzmann-Konstante: $1,3807 \times 10^{-23} \text{ (J K}^{-1}\text{)}$
σ_{B}	Stefan-Boltzmann-Konstante: $5,6705 \times 10^{-8} \text{ (W m}^{-2} \text{K}^{-4}\text{)}$

Abkürzungen

Abkürzung	Name
AR	Antireflexion (Beschichtung)
bw	Bandweite eines optischen Filters
FT	Fourier-Transformation
HSV	Helligkeit-Sättigung-Farbtone (Farbraum)
IR	Infrarot
LOI	Line of Interest (Linie von Interesse)
LWIR	Langwelliges Infrarot (8 – 12 μm)
MWIR	Mittelwelliges Infrarot (3 – 5 μm)
NETD	Noise Equivalent Temperature Difference
NIR	Nahes Infrarot (0,7 – 1,0 μm)
RGB	Rot-, Grün-, Blau-Anteil eines Farbkamerabildes
ROI	Region of Interest (Bereich von Interesse)
SNR	Signal-to-Noise Ratio (Signal-Rausch-Verhältnis)
SWIR	Kurzwelliges Infrarot (1 – 3 μm)
VIS	Sichtbarer (visible) Spektralbereich
zwl	Zentrale Wellenlänge eines optischen Filters

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	v
Abstract	vii
Verzeichnis der verwendeten Symbole, Naturkonstanten und Abkürzungen	ix
1 Zielsetzung und Stand der spektralen Infrarottechnik	1
2 Grundlagen	7
2.1 Strahlungsdichte, Abstrahlung und Bestrahlung	7
2.2 Plancksches Strahlungsgesetz	8
2.3 Stefan-Boltzmann-Gesetz	10
2.4 Emittierte Strahlung in einem Spektralband	10
2.5 Einführung der Energieflussbilanz	11
2.6 Emission, Absorption, Reflexion und Transmission	12
2.7 Kirchhoffsches Strahlungsgesetz	15
2.8 Teiltransparenz	16
2.9 Aktive Blitzthermografie	18
3 Bispektrale Kameratechnik – Zusammenführung des infraroten und des sichtbaren Spektralbereichs	21
3.1 Aufbau der Hybrid-Kamera	22
3.1.1 Parallaxenfreie Bildfusion mit Si-Strahlteiler	25
3.1.2 Synchronisierung	27
3.1.3 Kalibrierung	27
3.1.4 Darstellung der RGB- und der IR-Bilder	32
3.1.5 Visualisierungsmodi	32
3.2 Anwendungen der Hybrid-Kamera	35
3.2.1 Passive Thermografie	35
3.2.2 Aktive Thermografie – Verbesserte Defekt-Lokalisierung in einer Ultraschall-Thermografie	38
3.2.3 Verschmutzungserkennung anhand der RGB-Helligkeit bei einer Blitzthermografie	43
3.2.4 Erlangung der 3D-Oberflächeninformation inklusive der Farbbild- und IR-Defektbildtextur	48
3.2.5 Spektral selektive Einblendung der Farbkamerainformation in das IR-Kamerabild	54

3.3	Zusammenfassung	58
4	Spektral aufgelöste Thermografie	61
4.1	Verschmutzungserkennung	61
4.1.1	Referenzierte Verschmutzungserkennung	62
4.1.2	Spektral detektierende IR-Kamera	64
4.1.3	Simulation der Filterverkipfung	66
4.1.4	Spektral aktive und nicht aktive Materialien unterscheiden	69
4.1.5	Spektral detektierende Blitzthermografie	71
4.1.6	Spektrale Verschmutzungserkennung an einer keramisch beschichteten Turbinenschaufel	79
4.1.7	Vergleich der Ergebnisse mit und ohne Bearbeitung	80
4.1.8	Schwellwertdarstellung der Verschmutzungserkennung an keramisch beschichteten Turbinenschaufeln	85
4.1.9	Filterung einer Ultraschall-Thermografie mit einer Blitzthermografie	86
4.1.10	Zusammenfassung der Verschmutzungserkennung	94
4.2	Materialerkennung	96
4.2.1	Voruntersuchungen mit einem FTIR-Spektrometer	96
4.2.2	Kalibrierung der „Farb“-IR-Kamera	100
4.2.3	Ausnutzung der wellenlängenabhängigen Emissivität bei der passiven Thermografie	104
4.2.4	Vergleich der Messungen zwischen FTIR-Spektrometer und „Farb“-IR-Kamera	109
4.2.5	Theoretische Überlegungen zum Einfluss der Umgebung	111
5	Zusammenfassung der multispektralen Thermografie	115
5.1	Bispektrale Kamertechnik – Zusammenführung des infraroten und des sichtbaren Spektralbereichs	115
5.2	Spektral aufgelöste Thermografie	118
	Literaturverzeichnis	123
	Publikationen	135

1 Zielsetzung und Stand der spektralen Infrarottechnik

Zielsetzung dieser Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, bereits existierende aktive und passive Mittelwellen Infrarot-Prüfsysteme sowohl konstruktiv als auch verfahrenstechnisch so zu erweitern, dass unter Ausnutzung der spektralen Information bei der Inspektion von Bauteilen eine neue Stufe in der Prüfqualität erreicht wird [1]. Dazu werden zwei Möglichkeiten untersucht. Im ersten Fall, der Hybrid-Kamera, wird das Sichtbare mit dem Infraroten durch einen dichroitischen Strahlteiler parallaxenfrei kombiniert [2–5]. Im zweiten Fall wird der Spektralbereich einer MWIR-Kamera mit Hilfe von vier IR-Bandpassfiltern aufgeteilt, um mit neuen Verfahren zur Auswertung die wellenlängenabhängige Emissionscharakteristik von Materialien im Infraroten auszunutzen [2, 4–6]. Dadurch lässt sich eine Verschmutzungs- und eine Materialerkennung realisieren.

Bei der Hybrid-Kamera wird die zusätzliche sichtbare Information verwendet, um speziell bei Objekten mit komplexer Geometrie oder kleinen Abmessungen ein passgenaues Farbbild aus dem gleichen Blickwinkel wie bei der IR-Kamera zu erhalten. Dadurch wird ermöglicht, den sichtbaren und den infraroten Spektralbereich zu einem neuen aussagekräftigen Hybrid-Bild zusammenzuführen. Im Vordergrund steht hierbei eine verbesserte Prüfteilqualifizierung. Dabei soll durch das zusätzliche Farbbild die Lokalisierung und die Identifizierung von Fehlindikationen erleichtert werden. Dazu zählt auch die Gewinnung der 3D-Oberflächeninformation einschließlich überlagertem Hybrid-Bild mit Defektindikationen, um das Prüfteil noch besser zu visualisieren oder um die jeweilige Defektgröße auf der Oberfläche zu messen. Darüber hinaus soll auch kalibrierfrei die Markierung der Prüfscene zur Lokalisierung von Defekten anhand des IR-Bildes ermöglicht werden. Zusätzlich werden auch Anwendungen in der Raum- und Prozessüberwachung untersucht.

Für die Erkennung von Kontaminationen wird das mit Hilfe von vier IR-Bandpassfiltern detektierte IR-Signal in Bezug auf die enthaltene spektrale Information analysiert. Dadurch soll zwischen dem IR-Signal von Kontaminationen und von Defekten wie es Risse oder Delaminationen sind, unterschieden werden. Das Ergebnis wird genutzt, um in einer Ultraschall-Thermografie Fehlindikationen, verursacht durch oberflächliche Verschmutzungen, zu maskieren oder zu filtern. Infolgedessen kann der Prüflingenieur entscheiden, ob es sich bei den Indikationen tatsächlich um Defekte handelt oder um oberflächliche Verschmutzungen, welche unter Umständen weitere Defekte überdecken.

In der Materialerkennung werden die in den IR-Spektralbereichen detektierten Signale in Bezug auf deren absolute und relative Intensität ausgewertet, um sie so einem hinterlegten Material in einer Datenbank zuzuordnen. Nach der Identifizierung des untersuchten Materials lässt sich dann, z. B. für eine folgende Schichtdickenmessung, auf weitere Materialparameter wie der Wärmeleitfähigkeit oder der thermischen Diffusivität zurückgreifen, wodurch eine zeitaufwändige Eichung der Messapparatur entfällt.

Einleitend wird ein kurzer Überblick über bereits existierende Messsysteme gegeben, welche abbildend oder punktuell die jeweilige Messaufgabe erledigen und dabei in Abhängigkeit der angewandten Technik die wellenlängenabhängigen Materialeigenschaften nutzen.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Erweiterung der Thermografie unter Ausnutzung der spektralen Banden im Sichtbaren und Infraroten für die zerstörungsfreie Prüfteilqualifizierung.

Stand der spektralen Infrarottechnik

Bisherige Entwicklungen in der bispektralen Kamertechnik, welche, wie die Hybrid-Kamera, zwei unterschiedliche Spektralbereiche fusionieren, befinden sich bislang oftmals im Bereich der militärischen Anwendungen, z. B. für die Luftraum- oder Geländeüberwachung sowohl für den Einsatz in Flugkörpern [7, 8] als auch am Boden [9, 10]. Im zivilen Umfeld werden ähnliche Detektionssysteme für die Rollfeldüberwachung an Flughäfen eingesetzt [11]. Anwendungen mit geringerem Arbeitsabstand finden sich in der Bauthermografie [11, 12]. Des Weiteren werden für die Raumüberwachung bispektrale Kamerasysteme entwickelt [13]. Dabei sollen diese Systeme gerade bei wechselnder Umgebungsbeleuchtung die Möglichkeit bieten, permanent Veränderungen im Beobachtungsraum zu detektieren [14] oder, wie im Fall der Bauthermografie, lediglich einen schnellen Schnappschuss des Prüfobjekts erlauben. In einigen Fällen wurden eine Mikrobolometer-Kamera für das langwellige Infrarote (LWIR, 8–12 μm) oder eine Nah-IR-Kamera (NIR, 0,7–1,0 μm) mit einer lichtstarken oder hochauflösenden Farbkamera (RGB-Kamera) über einen dichroitischen Strahlteiler kombiniert, welcher einfaches Fensterglas war [13, 15]. Bei Kamerakombinationen aus einer mittelwelligen IR-(MWIR, 3–5 μm) und einer Farbkamera wurden beide Kameras wegen der Reflexions- und Absorptionsverluste am Strahlteiler und der Einfachheit halber nebeneinander aufgestellt. Den genannten Anwendungen ist gemeinsam, dass deren Arbeitsabstand im einstelligen Meterbereich anfängt und bis ins Unendliche gehen kann. Im Vordergrund steht dabei der Aspekt der Überwachung, so dass die Kombination beider Kamerainformationen zu einem besseren Gesamteindruck des Beobachtungsfeldes führt, wodurch die Passgenauigkeit beider Kamerabilder zueinander lediglich regional, also anhand von Merkmalen in der Szene bestimmt wird und deshalb keine pixelgenaue Übereinstimmung vorliegt. Das heißt, dass man einen leicht unterschiedlichen Blickwinkel oder eine schlechte Ausrichtung in Kauf nehmen kann, da beide Bilder, wenn überhaupt, erst am Computer anhand von Merkmalen wie z. B. Fensterrahmen, Türrahmen, Straßenbegrenzungen oder Gebäudeumrissen zueinander ausgerichtet werden [16]. Bei

einer anderen Vorgehensweise wird der Fokuspunkt der IR-Kamera ausgenutzt, um das Bild der Farbkamera zu überlagern. Dies setzt voraus, dass die optischen Achsen beider Kameras parallel zueinander sind und der Abstand zwischen beiden Kameras bekannt ist. In Abhängigkeit der Auflösung der eingesetzten Kameras und der zur Verfügung stehenden Rechenleistung reicht das für einen Einzelbildmodus, aber nicht mehr für eine flüssige Echtzeitdarstellung auf dem Bildschirm [17–19].

Im Hinblick auf die Reinheitskontrolle von Oberflächen wird in dieser Arbeit der Empfindlichkeitsbereich einer MWIR-Kamera mit Hilfe von vier IR-Bandpassfiltern aufgeteilt, um so die spektralen Unterschiede zwischen Kontamination und unverschmutztem Prüfteil auszunutzen. Durch eine Messung soll man eine Filtermaske erhalten, welche die Information über den Ort der Verschmutzungen besitzt. Mit dieser Maske lassen sich im Ergebnisbild, z. B. aus einer Ultraschall-Thermografie, Fehlinformationen, verursacht durch oberflächliche Verschmutzungen filtern oder maskieren, wodurch die Bewertung eines Bauteils vereinfacht wird.

Durch die spektral detektierende Thermografie mit Hilfe von IR-Bandpassfiltern soll die Funktionalität bestehender IR-Prüfsysteme zur Serienprüfung von Testteilen erweitert werden, ohne dass man zusätzliche wartungs- und kostenintensive Hardware in den Prüfprozess integrieren muss.

Bisherige Entwicklungen im Bereich der Reinheitskontrolle von Oberflächen erfordern teilweise einen hohen apparativen Aufwand, um eine höchstmögliche Nachweisbarkeit zu erzielen. Dabei sind viele Techniken weder berührungslos noch bildgebend oder erfordern eine Probenpräparation, da die Prüfung nicht am Bauteil stattfinden kann, was dem Routineeinsatz in der Fertigung widerspricht.

Im Folgenden werden einige etablierte Techniken vorgestellt, die sich bereits im Einsatz befinden.

Um großflächig Oberflächen zu testen, wird häufig der Berliner-Blau-Test [20] angewendet, bei dem ein Bauteil aus Stahl in eine Indikatorlösung gelegt wird. Ist das Bauteil nicht mit einer Passivschicht überzogen, färbt sich die Oberfläche beim Kontakt mit der Lösung blau. Eine weitere indirekte Methode ist der Wasserbruchttest, bei dem eine Metall- oder Kunststoffoberfläche als fettfrei gilt, wenn sie bei Entnahme aus dem Wasserbad einen einheitlichen und gleichmäßig ablaufenden Wasserfilm zeigt, der mindestens 20 s bestehen muss [21]. Beim Klebestreifentest wird ein transparentes Klebeband auf das Bauteil geklebt. Nach dem Abziehen haften Staub, Abrieb oder Späne auf dem Klebestreifen, der zur besseren Sichtung auf ein weißes Blatt Papier geklebt wird. Ausgewertet werden Anzahl und Größe der Schmutzpartikel unter einem Mikroskop oder einem Fotometer [22]. Bei der Röntgenfluoreszenzanalyse lassen sich gute Nachweisbarkeiten bei Elementen erzielen, die schwerer als Natrium sind [23]. Allerdings können mit diesem Verfahren nur glatte Flächen analysiert werden. Für die Kontrolle von Bauteilen vor Ort in der Produktion ist diese jedoch nicht geeignet, da es eine Probenpräparation erfordert. Das Gleiche gilt für die Elektronenmikroskopie [24] und die atomare Rasterkraftmikroskopie, mit denen Kontaminationsschichten im nm-Bereich nachweisbar sind. Beide Techniken erfordern einen hohen apparativen Aufwand, der sich in den Kosten für das Verfahren niederschlägt.

Messsysteme zur Reinheitskontrolle aus der Infrarottechnik, welche der Reflexions-/Absorptionsspektroskopie entstammen, sind derzeit bei der Inspektion von Halbleiterwafern in Verwendung. Dabei werden oftmals Fourier-Transformation-(FT)-IR-Spektrometer eingesetzt, die zwar einen großen Wellenlängenbereich messen können, allerdings nur relativ kleine Messfleckgrößen von bis zu 10 mm ermöglichen [25, 26]. Bei keramischen Werkstoffen werden ähnliche Ansätze gewählt wie in [27] besprochen, die ebenfalls auf ein FTIR-Spektrometer zurückgreifen.

Mit dem gleichen Ansatz, wie bei der Verschmutzungserkennung, bei dem eine MWIR-Kamera mit IR-Bandpassfiltern ausgerüstet wird, soll berührungslos eine Materialerkennung durchgeführt werden, die dann leicht mit einer aktiven Thermografie gekoppelt werden kann. So könnte deren Auswertung von der Kenntnis des Materials profitieren, indem die Wärmeleitungseigenschaften in die Auswertung miteinbezogen werden. Auf diese Weise ließe sich z. B. eine großflächige Schichtdickenmessung von unterschiedlichen Beschichtungen im gleichen Kamerabild realisieren.

Derzeitig erhältliche Messapparaturen zur Materialerkennung sind FT- [28], NIR- [29], Raman- [30] und Terahertz-Spektrometer [31] und auch Systeme, die auf der laserinduzierten Fluoreszenz basieren [32], die mit Hilfe einer entsprechenden Software, in die eine Materialdatenbank eingebunden ist, die gemessenen Spektren einem Material zuordnen können. Auch wurden handgehaltene Spektrometer basierend auf der abgeschwächten Totalreflexion (ATR) entwickelt, mit denen punktuell Messungen vorgenommen werden können [33]. Allerdings setzen diese Geräte den Kontakt zum Testobjekt und deshalb eine ebene Stelle voraus, um den Messkopf auf der Prüfoberfläche anzusetzen. Eine andere Messtechnik nutzt induktive Sensoren, die zur berührungslosen Sortierung von Metallrohren oder von Getränkedosen aus Weißblech und Aluminium eingesetzt wird [34].

Allen erhältlichen Methoden ist gemeinsam, dass sie im jeweiligen Spektralbereich teilweise hoch sensibel sind, jedoch ist keine der Methoden bildgebend.

Des Weiteren wurden die IR-Kameras von Seiten der Hersteller durch technische Innovationen sukzessive verbessert, damit sie IR-„farbig“ sehen können. Dabei kamen die Impulse oftmals aus dem Militärischen, mit dem Ziel, den Luftraum auf gefährliche Flugobjekte zu überwachen oder zur IR-spektralen Untersuchung der Erdoberfläche aus großer Höhe zur Auffindung von getarnten Anlagen oder Fahrzeugen.

Um bildgebend die infrarote Signalsignatur messen zu können, wurden als erstes IR-Kameras mit Filterschiebern oder einem Filtrrad ausgestattet [35, 36]. Dabei ist von Vorteil, dass der Empfindlichkeitsbereich eines MWIR-Detektors ins Kurzwellige erweitert wurde, so dass heutige breitbandige MWIR-Kameras in einem Wellenlängenbereich von 1,5–5,0 μm arbeiten. Das Ziel bestand oftmals darin, berührungslos abbildend Temperaturen zu messen [37–39]. Die Multikanal-Pyrometrie sollte eine berührungslose Temperaturmessung über die Erzeugung eines Emissivitätsbildes der Prüfzene ermöglichen.

Weitere Arbeiten im MWIR-Spektralbereich versuchten durch den Einsatz von IR-Filtern Störsignale zu minimieren oder das Signal von Defekten unter Verschmutzungen erkennbar zu machen.

Die nächste Generation von IR-Kameras bildeten Dualband-IR- [35, 40–42] und Zweiwellenlängen-/Dualwavelength-IR-Kameras [7, 42, 43]. Beide Kameratypen verfügen über einen eingebauten Detektor, der gleichzeitig in zwei Spektralbereichen Bilder aufnimmt, wodurch man nicht mehr auf den Einsatz von Spektralfiltern angewiesen ist. Dabei ist die Dualband-IR-Kamera im MWIR- und LWIR-Spektralbereich empfindlich, wohingegen die Zweiwellenlängen-IR-Kameras in zwei spektralen Banden im MWIR sensitiv sind. Bei letzterer Kamera lassen sich die spektralen Banden auf Anfrage konfektionieren, wodurch sie auf den jeweiligen Verwendungszweck angepasst werden können. Eingesetzt wird sie bisher meistens im Militärischen, z. B. für eine Raketenwarnung, da beide Spektralbereiche gleichzeitig aufgenommen werden und so auf ein drehbares Filterrad verzichtet werden kann [7]. Durch die geringen Stückzahlen sind diese Kameras jedoch noch sehr teuer und gerade für die Verwendung einer Zweiwellenlängen-Kamera braucht man eine konkrete Anwendung, um die geeigneten Spektralbereiche auszuwählen.

Eine andere Entwicklung ermöglicht zeilenweise ein Spektrum je Detektorspalte aufzunehmen. Solche hyperspektralen Kameras arbeiten mit einem vorangesetzten Gitterspektrometer, welches das Spektrum auf eine Detektorspalte aufspaltet [44, 45]. Dabei gibt es modellabhängig Kameras für den kurzwellig IR-(short wave IR = SWIR, 1–3 μm), MWIR- und LWIR-Spektralbereich [46]. Das komplette Bild wird dann aus einzelnen Zeilen zusammengesetzt, in dem die Szene mittels eines Spiegels abgescannt wird oder das Prüfobjekt an der Kamera vorbeigefahren wird. Eingesetzte Systeme haben ihre Anwendungen allerdings im kurzwelligen Infraroten vorrangig bei der Analyse der Konzentration von pharmazeutischen Produkten [47] und im Langwelligen bei der Untersuchung von geologischen Proben oder der Überwachung von Flug- bzw. Schiffshäfen zur Aufspürung von chemischen Gasen oder Tarnmaterialien. Die letzte Entwicklung in diese Richtung ging dahin, dass IR-Kameras mit FTIR-Spektrometern kombiniert wurden [48–50], wodurch ermöglicht wird, mit einer Frequenz bis zu 5 Hz ein komplettes Spektrum pro Pixel aufzunehmen [51]. Solche IR-Kameras können unter anderem genutzt werden, um Abgase von Schornsteinen zu untersuchen oder um aus der Luft die Artenvielfalt von bewachsenen Landschaften zu ermitteln [52]. Der Wellenlängenbereich, den solche Geräte abdecken, geht von 1,5–20 μm .

2 Grundlagen

Die Einführung des physikalischen Verständnisses stützt sich auf die folgenden im Literaturverzeichnis aufgeführten Quellen [53–57].

2.1 Strahlungsdichte, Abstrahlung und Bestrahlung

Bei der Betrachtung eines thermodynamischen Systems muss, damit keine Energie erzeugt oder vernichtet wird, die Summe der emittierten, absorbierten, reflektierten und transmittierten Beiträge null sein. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, werden alle Beiträge, die ein Flächenelement abstrahlt mit einem „ ‘ “ markiert, wohingegen die auf einem Flächenelement auftreffende Strahlung nicht markiert wird.

Die spektrale Strahlungsdichte $L'(\lambda, \theta', \phi')$ ist die Rate, mit der Strahlungsenergie oder ein Strahlungsfluss Φ' (auch Strahlungsleistung genannt) von einem Flächenelement dA bei einer gegebenen Wellenlänge λ emittiert wird und durch das Flächenelement dA'_n abgestrahlt wird (s. Abb. 2.1). Der Index „n“ kennzeichnet das senkrecht zum Strahlungsfluss orientierte differenzielle Flächenelement.

$$L'(\lambda, \theta', \phi') = \frac{d^3\Phi'}{dA \cos \theta' d\omega' d\lambda} \quad \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \mu\text{m sr}} \right) \quad (2.1)$$

Die spektrale Strahlungsdichte (2.1) drückt das Verhältnis des emittierten Strahlungsflusses Φ' zum Flächenelement aus, das durch den Raumwinkel

$$d\omega' = \frac{dA'_n}{r^2} = \frac{r \sin \theta' d\theta' r d\phi'}{r^2} = \sin \theta' d\theta' d\phi' \quad (2.2)$$

aufgespannt wird und die Flussrichtung (θ', ϕ') pro Wellenlängenintervall $d\lambda$ umschließt. Dabei ist dA'_n die senkrechte Projektion des emittierenden Flächenelements mit $dA'_n = dA \cos \theta'$.

Im Allgemeinen wird die Strahlung einen ganzen Halbraum oberhalb des emittierenden Flächenelements dA erfüllen. Für einen isotropen diffusen Emitter, wie es ein Lambert-Strahler ist, dessen Strahlungsemission richtungsunabhängig ist, gilt $L'(\lambda, \theta', \phi') = L'(\lambda)$. Mit dieser Annahme lässt sich die spektrale spezifische Leistung pro Flächeneinheit berechnen. Nach dem Lambertschen Gesetz fällt die Strahlungsdichte mit $\cos \theta'$ ab. Der Winkel θ' misst die Abweichung von der Richtung der Normalen auf der Fläche dA . Durch Integration über die Halbkugel erhält man die gesamte wellenlängenabhängige Abstrahlung in den Halbraum:

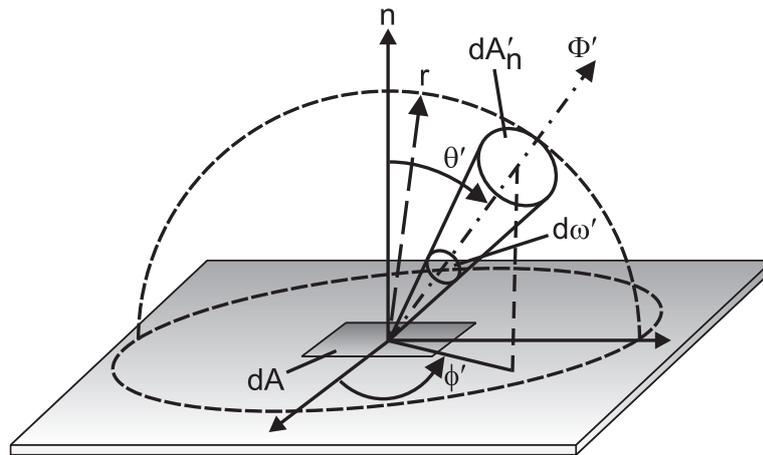


Abb. 2.1: Emittierter Strahlungsfluss Φ' durch das Flächenelement dA'_n in die Raumrichtung (θ', ϕ') .

$$M'(\lambda) = L'(\lambda) \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} \cos \theta' \sin \theta' d\theta = \pi L'(\lambda) \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \mu\text{m}} \right) \quad (2.3)$$

Für die Bestrahlung gelten die gleichen Überlegungen wie für die Abstrahlung. Auch die einfallende Strahlung durch Reflexion oder Emission eines anderen Körpers enthält sowohl eine Wellenlängen- als auch eine Richtungsabhängigkeit. So ergibt sich in äquivalenter Form für die Bestrahlungsdichte:

$$L(\lambda, \theta, \phi) = \frac{d^3\Phi}{dA \cos \theta d\omega d\lambda} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \mu\text{m sr}} \right) \quad (2.4)$$

Unter Annahme eines Lambert-Strahlers lässt sich dann die gesamte wellenlängenabhängige Bestrahlung berechnen:

$$M(\lambda) = \pi L(\lambda) \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \mu\text{m}} \right) \quad (2.5)$$

2.2 Plancksches Strahlungsgesetz

Die Emissivität ε beschreibt, wie ein Körper, der mit seiner Umgebung im thermischen Gleichgewicht steht, elektromagnetische Strahlung emittiert. Sie ist eine Oberflächeneigenschaft, die durch das Verhältnis aus der tatsächlich abgestrahlten zu der durch einen schwarzen Strahler emittierten Strahlung gebildet wird. Dabei gilt für beide Beiträge derselbe Wellenlängenbereich und die gleiche Temperatur.

Der schwarze Strahler mit $\varepsilon = 1$, ist ein idealisierter Körper, welcher jegliche auf ihn treffende Strahlung vollständig absorbiert und wieder reemittiert. Er sendet bei jeder Temperatur die maximal erreichbare Strahlung aus. Beschrieben

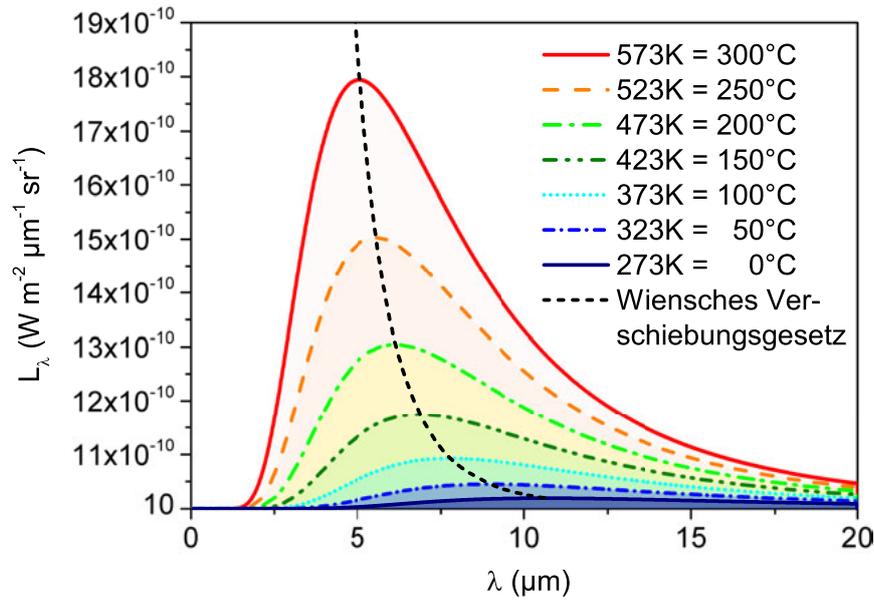


Abb. 2.2: Nach Planck berechnete Strahlungsdichten für einen schwarzen Strahler bei unterschiedlichen Temperaturen. Gestrichelt ist das Wiensche Verschiebungsgesetz nach (2.8) eingezeichnet.

wird er durch das Plancksche Strahlungsgesetz (2.6) mit den beiden Konstanten c_1 und c_2 (s. Abb. 2.2) [55].

$$L_\lambda(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T) - 1]} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \mu\text{m sr}} \right) \quad (2.6)$$

$$\text{mit } c_1 = 2hc_0^2 = 1,191044 \times 10^{-16} \quad (\text{W m}^2)$$

$$\text{und } c_2 = \frac{hc_0}{k_B} = 1,438769 \times 10^4 \quad (\mu\text{m K})$$

Darunter versteht man die spektrale Strahlungsdichte in Abhängigkeit der Wellenlänge bei gegebener Temperatur, die pro Flächen- und Raumwinkeleinheit von einem schwarzen Strahler bestrahlt wird. Dabei ist h die Planck-Konstante, c_0 die Lichtgeschwindigkeit und k_B die Boltzmann-Konstante.

Da das Spektrum des schwarzen Strahlers von keinem anderen Parameter, wie Material- oder Oberflächeneigenschaften, als der Temperatur abhängt, ist es gleichzeitig ein häufig genutztes Ideal für Rechnungen. Am nächsten kommen dem schwarzen Strahler Kalibrierkörper, die auf dem Prinzip eines Hohlraumstrahlers basieren oder speziell beschichtete großflächige Oberflächenstrahler. Des Weiteren kommen mit Graphit, Fotolack oder Ruß beschichtete Oberflächen dem schwarzen Strahler sehr nahe und werden deshalb oft von Thermografen zur Steigerung der Absorption und Emission von Strahlung im Bauteil eingesetzt.

Bei dem 2. Term in (2.6) können zwei Fälle unterschieden werden. Für den 1. Fall, dass $\lambda T \ll c_2$ ergibt sich das Wiensche Strahlungsgesetz:

$$L'_\lambda(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot \frac{c_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right) \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \mu\text{m sr}}\right) \quad (2.7)$$

Wenn man die erste Ableitung nach λ gleich null setzt, findet man für einen schwarzen Strahler mit $\varepsilon(\lambda, T) = 1$ die Wellenlänge λ_{\max} , bei der die Funktion das Maximum annimmt, also die größte Strahlungsleistung in Abhängigkeit der Temperatur abgegeben wird. Das Ergebnis (2.8) ist bekannt als das Wiensche Verschiebungsgesetz, wie es in Abb. 2.2 eingezeichnet ist:

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,7}{T} \quad (\mu\text{m K}) \quad (2.8)$$

Für $\lambda T \gg c_2$ entwickelt man den Exponenten mit:

$$\exp(a) - 1 \approx (1 + a + \dots) - 1 \approx a \quad \text{für kleines } a,$$

wodurch sich das Rayleigh-Jeans-Gesetz ergibt:

$$L'_\lambda(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot \frac{c_1}{\lambda^5 (c_2/\lambda T)} = \varepsilon(\lambda, T) \cdot 2c_0 k_B \frac{T}{\lambda^4} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \mu\text{m sr}}\right) \quad (2.9)$$

2.3 Stefan-Boltzmann-Gesetz

Zum Stefan-Boltzmann-Gesetz (2.10) kommt man durch Integration des Planck-Gesetzes über den gesamten Wellenlängenbereich $0 \leq \lambda \leq \infty$. Dabei wird σ_B als die Stefan-Boltzmann-Konstante bezeichnet:

$$M'(T) = \varepsilon(T) \sigma_B T^4 \quad (2.10)$$

$$\sigma_B = \frac{\pi^5 c_1}{15 c_2^4} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}\right) \quad (2.11)$$

Es beschreibt die totale abgestrahlte Leistung als den Strahlungsfluss pro Emissionsfläche über den gesamten Wellenlängenbereich und alle Strahlungswinkel unter der Annahme einer Lambertschen Oberfläche. Dabei darf, damit das Gesetz gilt, die Emissivität des Körpers keine Wellenlängenabhängigkeit aufweisen, da sonst das Integral unter Zugrundelegung der wellenlängenabhängigen Emissivität individuell ausgewertet werden muss.

2.4 Emittierte Strahlung in einem Spektralband

Die in einem Spektralbereich durch einen Körper in den Halbraum emittierte Strahlungsleistung lässt sich berechnen durch Integration des Planck-Gesetzes über den

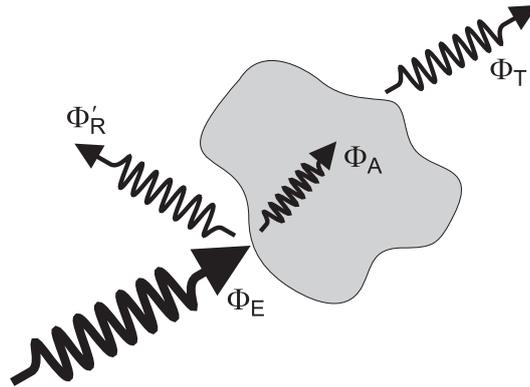


Abb. 2.3: Der einfallende Energiefluss Φ_E ist gleich der Summe aus dem reflektierten Φ'_R , absorbierten Φ_A und transmittierten Φ_T Energiefluss.

entsprechenden Wellenlängenbereich. Dabei wird angenommen, dass es sich um einen Lambert-Strahler handelt. So ergibt die Integration von L' über den Halbraum π (s. Kap. 2.1).

$$P'(\lambda_1, \lambda_2) = \pi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L'_\lambda(\lambda) d\lambda \quad \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) \quad (2.12)$$

2.5 Einführung der Energieflussbilanz

Die bisherigen Betrachtungen bezogen sich ausnahmslos auf den schwarzen Strahler mit $\varepsilon = 1$, der gemäß dem Planckschen Strahlungsgesetz elektromagnetische Strahlung absorbiert. Dieses Konzept wird in dem folgenden Abschnitt erweitert, um der realen Strahlungsemission von Körpern näher zu kommen.

Bislang nahmen wir an, dass ein Körper Strahlung lediglich emittiert. In der Realität wird die einfallende Strahlung allerdings auch teilweise reflektiert oder transmittiert. Dabei hängen Absorption, Reflexion und Transmission von der Wellenlänge der Strahlung, von den wellenlängenabhängigen Materialeigenschaften, vom Einfallswinkel und der Temperatur der einfallenden Strahlung ab. So ist demzufolge auch die Oberflächenbeschaffenheit, also die Rauigkeit oder Regelmäßigkeit, ein Faktor, der in die Energieflussbilanz eingeht.

Der reflektierte Anteil geht für das Messsignal verloren, wohingegen der absorbierte Anteil die innere Energie des Bauteils erhöht, was eine Temperaturerhöhung zur Folge hat. Da jeder Körper das Bestreben hat, mit seiner Umgebung im thermischen Gleichgewicht zu sein, gibt er diese gewonnene Energie ab bis der Gleichgewichtszustand hergestellt ist.

Daraus lässt sich ableiten, dass der einfallende Energiefluss Φ_E gleich der Summe aus dem reflektierten Φ'_R , absorbierten Φ_A und transmittierten Φ_T Energiefluss (s. Abb. 2.3) ist:

$$\Phi_E = \Phi'_R + \Phi_A + \Phi_T \quad (2.13)$$

Die vorangehende Gleichung (2.13) ist der allgemeine Fall, der hinsichtlich der Energieflussbilanz immer gültig ist. Vereinfachungen unterscheiden sich in folgenden Fällen:

1. Opaker lichtundurchlässiger Körper: $\Phi_T = 0$, da Reflexion und Absorption als Oberflächenphänomene angenommen werden, deren Eindringtiefe weniger als $1 \mu\text{m}$ ist.
2. Idealer perfekter Spiegel: $\Phi_A = 0$ und $\Phi_T = 0$, da jegliche einfallende Strahlung vollständig reflektiert wird.
3. Idealer schwarzer Strahler: $\Phi'_R = 0$ und $\Phi_T = 0$, da alles an Strahlung absorbiert wird.

In der Realität müssen diese Faktoren gewichtet werden und man muss Vereinfachungen treffen, da oftmals nicht alle Beiträge gleich gut bestimmt werden können. Bei genauerer Betrachtung von (2.13) fällt auf, dass sich im dritten Fall, dem schwarzen Strahler, der Körper immer weiter aufheizen würde, da er anscheinend keine Energie abgibt. Diese scheinbare Inkonsistenz wird durch das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz in Kap. 2.7 geklärt, welches einen Zusammenhang zwischen Absorption und Emission für Körper im thermischen Gleichgewicht herstellt.

2.6 Emission, Absorption, Reflexion und Transmission

Emission

Die bereits in (2.6) eingeführte Größe Emissivität ist ein Korrekturfaktor, welcher die Strahlungsemission eines schwarzen Strahlers dem realen anpasst. Sie ist eine einheitslose Größe und reicht von 0 bis 1. Beschrieben wird sie durch den Quotienten aus der tatsächlich in den Raum abgestrahlten zu der von der Oberfläche eines schwarzen Strahlers emittierten Strahlung.

Da die Emissivität eines realen Strahlers generell keine Konstante ist und von den Eigenschaften des schwarzen Strahlers mehr oder weniger stark abweicht, wird sie als wellenlängen- und richtungsabhängige Größe $\varepsilon(\lambda, T, \theta', \phi')$ mit dem Polarwinkel θ und dem Azimutwinkel ϕ eingeführt.

$$\varepsilon(\lambda, T, \theta', \phi') = \frac{L'_\lambda(\lambda, T, \theta', \phi')}{L'_{\lambda,s}(\lambda, T)} \quad (2.14)$$

Der Index s kennzeichnet dabei die Eigenschaft des schwarzen Strahlers, für den $\varepsilon(\lambda, T, \theta', \phi') = 1$ gilt. In der Praxis wird von einigen Spezialfällen für $\varepsilon(\lambda, T, \theta', \phi')$ ausgegangen:

1. Graue Strahler: Die Emissivität ist wellenlängenunabhängig $\Rightarrow \varepsilon(T, \theta', \phi')$ (s. Abb. 2.4 links)

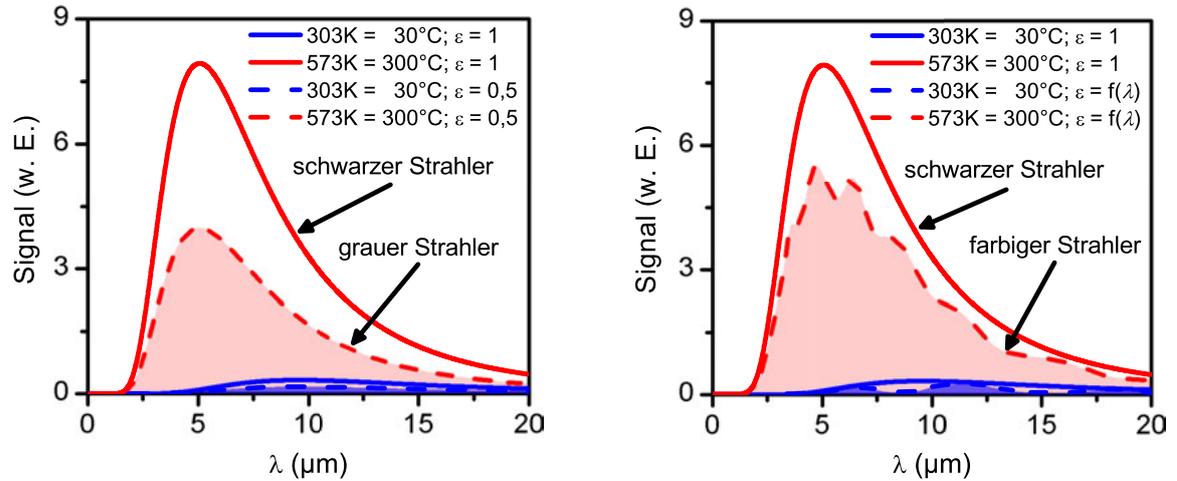


Abb. 2.4: Links: Grauer Strahler im Vergleich zum schwarzen Strahler. Rechts: Farbiger Strahler im Vergleich zum schwarzen Strahler.

2. Farbige Strahler: Volle Abhängigkeit von allen Parametern $\varepsilon(\lambda, T, \theta', \phi')$ (s. Abb. 2.4 rechts)
3. Für optisch homogene Materialien mit unstrukturierter Oberfläche ist die Emissivität isotrop im Azimutwinkel, was auch für den Fall gilt, dass der Polarwinkel klein ist und die Emissivität weder von der Wellenlänge noch vom Temperaturbereich abhängt. Somit wird $\varepsilon(\lambda, T, \theta') \approx \text{const.}$ angenommen.
4. Spektral hemisphärische Emissivität $\varepsilon(\lambda, 2\pi)$, welche sich auf den Mittelwert des Integrals über alle Raumrichtungen bezieht.

$$\varepsilon(\lambda, 2\pi) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} d\theta' \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\phi' \varepsilon(\lambda, \theta', \phi') \quad (2.15)$$

5. Totale hemisphärische Emissivität $\varepsilon(\lambda_t, 2\pi)$ als der Mittelwert der Emissivität über alle Wellenlängen und alle Raumrichtungen:

$$\varepsilon(\lambda_t, 2\pi) = \frac{M'(T)}{M'_s(T)} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon(\lambda, 2\pi) M'_s(\lambda, T) d\lambda}{M'_s(T)} \quad (2.16)$$

Für den Thermografen ist die Kenntnis der Emissivität von essentieller Bedeutung, da die detektierte emittierte Strahlung mit der Emissivität des Prüfteils über $L'(\lambda, T) = \varepsilon L_s(\lambda, T)$ miteinander verbunden sind. So bedingt die Temperaturmessung das Wissen über die Emissivität und umgekehrt [58–61].

In dieser Arbeit wird hauptsächlich auf den grauen und farbigen Strahler eingegangen. Dabei ist die materialabhängige Wellenlängenabhängigkeit der Emissivität von

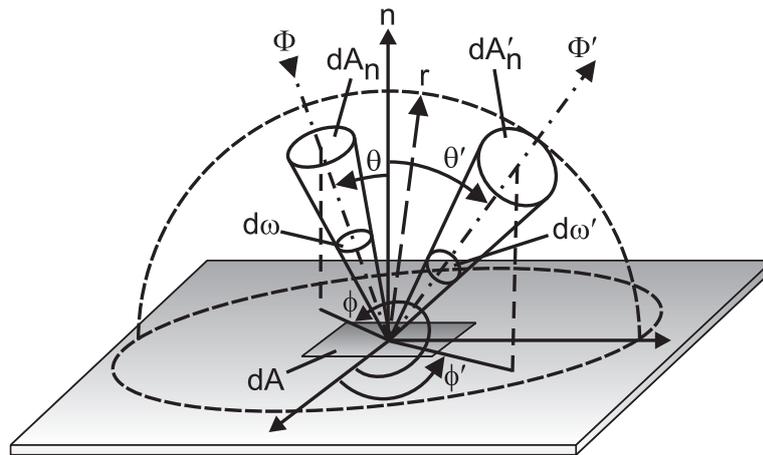


Abb. 2.5: Spektrale bidirektionale Reflexion mit einfallendem Φ und reflektiertem Φ' Strahlungsfluss.

zentraler Bedeutung. Die Temperatur- und Winkelabhängigkeit ist in den Experimenten nicht ausschlaggebend, weil einerseits die Probenoberflächen in den verglichenen Versuchsreihen konstant gehalten wurden und andererseits die IR-Kamera senkrecht auf die Probenoberflächen schaut. Außerdem wird in der Verschmutzungserkennung nur der qualitative Unterschied zwischen grauem und farbigem Strahler ausgenutzt und nicht der Absolute.

Absorption

Analog zur Emission lässt sich die Absorption beziehungsweise später die Reflexion und die Transmission definieren als:

$$\alpha(\lambda, T, \theta, \phi) = \frac{d\Phi_A}{d\Phi_E} \quad (2.17)$$

Dabei müssen wie bei der Emissivität die entsprechenden Abhängigkeiten für die spektral hemisphärische und die totale hemisphärische Absorption beachtet werden.

Reflexion

Die Reflexion wird ebenfalls als das Verhältnis von reflektiertem zu einfallendem Strahlungsfluss eingeführt. Allerdings müssen dabei, wie in Abb. 2.5, sowohl die einfallende (θ, ϕ) als auch die in den Halbraum reflektierte Strahlung mit den Winkeln θ' und ϕ' beachtet werden. Somit ergibt sich:

$$\rho(\lambda, \theta, \phi, \theta', \phi') = \frac{d\Phi'_{\lambda,R}}{d\Phi_{\lambda,E}} \quad (2.18)$$

Durch die Winkelabhängigkeit von einfallender und reflektierter Strahlung werden zur besseren Handhabung der Reflektivität zwei Vereinfachungen häufig angewendet,

die für den Fall gelten, dass $\rho = 1$ ist, also jegliche einfallende Strahlung vollständig reflektiert wird:

1. Bei polierten Spiegeln bzw. Metallen mit niedriger Emissivität wird die gerichtete Reflexion verwendet.
2. Bei gleichmäßig rauen Oberflächen wird die isotrope diffuse Reflexion eines Lambert-Strahlers angenommen.

Transmission

Da die Transmission auf mikroskopischer Ebene genauso den bidirektionalen Charakter wie die Reflexion besitzt und auch wegen Rückreflexionen an Trennschichten müssen Materialeigenschaften und Schichtdicken miteinbezogen werden. Allerdings bei Betrachtung des makroskopischen Gesamtsystems lässt sich die spektrale gerichtete hemisphärische Transmission ähnlich wie die Reflexion als das Verhältnis von transmittiertem zu einfallendem Strahlungsfluss definieren. Dabei wird als transmittierter Energiefluss der Halbraum unterhalb der Austrittsebene betrachtet.

$$\tau(\lambda, \theta, \phi, 2\pi) = \frac{d\Phi'_{\lambda,T}}{d\Phi_{\lambda,E}} \quad (2.19)$$

Wie zuvor kann man auch bei der Transmission den durchschnittlich gerichteten hemisphärischen Wert $\tau(\lambda_t, \theta, \phi, 2\pi)$ betrachten.

2.7 Kirchhoffsches Strahlungsgesetz

Das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz stellt einen Zusammenhang zwischen Emission und Absorption eines realen thermischen Strahlers im thermischen Gleichgewicht her. Für ein teiltransparentes Objekt ergibt sich der Zusammenhang nach:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.20)$$

Die Gleichung (2.20) gilt für verschiedene spektrale und wellenlängenunabhängige sowie für gerichtete und in den Halbraum abstrahlende Fälle. Die allgemeine Form des Kirchhoffschen Strahlungsgesetzes (2.21) besagt, dass im thermischen Gleichgewicht der gerichtete Emissionsgrad gleich dem gerichteten Absorptionsgrad ist, vorausgesetzt Wellenlänge und Richtung stimmen überein.

$$\varepsilon(\lambda, T, \theta', \phi') = \alpha(\lambda, T, \theta, \phi) \quad (2.21)$$

Streng genommen gilt das Gesetz nur für die gerichtete Emission und Absorption. Allerdings behält das Kirchhoffsche Gesetz in folgenden drei Fällen seine Gültigkeit:

1. Diffuser Strahler: spektraler hemisphärischer Absorptionsgrad = spektraler hemisphärischer Emissionsgrad = gerichteter spektraler Emissionsgrad

$$\alpha(\lambda, T, 2\pi) = \varepsilon(\lambda, T, 2\pi) = \varepsilon(\lambda, T, \theta', \phi') \quad (2.22)$$

2. Grauer Strahler: gerichteter totaler Absorptionsgrad = gerichteter totaler Emissionsgrad = gerichteter spektraler Emissionsgrad

$$\alpha(\lambda_t, T, \theta, \phi) = \varepsilon(\lambda_t, T, \theta', \phi') = \varepsilon(\lambda, T, \theta', \phi') \quad (2.23)$$

3. Diffuser und grauer Strahler: totaler hemisphärischer Absorptionsgrad = totaler hemisphärischer Emissionsgrad = gerichteter spektraler Emissionsgrad

$$\alpha(\lambda_t, T, 2\pi) = \varepsilon(\lambda_t, T, 2\pi) = \varepsilon(\lambda, T, \theta', \phi') \quad (2.24)$$

2.8 Teiltransparenz

Bislang wurde nur auf die Materialeigenschaften im Infraroten eingegangen. Die folgenden Betrachtungen gelten für den Fall, dass in das Prüfteil aktiv Wärme mittels Blitz- oder Laserpuls eingebracht wird, wodurch Absorption, Reflexion und Transmission bei der Anregung im sichtbaren Wellenlängenbereich zusätzlich zu den IR-Eigenschaften mitbetrachtet werden müssen. Dabei spielt die Teiltransparenz eine wichtige Rolle, welche das Phänomen bezeichnet, dass die Oberfläche des Prüfteils für die anregende und/oder emittierte elektromagnetische Strahlung wellenlängenabhängig nicht vollkommen opak ist.

Die Eindringtiefe für das sichtbare Wellenlängenspektrum in nicht-metallische Materialien ist oftmals größer, da sie von der Wechselwirkung mit Atomen oder Molekülen abhängt, wohingegen sie bei Metallen von der Wechselwirkung mit freien Leitungselektronen bestimmt ist. Deshalb ist gerade bei Nichtmetallen die Annahme eines oberflächlichen fothermischen Effekts, wie in Kap. 2.9 beschrieben wird, nicht gerechtfertigt.

Sobald davon auszugehen ist, dass man einen halbunendlichen im Infraroten teiltransparenten Körper untersucht, detektiert man ein IR-Signal entsprechend (2.27), welches im Doppelt-logarithmischen eine Steigung zwischen $-1/2$ und 0 hat [62, 63].

Für den Fall einer im Sichtbaren und Infraroten bestehenden Teiltransparenz hat man eine komplizierte Wechselwirkung von verschiedenen Mechanismen in beiden Spektralbereichen [38, 54].

Für eine Berechnung muss man sich über die Materialeigenschaften der Beschichtung und des Basismaterials im Klaren sein. Einige Materialsysteme sollen in Abb. 2.6 die Komplexität der Problemstellung verdeutlichen. Dabei ist μ_{IR} die thermische Diffusionslänge und μ_{RGB} die Eindringtiefe der sichtbaren Strahlung eines Blitzpulses. Der Parameter d kennzeichnet im Weiteren die Beschichtungsdicke:

Fall 1: $\mu_{\text{IR}} \ll d$ und $\mu_{\text{RGB}} \ll \mu_{\text{IR}}$:

Das ist die Charakteristik eines opaken, thermisch dicken Prüfteils, in dem die Oberflächentemperatur nur von den thermischen Eigenschaften und der Reflektivität der Beschichtung abhängt.

Fall 2: $\mu_{\text{IR}} \ll d$ und $\mu_{\text{RGB}} > \mu_{\text{IR}}$:

In diesem Fall ist das Material zwar auch thermisch dick, aber nicht mehr opak, weil das Volumen im sichtbaren Wellenlängenspektrum angeregt wird.

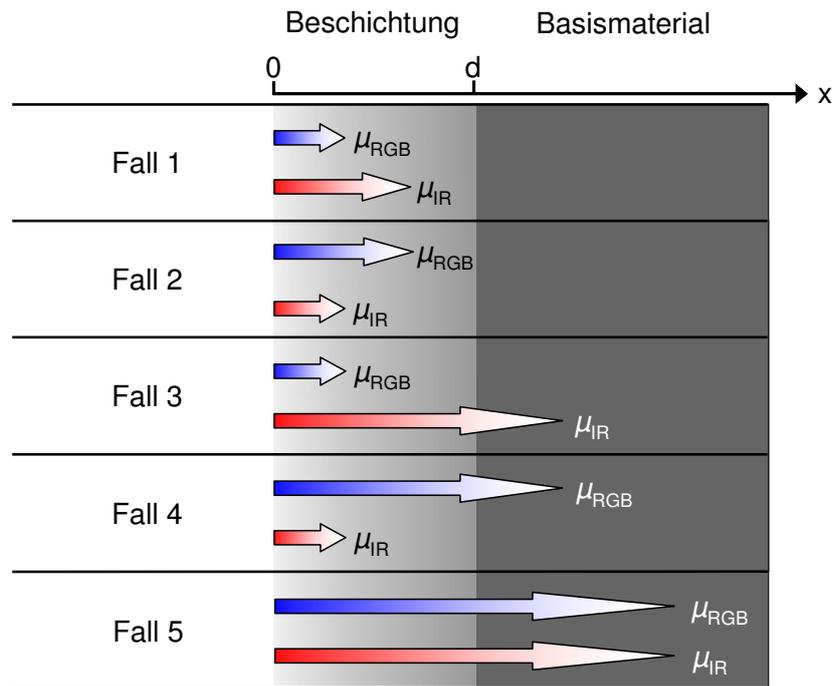


Abb. 2.6: Grafische Darstellung von fünf Situationen für die sichtbare Anregungstiefe und die thermische Ausbreitung in Abhängigkeit der Eindringtiefe im Sichtbaren μ_{RGB} und der thermischen Diffusionslänge μ_{IR} . Betrachtet wird ein beschichteter halbusendlicher Körper.

Fall 3: $\mu_{\text{IR}} \geq d$ und $\mu_{\text{RGB}} \ll d$:

Die Beschichtung ist thermisch dünn, aber im Sichtbaren opak. Das heißt, dass der Wärmefluss von der Dicke und den thermischen Eigenschaften der Beschichtung bestimmt ist, sowie durch die Reflexion an der Grenze zum Basismaterial.

Fall 4: $\mu_{\text{IR}} \ll d$ und $\mu_{\text{RGB}} \geq d$:

Hierbei muss die Reflexion für das sichtbare Wellenlängenspektrum an der Rückseite der Beschichtung betrachtet werden, da sie optisch dünn ist. Für die Wärmewelle ist die Beschichtung thermisch dick.

Fall 5: $\mu_{\text{IR}} > d$ und $\mu_{\text{RGB}} > d$:

In diesem Fall ist die Beschichtung sowohl optisch als auch thermisch dünn. Außerdem reichen μ_{IR} wie auch μ_{RGB} bis in das Basismaterial hinein, so dass für beide Wellenlängenbereiche die Beschichtungsdicke, die Materialeigenschaften der Beschichtung, die Reflexion beim Übergang zum Basismaterial und die Materialeigenschaften des Basismaterials mitberücksichtigt werden müssen.

Darüber hinaus können für hinreichend dünne Beschichtungen Interferenzphänomene [64] sowohl durch den Übergang von Luft zu Beschichtung wie auch von Beschichtung zu Basismaterial mit einbezogen werden als auch die Streuung von Licht in der

Beschichtung [65]. Oftmals wird ein exponentieller Abfall der einfallenden Strahlung angenommen, was bei pulverigen oder polykristallinen Materialien nicht zutreffend sein muss. In den angegebenen Quellen [38, 54, 66, 67] werden für einige der oben genannten Problemstellungen unter bestimmten Voraussetzungen der Materialsysteme Lösungen präsentiert.

Die in dieser Arbeit untersuchte Verschmutzungserkennung bezieht sich auf kein spezifisches Materialsystem. Die Problemstellung erfordert einen Lösungsansatz, der mit geringstem Kalibrierungsaufwand und nahezu ohne Vorkenntnis über die Verschmutzung auskommen muss.

2.9 Aktive Blitzthermografie

Die Blitzthermografie beruht auf dem fotothermischen Effekt, d. h. dass das Prüfteil durch einen Laserpuls oder eine Blitzlampe aufgewärmt wird, indem das Prüfteil den sichtbaren Strahlungsanteil absorbiert und in Wärme umwandelt. Durch die Art der Anregung kann großflächig, homogen und berührungslos mit einer definierten Energiemenge angeregt werden. Bei der Nutzung und Interpretation einer Blitzthermografie müssen also die optischen und thermischen Eigenschaften des Prüfobjektes mit eingeschlossen werden.

Zur analytischen Lösung des ersten Falls in Kap. 2.8 wird ein halbunendlicher isotroper homogener Körper betrachtet, dessen Oberfläche man mit einem Dirac-Delta-Blitzpuls der Wärmemenge Q_0 zur Zeit $t = 0$ anregt. Zur Behebung dieses Problems wird die eindimensionale Wärmediffusionsgleichung (2.25) gelöst, unter der Annahme, dass die Probenoberfläche die y-z-Fläche bei $x = 0$ ist. Da man großflächig anregt, ist bei der Blitzthermografie die laterale Wärmeausbreitung in y- und z-Richtung zu vernachlässigen, so dass nur die Ausbreitung in die Tiefe von Interesse ist.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha_{\text{Diff}}} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2.25)$$

Dabei entspricht

$$\alpha_{\text{Diff}} = \frac{k_{\text{P}}}{\rho_{\text{D}} c_{\text{P}}} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right) \quad (2.26)$$

der thermischen Diffusivität (auch Temperaturleitwert genannt). Diese Rate gibt Auskunft darüber, wie tief sich eine thermische Welle in das Material ausbreitet. ρ_{D} ist die Materialdichte und c_{P} ist die spezifische Wärmekapazität. Die Diffusivität hängt sowohl von der thermischen Leitfähigkeit k_{P} als auch von der Rate ab mit der Energie im Material gespeichert werden kann. Die Wärmediffusionsgleichung beschreibt die Wärmeausbreitung in Körpern über Wärmeleitung oder Diffusion.

Der vollständige Lösungsweg ist in [54, 68, 69] angegeben und führt zu dem folgenden Endergebnis der Wärmediffusionsgleichung für einen Dirac-Delta-Puls:

$$T(x, t) = \frac{Q_0}{2\sqrt{\pi\rho_{\text{D}}c_{\text{P}}k_{\text{P}}t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha_{\text{Diff}}t}\right) \quad (2.27)$$

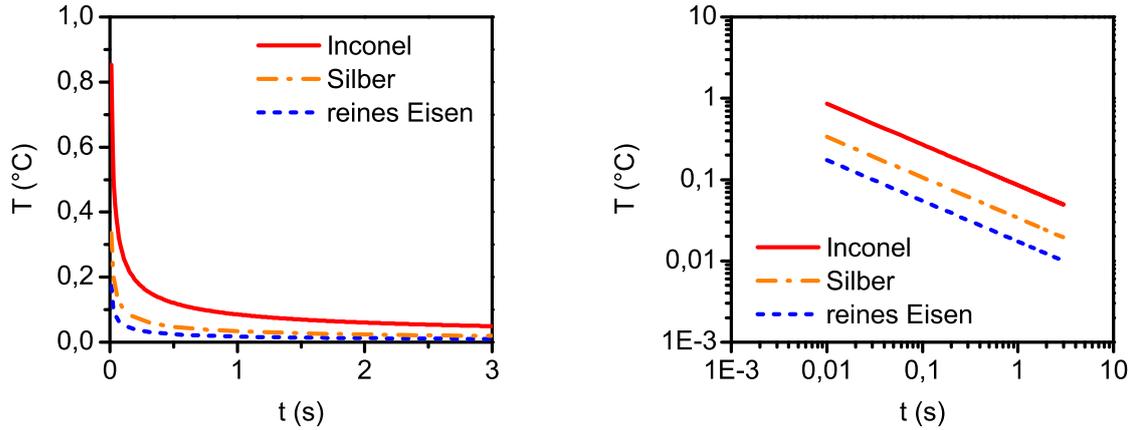


Abb. 2.7: Links: Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Zeit nach Dirac-Delta-Puls-Anregung nach (2.27). Rechts: Doppelt-logarithmische Auftragung der Signalverläufe von Abb. 2.7 links.

Der zeitliche Temperaturverlauf (2.27) nach der Delta-Puls-Anregung am Ort $x = 0$ ist in Abb. 2.7 links und in doppelt-logarithmischer Auftragung in Abb. 2.7 rechts dargestellt. Als Parameter wurden die Werte von Inconel, Silber und reinem Eisen nach [54, 55] gewählt. Das IR-Signal an der Oberfläche folgt in doppelt-logarithmischer Auftragung einer Geraden mit der Steigung $-1/2$ wie in Abb. 2.7 rechts zu sehen ist. Für den Fall eines im Infraroten transparenten Materials liegt aufgrund der Strahlungsemission aus dem Volumen die Steigung der Geraden zwischen 0 und $-1/2$ [62, 63].

Die Funktion $T(0, t)$ ist invers proportional zur Wurzel der Zeit und der thermischen Effusivität

$$e_{\text{th}} = \sqrt{\rho_D c_P k_P} \left(\frac{\text{W} \sqrt{\text{s}}}{\text{m}^2 \text{K}} \right), \quad (2.28)$$

welche auch Wärmeeindringkoeffizient genannt wird. Die Effusivität beschreibt das Vermögen eines Körpers mit seiner Umgebung Wärme auszutauschen. Die effektive thermische Diffusionslänge μ_e gibt die Tiefe $x = 2\sqrt{\alpha_{\text{Diff}} t}$ an, bei welcher die Temperatur $T(x, t)$ auf $1/e$ abgefallen ist.

3 Bispetrale Kameratechnik – Zusammenführung des infraroten und des sichtbaren Spektralbereichs

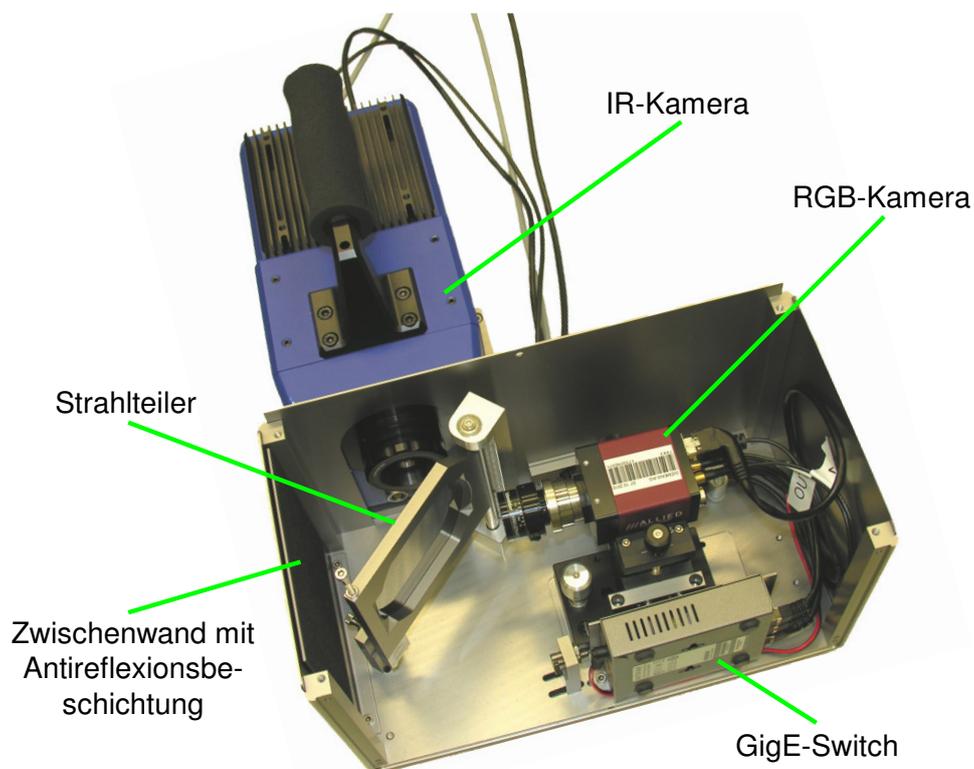


Abb. 3.1: Hybrid-Kamera mit IR-Kamera, RGB-Kamera, dichroitischem Strahlteiler und GigE-(Gigabit-Ethernet)-Switch. Auflösung der IR-Kamera: $640 \times 512 \text{ Pixel}^2$. Auflösung der RGB-Kamera: $1600 \times 1200 \text{ Pixel}^2$. Das Gehäuse wurde teilweise für das Foto abgebaut.

Die realisierte Hybrid-Kamera [2–5] (s. Abb. 3.1) soll die Qualifizierung von Prüfteilen verbessern, die abhängig von der Prüfaufgabe mit aktiver oder passiver IR-Thermografie untersucht werden. Dazu wurde das Sichtbare mit dem Infraroten parallaxenfrei kombiniert. Die wesentlichen Komponenten sind: 1. eine MWIR-Kamera, 2. eine im Sichtbaren empfindliche Farbkamera, 3. ein Strahlteiler, der infrarote Strahlung möglichst gut im Wellenlängenbereich von $1,5 - 5,1 \mu\text{m}$ transmittiert und sichtbare

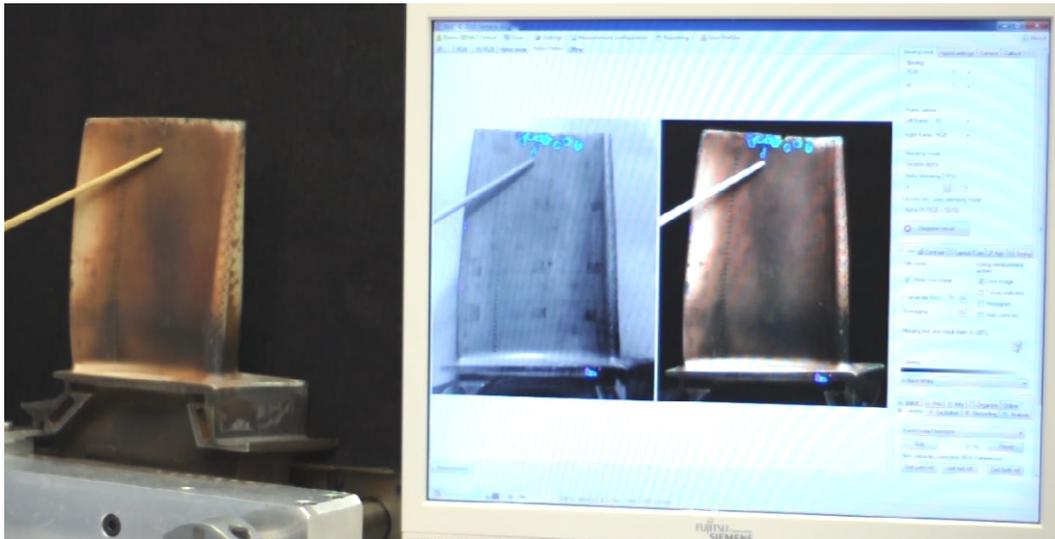


Abb. 3.2: Manuelle Lokalisierung von Defekten, die mittels Ultraschall-Thermografie sichtbar gemacht wurden. Auf dem Monitor ist links eine Zusammenführung des Defektbildes mit dem IR-Bild und rechts mit dem RGB-Bild zu sehen. Die Echtzeitdarstellung und die Passgenauigkeit von IR- zu RGB-Bild ermöglichen die Kombination zu einem neuen aussagekräftigeren Ergebnisbild.

Strahlung möglichst gerichtet und verlustfrei reflektiert. Bei der Entwicklung standen Aspekte wie der Einsatz eines Laptops, Transportabilität, Verfügbarkeit der verwendeten Komponenten, geringe Baugröße, eine triangulationsfreie Datenfusion und ein Arbeitsabstand von $10\text{ cm} - \infty$ im Vordergrund.

Durch die zusätzliche spektrale Information wird die bisherige thermografische Prüfteilqualifizierung wesentlich robuster, da die Passgenauigkeit der Überlagerung einen pixelweisen Informationsvergleich und nicht nur einen qualitativen Vergleich beider Bilder ermöglicht, wodurch das neue Hybrid-Bild eine aussagekräftige Kombination beider Kamerabilder ist. So kann die Darstellung auf dem Bildschirm wahlweise eine Kombination aus IR-, Farb- und Thermografieergebnisbild sein, wie in Abb. 3.2 gezeigt ist.

Darüber hinaus ließe sie sich zu Überwachungszwecken von großflächigen Umgebungen bis hin zu Büro- oder Maschinenräumen, zur Überhitzungs- oder Unterkühlungsdetektion einsetzen.

3.1 Aufbau der Hybrid-Kamera

Die Hybrid-Kamera fusioniert die breitbandigen spektralen Informationen zweier weit auseinanderliegender Spektralbereiche durch die Benutzung einer MWIR-Kamera und einer im Sichtbaren empfindlichen digitalen RGB-Farbkamera mittels eines dichroitischen Strahlteilers. Dadurch ist das Sichtfeld beider Kameras parallaxenfrei auf das Prüfteil, was bedeutet, dass beide Kameras das Prüfobjekt gleichzeitig aus dem selben Blickwinkel sehen. Durch diesen hybriden Ansatz erhält man bei der Benutzung einer

Parameter	IR-Kamera	RGB-Kamera
Hersteller	FLIR	AVT
Modell	SC7600	GE1660C
Pixelauflösung (Pixel ²)	640×512	1600×1200
Pixelgröße (µm ²)	15×15	5,5×5,5
Vollbildfrequenz (max.) (Hz)	100	34
Empfindlichkeitsbereich (µm)	1,5–5,1	0,4–0,8
Noise Equivalent Temperature Difference (NETD)	< 25 mK (20 mK typisch)	
Datenübertragung	GigE	GigE
Bandbreite (Megabit/s)	1000	1000
Farbwiedergabe	mono	rot, grün, blau
Farbtiefe pro Pixel (Bit)	14	8 pro Farbe
Gewicht (kg)	4,9	0,178
Festbrennweite (mm)	27	23
Öffnungswinkel (hor.) (Grad)	20,1	21,7
Öffnungswinkel (vert.) (Grad)	16,2	16,3

Tab. 3.1: Spezifikationen der IR- und der RGB-Kamera von FLIR Systems (FLIR) und Allied Vision Technologies (AVT) [70, 71].

Farbkamera eine gegenüber der IR-Kamera deutlich überlegene Auflösung (s. Tab. 3.1) und instantan durch die Bayer-Matrix des Farbkamerasensors drei Spektralbereiche im Sichtbaren.

Da die IR-Kamera bei der Siemens AG bereits vorhanden war, wurde die Farbkamera inkl. Objektiv auf die Anforderungen der IR-Kamera und den Verwendungszweck anhand folgender Kriterien ausgewählt:

1. Der Strahlteiler muss dahingehend optimiert sein, dass entweder der infrarote oder der sichtbare Spektralbereich gut transmittiert wird und der jeweils andere Spektralbereich gut reflektiert wird. Siehe dazu Kap. 3.1.1.
2. Das Sichtfeld der Farbkamera soll gleich groß oder minimal größer als das der IR-Kamera sein, damit bei einer Bild-in-Bild-Darstellung weder Pixel der IR-Kamera noch zu viele Pixel der RGB-Kamera abgeschnitten werden müssen. Da die IR-Kamera das eigentliche Messsignal liefert, darf deren Bild auf keinen Fall beschnitten werden.
3. RGB-Kamera und Objektiv sollen möglichst kompakt sein, was dem Einsatz von Zoomobjektiven widerspricht. Darüber hinaus besitzen industriell genutzte Kameras einen C-Mount-Anschluss. Zoomobjektive für diesen Kameraanschluss haben einen Arbeitsabstand von $> 0,5$ m, was für die vorgesehenen Anwendungen nicht nah genug ist. Objektive mit dem gewünschten minimalen Arbeitsabstand

können zwar mit einem Adapter befestigt werden, dadurch würde der Aufbau aber insgesamt zu groß werden.

4. Der eingesetzte Switch ersetzt ein Datenübertragungskabel. Außerdem muss er eine Übertragungsrate von 1 GBit/s bei kompakter Bauweise haben, damit das IR- und das RGB-Bild bei hoher Bildfrequenz und gleichzeitig hoher Auflösung der RGB-Kamera verlustfrei übertragen werden können.
5. Damit der Betrachter eine flüssige Bildwiedergabe auf dem Bildschirm hat, sollten beide Kameras synchronisiert mit mindestens 16 Hz gleichzeitig laufen können. Da beide Kameras ihre Bilder über einen gemeinsamen Switch an den Laptop senden, muss die Auflösung und das Bildformat der RGB-Kamera so gewählt werden, dass unter Berücksichtigung der maximal erreichbaren Datenübertragungsrate von 1 GBit/s die gewünschte Bildfrequenz erlangt wird. Die gewählte RGB-Kamera ermöglicht eine rechnerische Bildfrequenz von 19,7 Hz beider Kameras, was sich nur erzielen lässt, wenn der angeschlossene Rechner über genügend Ressourcen für die parallele Übertragung, Zwischenspeicherung, Bildfusion und Darstellung verfügt. Das eingesetzte Laptop (Hersteller: Fujitsu. Modell: Celsius H700) ermöglicht unter Ausnutzung eines einzelnen Rechenkerns eine verlustfreie Übertragungsfrequenz von 12 Hz mit anschließender Bildfusion und Darstellung auf dem Bildschirm.
6. Die Kameras müssen sich zur synchronen Bildaufnahme gegenseitig triggern können.
7. Da die Kameras von unterschiedlichen Herstellern sind, müssen die jeweiligen Treiber gleichzeitig funktionieren, um Bilder von beiden Kameras zu empfangen.
8. RGB-, IR-Kamera und Switch teilen sich eine Spannungsversorgung, d. h. dass alle Geräte für 12 V ausgelegt sind. Durch den Einsatz eines Switches und die einheitliche Versorgungsspannung soll die Anzahl der benötigten Kabel auf zwei reduziert werden.

Des Weiteren wurde zur Kostenreduktion auf verfügbare Mikrometerlineartische aus der Optik zurückgegriffen. Um die Hybrid-Kamera möglichst wartungsarm zu gestalten, wurde auf den Einsatz von elektrischen Motoren oder mechanischen Arretierungen verzichtet. So wird der klappbare Strahlteiler an seinen Endpositionen mit Hilfe von Magneten festgehalten (s. Abb. 3.3). Um nur mit der IR-Kamera zu arbeiten, kann der Strahlteiler einfach aus dem Strahlengang herausgeklappt werden, so dass man keine Absorptionsverluste in Kauf nehmen muss. Ohne diese Möglichkeit müsste man die IR-Kamera abmontieren. Zur Justierung des horizontalen Winkels der optischen Achse der Farbkamera zur IR-Kamera wurde die Endposition des Strahlteilers im Strahlengang der IR-Kamera mit einer Mikrometerschraube ausgeführt.

Da der gewählte Strahlteiler IR-Strahlung in gewissem Umfang reflektiert, wurde, wie in Abb. 3.1 zu sehen, eine Zwischenwand mit einer IR-Antireflexionsbeschichtung (AR-Beschichtung) eingebaut. Zur Feinjustierung der Endposition des Strahlteilers mittels Mikrometerschraube wurde in die Zwischenwand außerdem eine Durchführung für

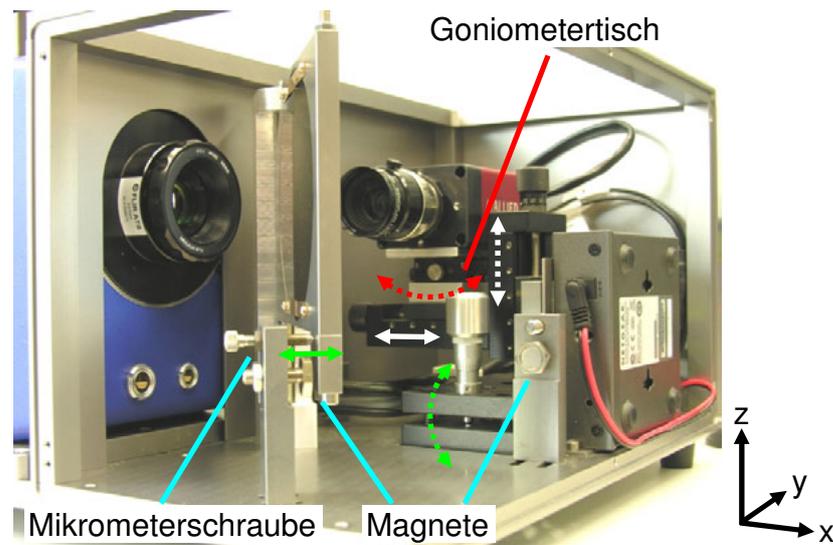


Abb. 3.3: Detailansicht der magnetischen Halterung des Strahlteilers. Der linke Halter mit Magnet und Mikrometerschraube dient gleichzeitig zur horizontalen Winkeleinstellung der optischen Achse der Farbkamera. Die rechte Halterung mit Magnet und Gegenschraube wird genutzt, wenn man nur das Infrarote braucht. Über die Distanzschraube oberhalb des Magneten kann man die Haltekraft einstellen. Roter Pfeil: Ausrichtung der Detektoren zueinander. Weiße Pfeile: Parallele Ausrichtung der optischen Achse der RGB-Kamera in y- und z-Richtung (nach dem Strahlteiler) zur optischen Achse der IR-Kamera. Grüne Pfeile: Einstellung des Winkels der optischen Achse der RGB-Kamera in der x-y- und der x-z-Ebene nach dem Strahlteiler.

einen Inbusschlüssel eingebaut. Dadurch spiegelt sich die IR-Kamera nicht an der Außenwand und man spiegelt bei der Justierung der Hybrid-Kamera kein störendes Signal über den Strahlteiler in die IR-Kamera ein.

3.1.1 Parallaxenfreie Bildfusion mit Si-Strahlteiler

Der parallaxenfreien Bildfusion liegt die Möglichkeit zugrunde, dass zwei Kameras den identischen Blickwinkel auf den Probenkörper haben. Dies wird bei der Hybrid-Kamera durch den Einsatz eines Strahlteilers erreicht. Er erleichtert außerdem die Justierung der optischen Achsen beider Kameras zueinander, da man gleichzeitig die Szene in beiden Spektralbereichen sieht. Für die Wahl des Strahlteilers gelten folgende Überlegungen: Man will vorrangig das Signal der IR-Kamera maximieren. Deshalb wählt man im ersten Fall einen Strahlteiler, der möglichst viel IR-Strahlung im Empfindlichkeitsbereich der IR-Kamera [70] von $1,5 - 5,1 \mu\text{m}$ transmittiert bei ebenfalls hohen Reflexionseigenschaften im sichtbaren Wellenlängenbereich von $400 \text{ nm} - 800 \text{ nm}$ (Empfindlichkeitsbereich der RGB-Kamera) [71]. Im zweiten Fall realisiert man eine hohe Transmission im Sichtbaren bei einer hohen Reflektivität im Infraroten.

Der zweite Fall ist für eine Reflexion von mehr als 50% im relevanten IR-Wellenlängenbereich und gleichzeitiger Transmission im Sichtbaren derzeit nicht

realisierbar. Sogenannte 45° cold mirrors [72] sind für den geforderten IR-Wellenlängenbereich nach aktuellem Stand nicht verfügbar. Sie sind nur für Anwendungen im kurzwelligen Infraroten vorgesehen.

Saphir (Al_2O_3) [73, 74], Bariumfluorid (BaF_2) [75], Calciumfluorid (CaF_2) [76], Zinkselenid (ZnSe) [74, 77] und Diamantfenster [78] sind, obgleich ihrer hohen Transmission im Infraroten, wegen der niedrigen Reflektivität im Sichtbaren und ihrer teilweise hygroskopischen oder spröden Materialeigenschaften keine geeignete Alternative. Außerdem reflektiert bei Materialien, die im Sichtbaren durchsichtig sind, sowohl die Vorder- als auch die Rückseite, wodurch die Farbkamera das Prüfobjekt zweimal sieht und zwar mit leichtem Versatz durch den 45° Winkel des Fensters zur RGB-Kamera, was unscharfe Bilder zur Folge hat.

Demzufolge sind Silicium (Si) [74, 79, 80] und Germanium (Ge) [74, 81, 82] geeignete Fenstermaterialien für eine Transmission der IR-Strahlung und eine Reflexion im Sichtbaren. Abgesehen von den spektralen Eigenschaften sollte der Strahlteiler möglichst dünn sein, um eine geringe horizontale Parallelverschiebung der optischen Achse aufgrund des Brechungsgesetzes zu verursachen. Der Brechungsindex von Si liegt im geforderten Wellenlängenbereich bei ca. 3,4 [83, 84], wodurch sich ohne AR-Beschichtung bei senkrechtem Lichteinfall eine Reflexion von 30 % berechnen lässt. Weiterhin soll durch die Wahl eines dünnen Strahlteilers der optische Weg durch das Medium verkürzt werden, um die totale Absorption zu minimieren. Die Bildverschiebung würde eine manuelle Justierung der Apparatur erschweren, da bei einer Veränderung des Winkels nicht nur das Sichtfeld der Farbkamera im Unendlichen mit dem der IR-Kamera zur Deckung gebracht wird, sondern gleichzeitig auch der Strahlengang der IR-Kamera horizontal verschoben wird. Ferner soll die Bildverschiebung möglichst gering gehalten werden, da man z. B. bei herausgeklapptem Strahlteiler eine Thermografiemessung machen will und das Ergebnis daraus dann wieder mit hineingeklapptem Strahlteiler dem RGB-Kamerabild überlagern will. Daneben braucht der Strahlteiler eine Mindestgröße von ca. 10 cm, damit das Sichtfeld beider Kameras nicht beschnitten wird.

Aus diesen Gründen hat man sich nicht zuletzt wegen der besseren Verfügbarkeit, der hohen Fertigungsstandards und des geringen Stückpreises für einen beidseitig polierten intrinsischen 4 Zoll-Si-Wafer entschieden. Eine geringe Dotierungsdichte erhöht die Durchlässigkeit [85] für die IR-Strahlung aufgrund der geringen Anzahl freier Ladungsträger, die für einen Teil der Absorption von IR-Strahlung verantwortlich sind. Außerdem entstehen durch die hohe Ebenheit des Halbleiters nur geringste abbildende Verzerrungen, welche eine deckungsgleiche Überlagerung der Farb- und IR-Bilder erschweren würden. Die gemessene integrale Transmission, des gewählten 600 μm dicken Si-Wafers, von 59 % stimmt mit der Literaturangabe von 53 % [83–86] gut überein. Im Vergleich dazu hatte eine 1 mm dicke breitbandig AR-beschichtete Germaniumprobe eine Transmission von etwa 65 %. Allerdings hatte das Germanium durch die AR-Beschichtung eine gelbliche Farbe bekommen, was das Bild für die Farbkamera ebenfalls gelblich aussehen lässt und folglich durch einen Weißabgleich kompensiert werden müsste. Eine AR-Beschichtung wurde auch für den Si-Wafer in Betracht gezogen, jedoch widersprachen dem vorerst die hohen Anschaffungskosten.

3.1.2 Synchronisierung

Zur Synchronisation beider Kameras stehen drei Möglichkeiten zur Auswahl: Die ersten zwei beinhalten, dass eine Kamera die andere Kamera triggert. Die dritte Variante benötigt zusätzliche Hardware, um beide Kameras extern zu triggern und ist deshalb nicht favorisiert.

Erschwerend ist die Tatsache, dass die IR-Kamera einen in Hardware realisierten nicht abschaltbaren Bildpuffer von drei Bildern eingebaut hat. Dieser Umstand verursacht einen Bildversatz zwischen Szene und Darstellung auf dem Bildschirm. Weitere Verzögerungen entstehen durch die Kombination des IR- und des RGB-Bildes zu einem Bild.

Da die RGB-Kamera der IR-Kamera in der Übernahmegeschwindigkeit von Einstellungen deutlich überlegen ist, wurde die IR-Kamera zum Master der Applikation bestimmt. Deshalb muss man nicht die IR-Kamera zwischen getriggert und frei laufend zeitaufwändig umstellen, je nachdem ob man sich im Echtzeitmodus mit 12 Hz beider Kameras befindet oder in einer aktiven Thermografiemessung mit 100 Hz der IR-Kamera und < 1 Hz der RGB-Kamera (im Hintergrund aktiv, aber die IR-Kamera nicht beeinflussend).

Für die Bildfusion werden zwei zum gleichen Zeitpunkt aufgenommene Bilder benötigt. Beide Kameras schicken über einen eingebauten Gigabit-Ethernet-(GigE)-Switch ihre Bilder an zwei separat im Laptop laufende Bildpuffer. Wegen des eingebauten Bildspeichers der IR-Kamera wird aus dem Ringpuffer der Farbkamera immer ein Bild genommen, das drei Bilder früher entstand. Erschwerend kommt hinzu, dass durch die Auslastung des Laptops mit Bildspeicherung zweier Bilder, Fusionierung zweier weiterer Bilder und Darstellung des Ergebnisbildes auf dem Bildschirm nicht immer zwei aufeinander folgende Bilder aus den Puffern entnommen werden. Zur genauen Bestimmung, welches passende Farbkamerabild ausgewählt wird, wertet man die Differenz der Bildnummern zweier aufeinander folgender IR-Bilder aus, anhand derer dann entschieden wird, welches Bild aus dem Farbkamerapuffer entnommen wird. Dies ist möglich durch die zusätzlichen Bilddaten, die von beiden Kameras jedem Bild angehängt werden.

Realisiert wurde die Software für die Hybrid-Kamera auf Basis der bei der Siemens AG im Bereich Corporate Research and Technologies Abteilung: GTF NDE (Global Technology Field Nondestructive Evaluation) entstandenen Software mit dem Namen SInE² (Siemens Infrared Explorer). Die Software ermöglicht die gleichzeitige Steuerung der IR- und der RGB-Kamera einschließlich der Darstellungs- und Auswertungsfunktionen.

3.1.3 Kalibrierung

Bei nebeneinander positionierten Kameras lässt sich über eine Kalibrierung mit einem eindeutigen Kalibriermuster auf die Positionen beider Kameras im Raum zurückrechnen [87–89]. Dabei werden meistens auch die jeweiligen Abbildungen entzerrt [90]. Dies ist der übliche Weg für eine mikrometergenaue Erfassung der dreidimensionalen (3D)

Objektoberflächeninformation. Allerdings lassen sich dadurch gerade bei kurzen Messabständen < 50 cm oder bei komplex geformten Objekten Abschattungen durch das Messobjekt selbst, aufgrund unterschiedlicher Blickwinkel auf das Prüfobjekt nicht vermeiden. Denn obgleich eine Rückrechnung auf einen beliebigen Kamerablickwinkel funktioniert, enthalten beide Kamerabilder nicht die äquivalente Information.

Wegen des parallaxenfreien Aufbaus der Hybrid-Kamera entfällt eine aufwändige Positionsbestimmung beider Kameras zueinander.

Für die Kalibrierung der Hybrid-Kamera wird zuerst mit Hilfe der manuellen Positioniermöglichkeiten die optische Achse der Farbkamera zur optischen Achse der IR-Kamera ausgerichtet. Dazu passt man als erstes das IR-Bild mittels eines Skalierungsfaktors an das RGB-Bild an. Weil die beiden Kameras unterschiedliche Detektorauflösungen haben, wird das niedriger aufgelöste Kamerabild der IR-Kamera auf das höher aufgelöste Kamerabild der Farbkamera abgebildet. Da beide Kameras in etwa den gleichen Öffnungswinkel haben, müssen in vertikaler Richtung 512 Pixel der IR-Kamera auf die 1200 Pixel der RGB-Kamera verteilt werden. Daraus ergibt sich ein Faktor von 2,34.

Je besser die manuelle Ausrichtung erfolgt, umso weniger laufen die Bilder auseinander, wenn man den Arbeitsabstand um mehrere Meter ändert und deshalb in einer anderen Fokusebene arbeitet. Die optische Ausrichtung muss möglichst zentral in der Bildmitte erfolgen, da sich bei Neufokussierung der Blickwinkel gerade beim IR-Objektiv verändert, wodurch der Kalibrierstrahler scheinbar seine Position relativ zum Kamerabild der Farbkamera ändert.

Die Ausrichtung beider optischen Achsen erfolgt möglichst weit entfernt von der Hybrid-Kamera, da eine minimale Winkeländerung einen großen Einfluss hat, wohingegen eine parallele Verschiebung der Strahlengänge erst bei in etwa parallelem Strahlengang beider Kameras und kurzem Arbeitsabstand sinnvoll ist. Deshalb ist es wichtig zuerst den Winkel zwischen den Achsen zu minimieren und danach den parallelen Versatz. Durch die Verkippung des Strahlteilers (s. Abb. 3.4 links) wird der Strahl horizontal ausgerichtet und durch Neigung der Farbkamera entlang der optischen Achse justiert man den Strahlengang vertikal (s. Abb. 3.4 rechts). Dann wird der Kalibrierstrahler nahe bei der Hybrid-Kamera aufgestellt und man verschiebt die Farbkamera sowohl senkrecht zur optischen Achse in der Horizontalen (s. Abb. 3.5 links) als auch vertikal in der Höhe, wie in Abb. 3.5 rechts, um die optischen Achsen von Farb- und IR-Kamera zu überlagern. Iterativ bringt man somit den Strahlengang der IR-Kamera mit dem Strahlengang der Farbkamera zur Deckung.

Im Anschluss an die manuelle Justierung wird eine Ausrichtung per Software durchgeführt, die mittels zweier Kalibrierpunkte an beiden Enden einer Bilddiagonalen erfolgt. Als Kalibrierkörper wurde eine Halogenlampe benutzt, die sehr hell und gleichzeitig sehr heiß ist. Mittels Schwerpunktberechnung [91] aller Pixel oberhalb eines gesetzten Schwellwertes werden nacheinander beide Positionen des Kalibrierstrahlers im IR- und im RGB-Bild berechnet, anhand derer die Bilder zueinander positioniert und endgültig skaliert werden.

Aufgrund von Herstellungstoleranzen sind die Kameradetektoren zueinander verdreht, was dadurch auffällt, dass IR- und RGB-Bild entlang der Diagonalen, an der

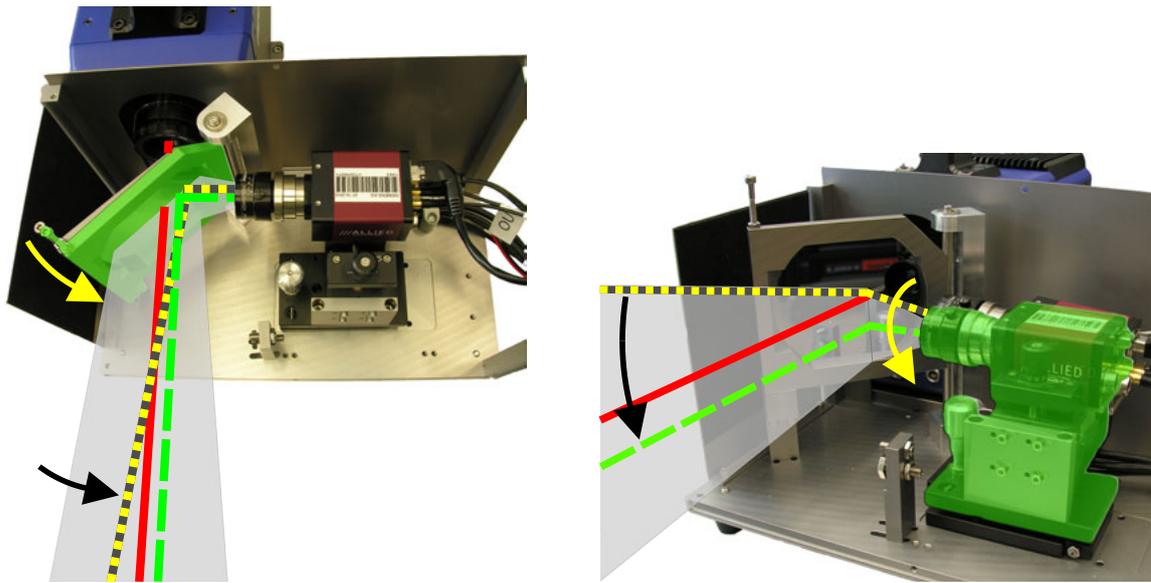


Abb. 3.4: Links: Horizontale Ausrichtung der optischen Achse der Farbkamera parallel zur optischen Achse der IR-Kamera (rote durchgezogene Linie) durch Verkippung des Strahlteilers. Ergebnis der Verkippung ist in grün gestrichelter Linie dargestellt. Ausgangssituation in gelb gepunkteter Linie. Rechts: Vertikale Ausrichtung der optischen Achse der Farbkamera (gelb gepunktete Linie) parallel zur optischen Achse der IR-Kamera durch Neigung der Farbkamera.

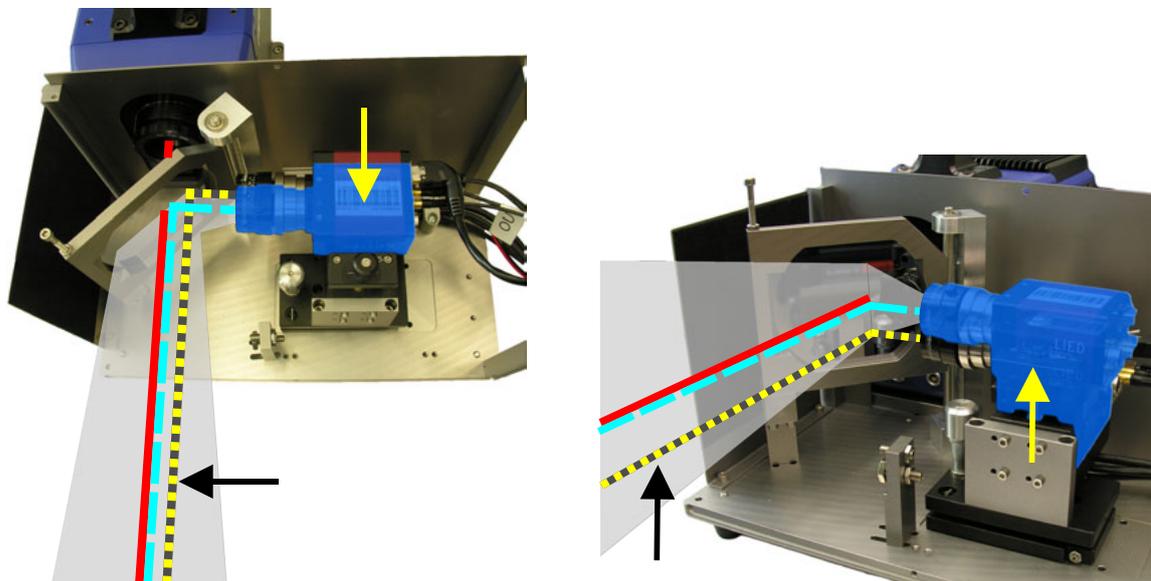


Abb. 3.5: Links: Waagrechte Verschiebung der optischen Achse durch seitliche Verschiebung der RGB-Kamera in der Horizontalen. Ausgangssituation in gelb gepunkteter Linie und Ergebnis der Verschiebung der Farbkamera in türkis gestrichelter Linie. Optische Achse der IR-Kamera in rot durchgezogener Linie. Rechts: Vertikale Verschiebung der optischen Achse durch die Höheneinstellung der Farbkamera.

kalibriert wurde, zusammenpassen, wohingegen die Bilder an der zweiten Diagonalen zu den Ecken hin auseinanderlaufen. Dies wird kompensiert, indem die Farbkamera, welche auf einem Goniometertisch befestigt ist, um die optische Achse gedreht wird (s. Abb. 3.3). Sinnvoll zur Ausrichtung sind lange gerade Kanten wie die von Türen, Fenstern oder Tischen. Da die IR-Messdaten möglichst wenig verändert werden sollen, wurde auf eine Rotation per Software verzichtet.

Genauigkeit der Kalibrierung

Durch die Kalibrierung wird das von der Anzahl der Pixel kleinere IR-Bild auf die Auflösung des RGB-Kamerabildes hochgerechnet und in diesem platziert. Zur Untersuchung der Passgenauigkeit wird die RGB- und IR-Ansicht eines Kalibrierungsmusters vom neuen Hybrid-Bild (Abb. 3.6 oben links und rechts) zuerst in eine grüne und eine rote Falschfarbendarstellung umgewandelt und danach multiplikativ überlagert. Das Bild in der Mitte von Abb. 3.6 zeigt das Ergebnis, in dem die hellen Ränder um die Quadrate auf Ungenauigkeiten in der Kalibrierung hindeuten. Zum Vergleich ist im Bild links unten eine Überlagerung dargestellt, in welchem der Aufbau nicht justiert ist, wodurch die hellen und dunklen Ränder um die Quadrate sehr ausgeprägt sind.

Aus dem Ergebnis der Überlagerung lässt sich eine Passgenauigkeit von < 3 Pixel des IR-Bildes abschätzen, was < 7 Pixel des RGB-Kamerabildes entsprechen. Weite Teile des Bildes sind besser. Eine höhere Genauigkeit erzielt man mit zusätzlichen Bildalgorithmen, die Verzerrungen der Objektivs korrigieren und eine höhere Passgenauigkeit der Bilder gewährleisten. Für die in dieser Arbeit betrachteten Anwendungen ist die absolute Passgenauigkeit beider Bilder nicht von Vorrang, da die erreichte Genauigkeit genügt, um die Bilder beider Spektralbereiche pixelweise zu verarbeiten, weil die Strukturen grob genug sind.

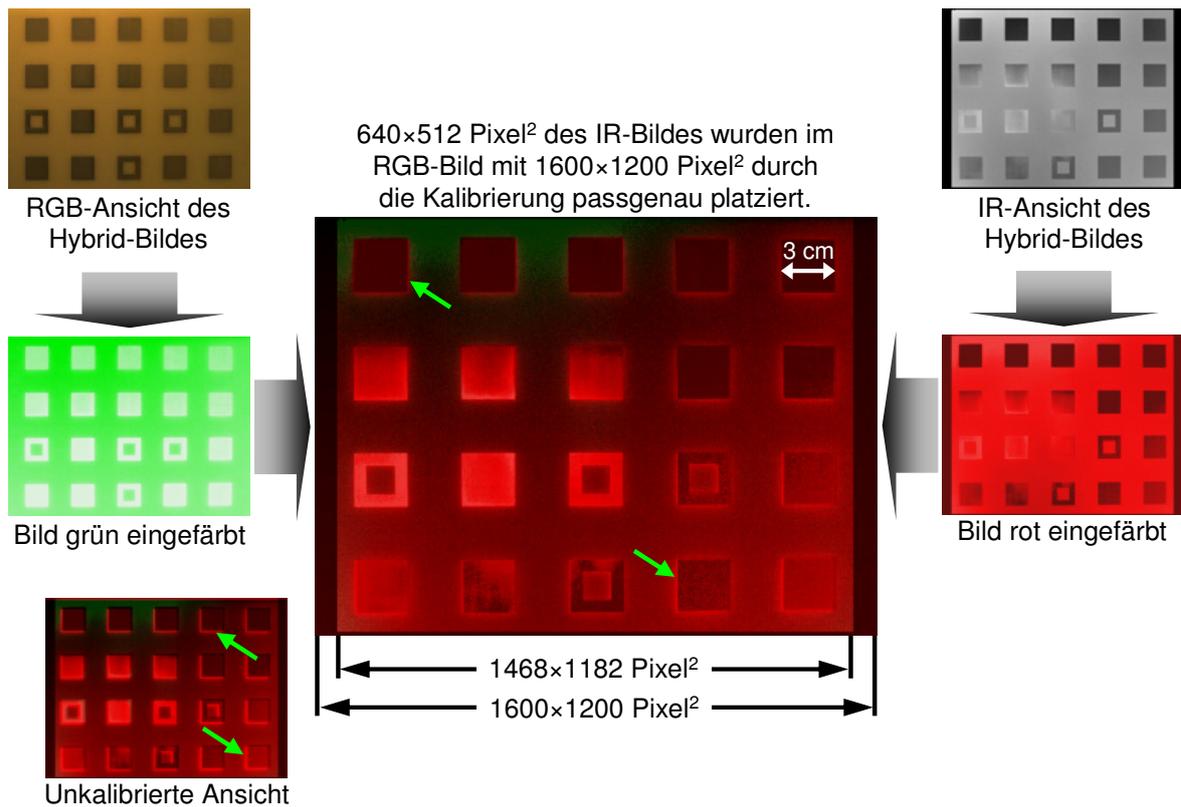


Abb. 3.6: Oben links: RGB-Ansicht des Hybrid-Bildes. Oben rechts: IR-Ansicht des Hybrid-Bildes. Mitte links: RGB-Ansicht ist grün eingefärbt. Mitte rechts: IR-Ansicht ist rot eingefärbt. Zentrum: Multiplikation der roten RGB- und der grünen IR-Ansicht. Teilweise ist der Rand um die Vierecke heller, was auf Ungenauigkeiten in der Kalibrierung hindeutet. Zwei Stellen dazu sind mit einem grünen Pfeil markiert. Unten links: Beispiel für einen nicht justierten Aufbau.

Darstellung von IR-Bildern, welche mit unterschiedlichen Farbpaletten visualisiert werden.

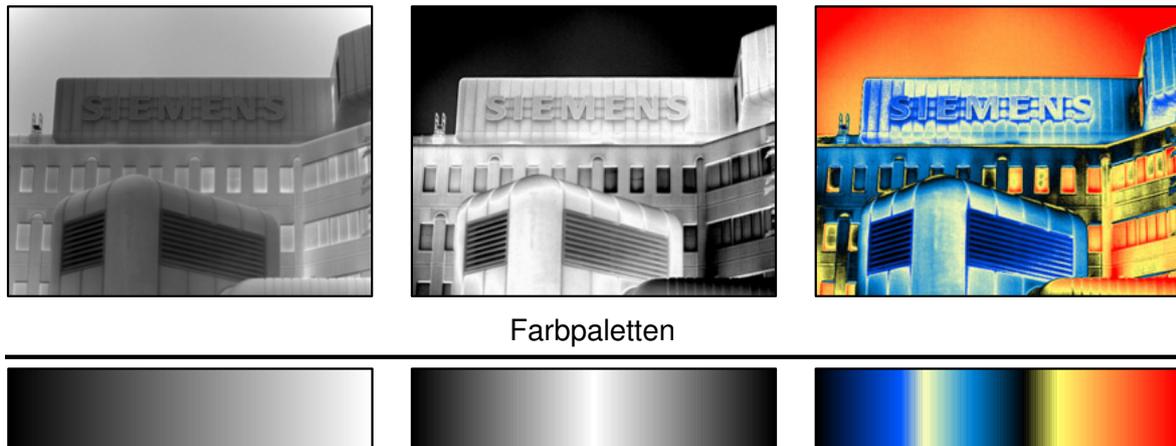


Abb. 3.7: Darstellung des SIEMENS Schriftzuges am Standort Neuperlach-Süd in München mit drei verschiedenen Farbpaletten visualisiert.

3.1.4 Darstellung der RGB- und der IR-Bilder

Größtenteils sind die in dieser Arbeit dargestellten Bilder farbig. Dabei liegen die Bilder der Farbkamera bereits im 24Bit-Format vor, das heißt, dass jede der drei Spektralfarben rot, grün oder blau über 256 verschiedene Abstufungen verfügt. Die Bilder der IR-Kamera sind hingegen 14Bit-Bilder ohne jegliche spektrale Information. Deshalb kann bei den Bildern der IR-Kamera auch von Graustufenbildern gesprochen werden, bei denen jedes Pixel über 2^{14} also 16.384 Abstufungen verfügt. Um die Bilder der IR-Kamera mit den Bildern der RGB-Kamera zusammenzuführen und um die Bilder der IR-Kamera farbig darzustellen, wird das 14Bit-Bild der IR-Kamera auf ein 8Bit-Bild umgerechnet. Dazu setzt man, um den Kontrast des IR-Bildes zu erhöhen, vor der Umrechnung eine obere und untere Kontrastschwelle. Alle Pixel deren Werte außerhalb des Kontrastbereichs liegen, bekommen den jeweiligen minimalen oder maximalen möglichen Pixelwert. Dann folgt die Umrechnung des IR-Bildes mit Hilfe einer Farbpalette in ein Bild mit drei Farbkanälen (rot, grün, blau). Die Visualisierung mit drei unterschiedlichen Farbpaletten ist in Abb. 3.7 gezeigt.

In dieser Arbeit ist das IR-Bild durchgehend ein 8Bit konvertiertes Graustufenbild, auf das eine beliebige Farbpalette angewendet wird. Die Falschfarbendarstellung ermöglicht durch geeignete Wahl der Farbpalette eine Hervorhebung von Temperatursprüngen und Temperaturunterschieden sowie die auffällige farbliche Unterscheidung zwischen IR-Bild und RGB-Bild.

3.1.5 Visualisierungsmodi

Mit Hilfe der Visualisierungsmodi werden über die geschickte Wahl von Schwellwerten die Informationen aus dem Infraroten und dem Sichtbaren zu einem neuen Hybrid-Bild zusammengeführt, so dass in einem Bild entweder beide Spektralbereiche kombiniert

sind, oder ein Spektralbereich durch die Verwendung des anderen verändert dargestellt ist. Dabei muss bedacht werden, dass die infrarote Information physikalisch nicht zwangsläufig mit der sichtbaren übereinstimmt. So haben Glas und Grafit im MWIR eine sehr hohe Emissivität von etwa 0,88–0,98 [54, 55, 92, 93], wobei sie im sichtbaren Spektralbereich vollkommen unterschiedliche Eigenschaften besitzen. Demgegenüber besitzen poliertes Platin und poliertes Aluminium ähnliche Eigenschaften, sowohl im Sichtbaren als auch im Infraroten.

Im Folgenden wird anhand einiger Beispiele gezeigt, wie die infrarote und die sichtbare Information in ein gemeinsames Bild einfließen kann. Dabei wird pixelweise mit einem globalen Schwellwert entschieden. Die Zusammenführung (Merging) der Bildpixelwerte erzeugt einen neuen Wert P_M . Dabei ist $I_{\text{IR-roh}}$ der 14 Bit-Pixelwert des IR-Rohbildes und P_{IR} der Pixelwert des IR-Bildes nach der Anwendung einer Farbpalette. Ein Pixel wird nachfolgend durch ein Triplet dargestellt mit

$$P_{\text{RGB}} := (P_{\text{RGB-R}} \mid P_{\text{RGB-G}} \mid P_{\text{RGB-B}}) \quad (3.1)$$

für das RGB-Bild und mit

$$P_{\text{IR}} := (P_{\text{IR-R}} \mid P_{\text{IR-G}} \mid P_{\text{IR-B}}) \quad (3.2)$$

für das IR-Bild in Falschfarbendarstellung, wobei die einzelnen Komponenten Werte von 0–255 annehmen können.

Folgende Modi sind denkbar:

1. Überblendung vom RGB- zum IR-Bild und umgekehrt: In Abb. 3.8 sind für drei verschiedene Merging-Faktoren f_M die Bilder nach (3.3) dargestellt:

$$P_M = f_M P_{\text{RGB}} + (1 - f_M) P_{\text{IR}} \quad (3.3)$$

2. Segmentierung des RGB-Bildes mit Hilfe des IR-Bildes: In Abb. 3.9 (a)–(c) sind drei unterschiedliche Fälle gezeigt, wie die IR-Information zur Segmentierung eines Farbbildes genutzt werden kann:

- a) Im Ergebnisbild wird alles oberhalb eines eingestellten Schwellwertes \hat{I}_{IR} im IR-Rohbild mit (3.4) rot dargestellt. Unterhalb von \hat{I}_{IR} wird das Farbbild angezeigt:

$$P_M = \begin{cases} (P_{\text{RGB-R}} \mid P_{\text{RGB-G}} \mid P_{\text{RGB-B}}) : & I_{\text{IR-roh}} \leq \hat{I}_{\text{IR}} \\ (255 \mid 0 \mid 0) : & I_{\text{IR-roh}} > \hat{I}_{\text{IR}} \end{cases} \quad (3.4)$$

- b) Im Ergebnisbild wird oberhalb eines eingestellten Schwellwertes im IR-Bild das IR-Bild selbst gezeigt mit (3.5). Unterhalb von \hat{I}_{IR} wird das Farbbild angezeigt:

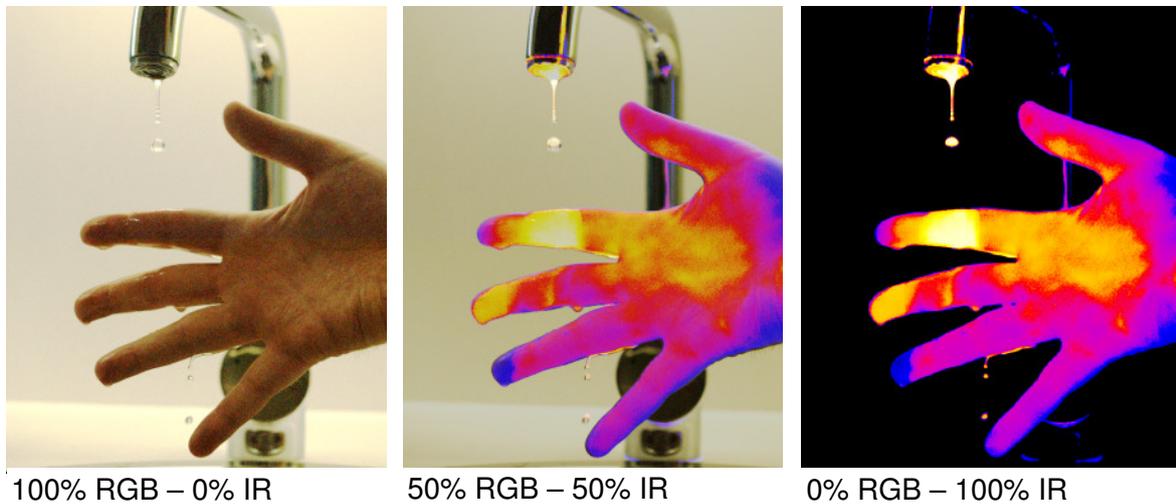


Abb. 3.8: Links: Reines RGB-Bild ($f_M = 1, 0$). Mitte: Zu jeweils 50 % ist RGB- und IR-Bild eingblendet ($f_M = 0, 5$). Rechts: Reines IR-Bild ($f_M = 0, 0$).

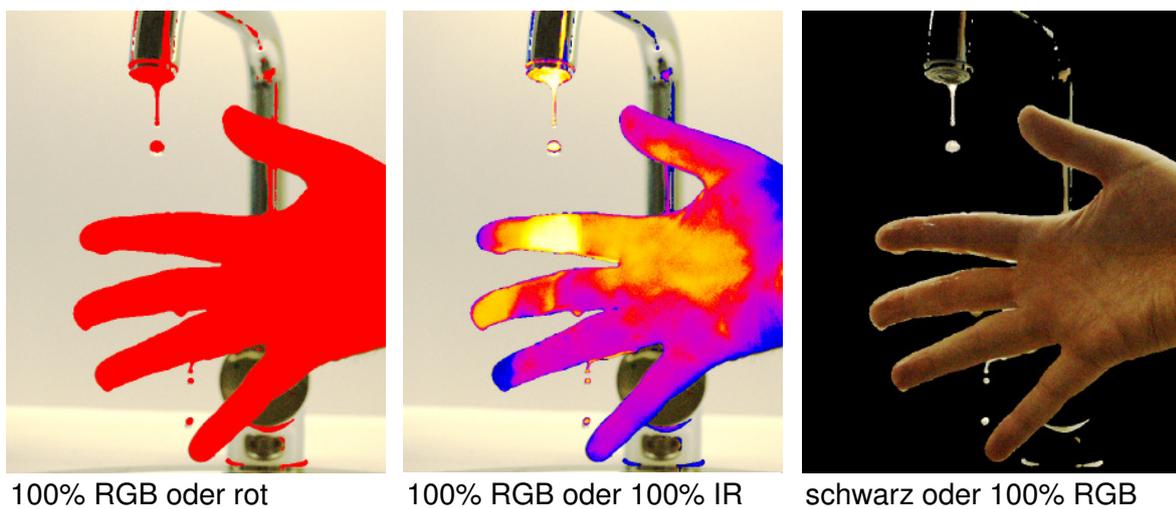


Abb. 3.9: Links: Bild zu (3.4). Mitte: Bild zu (3.5). Rechts: Bild zu (3.6).

$$P_M = \begin{cases} (P_{\text{RGB-R}} | P_{\text{RGB-G}} | P_{\text{RGB-B}}) : I_{\text{IR-roh}} \leq \hat{I}_{\text{IR}} \\ (P_{\text{IR-R}} | P_{\text{IR-G}} | P_{\text{IR-B}}) : I_{\text{IR-roh}} > \hat{I}_{\text{IR}} \end{cases} \quad (3.5)$$

- c) Im Ergebnisbild wird oberhalb eines eingestellten Schwellwertes im IR-Bild das RGB-Bild dargestellt. Unterhalb des Schwellwertes ist alles ausgeblendet:

$$P_M = \begin{cases} (0 | 0 | 0) : I_{\text{IR-roh}} \leq \hat{I}_{\text{IR}} \\ (P_{\text{RGB-R}} | P_{\text{RGB-G}} | P_{\text{RGB-B}}) : I_{\text{IR-roh}} > \hat{I}_{\text{IR}} \end{cases} \quad (3.6)$$

3. Segmentierung des IR-Bildes mit Hilfe des RGB-Bildes, worauf in den nächsten Kapiteln eingegangen wird.

3.2 Anwendungen der Hybrid-Kamera

Im folgenden Abschnitt werden die Anwendungen sowohl für die passive als auch die aktive Thermografie vorgestellt. In der passiven Thermografie kann die Hybrid-Kamera zur Raum- oder Prozessüberwachung genutzt werden, um so beim Überschreiten einer Temperaturschwelle einen Alarm auszulösen. Zur besseren Lokalisierung wird die alarmanzulösende IR-Information in das RGB-Bild eingeblendet.

Anschließend wird auf die Segmentierung des IR-Bildes mit Hilfe des RGB-Bildes eingegangen. Dabei werden die Vorteile der zusätzlichen Nutzung des sichtbaren Spektralbereichs für eine Ultraschall-Thermografie [94–97] und eine Blitzthermografie [64, 98–100] hervorgehoben. Außerdem wird erläutert, wie man mit der Hybrid-Kamera relativ leicht die 3D-Oberflächeninformation des Prüfteils ohne den Einsatz zusätzlicher teurer Hardware oder Software erhält. Darüber hinaus wird ein rotes Laserkreuz mit Hilfe der drei Spektralbereiche des Farbkamerabildes herausgefiltert und im IR-Bild angezeigt.

3.2.1 Passive Thermografie

Zwei Beispiele für eine Prozessüberwachung sind in Abb. 3.10 dargestellt. In der Abb. 3.10 links erwärmt sich die Bohrspitze während sie ein Loch in einen Aluminiumblock hineinbohrt und wird deshalb in der IR-Ansicht angezeigt. Das Gleiche gilt für die herausgebohrten Aluminiumspäne, die sich mit dem Bohrer drehen. Rechts in Abb. 3.10 ist der Funkenflug und die Schleiffläche einer Schleifscheibe beim Bearbeiten eines Stahlblocks in der IR-Ansicht zu sehen. Auch hier ist wegen der Wärmeentwicklung die IR-Information in das Bild eingeblendet, wohingegen die kältere Umgebung in der RGB-Ansicht zu sehen ist. Durch die Synchronität der Bilder liegen selbst bei den schnell fliegenden Funken IR- und RGB-Bild perfekt übereinander.

In der Abb. 3.11 sind links und rechts von oben nach unten Bildsequenzen dargestellt, in welchen der Autor der Arbeit mit einem heißen Wasserkocher von links nach rechts bzw. von rechts nach links durch das Bild geht. Die Darstellung des Hybrid-Bildes ist in drei Bereiche aufgeteilt. Im linken Bereich ist aus dem Hybrid-Bild lediglich

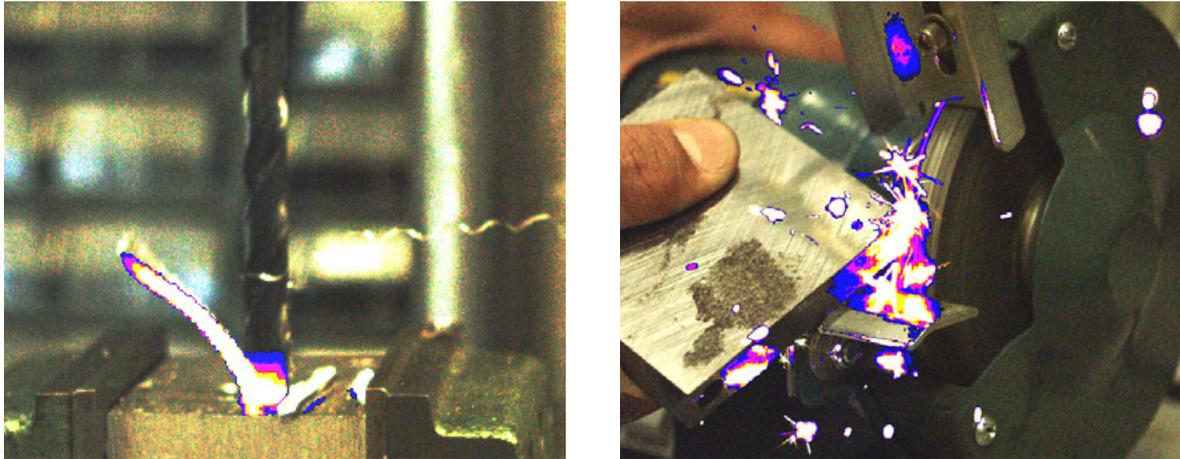


Abb. 3.10: Links: Mit der Bohrmaschine wird ein Loch in einen Aluminiumblock gebohrt. Die herausgebohrten Späne sind warm, woraufhin die IR-Information eingeblendet wird. Rechts: Ein Stahlblock wird an eine Standschleifmaschine gehalten. Die abgeschliffenen teilweise glühenden Stahlsplitter werden wegen ihrer Wärme in der IR-Ansicht dargestellt. Bei beiden Bildern bleibt die kältere Umgebung als RGB-Information eingeblendet.

das Farbbild eingeblendet, in der Mitte wird ein Segmentierungsmodus, wie der in Abb.3.9 Mitte, eingeblendet und rechts ist nur das IR-Bild gezeigt. An den Übergängen zwischen den Bereichen und besonders in der Mitte sieht man die Synchronität beider Kameras. In beiden Bildsequenzen ist zu erkennen, wie sowohl der heiße Wasserdampf segmentiert wird als auch das kochend heiße Wasser beim Ausschütten in das Waschbecken, welches dadurch stark erwärmt wird. Ebenfalls ist zu sehen, dass an der Unterseite der Hängeschränke heißer Wasserdampf kondensiert.

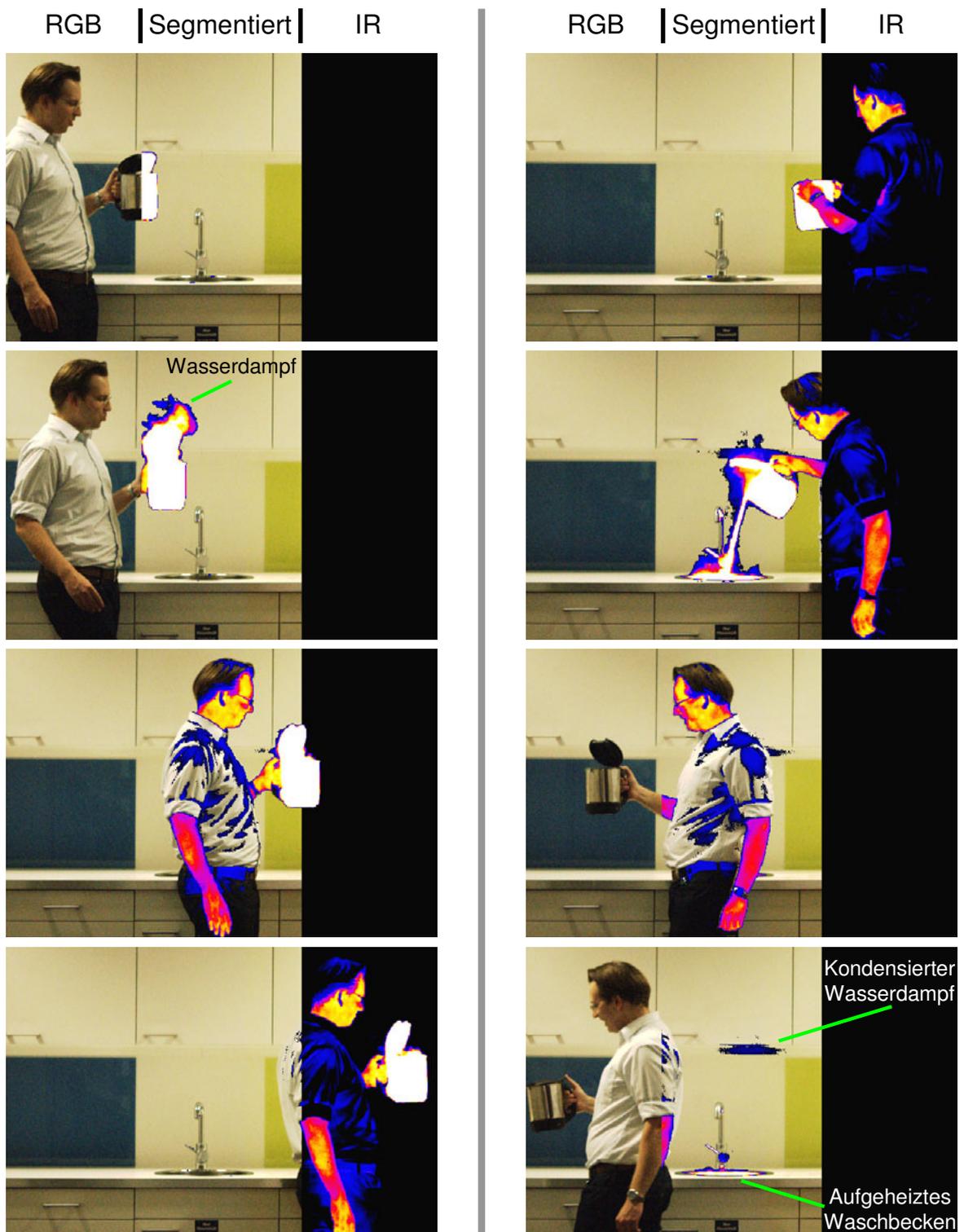


Abb. 3.11: Im Hybrid-Kamerabild wird in jedem Drittel eine andere Bildinformation für den Betrachter sichtbar gemacht. Im linken Drittel ist nur die RGB-Information dargestellt. Im mittleren Drittel ist die Ansicht wie in Abb. 3.9 Mitte gewählt. Im rechten Drittel ist nur die IR-Information angezeigt. Linke Bildsequenz: Person mit heißem Wasserkocher geht von links nach rechts durchs Bild. Rechte Bildsequenz: Person mit heißem Wasserkocher geht von rechts nach links durchs Bild.

3.2.2 Aktive Thermografie – Verbesserte Defekt-Lokalisierung in einer Ultraschall-Thermografie

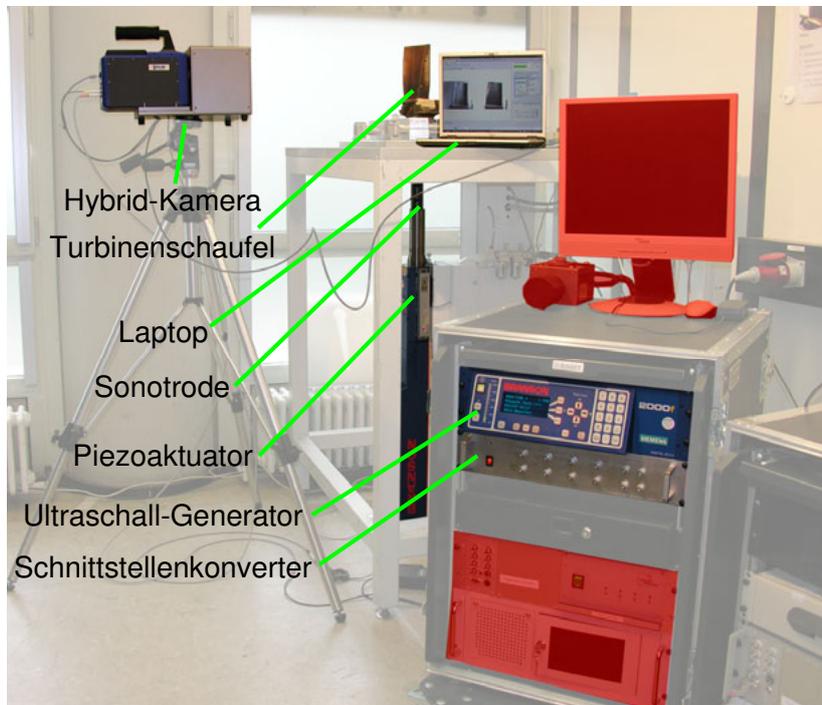


Abb. 3.12: Ultraschall-Thermografie-Messaufbau mit Piezoaktuator, Sonotrode, Prüfobjekt (Gasturbinenschaufel), Hybrid-Kamera, Ultraschall-Generator zur Steuerung des Piezos und einem Schnittstellenkonverter zur Verbindung zwischen Generator und Laptop.

Bei der aktiven Ultraschall-Thermografie [97, 101–105], wie sie in Abb. 3.12 mit der Hybrid-Kamera aufgebaut ist, wird das Bauteil mittels eines Piezoaktuators, der seine Schwingungen über eine Sonotrode in das Bauteil einkoppelt, zum Schwingen angeregt. Während der Anregung reiben sich berührende Rissflanken aneinander und erzeugen Wärme. Oberflächlich erzeugte Wärme wird von der IR-Kamera sofort detektiert. Wärme, die im Prüfteil erzeugt wird, breitet sich in Abhängigkeit von der Diffusivität zur Oberfläche aus und kann dort etwas später gemessen werden.

Mittels Puls-Phasen-Analyse wertet man den detektierte IR-Signalverlauf (s. Abb. 3.13 oben) aus. Dabei wird der Signalverlauf mit einer Sinus- und einer Kosinusfunktion korreliert, wodurch man ein Amplituden- und ein Phasenbild erhält, wie das in Abb. 3.13 Mitte links und rechts. Die Amplitude korreliert mit der Intensität der Wärme und die Phase mit der „Laufzeit“ der Wärmefront auf der Oberfläche. Beide Bilder werden im HSV-Farbraum (Helligkeit-Sättigung-Farbtone) überlagert, wodurch man ein farbkodiertes Defektbild, wie das in Abb. 3.13 unten, erzeugen kann.

Dieses Bild kann dann zur vereinfachten Auffindung der Defekte auf dem Prüfteil dem aktuellen Kamerabild überlagert werden. Das Amplitudenbild gibt dem Ergebnisbild die Helligkeit, wohingegen das Phasenbild den Farbton einstellt. Die Sättigung erhält

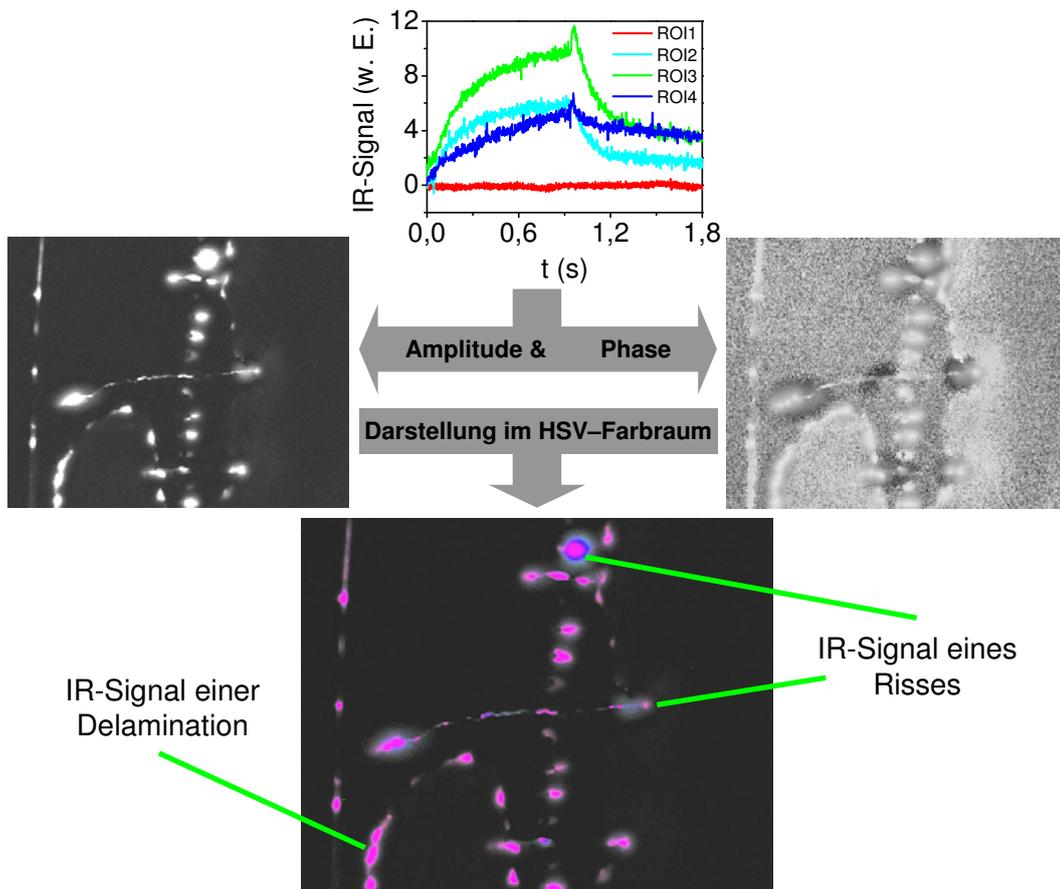


Abb. 3.13: Mitte oben: IR-Signalverlauf einer Ultraschall-Thermografie. Rechts und links Mitte: Nach der Puls-Phasen-Analyse hat man ein Amplituden- und ein Phasenbild. Mitte unten: Kombination von Amplituden- und Phasenbild im HSV-Farbraum zum Ergebnisbild der Thermografie.

den konstanten Wert 1. In Abb. 3.12 ist der Ultraschall-Thermografie-Messaufbau zu sehen, in dem zusätzlich in rot die Komponenten markiert sind, die durch den Einsatz einer IR-Kamera neueren Herstellungsjahres gegen Geräte kleinerer Bauform ersetzt werden konnten. Dabei handelt es sich um das Netzteil der IR-Kamera und einen PC inkl. Bildschirm, welche zum Transport in einem Rollcontainer verstaut wurden. Die neuere IR-Kamera im Hybrid-Aufbau ermöglicht den Einsatz eines Laptops. Spezielle Schnittstellen oder Netzteile entfallen.

Das Ergebnis einer Ultraschall-Thermografie ist in Abb. 3.14 links dem IR-Kamerabild in Graustufen überlagert und in der Abb. 3.14 rechts dem RGB-Kamerabild. Die Hybrid-Kamera ermöglicht beide Darstellungen gleichzeitig, wohingegen im linken Bild ohne die Information aus dem sichtbaren Spektralbereich nicht ersichtlich ist, dass es sich bei dem Prüfobjekt um eine mit Defekten behaftete Turbinenschaufel handelt, deren keramische Zirkoniumoxid-(ZrO)-Beschichtung unterschiedlich farbig ist und sogar teilweise entfernt wurde. Im Bild rechts ist das ohne Weiteres erkennbar. Zusätzlich ist ersichtlich, dass nicht alle Risse über die volle Länge während

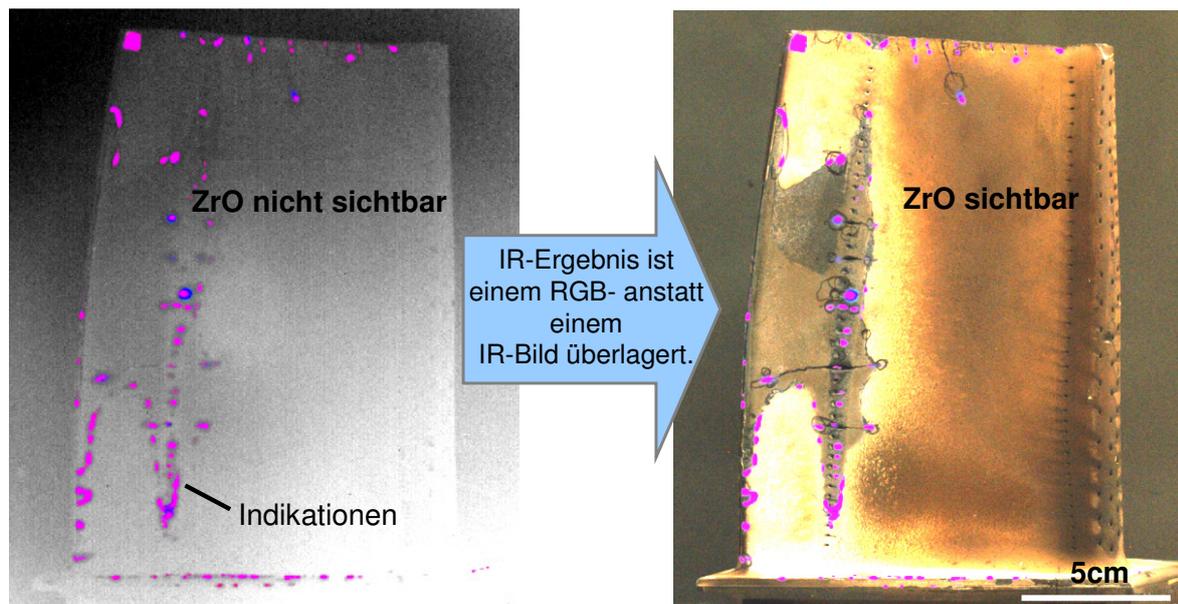


Abb. 3.14: Ergebnisbild einer Ultraschall-Thermografie in Magenta und Blau links dem IR-Kamerabild und rechts dem RGB-Kamerabild überlagert.

der Ultraschall-Anregung Reibungswärme erzeugen, da sich die Rissflanken oftmals nicht berühren. Außerdem erkennt man Delaminationen am Rand der keramischen Beschichtung, während im reinen IR-Bild nicht ersichtlich ist um welche Art von Defekt es sich handelt.

Um die Überlagerungsqualität von RGB- zu IR-Bild zu demonstrieren, wurde, wie in Abb. 3.15 links zu sehen, eine Ultraschall-Thermografie durchgeführt, wobei man die Hybrid-Kamera so nah wie möglich vor dem Prüfobjekt aufstellte. Das Hybrid-Ergebnisbild ist in Abb. 3.15 rechts dargestellt. Durch den Einsatz eines Strahlteilers haben sowohl die IR- als auch die RGB-Kamera den gleichen Blickwinkel, so dass kürzeste Arbeitsabstände realisiert werden können, ohne dass die Qualität der Bildfusion darunter leidet. Bei nebeneinander aufgestellten Kameras würde es, aufgrund von unterschiedlichen Blickwinkeln hinsichtlich Prüfobjekten mit komplexer Geometrie, wegen der kurzen Arbeitsabstände zu Abschattungen kommen, wodurch relevante Informationen verloren gehen können. In Abb. 3.15 rechts sieht man, wie gut das IR-Ergebnisbild dem RGB-Bild überlagert ist. Durch die Abbildungsqualität des IR- und des RGB-Objektivs ist der Einsatz von entzerrenden Bildbearbeitungsalgorithmen für diese Anwendung nicht notwendig, so dass für eine Bildfusion lediglich eine Translation und eine Skalierung des IR-Bildes zum RGB-Bild nötig ist.

Des Weiteren ist jetzt auch ersichtlich, warum nicht die gesamte Länge eines Risses als Defekt erscheint. Denn nur Risse, deren Flanken sich berühren, können durch Reibungswärme ein Defektsignal erzeugen. So kann die hybride Kameratechnik genutzt werden, um Risserwärmungsmechanismen tiefergehender zu studieren, was noch immer Thema wissenschaftlicher Arbeiten ist [97, 101, 102].

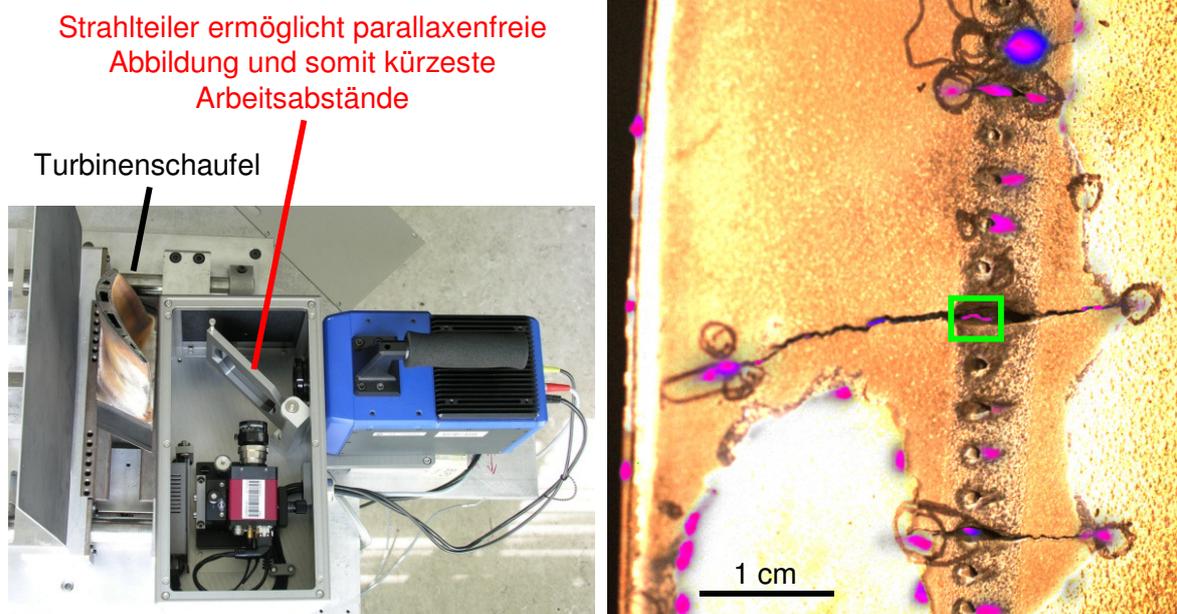


Abb. 3.15: Links: Messaufbau mit dem kürzesten realisierbaren Arbeitsabstand der Hybrid-Kamera zum Prüfobjekt. Der kleinste Arbeitsabstand ist hier durch das Gehäuse bestimmt. Kleinere Objekte können auch im Gehäuse vor dem Wafer platziert werden. Rechts: Zugeschnittenes Ergebnisbild, in dem ein Ultraschall-Ergebnis dem RGB-Bild überlagert ist.

Außerdem erhält man durch die gegenüber der IR-Kamera mehr als doppelt so hohe Auflösung der RGB-Kamera eine wesentlich höhere Detailschärfe. Die Detailansichten in Abb. 3.16 zu dem grünen Rechteck in Abb. 3.15 rechts Mitte zeigen den in der Turbinenschaufel liegenden Defekt. Zu erkennen sind die mit der IR- und der Hybrid-Kamera erreichbaren Bilder mit und ohne IR-Ergebnisbild. In den Hybrid-Bildern ist das RGB-Kamerabild sowohl in Graustufen als auch in Farbe dargestellt.

In Abb. 3.16 links kann man den Ursprung des Defektsignals aufgrund der niedrigen Auflösung und des geringen Kontrastes der IR-Kamera nicht erkennen. Im mittleren Bild ist das Thermografieergebnis dem RGB-Bild in der Graustufendarstellung überlagert, um den Farbunterschied zwischen Defekt und Umgebung beizubehalten. Der Defekt ist im unteren Bild gut zu erkennen und man sieht, dass es sich um einen im Inneren der Turbinenschaufel liegenden Riss handelt. Im rechten Bildpaar wurde dann das Farbbild benutzt, wodurch der Zustand des Prüfteils sichtbar wird. Wegen der höheren Auflösung der RGB-Kamera, des besseren Kontrastes und der Echtfarbdarstellung der Oberfläche inkl. dem Thermografieergebnisbildes kann die Hybrid-Kamera helfen, Risserwärmungsmechanismen genauer zu untersuchen.

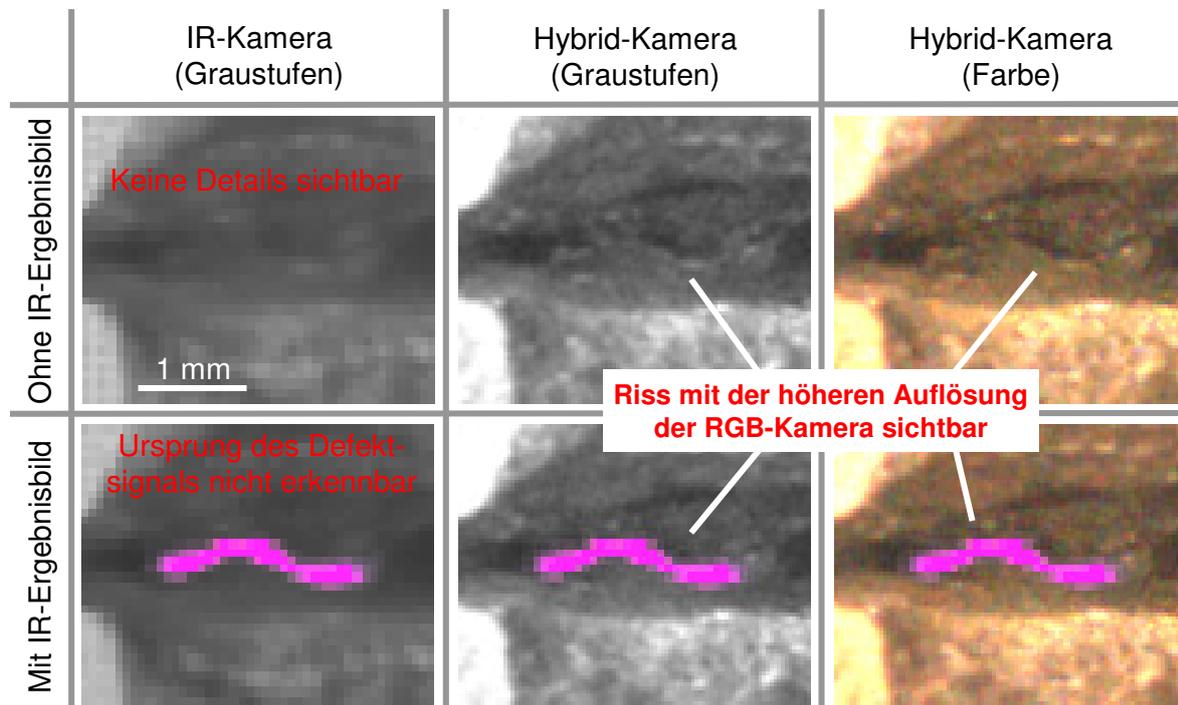


Abb. 3.16: Jeweils oben IR- oder RGB-Bild ohne Thermografieergebnis und unten mit IR-Ergebnis. Links: Nur die IR-Kamera wird benutzt. Mitte: Hybrid-Kamera mit RGB-Bild in Graustufen. Rechts: Mit RGB-Bild in Farbe.

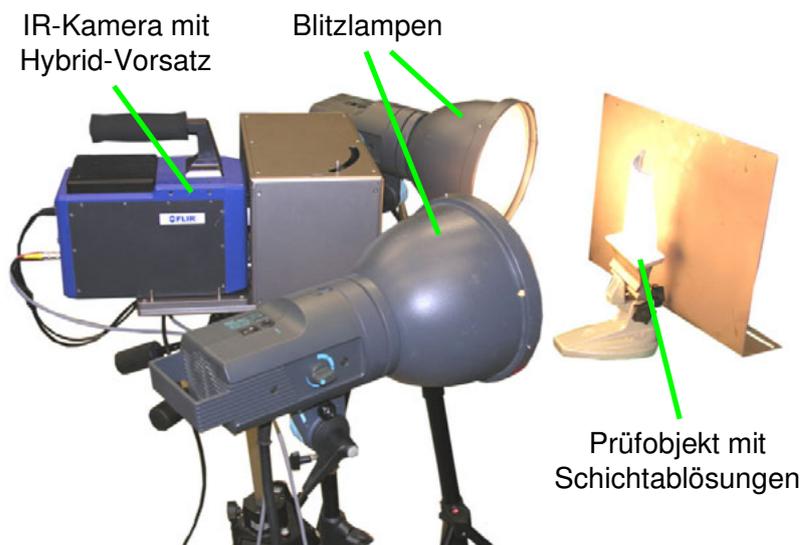


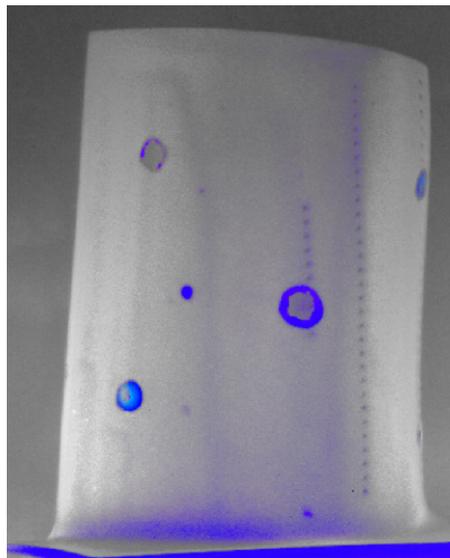
Abb. 3.17: Messaufbau für eine Blitzthermografie mit Hybrid-Kamera, Blitzlampen des Herstellers Broncolor und mit Delaminationen präparierte keramisch beschichtete Turbinenschaufel.

3.2.3 Verschmutzungserkennung anhand der RGB-Helligkeit bei einer Blitzthermografie

Bis jetzt wurde die zusätzliche sichtbare Spektralinformation genutzt, um Thermografiemessungen besser zu visualisieren. Im nachfolgenden Unterkapitel wird die Farbkamerainformation genutzt, um dem Prüfer anzuzeigen, ob bei einer Blitzthermografie [106–112] Fehldetektionen aufgrund von oberflächlichen Verschmutzungen aufgetreten sind. Das beinhaltet die Annahme, dass Verschmutzungen im Sichtbaren dunkler als das Prüfobjekt sind. Dazu wurde mit dem Versuchsaufbau in Abb. 3.17 zuerst an einer mit Delaminationen präparierten keramisch beschichteten Turbinenschaufel eine Blitzthermografie durchgeführt. Dabei regt man das Prüfobjekt großflächig mit Hilfe von Blitzlampen an. Im Testobjekt wird durch fothermischen Effekt [54] der Lichtblitz in Wärme umgewandelt, die sich in dem Prüfobjekt ausbreitet. Durch Delaminationen entsteht ein Wärmestau in der Beschichtung, der detektiert werden kann.

Nach einer Puls-Phasen-Auswertung und anschließender Kombination des Amplituden- und Phasenbildes im HSV-Farbraum (s. Abb. 3.13) erhält man das Blitzthermografie-Ergebnisbild aus Abb. 3.18, welches zur besseren Darstellung und Lokalisierung der Indikationen dem IR-Kamerabild überlagert ist.

In dem Bild sind die Indikationen in Farbe angezeigt, allerdings beinhaltet die Blitzthermografie das Problem, dass nicht nur Delaminationen als Defekte detektiert werden, sondern auch oberflächliche Verschmutzungen, welche die ursprüngliche Emissivität ändern und somit das Absorptionsverhalten der keramischen Beschichtung, die teiltransparent [66, 109, 113] ist. Das heißt, dass der Prüfer das Thermografieergebnis mit dem realen Prüfteil abgleichen muss, um festzustellen, ob es sich bei der Indikation



IR + IR-Ergebnis

Abb. 3.18: Zur besseren Lokalisierung der Defekte ist das Bild der Puls-Phasen-Auswertung dem IR-Bild überlagert. Die Indikationen für Defekte sind in blau markiert.

um einen echten Defekt oder lediglich um eine unkritische oberflächliche Verschmutzung handelt.

Die Hybrid-Kamera erleichtert diese Aufgabe, da man gleichzeitig mit dem IR-Bild ein RGB-Bild, wie in Abb. 3.19 links, erhält, in dem man aufgrund des besseren Kontrasts und der höheren Auflösung selbst kleinste oberflächliche Farbunterschiede erkennen kann. Mehr noch, wegen der Passgenauigkeit von IR- zu RGB-Bild kann die Helligkeitsinformation des RGB-Bildes genutzt werden, um im Blitzthermografieergebnis oberflächliche dunkle Verschmutzungen anzuzeigen.

Dabei geht man wie folgt vor (Detailansichten zu dem Beispiel werden darauf folgend besprochen):

Als Erstes wird im RGB-Kamerabild (Abb. 3.19 links) ein Helligkeitsschwellwert gesetzt, unterhalb dessen das Bildpixel eine dunkle Verschmutzung erkennt. Oberhalb des Schwellwertes sieht es die unverschmutzte keramische Beschichtung. Demzufolge muss das Prüfobjekt entsprechend gleichmäßig ausgeleuchtet sein, damit in diesem Schritt keine Fehlindikationen stattfinden.

Als Zweites wird pixelweise mit dem IR-Ergebnisbild in Abb. 3.19 rechts verglichen, ob es eine Übereinstimmung eines dunklen RGB-Pixels mit einem farbigen Pixel des Blitzthermografieergebnisses gibt. Falls das zutrifft, wird der Farbton des entsprechenden Pixels im IR-Ergebnis nach gelb geändert [114, 115].

Als Letztes wird das so entstandene neue farbtongeeänderte IR-Ergebnis dem RGB-Bild überlagert, wie in Abb. 3.19 Mitte gezeigt ist.

Der Vergleich der Ausgangssituation mit dem durch die Hybrid-Kamera ermöglichten neuen Endergebnis ist in Abb. 3.20 dargestellt. Dabei sind die Defekte 1 und 2

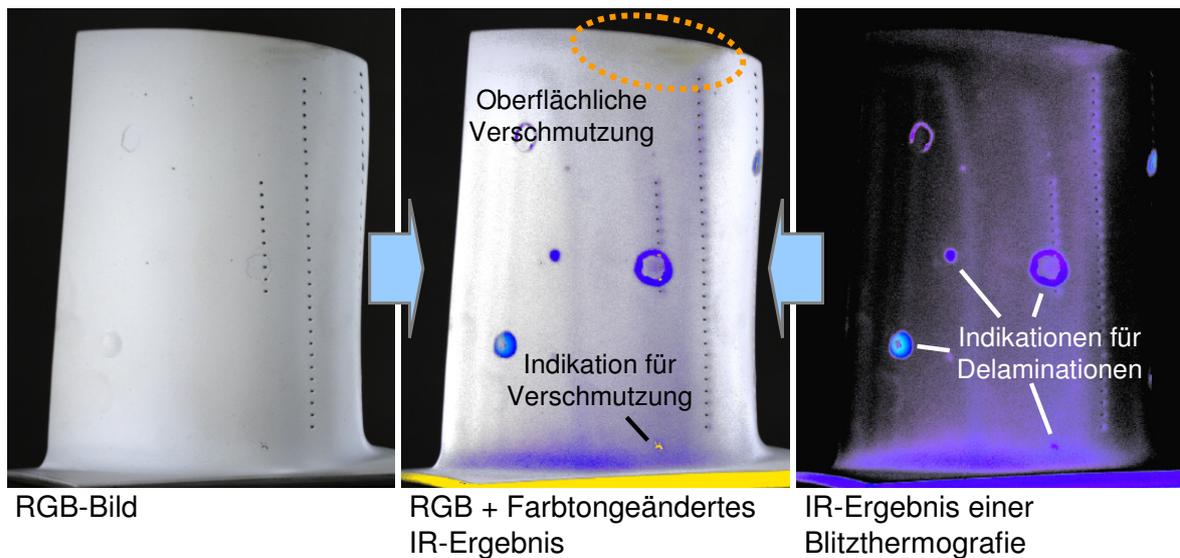


Abb. 3.19: Links: RGB-Bild. Mitte: Farbtongeändertes IR-Ergebnisbild dem RGB-Bild überlagert. Rechts: Ergebnisbild der Blitzthermografie.

Schichtabplatzungen und der Defekt 3 eine starke Delamination, die mit dem bloßen Auge erkennbar sind (vgl. Abb. 3.19 links). Der Defekt Nr. 4 (Abb. 3.20) ist eine echte Delamination, wohingegen der Defekt Nr. 5 gelb eingefärbt wurde, da es dort eine Übereinstimmung mit einer oberflächlichen Verschmutzung gibt (vgl. Abb. 3.19 links).

Der Vergleich des mit der Hybrid-Kamera erreichbaren Endergebnisses aus Abb. 3.20 links mit dem erreichbaren Endergebnis unter Benutzung lediglich der IR-Kamera (Abb. 3.20 rechts) zeigt die Verbesserungen:

1. Die Detailschärfe ist durch die Zusammenführung des IR-Ergebnisses mit dem höher aufgelösten RGB-Bild besser, wie an den Kühlluftbohrungen gut zu erkennen ist.
2. Oberflächliche Verschmutzungen, welche im IR-Ergebnis zu einer Indikation beigetragen haben, wurden mit Hilfe der RGB-Helligkeitsinformation gelb eingefärbt.
3. Durch die selektive Änderung des Farbtone im Defektbild wird die Verschmutzung an der Spitze der Turbinenschaufel in Abb. 3.20 (a) gelblich angezeigt, weil dort das IR-Ergebnisbild nur eine schwache Indikation hat, wie in Abb. 3.19 rechts zu sehen ist.
4. Die schwarzen Kühlluftbohrungen sind trotz ihrer niedrigen Helligkeit nicht gelb eingefärbt, da die Blitzthermografie dort keine Auffälligkeiten zeigt (s. Abb. 3.20 (b)).

Das mit der Hybrid-Kamera gewonnene Endergebnis zeigt eine signifikante Verbesserung für den Prüfer, der auf Probleme in der Blitzthermografie durch oberflächliche

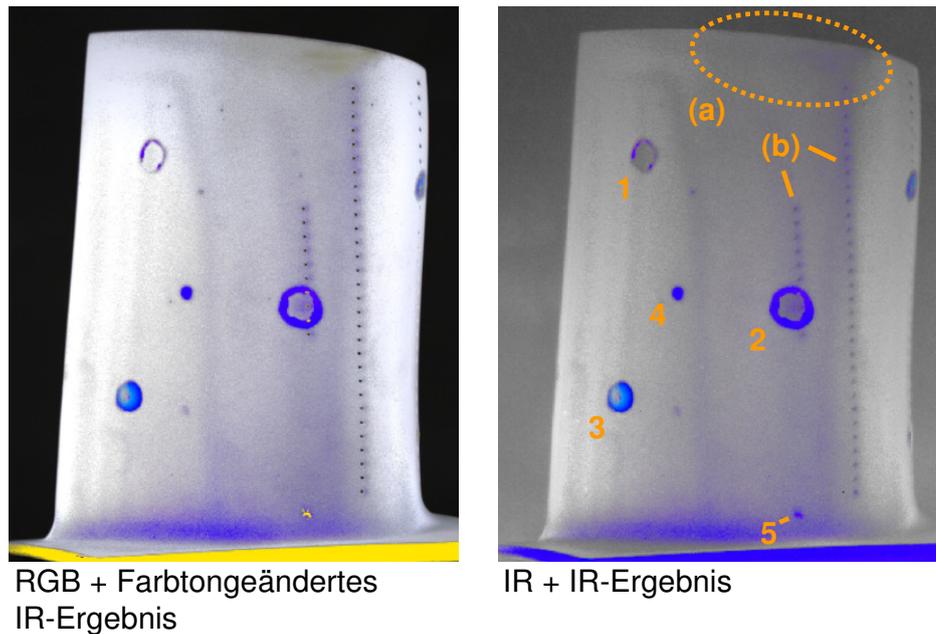


Abb. 3.20: Links: Farbtongeändertes IR-Ergebnisbild dem RGB-Bild überlagert wie in Abb.3.19 Mitte. Rechts: Thermografieergebnis dem IR-Bild überlagert. Auf die einzelnen Markierungen wird im Text eingegangen.

Verschmutzungen aufmerksam gemacht wird [3–5]. Jedoch müssen bei den gelb gekennzeichneten Indikationen gegebenenfalls weitere Tests durchgeführt werden, da noch nicht geklärt wurde, ob sich unter den Verschmutzungen doch Defekt befinden. Auf der anderen Seite kann der Prüfer sicher sein, dass die blau eingefärbten Defekte tatsächlich Delaminationen sind oder Verschmutzungen, die nicht dunkler als der gesetzte Helligkeitsschwellwert sind und deshalb die Materialeigenschaften der Beschichtung nicht ändern.

Durch die parallaxenfreie Bildkombination zweier unterschiedlicher Spektralbereiche konnte in dem gezeigten Beispiel die Information des Sichtbaren genutzt werden, um auf Schwierigkeiten in der Thermografie hinzuweisen. Als Nächstes wird anhand von zwei vergrößerten Detailansichten die gute Passgenauigkeit beider Spektralbereiche zueinander gezeigt.

Detailansichten

Die Bildsequenzen von oben nach unten in Abb. 3.21 links und rechts verdeutlichen in der Detailansicht, wie die Nutzung der sichtbaren Spektralinformation mittels Hybrid-Kamera die Auswertung einer Blitzthermografie sicherer und einfacher macht.

In den linken Detailansichten ist gezeigt, dass aufgrund der örtlichen Übereinstimmung einer Indikation im Thermografieergebnis und im Farbbild diese, wie bereits vorangehend beschrieben, gelb eingefärbt wird. Dabei ist im RGB-Bild sehr detailliert der Defekt zu sehen, wohingegen im IR-Bild durch die niedrige Auflösung und den ge-

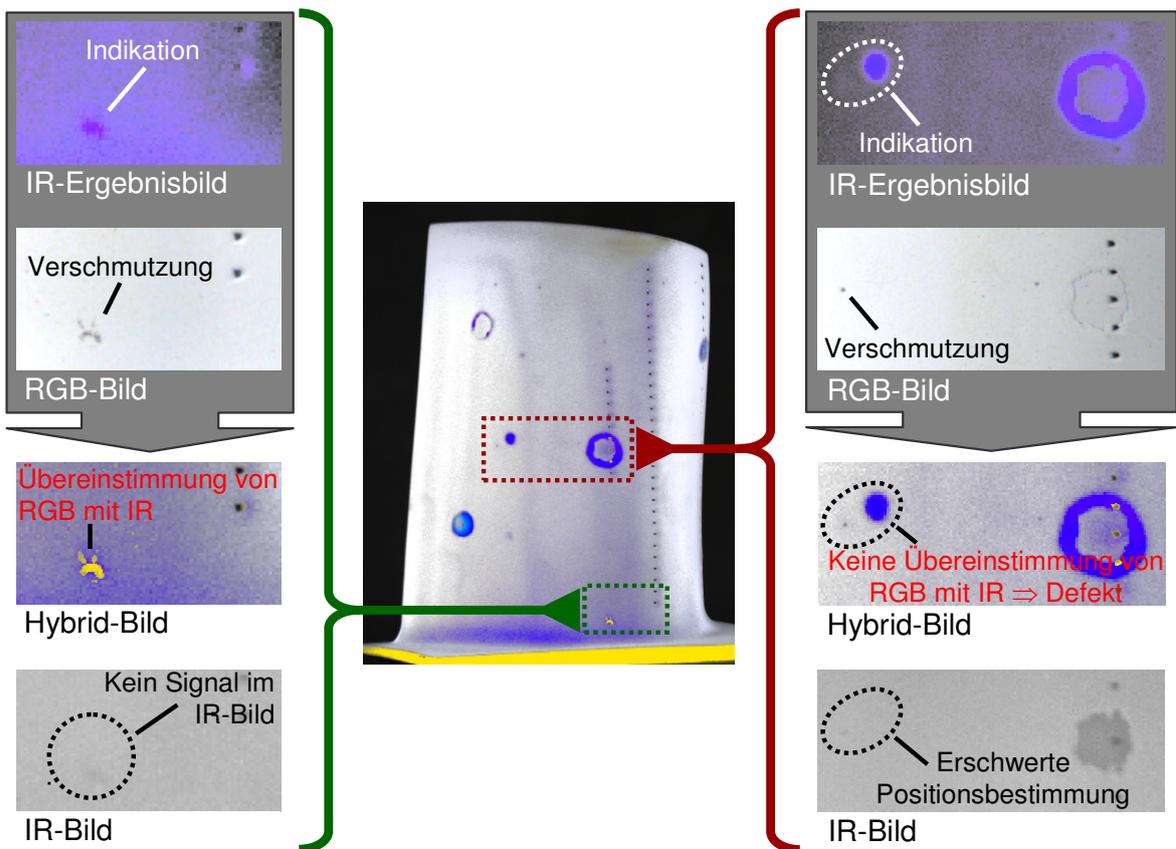


Abb. 3.21: Bildsequenz links von oben nach unten verdeutlicht das Zustandekommen der Einfärbung einer Indikation in der Blitzthermografie. Rechts wird gezeigt, wie kleinste Details auf dem Prüfobjekt genutzt werden können, um Defekte sicherer zu lokalisieren.

ringen Kontrast nichts von der oberflächlichen Verschmutzung zu erkennen ist, welche in der Blitzthermografie als Indikation erkannt wurde.

Die rechte Bildsequenz stellt eine andere Situation dar. Die mittels Thermografie erkannte Indikation hat im RGB-Bild keine Übereinstimmung, wodurch die blaue Farbe im Ergebnisbild beibehalten wird. Jedoch ist neben der Delamination eine Verschmutzung sichtbar, die durch den Prüfer als oberflächliches Indiz für den Defekt angesehen werden könnte. Dadurch würde die falsche Position für einen Bearbeitungsprozess markiert werden, wenn nur das IR-Bild genutzt werden kann, in dem keine weiteren signifikanten Orientierungspunkte in der Nähe der Delamination erkennbar sind. Die Farbkamera der Hybrid-Kamera zeigt allerdings eine kleine Verschmutzung in der Nähe an, die sich zur Orientierung auf dem Prüfteil verwenden lässt.

Demzufolge hilft die Hybrid-Kamera durch die hohe Auflösung der Farbkamera und des parallaxenfreien Sichtfeldes Defekte sicherer zu lokalisieren. Damit kann auf Fehlinterpretationen in einer Blitzthermografie aufgrund oberflächlicher Verschmutzungen aufmerksam gemacht werden. Des Weiteren können RGB- und Blitzthermografiebild abgespeichert werden, um den aktuellen Zustand des Prüfteils zu dokumentieren, oder um die Bilder über Internet bei schwierigen Entscheidungen an einen weiteren Entscheidungsträger weiterzuleiten.

3.2.4 Erlangung der 3D-Oberflächeninformation inklusive der Farbbild- und IR-Defektbildtextur

In der Bildverarbeitung ist heutzutage die Erlangung der 3D-Oberflächeninformation mit Hilfe der Streifenlichtprojektion eine oft genutzte Technik [116–119]. Mittels Farbkamera kann dann noch auf das gewonnene 3D-Modell die Oberflächentextur projiziert werden, wodurch das Modell noch näher an der Realität ist.

Als Oberflächentextur wird ein Bild bezeichnet, welches um den Detailgrad zu erhöhen auf ein 3D-Modell projiziert wird. Die 3D-Form selbst ist eine Punktwolke [120]. Dabei bleibt der Detailgrad der Geometrie unverändert.

In der Thermografie will man die 3D-Oberflächeninformation möglichst einfach als zusätzliche Information erlangen, um dann die Defektbildtextur auf die Oberfläche zu projizieren. Dabei gibt es die drei folgenden Ansätze:

1. Man betreibt parallel zur IR-Kamera ein Setup mit Farbkamera und Lichtstreifenprojektor, wobei beide Kameras das Prüfobjekt aus unterschiedlichem Blickwinkel sehen würden, und deshalb die Position beider Kameras zuerst mit einer Kalibrierung im Raum bestimmt werden muss. Dazu wird ein für beide Kameras sichtbares Kalibriermuster benötigt. Der Nachteil ist deshalb der programmier-technische Aufwand, um für eine Kalibrierung die unterschiedlichen Blickwinkel zu kompensieren.
2. Man benutzt zur gleichzeitigen Gewinnung des IR-Defektbildes und der 3D-Oberflächeninformation einen IR-Diodenlaser. Dabei wird der Laserpunkt so

schnell über das Bauteil geführt, dass er von der IR-Kamera bei entsprechender Wahl der Integrationszeit als Linie wahrgenommen wird. Über eine verfügbare Bildbearbeitungssoftware und vorheriger Kalibrierung erhält man dann die 3D-Oberfläche. Dieselbe Bildserie wird anschließend thermografisch zu einem Defektbild ausgewertet [121]. Die Zusammenführung des 3D-Modells mit der Defekt-Textur ist dann passgenau, weil 3D-Oberfläche und Defektbild aus dem gleichen Blickwinkel aufgenommen wurden. Allerdings wird für diesen Ansatz ein IR-Laser inkl. einer Ablenkeinheit benötigt, was insgesamt in der gleichen Preisklasse wie eine gekühlte IR-Kamera ist. Außerdem erfordert der Laser aus Sicherheitsgründen eine Abschirmung, was den kompletten Aufbau unhandlich macht.

3. Die Stärke der Hybrid-Kamera besteht darin, dass IR- und Farbkamera den gleichen Blickwinkel auf das Prüfobjekt haben. Gleichzeitig ist kein teurer IR-Laser notwendig, weil die 3D-Oberflächenerfassung mit der Farbkamera und einem einfachen Linienlaser durchgeführt werden kann. Als Textur wird dann das Ergebnis einer aktiven oder passiven Thermografie auf das 3D-Modell projiziert. So vereint man die Vorzüge beider zuvor genannten Ansätze, nämlich den Gebrauch einer bereits vorhandenen 3D-Bildbearbeitungssoftware mit dem Vorteil des gleichen Blickwinkels beider Kameras, wodurch deren Position im Raum nicht kalibriert werden muss.

Im Folgenden wird auf die beiden letzten Ansätze eingegangen, da sie im Labor realisiert werden konnten. Der erste Ansatz wird nicht erläutert, weil die Hybrid-Kamera das gleiche Vorgehen ohne die Positionskalibrierung beider Kameras im Raum ermöglicht.

3D-Oberfläche und Thermografie-Textur mittels IR-Kamera und IR-Lasers

Abb. 3.22 zeigt einen abgeschirmten Aufbau für eine sogenannte Flying-Spot-Thermografie [122, 123]. Dabei wird das Prüfobjekt vertikal oder horizontal mit dem Laserpunkt abgerastert. Die mittels IR-Kamera aufgenommene Bildserie wird wegen der zu unterschiedlichen Zeiten auftretenden Signalmaxima im Speicher umsortiert und anschließend mit Hilfe eines Gradientenfilters ausgewertet [1, 124]. Dadurch erhält man das IR-Ergebnisbild in Abb. 3.23 oben rechts in Falschfarbendarstellung.

Wenn die Laserpunktgeschwindigkeit und die Integrationszeit der IR-Kamera so gewählt werden, dass der Laserpunkt von der Kamera wie eine Linie wahrgenommen wird (s. Abb. 3.22 IR-Bild oben links), dann kann mit Hilfe einer entsprechenden Rekonstruktionssoftware und vorheriger Kalibrierung ein 3D-Modell aus dem Versatz der Laserlinie vom Schirm zum Prüfobjekt, einem Inconel Turbinenschaufelfuß, errechnet werden. Die benutzte Software ist von der DAVID Vision Systems GmbH [125]. Mit dieser Software wurde das 3D-Modell in der Abb. 3.23 oben links erzeugt.

Zur Kalibrierung wird ein zweiter Schirm mit einem ausgedruckten Muster beklebt und gegen den Messschirm ausgetauscht. Dann löst man einen Lichtblitz aus, welcher die Emissivitätsunterschiede des Kalibrierungsmusters für die IR-Kamera sichtbar macht. Nach erfolgreicher Kalibrierung werden die Schirme ausgetauscht. Das Material des

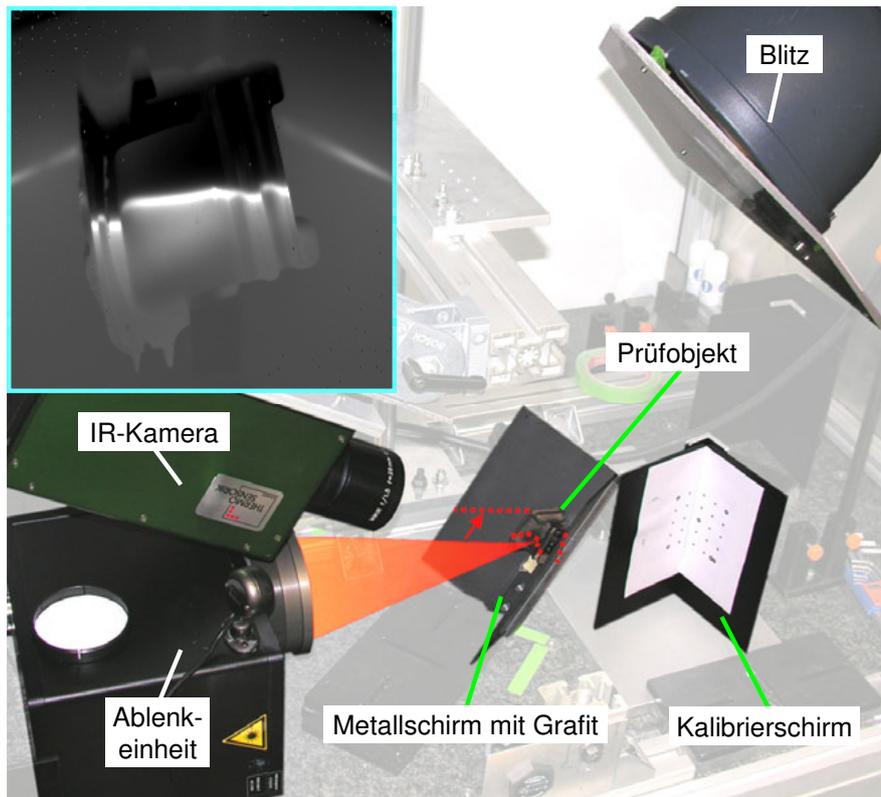


Abb. 3.22: Aufbau einer Flying-Spot-Thermografie mit fokussiertem IR-Diodenlaser (Hersteller: Laserline, Modell: LDM 400-90, Laserklasse 4, Wellenlänge: 980 nm, Laserpunktdurchmesser: 400 μm), Ablenkeinheit (Hersteller: Raylase, Modell: Turboscan-30, maximale Auslenkung pro einzelner Achse: 0,785 rad), IR-Kamera der Thermosensorik GmbH, Modell: CMT 256 MHS und Inconel Turbinenschaufelfuß als Prüfobjekt in der Ecke eines ortskalibrierten Schirms. Im türkisen Rahmen links oben ist ein IR-Bild während des Scans gezeigt.

Messschirms muss ähnliche Emissivität und Wärmeleitfähigkeitseigenschaften haben wie das des Prüfobjekts, damit beim Laser-Scan der Laserpunkt gleich gut auf Schirm und Prüfobjekt zu sehen ist. Deshalb wird der Kalibrierschirm ausgetauscht, da das bedruckte Papier auf dem Schirm im Vergleich zum Inconel des Turbinenschaufelfußes eine zu geringe Wärmeleitfähigkeit hat. Der eingesetzte Messschirm bestand aus 3 mm dickem mit Grafit beschichtetem Stahl. Auch muss darauf geachtet werden, dass das Prüfobjekt möglichst nah am Schirm steht, da der Laserstrahl divergent ist, so dass bei Fokussierung auf das Messobjekt der Laserpunkt auf dem Schirm bereits ein wenig aufgeweitet ist. Dadurch ist er auf Testkörper und Messschirm für die Rekonstruktionssoftware unterschiedlich gut detektierbar.

Durch die gemeinsame Benutzung eines einzigen IR-Laser-Scans kann somit eine Risserkennung und eine 3D-Oberflächenerkennung durchgeführt werden. Mit der Hybrid-Kamera ist man allerdings deutlich flexibler beim Aufbau und bei der Messobjektgröße, angesichts des Verzichts auf einen fokussierten IR-Diodenlaser.

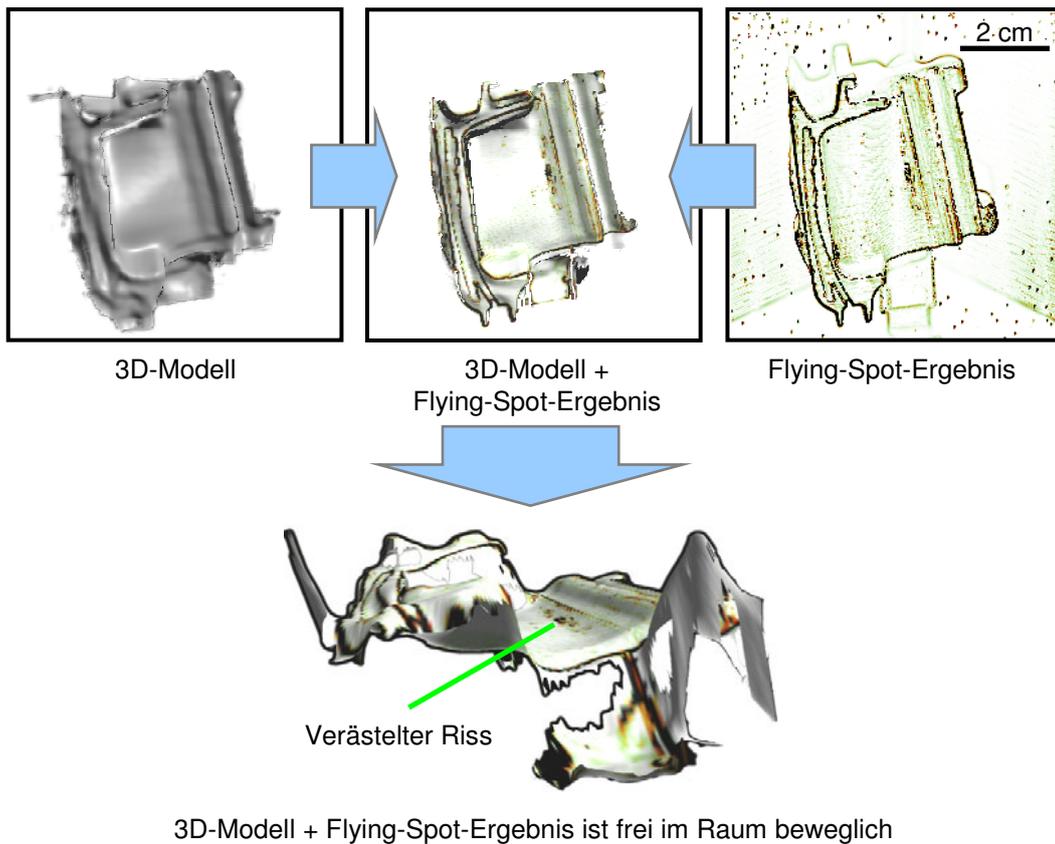


Abb. 3.23: Oben links nach rechts: 1. Mittels IR-Laser-Scan gewonnene 3D-Oberfläche. 2. Zusammenführung der 3D-Oberfläche mit dem Thermografieergebnis aus dem rechten Bild. Unten: Mit dem frei rotierbaren 3D-Modell lässt sich die Position des Defekts auf der komplex geformten Prüfteiloberfläche besser bestimmen.

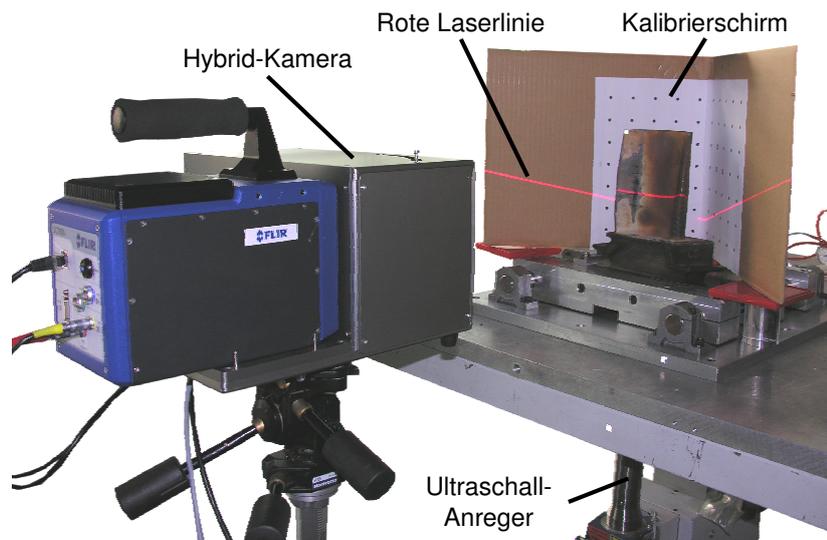


Abb. 3.24: Messaufbau mit Hybrid-Kamera, eingespannter Turbinenschaufel zur Ultraschall-Anregung, kalibriertem Projektionsschirm mit Kalibriermuster und horizontaler roter Laserlinie, die mit der Hand über das Prüfobjekt geführt wird. Aus dem Versatz der Laserlinie von Schirm zu Prüfobjekt wird die 3D-Oberfläche rekonstruiert.

3D-Oberfläche, Thermografie-Textur und Farbbild mittels Hybrid-Kamera und Linienlaser

Dadurch, dass bei der Hybrid-Kamera die IR- und die RGB-Kamera den gleichen Blickwinkel haben lassen sich die Bilder beide Kameras gegeneinander austauschen. Infolgedessen muss nur eine Kamera für die 3D-Oberflächenrekonstruktion kalibriert werden. Deshalb kann auch hier auf die bereits verfügbare 3D-Rekonstruktionssoftware zurückgegriffen werden.

Der Messaufbau, bei dem ein Ultraschall-Thermografieergebnis mit einem 3D-Modell des Prüfobjektes zusammengeführt wird, ist in Abb. 3.24 dargestellt. Da der rote Linielaser eine geringe Divergenz besitzt, keine Abschirmung des Messaufbaus wegen der geringen Laserleistung nötig ist, und die Auflösung der RGB-Kamera entsprechend hoch ist, können wesentlich größere Prüfobjekte, wie die gezeigte Turbinenschaufel deren sichtbare Höhe 23,3 cm beträgt, selbst mit der Hand gescannt werden.

Die Rekonstruktion eines solchen Scans ergibt das 3D-Modell in Abb. 3.25 oben links. Anschließend wird eine Ultraschall-Thermografie durchgeführt, deren Ergebnis dann wahlweise mit dem RGB- oder dem IR-Bild zusammengeführt werden kann. Die Abb. 3.25 oben rechts zeigt das Farbkamerabild, welches mit dem Thermografieergebnis fusioniert wurde. Dieses Bild wird dann als Textur auf das 3D-Modell projiziert, wie in der Abb. 3.25 oben Mitte zu erkennen ist.

In den Ansichten in Abb. 3.25 unten ist auf dem 3D-Modell links das Thermografieergebnis gemeinsam mit dem Farbbild dargestellt und rechts statt dem Farbbild mit dem IR-Kamerabild abgebildet. Damit das gesamte Prüfteil rekonstruiert werden kann, müsste man das Prüfobjekt vor dem kalibrierten Schirm drehen.

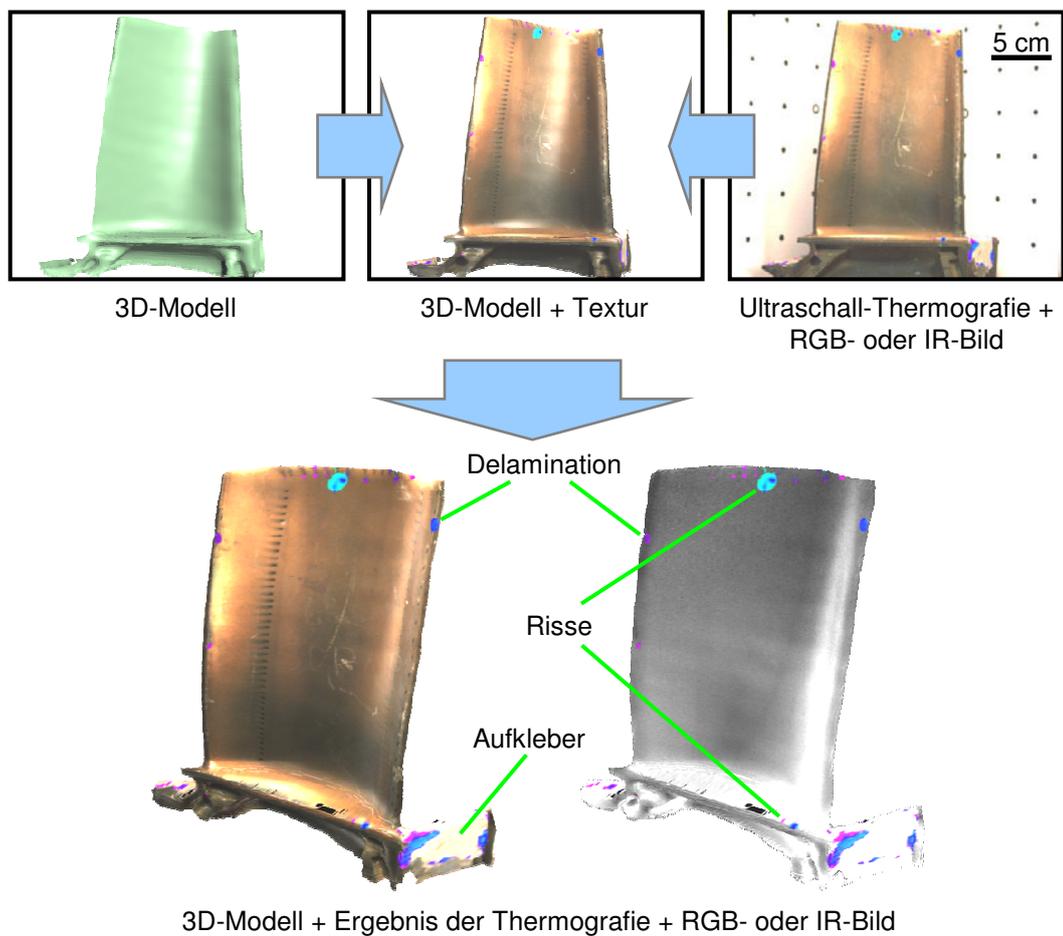


Abb. 3.25: Oben links nach rechts: 1. Mittels RGB-Kamera gewonnene 3D-Oberfläche. 2. Zusammenführung der 3D-Oberfläche mit dem Hybrid-Bild aus der rechten Grafik. Im Hintergrund des rechten Bildes ist das Kalibrieremuster zu erkennen, welches für die Messung mit dem Linienlaser nicht ausgetauscht werden muss. Unten: Mit dem frei rotierbaren 3D-Modell lässt sich die Position des Defekts auf der komplex geformten Prüfteiloberfläche besser bestimmen.

Der Vergleich mit der 3D-Oberflächenerfassung mittels IR-Laser und IR-Kamera (s. Abb. 3.22) zeigt, dass die Hybrid-Kamera die einfachere Zugänglichkeit zu einer 3D-Formfassung und die spätere Zusammenführung mit einer Ultraschall-Thermografie ermöglicht. Die Kombination mit einer Blitz- oder Induktionsthermografie ist auch ohne Weiteres möglich. Der Linienlaser hat im Vergleich zu dem fokussierten IR-Laser den Vorteil, dass unter Beachtung der Sicherheitsvorschriften für den benutzten Linienlaser ohne Abschirmung des Aufbaus gearbeitet werden kann. Außerdem können wegen der geringen Divergenz des Linienlasers wesentlich größere Objekte abgescannt werden als es ein fokussierter IR-Laser ermöglicht.

3.2.5 Spektral selektive Einblendung der Farbkamerainformation in das IR-Kamerabild

Wie bereits erwähnt ermöglicht die Hybrid-Kamera eine bessere visuelle Lokalisierung von Defekten. Allerdings will man nicht, wie in Abb. 3.2 dargestellt, die im Prüfteil gefundenen Defekte mit einem Zeigestab durch Vergleich mit dem Ergebnisbild auf dem Computermonitor abgleichen, um sie dann zu markieren. Viel eher will man einen Defekt auf dem Monitor kennzeichnen und sich diesen dann z. B. mit einem Laserkreuz auf dem Prüfteil anzeigen lassen. Außerdem soll für die Kennzeichnung auf dem Bildschirm nur das IR-Bild benutzt werden und entsprechend soll die Position der aktuell mittels Laserkreuz markierten Stelle im IR-Bild zur Kontrolle dargestellt werden. Denn oftmals hat man im IR-Bild störende Reflexionen von Lampen oder man will eine feuchte Stelle in einer Mauer auffinden, welches beides nur mit der IR-Kamera sichtbar ist, so dass eine Steuerung des Laserkreuzes aus dem RGB-Bild heraus nicht möglich ist. Auch bei diesem Problem bietet die Hybrid-Kamera eine passende Lösung.

Da die Farbkamera selbst bereits drei eingebaute Spektralbereiche nutzt, kann damit eine monochromatische Lichtquelle im sichtbaren Wellenlängenbereich gefiltert werden, um sie im IR-Bild darzustellen, wie in Abb. 3.26 gezeigt ist.

Da für die IR-Kamera rote, grüne oder blaue Laserquellen nicht messbar sind, ist eine Markierung von Defekten, welche für die IR-Kamera und den Prüfer sichtbar sind technisch höchstens mit einem leistungsstarken IR-Diodenlaser realisierbar, welcher das Prüfobjekt lokal erwärmt (vgl. Kap. 3.2.4). Viel einfacher ermöglicht die Hybrid-Kamera eine Markierung von Defekten mit Hilfe eines Laserkreuzes. Die Positionsbestimmung des Laserkreuzes wird mittels der RGB-Kamera durchgeführt und kann wegen des parallaxenfreien Blickwinkels direkt in das IR-Bild übernommen werden, ohne dass die IR-Kamera die Laserlinie detektiert. Außerdem lässt sich durch die einfache Extrahierung des Laserkreuzes aus dem RGB-Bild das Laserkreuz an die Position eines thermografisch detektierten Defektes führen, um diesen zu markieren. Auch hier ermöglicht der gleiche Blickwinkel der RGB- als auch der IR-Kamera eine einfache kalibrierfreie Steuerung der Laserlinie in horizontaler und vertikaler Richtung.

Mit Hilfe von Abb. 3.27 wird schematisch in drei Schritten die Filterung eines roten Laserkreuzes aus dem RGB-Bild skizziert:

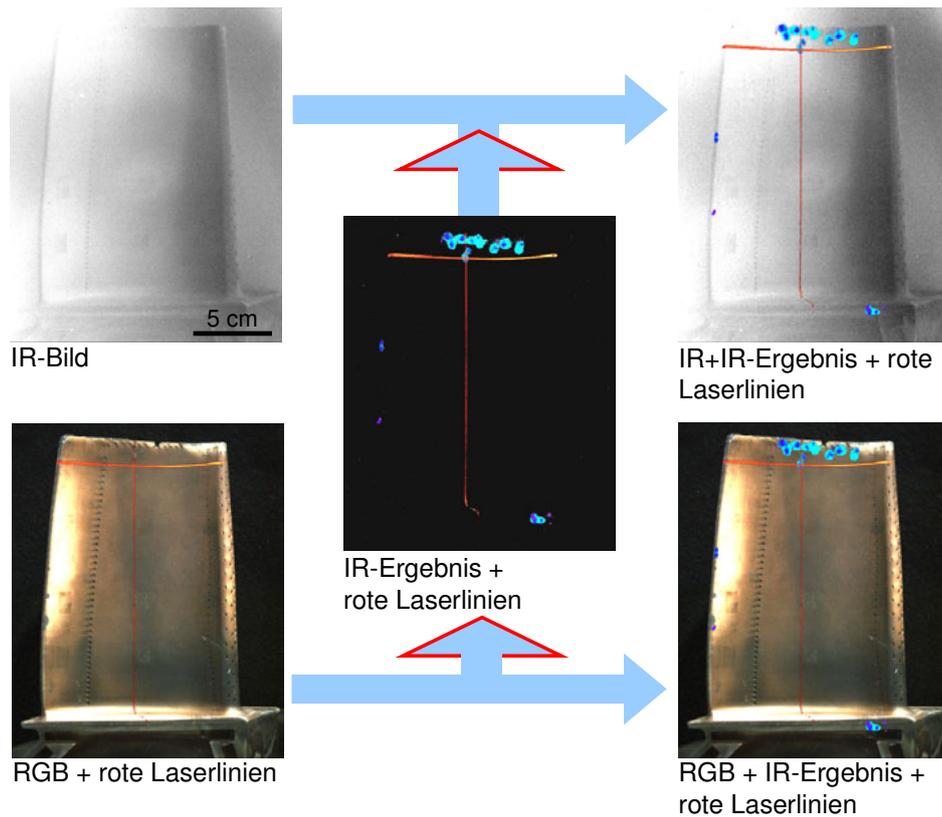


Abb. 3.26: Aus dem RGB-Bild links unten wird das rote Laserkreuz gefiltert, so dass es an eine Markierung im Thermografieergebnis (Mitte) oder im IR-Bild (links oben) gesteuert werden kann. Zur Kontrolle wird das gefilterte Laserkreuz im IR-Bild mit den Indikationen für die Defekte angezeigt (rechts oben) und gleichzeitig ist das Bauteil für den Prüfer mit dem roten Laserkreuz markiert (rechts unten).

1. Im ersten Schritt wird das RGB-Bild in die drei Spektralbereiche rot, grün und blau aufgespaltet (s. Abb. 3.27 erster Schritt). Wie erwartet, ist die rote Laserlinie hauptsächlich im roten Spektralbereich sichtbar. Im grünen Spektralbereich ist sie aufgrund der Kameraempfindlichkeit (Abb. 3.27 oben links) deutlich schwächer in ihrer Intensität.
2. Im zweiten Schritt wird die wellenlängenabhängige Farbkameraempfindlichkeit zur Filterung des Laserkreuzes P_{Laser} ausgenutzt.

$$P_{\text{Laser}} = \begin{cases} P_{\text{RGB}} : S_{\text{RG}} > P_{\text{RGB-R}} - P_{\text{RGB-G}} \wedge S_{\text{RB}} > P_{\text{RGB-R}} - P_{\text{RGB-B}} \\ (0 \mid 0 \mid 0) : S_{\text{RG}} \leq P_{\text{RGB-R}} - P_{\text{RGB-G}} \wedge S_{\text{RB}} \leq P_{\text{RGB-R}} - P_{\text{RGB-B}} \end{cases} \quad (3.7)$$

Über einen Schwellwert, welcher die Differenz von rotem zu grünem (S_{RG}) oder/und rotem zu blauem (S_{RB}) RGB-Kamerakanal prüft, lässt sich die rote Laserlinie filtern.

3. Im dritten Schritt wird die so gefilterte Laserlinie mit dem Thermografieergebnis zusammengeführt. Das so entstandene Endergebnis kann dann wiederum mit dem IR- oder RGB-Bild kombiniert werden, wie in Abb. 3.26 rechts oben und unten dargestellt ist.

Durch die Auswertung des Kreuzungspunktes der gefilterten horizontalen und vertikalen Laserlinie aus Abb. 3.27 kann er kalibrierfrei gesteuert werden, indem er interaktiv von einer Software dem Zielpunkt genähert wird. Somit lässt sich ein im Infraroten detektierter Defekt mit dem Laserkreuz auf dem Prüfteil markieren, was durch die Abbildung der gefilterten Laserlinie im IR-Bild verifiziert werden kann.

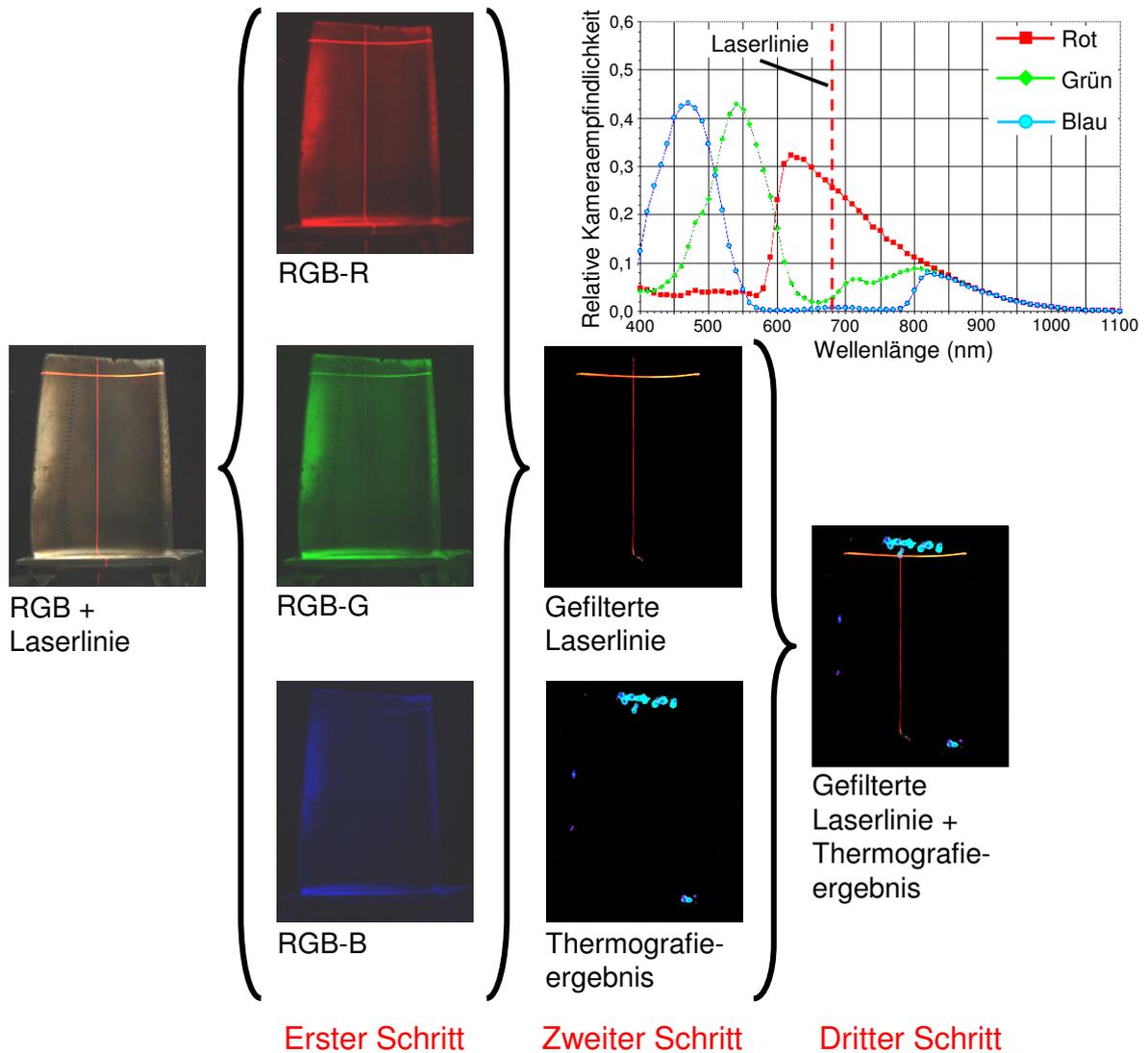


Abb. 3.27: Filterung des roten Laserkreuzes mit den drei Spektralbereichen der RGB-Kamera. Erster Schritt: Aufspaltung des RGB-Bildes in die drei Spektralbereiche. Zweiter Schritt: Ausnutzung der monochromatischen Laserstrahlung zum Extrahieren des Laserkreuzes. Dritter Schritt: Zusammenführung des gefilterten Laserkreuzes mit dem IR-Ergebnis. Oben rechts: Farbkameraempfindlichkeitskurven des roten, grünen und blauen Spektralbereichs [71].

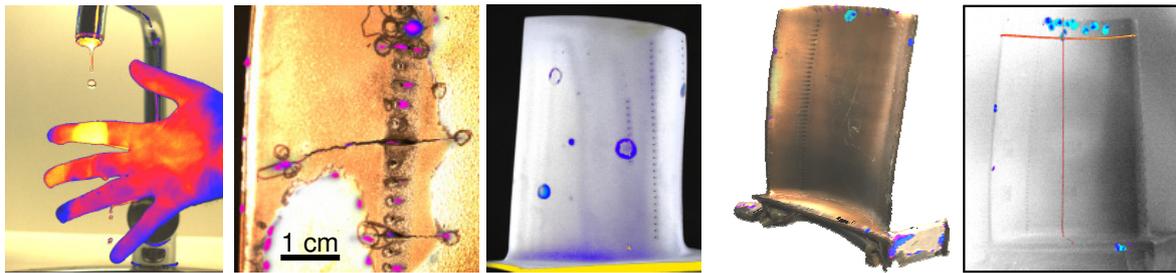


Abb. 3.28: Bilder von links nach rechts. 1. Oberhalb eines eingestellten Schwellwertes im IR-Bild wird das Infrarote im RGB-Bild dargestellt (Kap. 3.1.5). 2. Die Ausrichtung der RGB- zur IR-Kamera erlaubt die Überlagerung einer Ultraschall-Thermografie auf das Farbbild (Kap. 3.2.2). 3. Die Farbbildhelligkeit wird genutzt, um die Interpretationsfähigkeit einer Blitzthermografie zu erhöhen (Kap. 3.2.3). 4. Erlangung des 3D-Oberflächenmodells inkl. der Farbbild- und IR-Defektbildtextur (Kap. 3.2.4). 5. Spektral selektive Einblendung der Farbkamerainformation in das IR-Bild (Kap. 3.2.5).

3.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Hybrid-Kamera eingeführt, die erlaubt, zwei weit auseinander liegende Spektralbereiche, nämlich den sichtbaren und den infraroten, zu einem Bild parallaxenfrei und zeitsynchron zusammenzuführen.

Dabei kann der infrarote Spektralbereich genutzt werden, um entweder die Farb- oder die IR-Information ein- oder auszublenden (s. Abb. 3.28 linkes Bild).

Das zweite Beispiel hat gezeigt, wie aufgrund der Passgenauigkeit von IR- zu RGB-Bild die Quelle von Erwärmungen visuell besser identifiziert werden kann, wodurch sich Risserwärmungsmechanismen einfacher studieren lassen (s. Abb. 3.28 zweites Bild).

Im dritten Beispiel wurde die Information des sichtbaren Spektralbereichs genutzt, um oberflächliche Verschmutzungen zu markieren, die eine Übereinstimmung mit einer Indikation im Blitzthermografieergebnis haben. Dadurch lassen sich Prüfteile zuverlässiger bewerten, weil die Fehlinterpretation einer Blitzthermografie verringert wird (s. Abb. 3.28 drittes Bild).

Im vierten Beispiel ließ sich mit einer käuflichen 3D-Oberflächenrekonstruktionssoftware ein 3D-Modell des Prüfteils erstellen, auf welches dann das Ergebnis einer Thermografie projiziert wurde. Dies war in der vorgestellten Einfachheit nur mit der Hybrid-Kamera zu bewerkstelligen (s. Abb. 3.28 viertes Bild).

Im letzten Beispiel konnte ein roter Laser aus dem RGB-Bild gefiltert werden, den man dann im IR-Bild dargestellt hat. Durch die Überlagerung von RGB- und IR-Bild konnte dann mit der Information aus dem RGB-Bild der Laserstrahl an die Position eines thermografisch detektierten Defekts geführt werden, um so den Riss auf dem Bauteil zu markieren (s. Abb. 3.28 fünftes Bild).

Im nächsten Kapitel wird nicht mehr der sichtbare und der infrarote Spektralbereich betrachtet, sondern man teilt den Empfindlichkeitsbereich einer MWIR-Kamera mit Hilfe von IR-Bandpassfiltern in vier IR-Banden auf. Durch diesen Ansatz lässt sich

die wellenlängenabhängige Materialcharakteristik im Infraroten ausnutzen, um mittels aktiver Thermografie eine Verschmutzungserkennung von Prüfteilen durchzuführen. Außerdem wird gezeigt, wie sich mit den vier IR-Banden eine Materialerkennung realisieren lässt.

4 Spektral aufgelöste Thermografie

4.1 Verschmutzungserkennung

Im vorangegangenen Kapitel wurde der sichtbare mit dem MWIR-Spektralbereich ($1,5 - 5,1 \mu\text{m}$) zu einem aussagekräftigeren neuen Bild zusammengeführt. Im folgenden Kapitel wird der Spektralbereich einer MWIR-Kamera mittels dielektrischer IR-Bandpassfilter in vier aneinandergrenzende Spektralbereiche aufgeteilt. Das Ziel besteht darin, mit Hilfe der Blitzthermografie die wellenlängenabhängige Emissivität (Kap. 2.6) von Materialien im Wellenlängenbereich von $3,4 - 5,1 \mu\text{m}$ auszunutzen [2, 4, 5], um ein Bild zu erzeugen in dem oberflächliche Verschmutzungen gefiltert sind. Danach können mit diesem Bild in einer aktiven Ultraschall-Thermografie Fehlanzeigen maskiert oder gefiltert werden, so dass die in Abb. 4.1 links markierten Verschmutzungen nicht mehr oder in einer anderen Farbe erscheinen und sich somit farblich von den Indikationen für Risse unterscheiden. Dabei wird das Ziel verfolgt jegliche Verschmutzungen auf dem Prüfteil zu detektieren, ohne Wissen über deren Materialzusammensetzung. Dazu wurden exemplarisch verschiedene in einer Werkstatt eingesetzte Fette untersucht, um die Einsetzbarkeit der spektralen Thermografie zu ermitteln.

Zu Beginn wird eine referenzierte Verschmutzungs-/Kontaminationserkennung vorgestellt, welche ohne den Einsatz von IR-Filtern auskommt. Dabei wird auf Probleme des Verfahrens eingegangen, die nur durch den Gebrauch von IR-Bandpassfiltern gelöst werden können.

Die referenzierte Methode basiert auf der Verwendung einer geeigneten, das Bauteil charakterisierenden sauberen Referenz, um die Messapparatur zu kalibrieren. Durch pixelweisen Vergleich aller Bilder der Blitzthermografie mit einem passenden Bild der Referenz wird zwischen sauberer und kontaminierter Prüfteiloberfläche unterschieden.

Bei der referenzfreien Kontaminationserkennung werden IR-Bandpassfilter eingesetzt, um mittels spektral detektierender Blitzthermografie spektral aktive von nicht aktiven Materialien auf beliebig geformten Messobjekten unterscheiden zu können. Hierbei ist durch den Einsatz von Spektralfiltern die Prüfmethode unabhängig von einer Referenz einsetzbar, weil der spektrale Unterschied zwischen biologischen und metallischen Materialien ausgewertet wird.

In Abb. 4.1 rechts ist ein Foto des Prüfteils zu sehen, das in weiten Teilen des Kapitels benutzt wird. Es handelt sich um eine mit Fotolack beschichtete Gasturbinenschaufel aus Inconel mit Kühlluftbohrungen, auf die zusätzlich drei verschiedene Fette in jeweils drei verschiedenen Schichtdicken aufgetragen wurden. Diese sollen beispielhafte Verschmutzungen darstellen, wie sie auch im normalen Betrieb entstehen können. Die

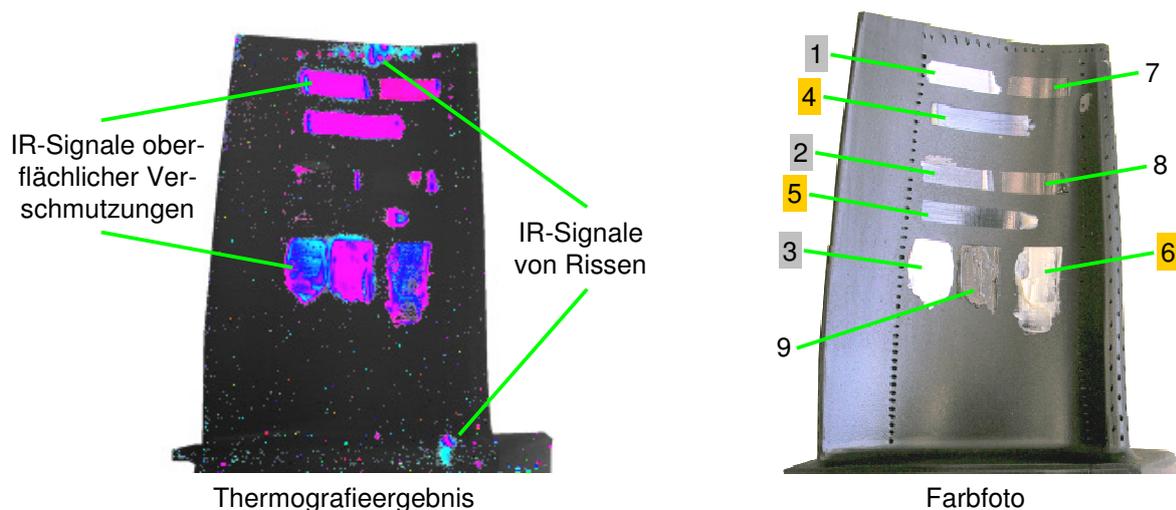


Abb. 4.1: Links: Darstellung des Amplituden- und des Phasenbildes einer Ultraschall-Thermografie im HSV-Farbraum entsprechend dem Beispiel aus Kap. 3.2.2. Rechts: Farbfoto des Prüfteils, einer mit Fotolack beschichteten Turbinenschaufel. Aufgebrachte Kontaminationen: 1, 2 und 3 (grau hinterlegt): Molykote: 150 μm dick, 50 μm dick und grob aufgetragen. 4, 5 und 6 (gelb hinterlegt): Hochgeschwindigkeitsfett: 150 μm dick, 50 μm dick und grob aufgetragen. 7, 8 und 9: Ceplattyn 300: 150 μm dick, 50 μm dick und grob aufgetragen.

Namen und Schichtdicken der Fette bzw. Verschmutzungen können der Bildunterschrift entnommen werden.

Im Folgenden wird als Erstes auf die referenzierte Verschmutzungserkennung ohne den Einsatz von IR-Filtern eingegangen. Danach folgt die referenzfreie Verschmutzungserkennung unter Benutzung von IR-Filtern.

4.1.1 Referenzierte Verschmutzungserkennung

Bei der referenzierten Verschmutzungserkennung kann auf den Einsatz von IR-Filtern vollständig verzichtet werden, da das Prüfteil mit einer passenden Referenz abgeglichen wird, wodurch der Vergleich zwischen unterschiedlichen Spektralbereichen entfällt. Als Referenz nutzt man entweder ein sauberes baugleiches Prüfteil oder, wie in dem folgenden Beispiel, eine das Prüfteil charakterisierende unverschmutzte Oberfläche. Dann wird für jedes Pixel die Differenz zum Mittelwert aller Pixel der Referenz gebildet und das für jedes einzelne Bild der Blitzthermografie. Ein so entstandenes Differenzbild ist in Abb. 4.2 links für eine unbeschichtete Turbinenschaufel aus Inconel zu sehen. Das entsprechende Farbfoto ist in der Abb. 4.2 rechts dargestellt.

Die referenzlose Verschmutzungserkennung wird anhand einer einzigen normierten Blitzthermografie durchgeführt. Ausgewertet wird ein Bild, dessen totaler Mittelwert aller Pixel die geringste Differenz zur Referenz hat. Große Abweichungen von der Referenz sind heller dargestellt und weisen auf oberflächliche Kontamination hin. Die Verschmutzungen lassen sich bis auf Kontamination Nr. 6 (s. Abb. 4.2 rechts) recht gut

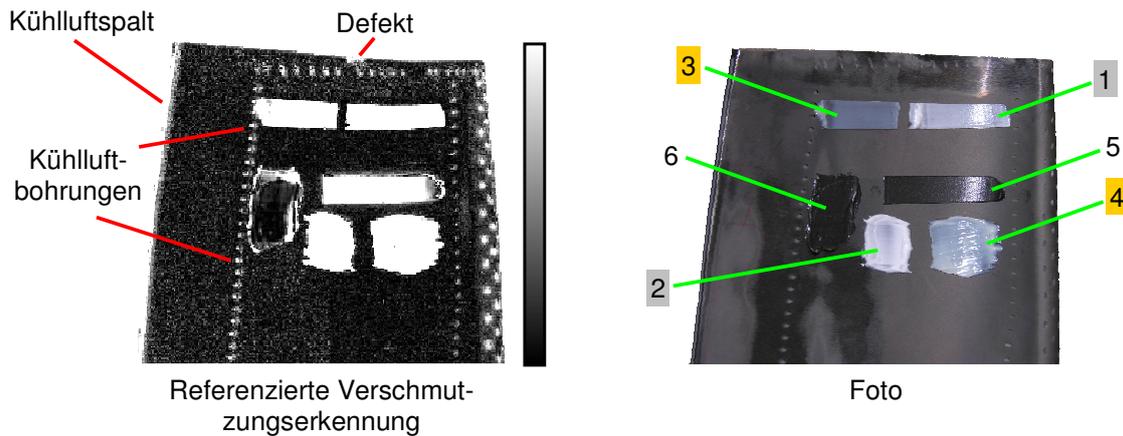


Abb. 4.2: Links: Differenzbild der referenzierten Verschmutzungserkennung in einer Grauwertdarstellung. Rechts: Farbbild des benutzten Prüfteils einer unbeschichteten Inconel Gasturbinenschaufel ohne Beschichtung. Zusätzlich Aufgebrachte Kontaminationen: 1 und 2 (grau hinterlegt): Molykote: 150 μm dick und grob aufgetragen. 3 und 4 (gelb hinterlegt): Hochgeschwindigkeitsfett: 150 μm dick und grob aufgetragen. 5 und 6: Ceplattyn 300: 150 μm dick und grob aufgetragen.

vom Metall der Schaufel unterscheiden. Dies liegt an dem sehr unterschiedlichen Signalverlauf im Vergleich zum Inconel, wie in Abb. 4.3 zu erkennen ist.

In der Grafik sind zu ausgewählten ROIs (Regions of Interest) in Abb. 4.3 unten rechts die entsprechenden IR-Signalverläufe der normierten Blitzthermografieserie dargestellt. Bei Kontamination Nr. 6, dem Ceplattyn 300, handelt es sich um eine Graphitpaste mit Hochdruck- und Haftzusätzen, die einen oberflächlichen Absorber für den Blitzpuls darstellt und sowohl optisch als auch thermisch dick ist (s. Abb. 2.8). Das detektierte Signal ist dann in der normierten Darstellung, wie in Kap. 2.9 gezeigt, gleich dem des Inconels bis die Wärme zum Turbinenschaufelbasismaterial diffundiert ist. Bei den schräg in die Turbinenschaufelwand gelaserten Kühlluftbohrungen sieht man, dass es wegen der geringeren Wandstärke schneller zu einem Wärmestau kommt im Vergleich zum restlichen Teil der hohlen Turbinenschaufel. Dasselbe Verhalten trifft sowohl auf den Defekt, der sich an einer besonders dünnen Stelle der Schaufel befindet, als auch auf den Kühlluftspalt zu, an dem Vorder- und Rückseite der Schaufel zusammenlaufen. Denn bei dünnen Wandstärken kommt es früher zu einem detektierbaren Wärmestau an der Rückseite, welcher sich dann stark von der Referenz an einer dicken Fläche unterscheidet. Da das Ergebnisbild 0,13s nach der Blitzanregung aufgenommen wurde, konnte auch noch das 150 μm dicke Ceplattyn im Gegensatz zum wesentlich dicker aufgetragenen Ceplattyn (Nr. 6) unterschieden werden, da es früher zu einem Wärmestau an der Rückseite gekommen ist. Wenn sich das Signal des Ceplattyns früher vom IR-Signal des Inconels trennen würde, könnte man ein früheres Bild als Ergebnis wählen, in dem die Kühlluftbohrungen nicht als Verschmutzungen erkannt werden.

Das heißt, dass für die erfolgreiche Detektion von Verschmutzungen die jeweilige Schichtdicke ein wichtiger Parameter ist.

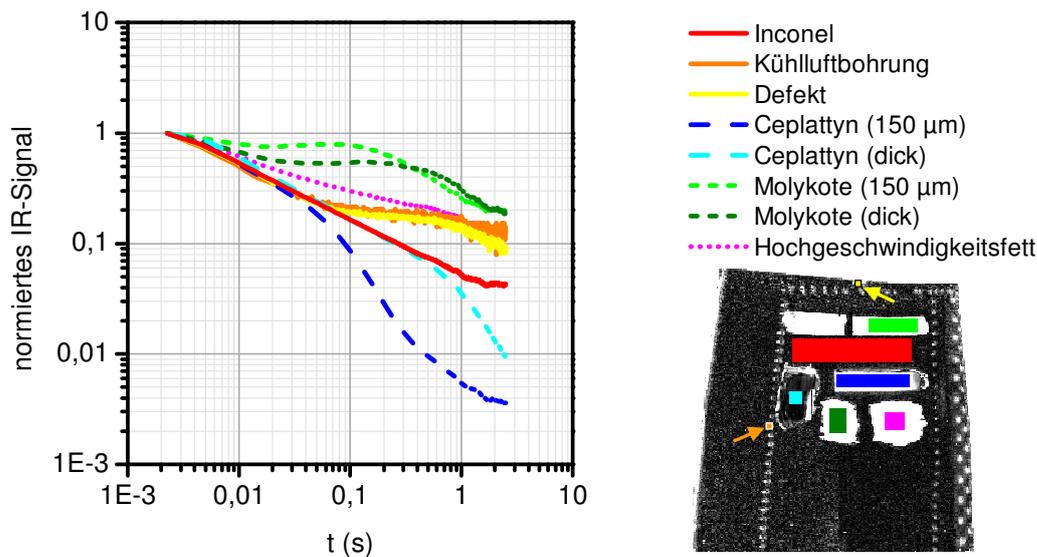


Abb. 4.3: Darstellung des IR-Signals der normierten Blitzthermografieserie für ausgewählte ROIs (Regions of Interest). Die Position und Größe der ROIs sind im Bild unten rechts markiert.

Die gezeigte Methode kann nicht einwandfrei zwischen Verschmutzungen und bauteilspezifischen Eigenheiten des Prüfteils wie z. B. der unterschiedlichen Materialdicke unterscheiden.

Um das Problem zu lösen, wird durch IR-Bandpassfilter eine spektral detektierende Blitzthermografie durchgeführt, die es ermöglicht zwischen dem spektral nicht aktiven Basismaterial und den spektral aktiven Verschmutzungen zu unterscheiden. Auf diese Weise werden nur oberflächliche Verschmutzungen und keine Variationen in der Materialdicke des Prüfteils als Kontaminationen erkannt.

4.1.2 Spektral detektierende IR-Kamera

In den folgenden Kapiteln wird das Ziel verfolgt durch die Ausnutzung der spektralen Eigenschaften von unterschiedlichen Materialien eine kalibrierfreie also referenzfreie Verschmutzungserkennung mit Hilfe der spektral detektierenden Blitzthermografie zu realisieren. Auf diese Weise sind Schichtdickenunterschiede eines spektral geringfügig aktiven Basismaterials genauso unproblematisch wie Defekte im Bauteil. Das Ergebnisbild soll dazu dienen die gefundenen Indikationen in einer Ultraschall-Thermografie zu filtern, um so zwischen oberflächlichen Verschmutzungen und Defekten im Bauteil zu unterscheiden.

Um der IR-Kamera zu ermöglichen, IR-farbig zu sehen, wurde der gesamte Spektralbereich der Kamera durch die IR-Filter in Abb. 4.4 in vier Spektralbereiche aufgeteilt. Dabei galten folgende Überlegungen für die Wahl eines geeigneten Filtersatzes:

1. Das Filtersubstrat soll für alle Filter einheitlich sein, damit keine Bildfeldhebung beim Wechsel der Filter durch unterschiedliche Brechungsindizes auftritt.

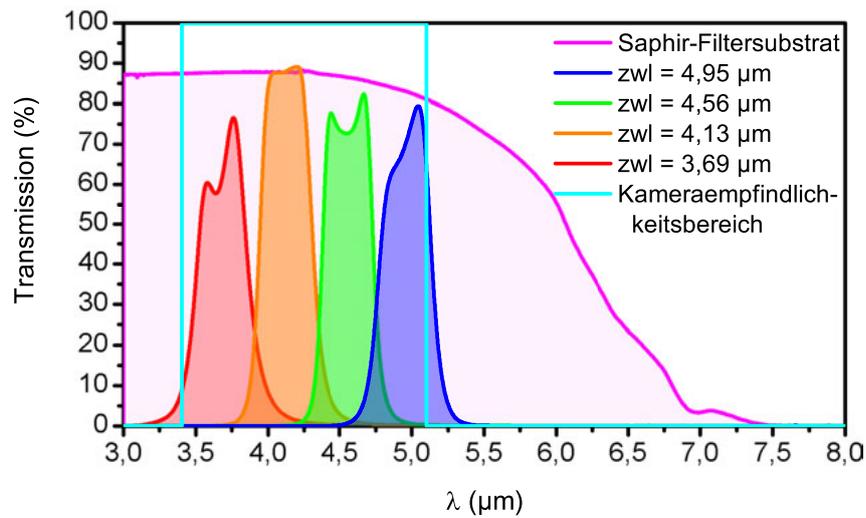


Abb. 4.4: Transmissionskennlinien des Saphir-Filtersubstrats (Dicke = 1 mm) ohne Antireflexionsbeschichtung; IR-Filter mit der zentralen Wellenlänge (zwl) = 3,69 μm mit einer Bandbreite (bw) von 10,46 %, IR-Filter mit einer zwl = 4,13 μm (bw = 9,06 %), IR-Filter mit einer zwl = 4,46 μm (bw = 8,26 %), IR-Filter mit einer zwl = 4,95 μm (bw = 7,78 %)

Die Änderung des Brechungsindex würde die Fokusebene verschieben, wodurch nachfokussiert werden müsste, was eine pixelgenaue Überlagerung der Bilder nach dem Filterwechsel unmöglich machen würde.

2. Entsprechend muss das Filtersubstrat für alle Filter eine einheitliche Dicke haben.
3. Der Spektralbereich der IR-Kamera soll möglichst gleichmäßig ohne Lücken oder Überlappungen bezogen auf die Halbwertsbreite aufgeteilt sein, um möglichst viel IR-Signal zu detektieren und gleichzeitig die spektrale Signatur eines Materials einem bestimmten Spektralbereich zuordnen zu können.
4. Da die betrachteten IR-Signale bei einer Blitzthermografie im Bereich der Raumtemperatur liegen, wird das gemessene Signal bei kleineren Wellenlängen geringer sein. Deshalb sollte die Bandbreite bei kleineren Wellenlängen größer sein (vgl. Abb. 2.2).
5. Eine hohe detektierte Signalintensität verlangt einen breitbandigen Filter. Im Gegensatz dazu benötigt eine hohe spektrale Selektivität einen schmalbandigen Filter. In beiden Fällen sollte die Transmission möglichst hoch sein. Da die weiteren Experimente bei Zimmertemperatur stattfinden, wurde der breitbandigen Detektion Vorrang gegeben.

Der bei der Firma Laser Components GmbH bestellte Filtersatz (s. Abb. 4.4) wurde entsprechend den genannten Überlegungen für die IR-Kamera in Abb. 4.5 links angefertigt.

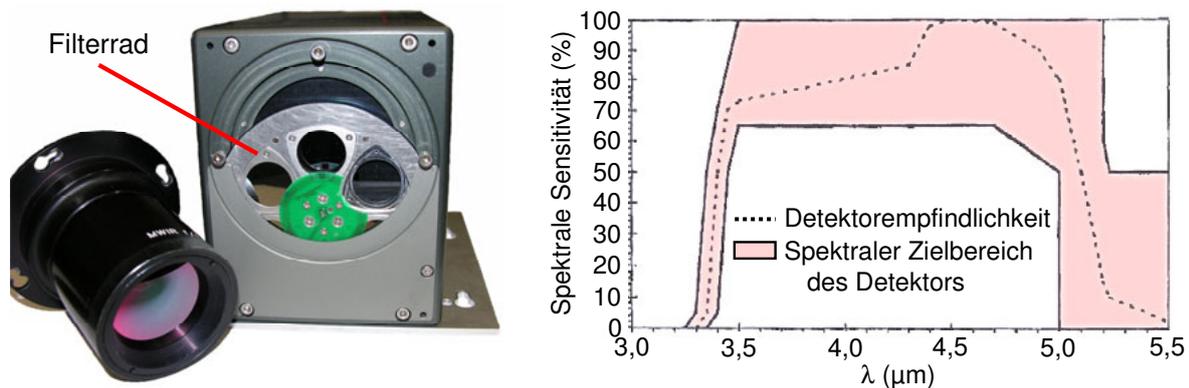


Abb. 4.5: Links: IR-Kamera Modell: CMT 256 MHS der Firma Thermosensorik GmbH mit einem spezifizierten Empfindlichkeitsbereich von 3,4–5,1 μm . Rechts: Kameraempfindlichkeitskurve des Kameraherstellers. Gestrichelt dargestellt ist die spektrale Empfindlichkeit des eingebauten IR-Detektors. In den durchgezogenen Linien ober- und unterhalb der gestrichelten Kurve ist der spektrale Zielbereich des Detektorherstellers eingezeichnet, in dem die Detektorempfindlichkeit bei Auslieferung des Detektors liegen muss.

Um eine möglichst reproduzierbare pixelgenaue Abbildung bei Filterwechsel zu gewährleisten, wurde die IR-Kamera mit einem positionierbaren Filterrad für sechs 1 Zoll-IR-Filter, wie in Abb. 4.5 links zu sehen ist, nachgerüstet.

Ursprünglich wurde mit IR-Filterschiebern gearbeitet, die allerdings den Nachteil hatten, dass keine reproduzierbare Positionierung der Filter in der Kamera erreicht wurde. Außerdem kam es nach dem Einsetzen zu einer Signaldrift, da sich die Filter auf Kameratemperatur aufwärmten und somit selbst zum thermischen Strahler wurden.

4.1.3 Simulation der Filterverkipfung

Der Einfluss von Filterverkipfungen aufgrund von Fertigungstoleranzen und der Befestigung der Filter im Filterrad wurde mit dem Programm ZEMAX simuliert. Dabei wurden Bildverschiebungen bis zu einem Verkipfungswinkel von 5° für ein Saphir-Glas mit einer Stärke von 1 mm angenommen.

Mit dem Programm ZEMAX wurde das Modell aus Abb. 4.6 rechts mit der Strahlungsquelle aus Abb. 4.6 links simuliert. Die Software ermöglicht Design und Analyse von optischen Systemen durch Nachahmung der Strahlengänge für ein angenommenes Modell. Dadurch konnte berechnet werden, wie sich die Abbildung auf den IR-Detektor bei Veränderung des Neigungswinkels der IR-Filter verändert. Die Quellen der IR-Strahlung sind hier konzentrische Kreise, welche in den Detektor abgebildet werden. Bei simulierter Verkipfung des IR-Filters werden die Ringe mit einem seitlichen Versatz abgebildet.

Für ein Standard-IR-Objektiv im Wellenlängenbereich von 3–5 μm errechnete sich eine annähernd lineare Bildverschiebung von 11 $\mu\text{m}/\text{Grad}$. In Anbetracht der Tatsache, dass die IR-Kamera eine Detektorgröße von $256 \times 256 \text{ Pixel}^2$ bei einem Pixelraster

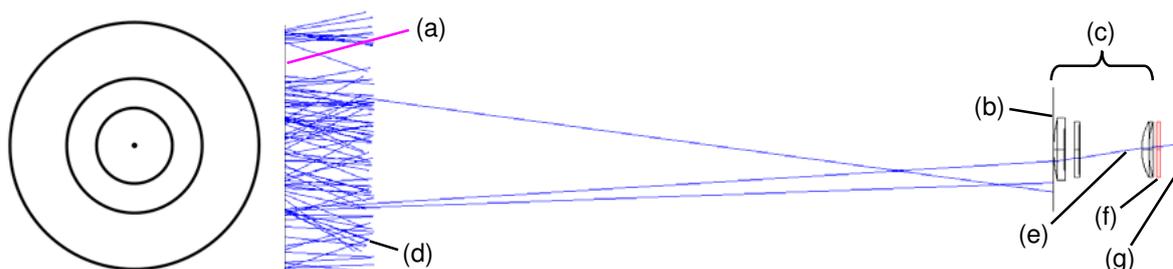


Abb. 4.6: Links: Grafik mit schwarzen konzentrischen Ringen, welche die Strahlungsquelle für die Simulation rechts darstellt. Rechts: ZEMAX-Simulation, bei der 267.000 auf dem IR-Detektor ankommende IR-Strahlen berechnet wurden. Die Strahlungsquelle emittiert statistisch verteilt IR-Strahlen in den Halbraum, und nur diejenigen, die den Detektor treffen, werden betrachtet. (a) Schwarze Ringe sind die Quellen der IR-Strahlung. (b) Der Strahlengang wird nur für diejenigen IR-Strahlen berechnet, welche durch das Objektiv propagieren. (c) IR-Objektiv. (d) Alle von der Kreisgrafik in den Halbraum emittierten IR-Strahlen. (e) Nur Strahlen, die auf den Detektor treffen, werden betrachtet. (f) IR-Filter. (g) IR-Detektor.

von $40\ \mu\text{m}$ und einer aktiven Pixelfläche von $35 \times 35\ \mu\text{m}^2$ hat, ist man damit bei einer Bildverschiebung im Subpixelbereich, wenn man Verkippungen kleiner als 1° erreicht.

Die Überlagerung der Ergebnisse für einen Neigungswinkel von 0° , 1° und 5° des IR-Filters sind in Abb. 4.7 dargestellt.

In Abb. 4.7 oben ist gut erkennbar, dass aufgrund der angenommenen Filterverkippung von 5° die ideale Abbildung (grüne Pixel) nicht mit der unter verkipptem Winkel (rote Pixel) zur Deckung gebracht wird. Das entspricht dem Fall einer um $55\ \mu\text{m}$ seitlichen Verschiebung der Abbildung auf dem Detektor. Das heißt, dass die Bildverschiebung > 1 Pixel ist.

In dem Fall einer Verkippung des Filters um 1° (Abb. 4.7 Mitte) ist die berechnete Verschiebung im Subpixelbereich von nunmehr $11\ \mu\text{m}$ allerdings noch sichtbar. Daraus lässt sich ableiten, dass selbst geringste Verkippungen der vier IR-Filter untereinander dazu führen, dass die Abbildung des Prüfobjekts in den IR-Detektor insbesondere an Kanten nicht ideal sein könnte.

Abb. 4.7 unten zeigt, wie die Ringstruktur aus Abb. 4.6 links ohne Filterverkippung in den 256×256 Pixel² Detektor abgebildet werden würde.

Abhilfe würde hier lediglich eine Dualband- oder Dualwavelength-Kamera bringen, die gleichzeitig mit einem Detektor in zwei Spektralbereichen messen kann. Die Messungen der Filterverkippung an der verwendeten Kamera mit Filterrad erfolgt in Kap. 4.1.5.

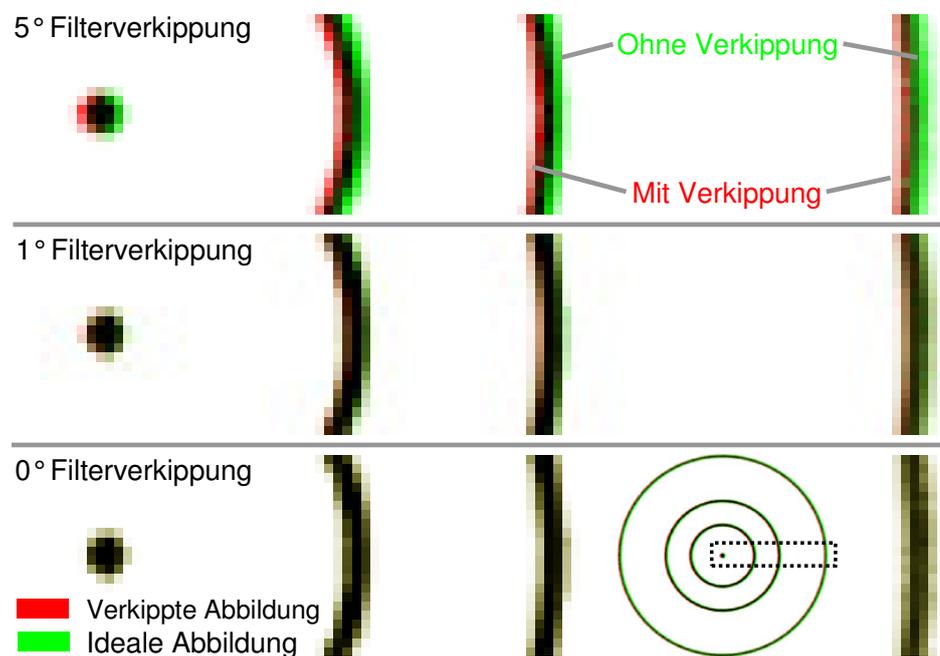


Abb. 4.7: Bildüberlagerung der in Detektorauflösung $256 \times 256 \text{ Pixel}^2$ simulierten Abbildungen auf den IR-Detektor. Oben: Simulation für eine 5° Filterverkipfung. Mitte: Simulation für eine 1° Filterverkipfung. Unten: Simulation für 0° Filterverkipfung. Die dargestellten Ansichten sind Ausschnitte aus dem Bereich, der in dem Simulationsergebnis unten rechts rechteckig schwarz gepunktet eingezeichnet ist.

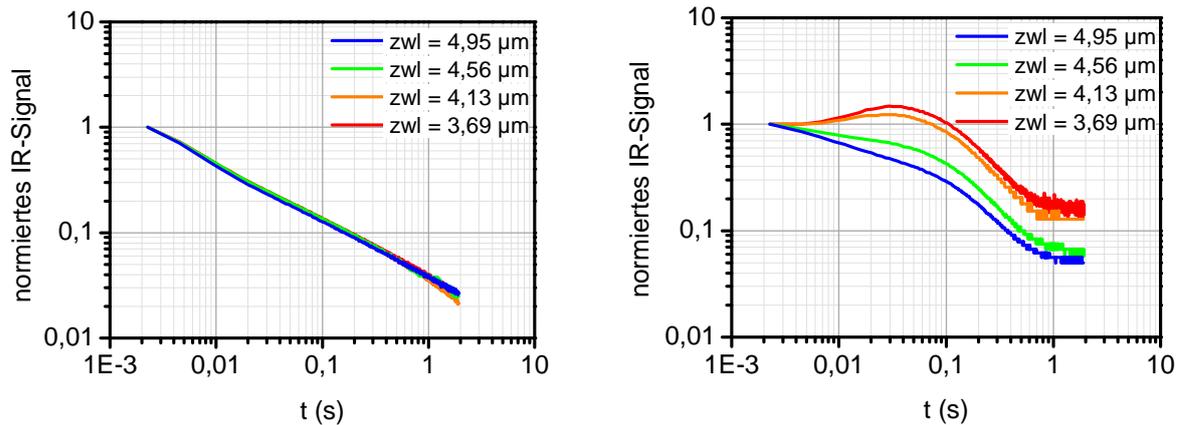


Abb. 4.8: Links: Spektral detektiertes IR-Signal einer mit Fotolack beschichteten Turbinenschaufel nach Blitzanregung. Rechts: Spektral detektiertes IR-Signal einer organischen Verschmutzung auf der mit Fotolack beschichteten Turbinenschaufel nach Blitzanregung.

4.1.4 Spektral aktive und nicht aktive Materialien unterscheiden

Mit der spektral detektierenden Blitzthermografie lässt sich ein infrarot aktives Material mit einer wellenlängenabhängigen Emissivität ($0 \leq \varepsilon(\lambda) \leq 1$) von einem grauen ($0 \leq \varepsilon < 1$) oder schwarzen Material ($\varepsilon \approx 1$) unterscheiden (vgl. Kap. 2.6). Dafür sollte sich $\varepsilon(\lambda)$ in mindestens einem der vier Spektralbereiche aus Abb. 4.4 deutlich messbar von den anderen unterscheiden. Der IR-Signalabfall für ein spektral nicht aktives Material nach einer deltapulsförmigen Blitzanregung ist in Abb. 4.8 links dargestellt. Er entspricht dem theoretisch erwarteten Potenzgesetz für einen halbunendlichen Körper für alle Filterbereiche (vgl. Kap. 2.9). Ein Beispiel für ein spektral aktives Material ist in Abb. 4.8 rechts gezeigt, in dem zusätzlich zur Teiltransparenz im Infraroten der Einfluss der Teiltransparenz im Sichtbaren zu sehen ist, was zusammen einen messbaren Signalanstieg nach dem Puls bewirkt, da nicht nur die Oberfläche angeregt wurde, sondern auch das Volumen (vgl. Kap. 2.8).

Ein spektral aktives Material lässt sich von einem spektral nicht aktiven unterscheiden, indem es sich in mindestens einem der vier genutzten Spektralbereiche anders verhält (vgl. Kap. 2.6 und 2.8).

Auswertung der Streuung der vier Spektralbereiche

Um ein spektral aktives von einem spektral nicht aktiven Material zu unterscheiden, wird die Streuung der vier IR-Signale in den Spektralbereichen ausgewertet. Eine starke Streuung entspricht dann einem spektral stark aktiven Material, wie es z. B. biologische Verschmutzungen wie Fette oder Öle sein können, und eine geringe Streuung entspricht einem spektral eher nicht aktiven Material, wie es die meisten Metalle sind. Dazu wird nach (4.1) die Streuung σ für das detektierte Signal a in den vier Spektralbereichen $j = 1, \dots, 4$ berechnet.

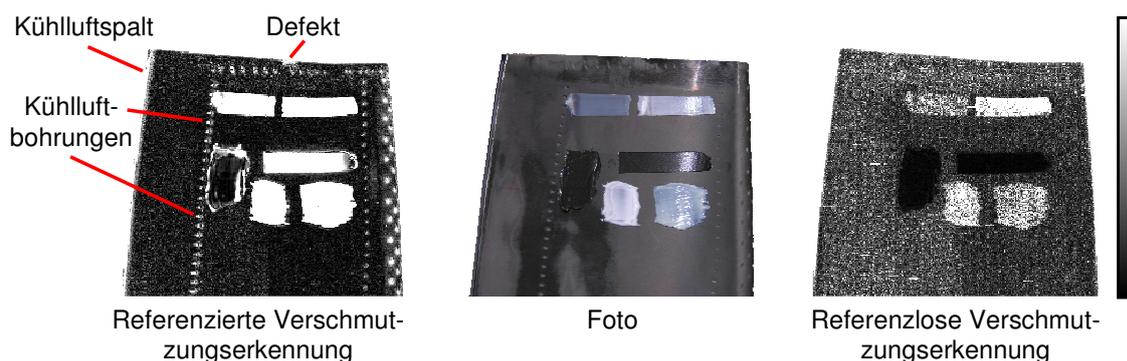


Abb. 4.9: Links: Ergebnis der referenzierten Verschmutzungserkennung aus Kap. 4.1.1. Mitte: Foto des Prüfteils. Rechts: Ergebnis der referenzfreien Verschmutzungserkennung.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{1-4} \sum_{j=1}^4 (a_j - \bar{a})^2} \quad \text{mit} \quad \bar{a} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 a_j \quad (4.1)$$

In Abb. 4.9 ist das Ergebnis aus Kap. 4.1.1 dem Ergebnis aus der Auswertung der Streuung gegenübergestellt, welche der referenzfreien Vorgehensweise entspricht. Die Abb. 4.10 zeigt das spektral unterschiedliche Verhalten des Prüfteils und der Verschmutzungen in den vier Spektralbereichen nach einer Blitzpuls-Anregung. Dabei sind alle vier Spektralbereiche jeweils passend zur ROI in einer Farbe dargestellt.

Die Vorteile einer spektral detektierenden Thermografie liegen darin, dass die Kühlluftbohrungen und der Kühlluftspalt aufgrund der geringen spektralen Aktivität nicht als Verschmutzungen maskiert sind. Das heißt, dass Materialdickenunterschiede auch bei beschichteten Materialien nicht detektiert werden würden, solange die Oberfläche eine geringe spektrale Aktivität besitzt. Spektral aktive Verschmutzungen hingegen unterscheiden sich durch die verstärkte Streuung der IR-Signale in den betrachteten Spektralbereichen und können so erkannt werden (s. Abb. 4.10 ROI 3 und 4). Allerdings werden spektral nicht aktive Verschmutzungen durch diese Vorgehensweise nicht detektiert, wie in Abb. 4.10 anhand des Ceplattyn 300 zu sehen ist.

Jedoch hat man das Problem, dass aufgrund der Benutzung der IR-Filter das SNR (Signal-to-Noise Ratio) im Vergleich zur Benutzung des gesamten Kameraempfindlichkeitsbereichs sinkt, wie bei der referenzierten Verschmutzungserkennung. Dadurch ist das Ergebnisbild stark verrauscht. Außerdem sind die IR-Signale der ROIs 3 und 4 in den Spektralbereichen selbst für die betrachtete Anzahl an Pixel in den ROIs noch sehr verrauscht, wie die Abb. 4.10 zeigt.

Darüber hinaus wurde an diesem Experiment festgestellt, dass selbst das Inconel der Turbinenschaufel über eine minimale spektrale Aktivität verfügt, die es erschwert geringere Mengen von Verschmutzungen zu detektieren. Um dem entgegen zu wirken und um das detektierbare Signal der unverschmutzten Turbinenschaufel zu erhöhen, wird sie für die weiteren Experimente mit Fotolack beschichtet, auf welchen dann Verschmutzungen aufgebracht werden.

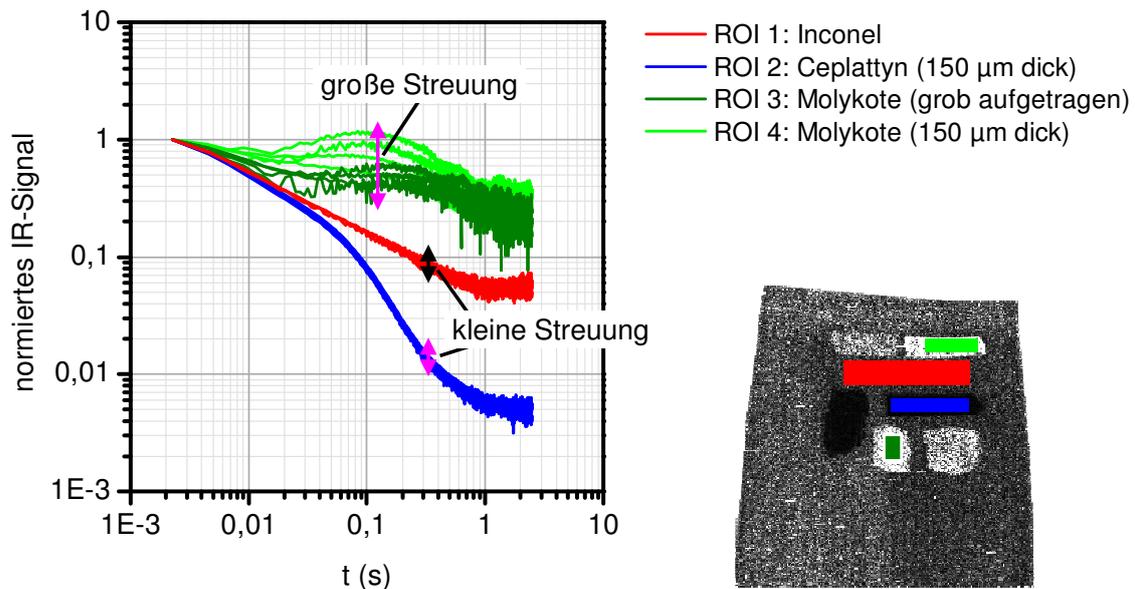


Abb. 4.10: Darstellung der IR-Signale in den vier Spektralbereichen für jeweils eine ROI. ROI 1 bezieht sich auf die Inconel Turbinenschaufel. ROI 2 zeigt das Signal einer Verschmutzung mit geringer spektraler Aktivität. ROI 3 und 4 beziehen sich auf eine spektral aktive Verschmutzung in zwei verschiedenen Schichtdicken.

4.1.5 Spektral detektierende Blitzthermografie

Zur Verdeutlichung wie sich der Einsatz von IR-Bandpassfiltern auf das SNR auswirkt, sind in Abb. 4.11 Bilder der mit Fotalack beschichteten Turbinenschaufel aus Abb. 4.1 nach einem Blitzpuls dargestellt. Die Bilder wurden zu drei unterschiedlichen Zeiten nach dem Blitzpuls aufgenommen. Außerdem sind von oben nach unten verschiedene Filter benutzt worden, um zu verdeutlichen, wie sich die Signalqualität bei der Benutzung von IR-Filtern ändert und wie sich die Signalqualität des kurzwelligen IR-Filters ($3,69\ \mu\text{m}$) gegenüber dem langwelligen ($4,95\ \mu\text{m}$) verschlechtert. Dies wird deutlicher bei langen Aufnahmezeiten. Durch das geringere Signal können die Bilder nicht einzeln ausgewertet werden. Dabei muss man beachten, dass Fotalack ein wellenlängenunabhängiges $\varepsilon \approx 1$ hat und demzufolge das emittierte IR-Signal größer ist als bei einem Material mit deutlich geringerer Emissivität. Das ermöglicht die deutlichere Unterscheidung des Basismaterials von den ebenfalls aufgetragenen organischen Verschmutzungen auf der Turbinenschaufel.

Um dennoch pixelweise im emittierten IR-Signal in den vier Spektralbereichen die Verschmutzung von der Beschichtung zu unterscheiden, wurden Geraden an den doppelt-logarithmischen Signalverlauf je Spektralbereich gefittet, wie in Abb. 4.12 zu sehen ist. Dadurch wird ausgenutzt, dass für einen grauen halbunendlichen Körper nach Delta-Puls-Anregung der IR-Signalabfall an der Oberfläche im Doppelt-logarithmischen einer Geraden mit Steigung $-1/2$ entspricht (s. Kap. 2.9). Im Gegensatz dazu zeigen spektral aktive Verschmutzungen aufgrund der Teiltransparenz, je nachdem welcher Spektralbereich betrachtet wird, keinen linearen Temperaturabfall

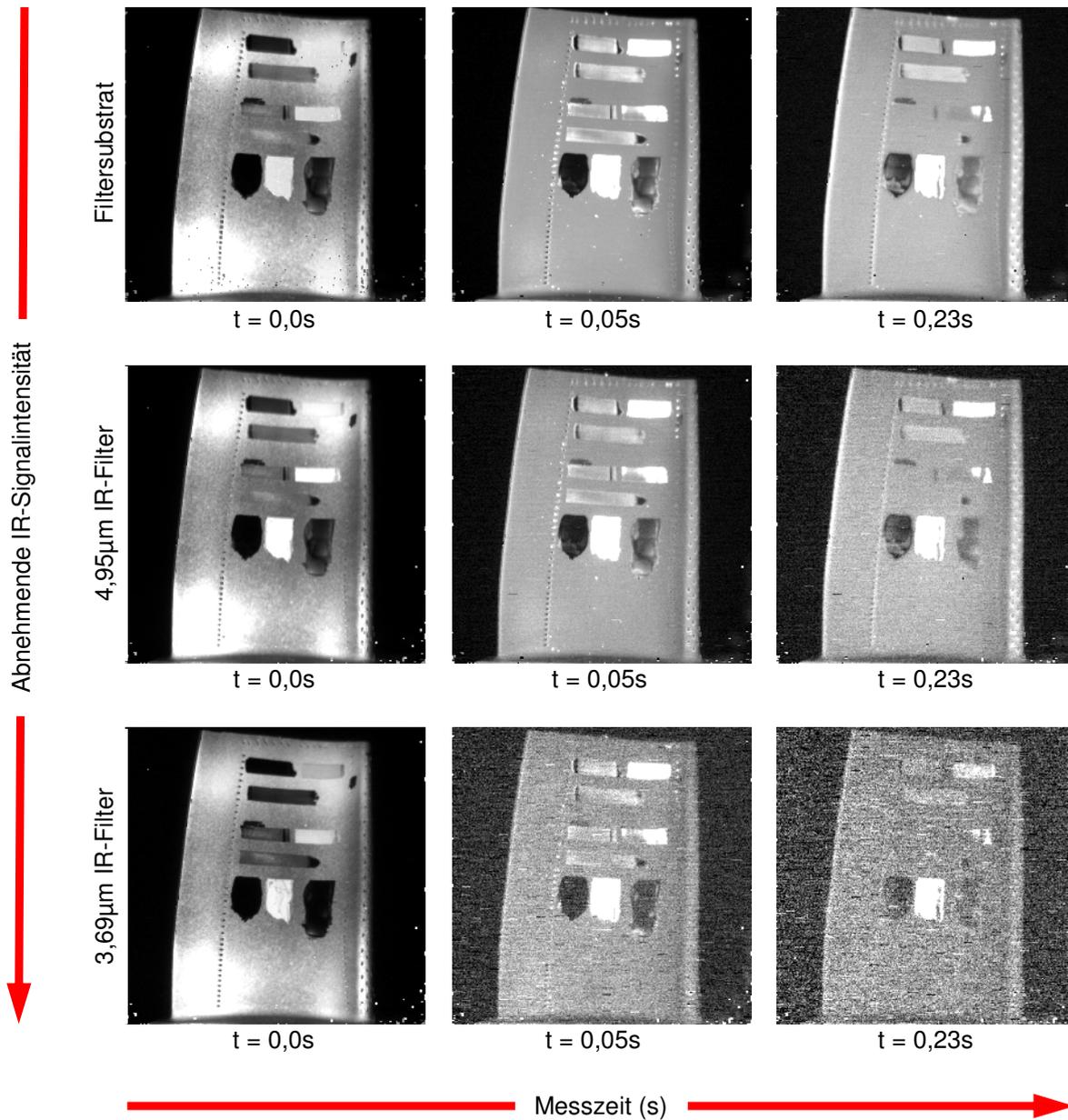


Abb. 4.11: Von links nach rechts: Aufnahmen einer Blitzthermografie zu verschiedenen Zeitpunkten nach dem Blitzpuls. Von oben nach unten: Aufnahmen mit verschiedenen IR-Filtern. Das detektierte Signal nimmt von links oben nach rechts unten ab, d. h., dass das SNR sinkt.

im Doppelt-logarithmischen. Durch den Fit wird erreicht, dass zeitliche Schwankungen des Signals aufgrund des geringen SNRs weniger ins Gewicht fallen. Dann wird die mittlere quadratische Abweichung der vier Geradensteigungen ausgewertet.

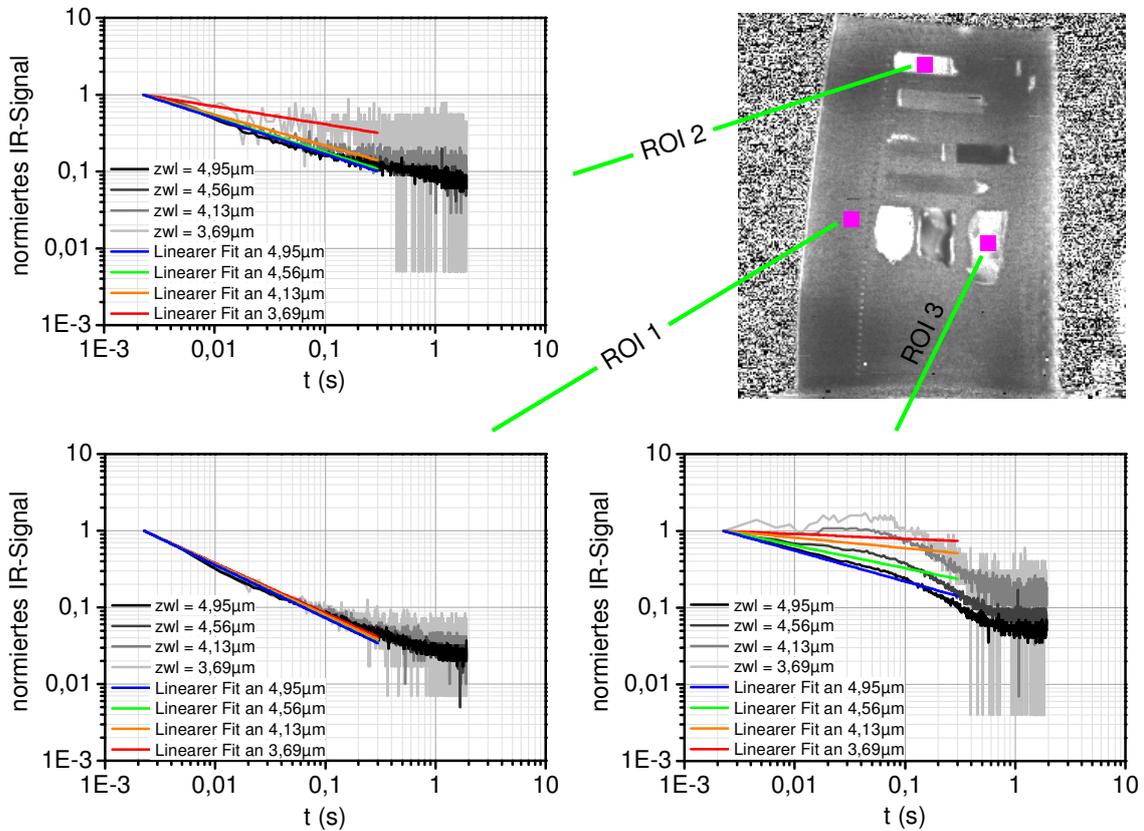


Abb. 4.12: Betrachtung der Signalverläufe für drei unterschiedliche Regions of Interest (ROIs). Dabei haben die ROIs lediglich die Größe eines einzelnen Pixels. An das jeweilige IR-Signal wurden Geraden mit festgehaltenem y-Achsenabschnitt gefittet, um die Unterschiede der Geradensteigungen besser darzustellen. ROI1 hat den Fokus auf den spektral nicht selektiven Fotolack mit einer Emissivität nahe bei eins. ROI2 stellt eine Verschmutzung dar, die hauptsächlich im Kurzwelligen aktiv ist. Die Verschmutzung in ROI3 ist im Gegensatz zu ROI2 in jedem der vier betrachteten Spektralbereiche aktiv.

In Abb.4.12 wurden an die Signalverläufe Geraden mit festem y-Achsenabschnitt beim Startwert nach der Methode der kleinsten quadratischen Abweichung (least-squares-Fit) gefittet:

Ausgangspunkt ist eine Gerade (4.2), die an n Datenpunkte mit (y_i, x_i) gefittet wird, wobei $i = 1, 2, 3, \dots, n$ den zu fittenden Datenpunkten entspricht.

$$y = ax + b \quad (4.2)$$

Dabei werden die mittleren Abstandsquadrate (a, b) der Datenpunkte zur Modellgeraden minimiert,

$$\chi^2(a, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - b - ax_i)^2. \quad (4.3)$$

Für die Geradensteigungen mit freiem y-Achsenabschnitt ergibt sich daraus dann

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{j=1}^n y_j)}{n \sum_{i=1}^n (x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (4.4)$$

mit

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (4.5)$$

$$x_i = \lg t_i \quad (4.6)$$

und

$$y_i = \lg(\Delta I_i). \quad (4.7)$$

ΔI entspricht dem IR-Signalhub durch die Blitzanregung zum Zeitpunkt t nach der Blitzpulsanregung. Dabei wird der Fit auf jedes einzelne Kamerapixel angewendet.

Für Geradensteigungen mit festgehaltenem y-Achsenabschnitt vereinfacht sich (4.4) zu

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - y_1 \sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n (x_i^2)}. \quad (4.8)$$

Die Geradensteigungen werden nach jeder weiteren Zeiteinheit neu berechnet.

Die ausgewerteten Geradensteigungen nach (4.8) und (4.4) sind für die ROIs 1–3 aus Abb. 4.12 für die vier IR-Bandpassfilter in Abb. 4.13 links und Abb. 4.13 rechts dargestellt.

Vergleicht man die zeitlichen Entwicklungen der Steigungen aus Abb. 4.13 links mit denen aus Abb. 4.13 rechts sieht man, dass sie sich wie erwartet glatter entwickeln, da der Fit einen Freiheitsgrad weniger hatte. Starke Änderungen der Messwerte wirken sich in geringerem Maße auf die Berechnung der Steigung aus, was für eine stark verrauschte Messung von Vorteil ist. Wie sich dies auf das Endergebnis auswirkt, wird später noch gezeigt.

Als Nächstes wird berechnet, wie weit sich die Steigungen bis zu einem bestimmten Zeitpunkt voneinander unterscheiden, um so spektral aktive von nicht aktiven Materialien zu unterscheiden. Dazu wird nach (4.1) die Streuung der Geradensteigungen σ für die vier Spektralbereiche berechnet.

Das Ergebnis dieser Berechnung ist in Abb. 4.14 für verschiedene Ausgangssituationen und unterschiedliche ROIs gezeigt.

In Abb. 4.14 ist links oben σ für jeweils eine einzige Messung grafisch dargestellt. Dabei beziehen sich ROI 1 und 4 auf die geschwärzte Turbinenschaufel und die übrigen ROIs auf die Verschmutzungen. Wie zu erwarten war, verläuft σ für die mit festem

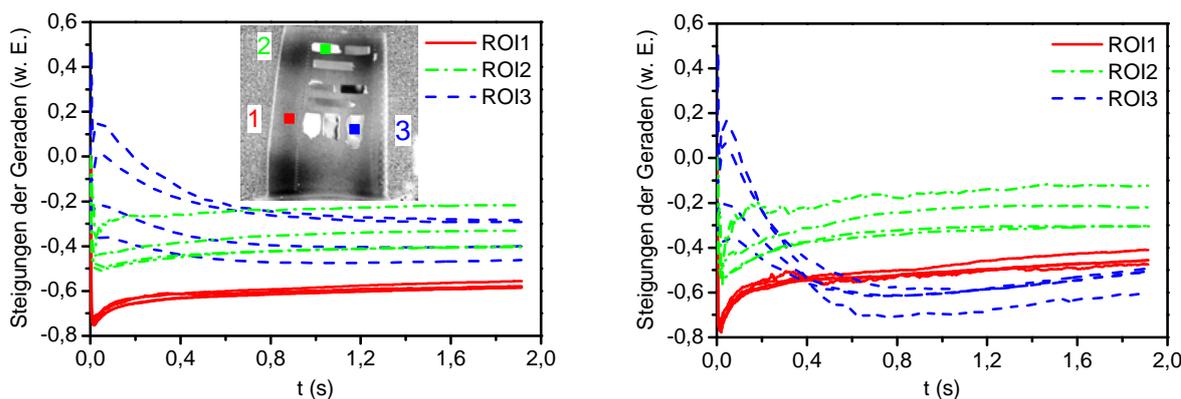


Abb. 4.13: Links: Darstellung der gefitteten Geradensteigungen mit fester Ordinate nach (4.8) für die ROIs 1–3. Zwischen den Steigungen der vier IR-Signale je ROI wurde farblich kein Unterschied gemacht. In dem Bild sind die Positionen der einzelnen ROIs farblich gekennzeichnet. Rechts: Aufgetragen sind die Steigungen für die ROIs 1–3 nach (4.4).

y-Achsenabschnitt gefitteten Geraden glatter, wodurch die Streuung deutlich gleichmäßiger verläuft als in der Grafik oben rechts. Das heißt, dass die Bilder der Streuungsserie sichtbar weniger verrauscht sind als bei Betrachtung einer einzelnen Messung. Die Auswertung erfolgt dort, wo die Streuung des Basismaterials möglichst gering ist. In den Grafiken oben ist ein solcher Punkt ansatzweise zwischen 0,4s und 1s zu finden, wo sich die ROIs 1 und 4 von den ROIs 5 und 6 trennen.

Zu den Streuungsgrafiken sind in äquivalenter Anordnung in Abb. 4.15 die entsprechenden Ergebnisbilder in der Schwellwertdarstellung bezogen auf die Streuung des Basismaterials gezeigt, in denen grün einem hohen σ entspricht und demzufolge einem spektral aktiven Material. Der Vergleich mit Abb. 4.14 zeigt in Übereinstimmung, dass im linken oberen Bild die Erkennung der Verschmutzungen tatsächlich geringfügig besser ist.

Da allerdings mit der bisherigen Methode die Ergebnisse noch immer sehr verrauscht sind und die Erkennungsrate noch relativ gering ist, wurden 100 Messungen je IR-Filter gemittelt und ausgewertet, wie bereits erläutert, um das SNR-Verhältnis insbesondere für die Messung mit dem kurzwelligem IR-Filter zu verbessern. Die dazugehörigen Ergebnisse sind in Abb. 4.14 unten und ebenfalls in der entsprechenden Schwellwertdarstellung in Abb. 4.15 unten gezeigt. In diesem Fall hat sich die Erkennbarkeit geändert. Jetzt ist die Detektierbarkeit der Kontaminationen bei der Auswertung, welche mit freiem y-Achsenabschnitt gefittet wurden, der anderen überlegen. Dies entspricht der Tatsache, dass in Abb. 4.14 unten rechts ein Minimum bei etwa 0,4s entstand. Die Auswertung der Rohdaten mit einem Geradenfit nach (4.8), bei welchem der y-Achsenabschnitt fest ist, zeigt hingegen in Abb. 4.14 unten links kein Minimum, was bedeutet, dass sich auf Anrieb kein geeignetes Bild für eine Schwellwertdarstellung wählen lässt. Dies kommt dadurch zu Stande, dass die Variation der Geradensteigungen in Abb. 4.13 links für jeden weiteren Messpunkt aufgrund des festgehaltenen y-Achsenabschnittes nur noch gering ausschlägt.

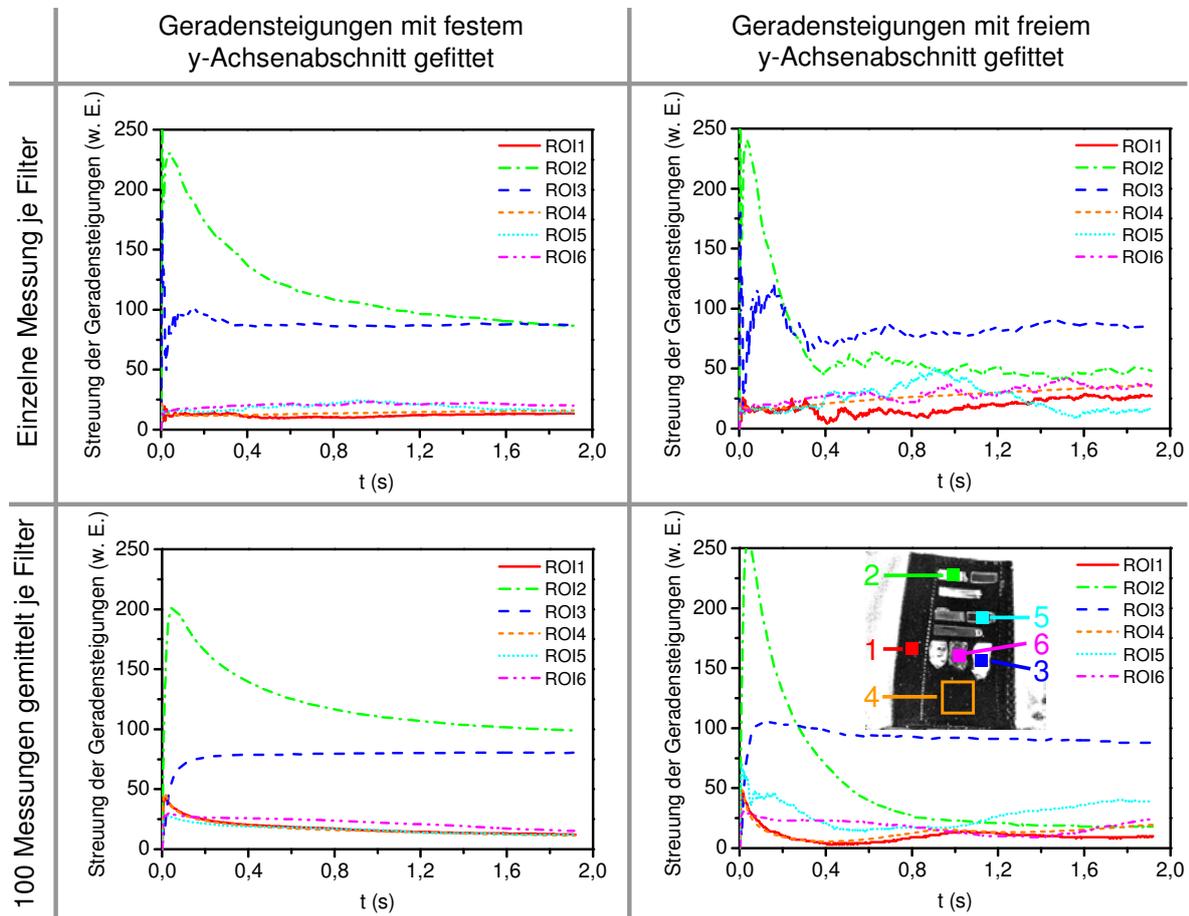


Abb. 4.14: Ergebnisse der berechneten Streuungen aus den Geradensteigungen für ausgewählte ROIs in der Matrixdarstellung. Links wurden zuerst die Steigungen unter der Bedingung bestimmt, dass der y-Achsenabschnitt festgehalten ist. Rechts wurden die Steigungen nach (4.4) gefittet. Oben wurde die Auswertung nur auf eine einzelne Messung angewendet. Unten wurde der Algorithmus auf 100 gemittelte Messungen je IR-Filter angewendet. Bis auf ROI4 beziehen sich alle ROIs auf ein einzelnes Pixel. Die Positionen der einzelnen ROIs auf dem Prüfteil sind im Diagramm unten rechts zu sehen. ROI 1 = Inconel (Material der Turbinenschaufel), ROI 2 = Molykote (150 μm dick), ROI 3 = Hochgeschwindigkeitsfett (dick aufgetragen), ROI 4 = Inconel, ROI 5 = Ceplattyn 300 (150 μm dick), ROI 6 = Ceplattyn 300 (dick aufgetragen).

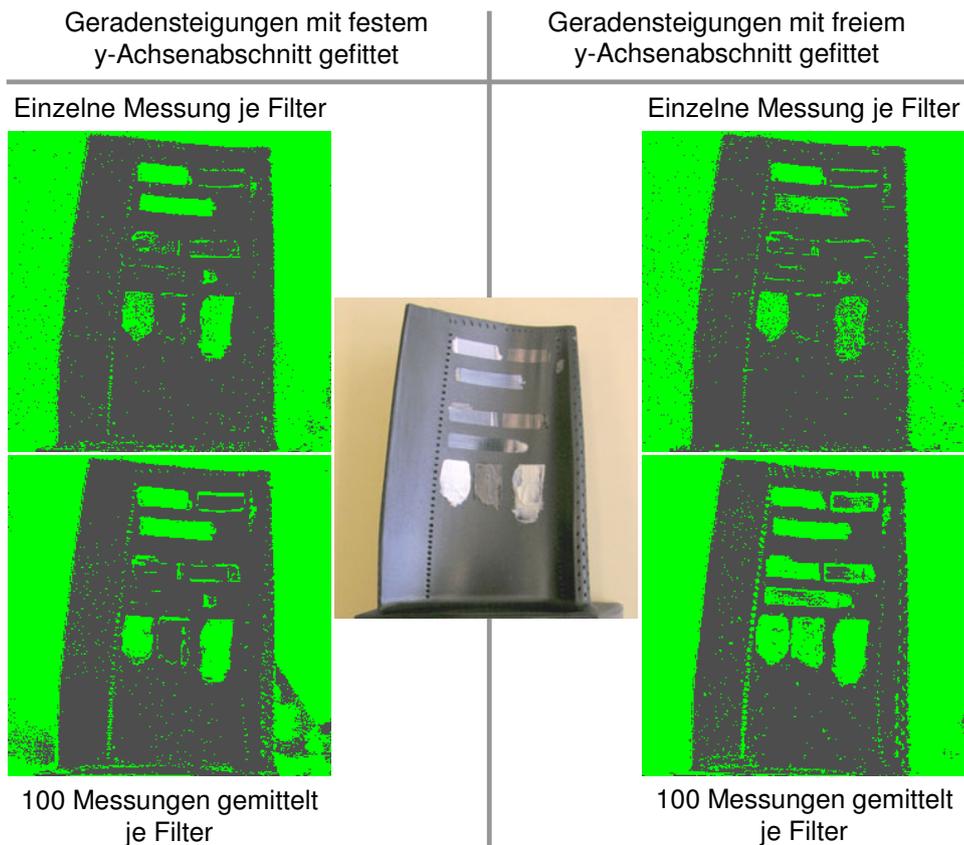


Abb. 4.15: Schwellwertdarstellung eines Ergebnisbildes der Serien aus Abb. 4.14. Die Anordnung der Bilder ist äquivalent zur Anordnung der vorangegangenen Grafik. In der Mitte ist zum Vergleich das untersuchte Prüfteil als Farbfoto dargestellt.

So steigt die Detektierbarkeit von Verschmutzungen für die Methode, bei welcher die Streuung der Geradensteigungen nach dem Fitten von Geraden mit freier Ordinate berechnet wird, gegenüber der anderen, je rauschärmer die Rohdaten der Blitzthermografie sind. Wenn die Rohdaten entsprechend schlecht sind, ist die Methode, bei der Geraden mit festgehaltener Ordinate gefittet werden, geringfügig besser gegenüber der anderen Vorgehensweise.

Fehlerquellen bei der Prüfteilqualifizierung

Eine Fehlerquelle der spektral detektierenden Schmutzerkennung mit IR-Bandpassfiltern in einem drehbaren Filterrad ist die Positionierung der Filter (vgl. Kap. 4.1.3). Bei einem Filterwechsel dreht sich das Filterrad um mindestens eine Position weiter. Dadurch erhält man einen minimalen Versatz der Ergebnisbilder zueinander. Da bei den Messungen mit vier Filtern gearbeitet wurde, verstärkt sich der Effekt. Die Auswertung in Abb. 4.16 zeigt die Bildverschiebung eines jeden Filters relativ zum 4,95 μm -Filter in Pixel. Berechnet wurde die Verschiebung des Schwerpunktes in x- und y-Richtung an den Rändern des Prüfteils nach dem Filterwechsel entlang

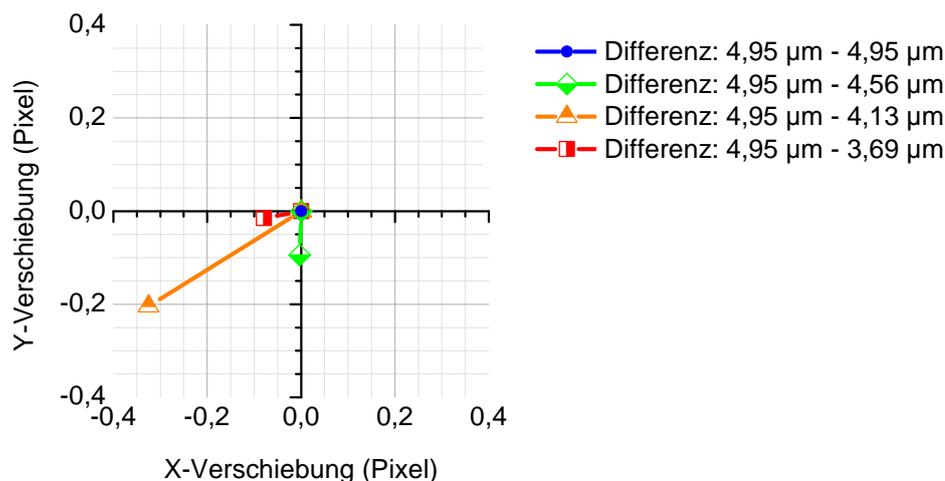


Abb. 4.16: Ergebnis der Auswertung des Bildversatzes nach einem Filterwechsel. Aufgetragen sind die x- und y-Verschiebungen aller vier Filter relativ zum 4,95 µm-Filter.

einer LOI (Line of Interest). Nach Kap. 4.1.3 entspricht eine Filterverkipfung von etwa 1° einer Bildverschiebung von etwa $11 \mu\text{m}$ auf der Seite des Detektors. Das heißt, dass sich bei einer Bildverschiebung von $< 0,4$ Pixel bei einem Pixelraster von $40 \mu\text{m}$ eine Filterverkipfung von $< 1,5^\circ$ ergibt. Das entspricht dem Fall, dass ein 1 Zoll Filter auf einer Seite um $0,6 \text{ mm}$ höher auf der Halterung aufliegt als auf der anderen Seite. Vorausgesetzt alle anderen Filter liegen vollkommen plan im Filterrad. Somit sind die Gründe für den Bildversatz zum Einen die Befestigung der IR-Filter in der Halterung und zum Anderen das Filterrad selbst, das eine geringe Welligkeit besitzen kann.

Obwohl sich die Bildverschiebung also im Subpixelbereich befindet, ist dieser Einfluss an den grünen Umrandungen in Abb. 4.15 bei einem Materialübergang zu erkennen. Die Verschmutzung selbst wurde dabei nicht erfasst. Das heißt, dass der Übergang des Fotolacks zur Verschmutzung, dem Hintergrund oder dem Inneren einer Kühlluftbohrung immer spektral aktiver scheint. Die Stärke des Effekts bewirkt, dass entweder nur der Übergang zwischen unterschiedlichen Materialien in der Schwellwertdarstellung sichtbar wird, vorausgesetzt, dass beide Materialien eine relativ geringe spektrale Aktivität haben oder, dass eine Verschmutzung in der Schwellwertdarstellung infolge der Randeffekte vergrößert zu sehen ist.

Bei den Kühlluftbohrungen kommt noch ein anderer Effekt zur Geltung. In der Nahaufnahme in Abb. 4.17 ist das Innere der Kühlluftbohrungen sehr hell, also spektral aktiver, als die Oberfläche der fotolackbeschichteten Turbinenschaufel. Die schwarzen Fäden in den Kühlluftbohrungen im mittleren Bild sind ursprünglich Stofffasern des Putztuches, welches zur Probenpräparation vor der Beschichtung benutzt wurde. Durch das Besprühen der Turbinenschaufel mit Fotolack hat man diese Verschmutzungen an den oberen Rändern der Kühlluftbohrungen ebenfalls mit Fotolack überzogen. Allerdings gelangten nur geringe Mengen des Fotolacks in das Innere der Kühlluftbohrungen. In den Untersuchungen von Kap. 4.1.4 hat sich herausgestellt, dass das Material der Turbinenschaufel selbst spektral aktiver als der Fotolack ist, obwohl Metalle als an-

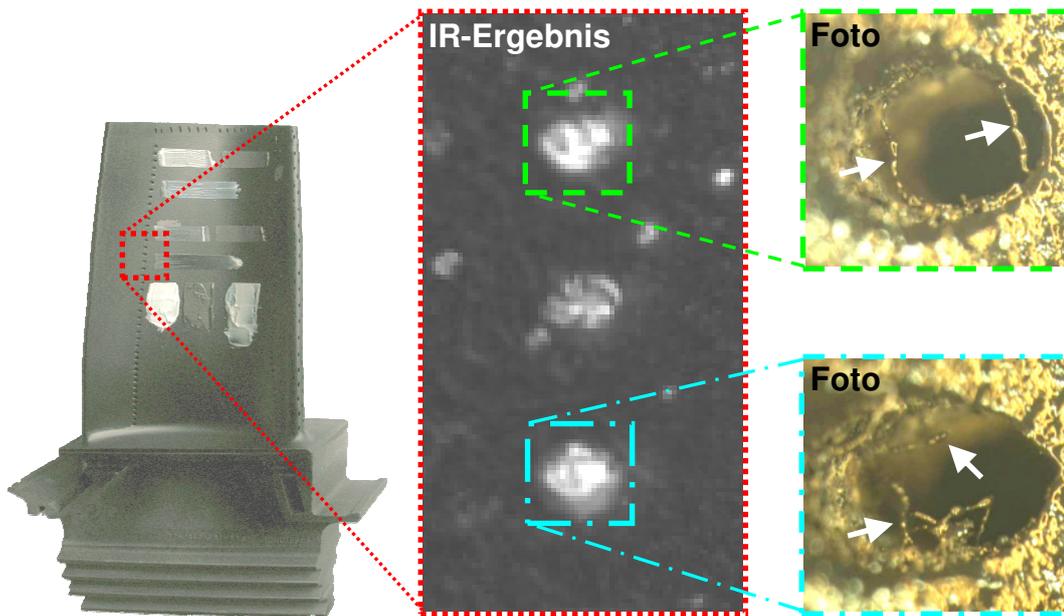


Abb. 4.17: Links: Foto des Prüfteils. Mitte: In Graustufen ein Bildausschnitt eines spektralen Verschmutzungserkennungsergebnisses zur Klärung der spektralen Aktivität der Kühlluftbohrungen. Rechts oben und unten: Foto zweier Kühlluftbohrungen zum Vergleich. Die fotolackbeschichteten Stofffäden sind mit Pfeilen markiert. Diese Fäden sind im mittleren Bild dunkel also spektral wenig aktiv. Der innere unbeschichtete Teil der Kühlluftbohrung ist hingegen hell, also spektral aktiver als die Fotolackbeschichtung dargestellt.

nähernd spektral nicht aktiv angesehen werden. Außerdem hat sich hier gezeigt, dass nur durch die Beschichtung der Turbinenschaufel mit Fotolack solch ein gutes Ergebnis erzielt werden konnte. Die Verschmutzungserkennung an der unbeschichteten Inconel Turbinenschaufel ist aus diesem Grund unter denselben Prüfbedingungen nicht so erfolgreich.

Im nächsten Abschnitt wird gezeigt, welchen Vorteil gerade die spektrale Verschmutzungserkennung bei keramisch beschichteten Turbinenschaufeln hat, da dort eine organische Verschmutzung tief in das Material eindiffundieren kann, was sich durch eine spektral detektierende Blitzthermografie einfacher aufdecken lässt.

4.1.6 Spektrale Verschmutzungserkennung an einer keramisch beschichteten Turbinenschaufel

Aus Vorangegangenem ist klar geworden, dass für eine erfolgreiche referenzfreie Verschmutzungserkennung der Unterschied zwischen spektral aktivem und nicht aktivem Material möglichst groß sein sollte. Außerdem gilt, dass die Schichtdicke umso größer sein muss, je geringer der spektrale Unterschied ist.

Aus diesem Grund eignen sich gerade poröse Materialien oder Beschichtungen für die spektral detektierende Thermografie, weil z. B. Fette oder Öle eindiffundieren können,

welche die Materialeigenschaften ändern und so zu einem frühzeitigen Versagen des Bauteils führen können.

In dem folgenden Abschnitt wird die spektral detektierende Blitzthermografie, wie bereits eingeführt, an einer gebrauchten Zirkoniumoxid-(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 (s. Abb. 4.18 Mitte oben). Beim Vergleich des Blitzthermografiebildes, welches mit dem Saphir-Substrat aufgenommen wurde, mit den vier Blitzthermografiebildern, die mit den IR-Filtern (s. Abb. 4.18 unten) gemessen wurden, stellt sich heraus, dass insbesondere im Kurzwelligen das eindiffundierte Fett gut zu erkennen ist. Die Detektierbarkeit des Fettes sinkt mit steigender λ (zentraler Wellenlänge) des benutzten IR-Filters, was die spektrale Aktivität der Verschmutzung zeigt.

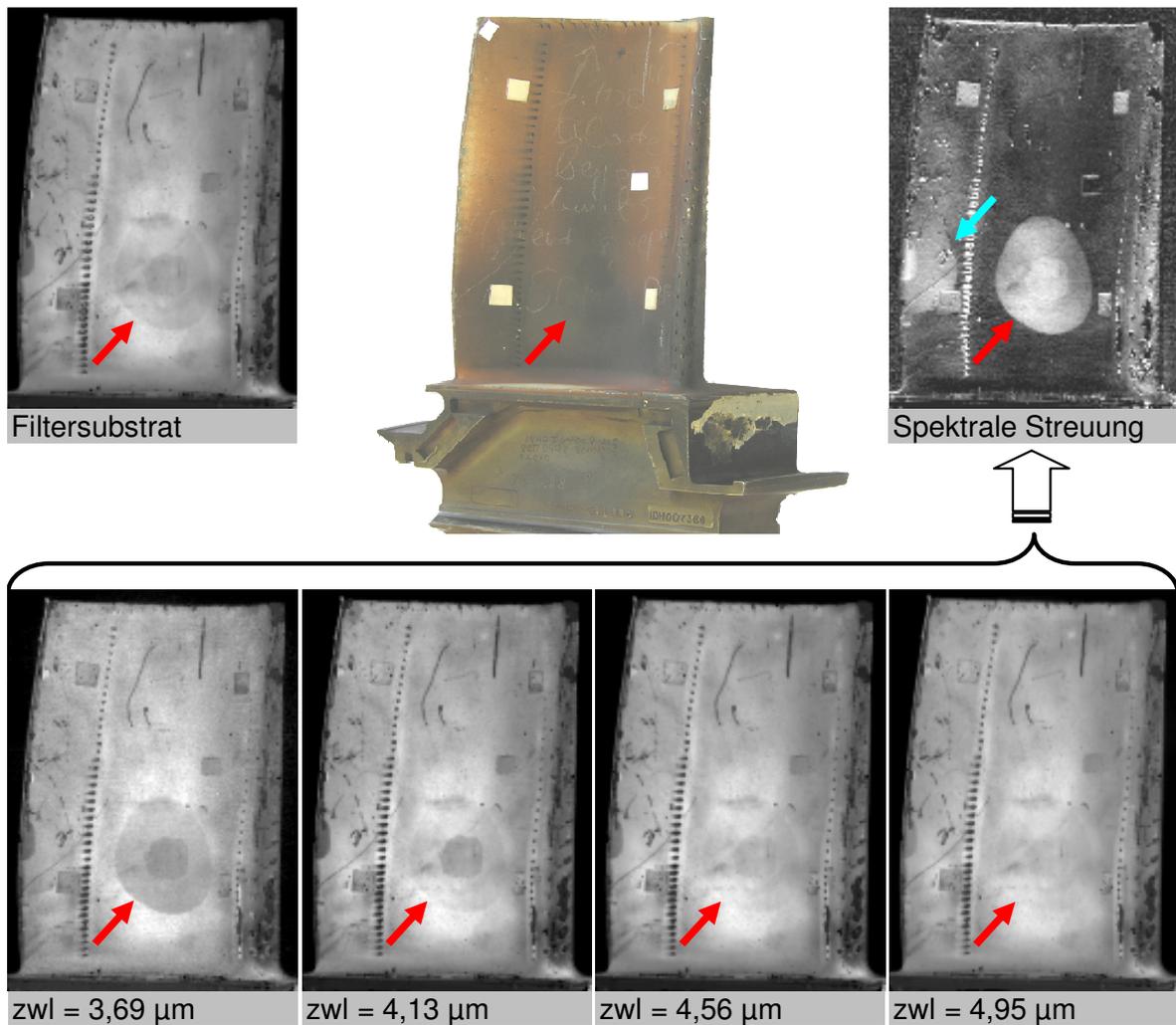
Die Berechnung der spektralen Streuung der an den jeweiligen Signalverlauf gefitteten Geradensteigungen ergibt das Ergebnisbild in Abb. 4.18 rechts oben in der Grauwertdarstellung. Die Erkennbarkeit des eindiffundierten Fettes wurde signifikant gesteigert im Vergleich zu dem Bild, das mit dem Filtersubstrat aufgenommen worden ist (s. Abb. 4.18 links oben). Darüber hinaus ist mit einem türkisen Pfeil 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 Abb. 4.15 links unten, da auch die ZrO-Beschichtung durch den Alterungsprozess in der Gasturbine IR-farbiger wurde [126–128]. Das hat zur Folge, dass die Beschichtung selbst nicht mehr eindeutig von einer spektral aktiven Verschmutzung unterschieden werden kann. Auf diesen Punkt wird noch am Ende des Kapitels eingegangen.

4.1.7 Vergleich der Ergebnisse mit und ohne Bearbeitung

Bis jetzt wurde gezeigt, wie man mit Hilfe eines Geradenfits eine spektral detektierende Blitzthermografie besser auswerten kann. Im Folgenden wird das erarbeitete letzte Endergebnis mit der Auswertung der spektralen Streuung eines einzelnen Bildes für jeden der vier Spektralbereiche verglichen, wie es der Ausgangssituation entsprach.

In Abb. 4.19 ist links die spektrale Streuung von vier einzelnen Bildern einer Blitzthermografie je Spektralbereich (oben) und von 100 gemittelten Messungen je Bild und Spektralbereich (unten) gezeigt. In der Grafik rechts wurden zuvor Geraden an das IR-Signal bis 0,67 s nach dem Blitzpuls gefittet. Anschließend wurde die Streuung der vier Geradensteigungen ausgewertet. Dabei wurden rechts oben die Geraden mit festem y -Achsenabschnitt gefittet, weil dadurch für einzelne Messungen bessere Ergebnisse erzielt werden. Im Gegensatz dazu wurden unten die Geraden mit freiem y -Achsenabschnitt gefittet, weil das SNR des IR-Signals das zuließ, so dass sich größere Änderungen der Geradensteigungen ergaben, ohne dass sie zu stark zeitlich variierten (s. Abb. 4.20 unten rechts).

Klar zu sehen ist, dass das Ergebnisbild ohne vorherigen Geradenfit an die Rohdaten (Abb. 4.19 links oben) gegenüber der Auswertung mit Geradenfit (Abb. 4.19 rechts oben) deutlich verrauschter ist. Dazu ist in Abb. 4.20 die spektrale



Abfallende Detektierbarkeit des eindiffundierten Fettes in das ZrO

Abb. 4.18: Mitte oben: Bild des Prüfobjektes. Links oben: Blitzthermografiebild ohne IR-Filter aufgenommen. Unten links nach rechts: Blitzthermografiebilder mit vier IR-Bandpassfiltern aufgenommen. Rechts oben: Spektral ausgewertetes IR-Ergebnisbild. Eine Verschmutzung wurde überall mit einem roten Pfeil gekennzeichnet. Rechts oben wurde eine weitere detektierte Kontaminierung mit einem türkisen Pfeil markiert.

Streuung für ausgewählte ROIs in der zeitlichen Entwicklung dargestellt. In der Auswertung der Rohdaten ohne vorherige Messwertaufbereitung erkennt man gerade noch die Konturen der Turbinenschaufel. Dieser Sachverhalt wird in Abb. 4.20 links oben durch das starke Rauschen in den ROIs 1–3 unterstützt.

Im Vergleich dazu ist das Ergebnisbild rechts oben in Abb. 4.19, bei dem zuerst Geraden an den Signalverlauf gefittet wurden, wesentlich besser. Dadurch wurde das SNR um 33% gesteigert. Der entsprechende Signalverlauf in Abb. 4.20 rechts oben ist zwar deutlich rauschärmer, aber dennoch für eine verbesserte Bauteilqualifizierung nicht geeignet. Das Problem liegt darin, dass zwar die großen ROIs 4–6 das richtige Verhalten zeigen, nämlich dass die Verschmutzung (ROI 6) die größte spektrale Farbigkeit zeigt gegenüber den ROIs 4 und 5. Jedoch setzt sich dieser Trend nicht auf Pixelebene fort, womit das Endergebnis nicht eindeutig ist. Die Gründe dafür liegen einerseits darin, dass die größte spektrale Aktivität tendenziell in den kurzwelligen Filtern festgestellt wurde, andererseits sinkt das SNR von 10,45 mit dem langwelligen 4,95 μm -Filter auf 2,13 für den 3,69 μm -Filter. Dies beruht auf der Abnahme des detektierten Signals auf ein Fünftel. Zum Einen liegt das an der reduzierten Kameraempfindlichkeit bei kürzeren Wellenlängen (s. Abb. 4.5 rechts) und zum Anderen an der langwelligeren Blitzpulsanregung. Dennoch ist diese Anregung z. B. gegenüber einer Heizplatte aufgrund der pulsformigen gerichteten Energiefreisetzung von 2 kJ im Millisekundenbereich überlegen. Zum Vergleich, eine Aufnahme mit dem antireflexionsbeschichteten Filtersubstrat hat ein SNR von 43,72.

Um das größtmögliche Potential für diese Technik herauszufinden, wurden je Filter 100 Messungen gemittelt, was das SNR je IR-Filter um den Faktor 10 verbessert. Die im Anschluss daran ausgewerteten Blitzthermografieserien wurden auf die gleiche Weise verarbeitet, wie die Bilder in Abb. 4.19 oben. Die Endergebnisse sind in derselben Abb. 4.19 unten dargestellt. Wie zu erkennen ist, hat das Bild links unten, das lediglich auf der Auswertung der spektralen Streuung der gemittelten Rohdaten beruht, bereits deutlich an Detailschärfe gewonnen. Dies ist auch an der klaren Trennung der Signalverläufe in Abb. 4.20 zu erkennen. Durch das Fitten von Geraden verbessert sich die Signalqualität allerdings noch um weitere 8,3%.

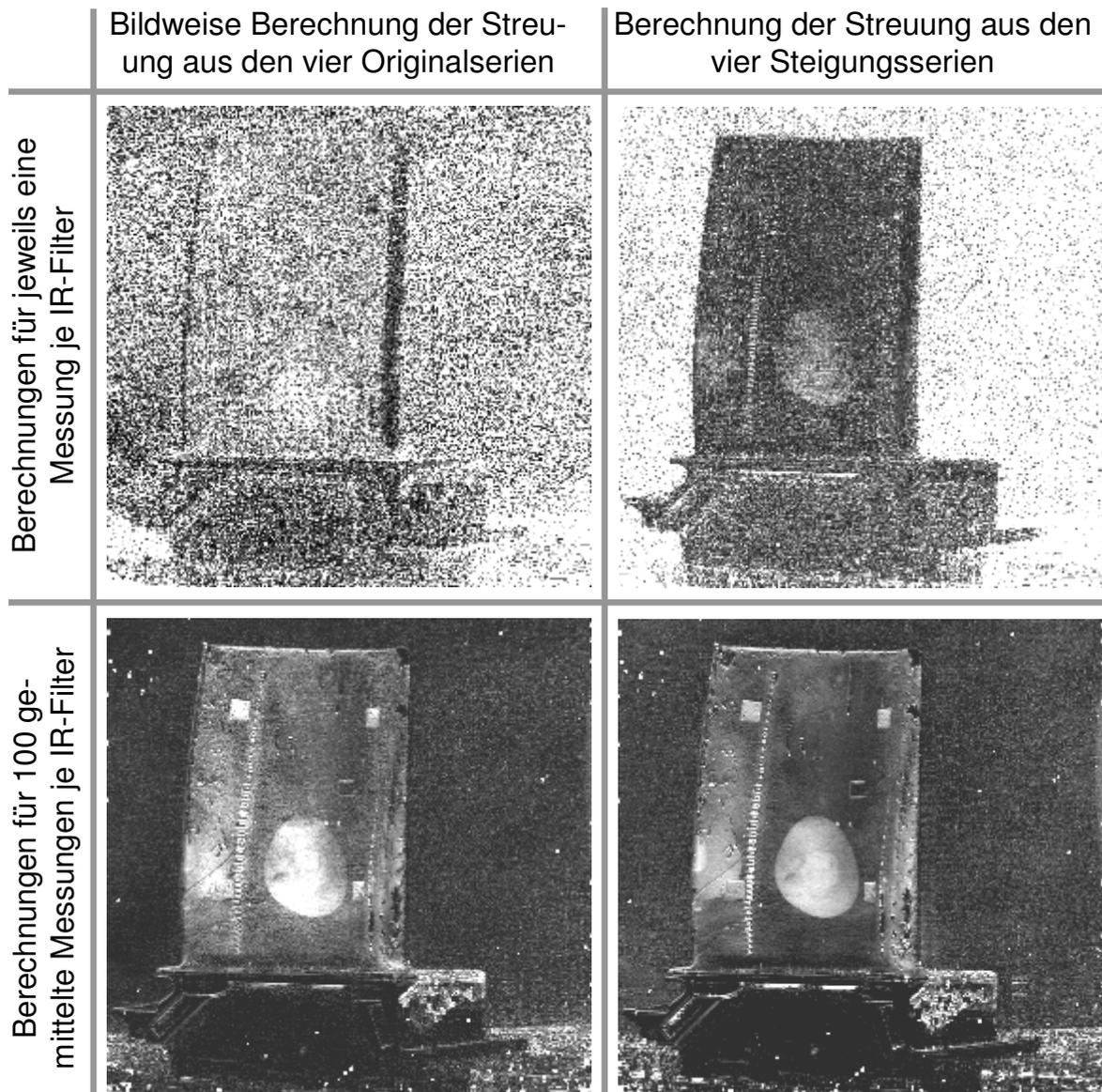


Abb. 4.19: Links oben: Berechnung der spektralen Streuung anhand eines einzelnen nicht gemittelten Bildes je IR-Spektralbereich 0,67 s nach der Blitzpulsanregung. Rechts oben: Anwendung des Fitalgorithmus auf eine einzelne Messung je IR-Spektralbereich bis 0,67 s nach der Blitzpulsanregung und anschließender Berechnung der spektralen Streuung. Links unten: Berechnung der spektralen Streuung anhand von 100 gemittelten Messungen je IR-Spektralbereich. Rechts unten: Anwendung des Fitalgorithmus auf 100 gemittelte Messungen je IR-Filter und anschließender Berechnung der spektralen Streuung. Die unteren Bilder entstanden zum gleichen Zeitpunkt wie die oberen.

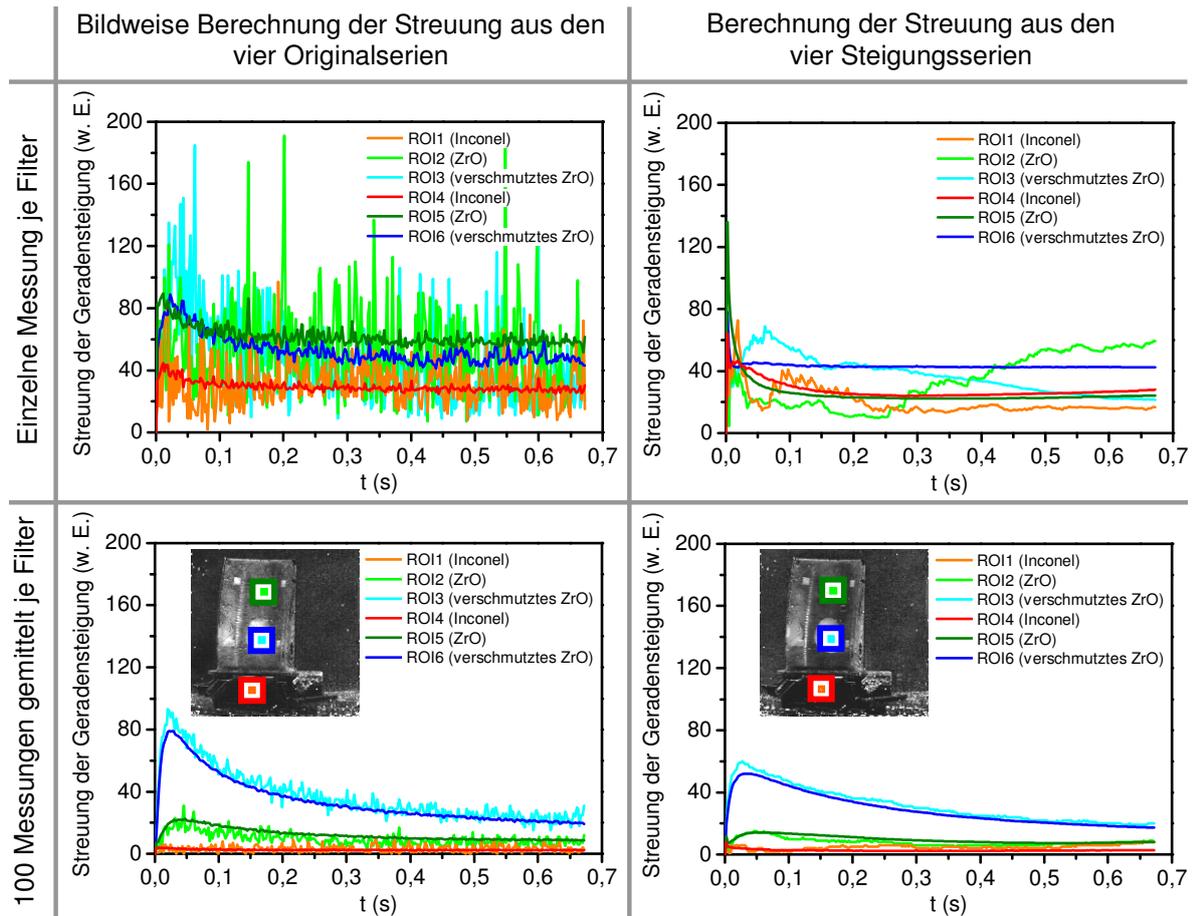


Abb. 4.20: Darstellung von ausgewählten ROIs aus den Ergebnisreihen in Abb. 4.19. Die Positionen der ROIs sind in allen Serien identisch und in den Grafiken unten links und rechts dargestellt. Die ROIs 1 – 3 beziehen sich auf ein einzelnes Pixel im Zentrum einer 19×19 Pixel² großen ROI (s. ROIs 4 – 6).

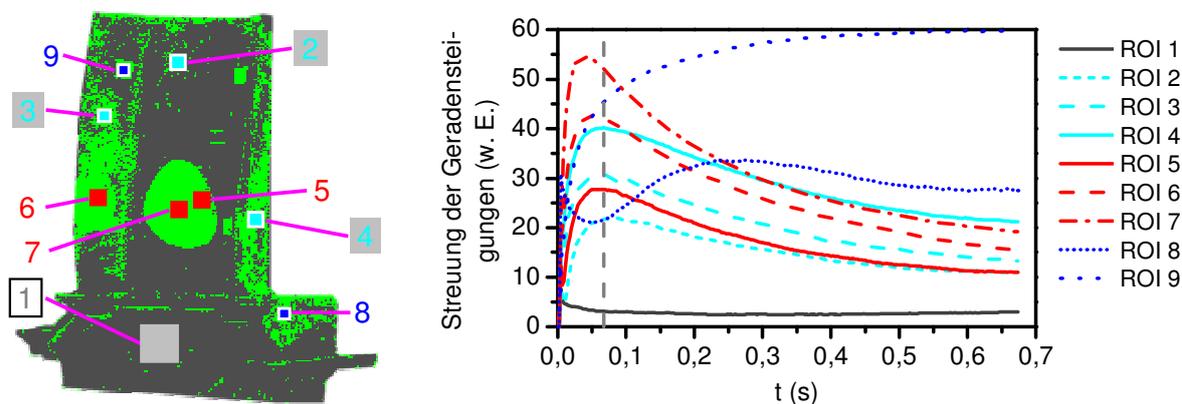


Abb. 4.21: Links: Schwellwertdarstellung des Verschmutzungserkennungsergebnisses. In grau spektral nicht aktives Material und in grün die erkannten Verschmutzungen. Rechts: Darstellung der spektralen Streuung ausgewählter ROIs des linken Bildes. Gestrichelte Vertikale markiert den Zeitpunkt zu dem das linke Bild entstand.

4.1.8 Schwellwertdarstellung der Verschmutzungserkennung an keramisch beschichteten Turbinenschaufeln

In der Schwellwertdarstellung des Ergebnisses aus Abb. 4.21 links wurden in grün neben den besprochenen eindiffundierten Fetten (ROIs 5–7 in rot) fälschlicherweise auch Teile der keramisch beschichteten Turbinenschaufel (ROIs 2–4 in türkis) als Verschmutzung erkannt. Wie im Bild rechts in der Darstellung der spektralen Streuung zu den entsprechenden ROIs erkennbar ist, liegt das daran, dass das keramische Material zu keinem Zeitpunkt von der eigentlichen Verschmutzung getrennt werden kann. Denn durch die Alterung der Beschichtung in der Gasturbine wachsen die wellenlängenabhängigen Emissivitätsunterschiede [126–128]. Da jetzt also im Gegensatz zu Abb. 4.15 das Prüfteil selbst nicht ideal grau ist, können Verschmutzungen durch eine einfache Schwellwertdarstellung nicht mehr zuverlässig gekennzeichnet werden.

Außerdem sind selbst Klebestreifen, wie in den ROIs 8 und 9, in der Schwellwertdarstellung nicht mehr eindeutig von der Beschichtung zu unterscheiden. Der Turbinenschaufelfuß (ROI 1) hat, wie zu erwarten war, die für ein Metall charakteristische niedrige Streuung in den IR-Banden und grenzt sich deshalb deutlich vom beschichteten Teil der Schaufel ab.

Da das ZrO auf der Turbinenschaufel durch den Alterungsprozess in der Gasturbine zunehmend IR-farbiger wird, stellt sich die Frage, ob die Verschmutzungserkennung bei einer neuen Beschichtung erfolgreicher wäre. Zum Vergleich der spektralen Eigenschaften der bisher betrachteten gebrauchten mit denen einer neuen keramischen Beschichtung sind in Abb. 4.22 unten 30 ROIs mit jeweils einer Größe von $2 \times 2 \text{ Pixel}^2$ dargestellt. Diese sollen den allgemeinen spektralen Zustand des Zirkoniumoxids kennzeichnen. Die Bildpaare oben zeigen jeweils links das Farbbild der beschichteten Turbinenschaufel und rechts das Ergebnisbild der spektralen Streuung inkl. der Markierungen der ROIs. Man erkennt, dass die spektrale Streuung der neuen Beschichtung nur etwa ein Viertel von

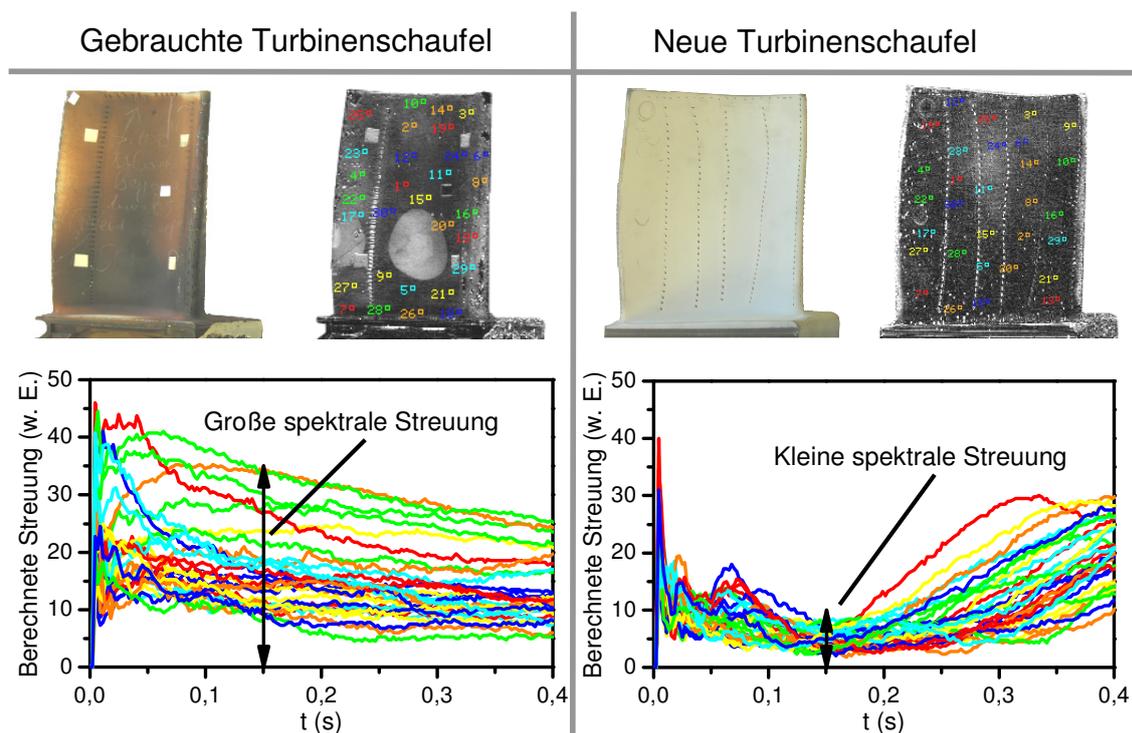


Abb. 4.22: Vergleich der spektralen Streuung der gebrauchten Turbinenschaufel mit einer neuen. In den Grafiken unten sind die spektralen Streuungen von 30 2×2 Pixel² großen ROIs dargestellt.

der gebrauchten Turbinenschaufel beträgt, so dass eine Schwellwertdarstellung wie in Abb. 4.21 zu einer besseren Detektierbarkeit der Verschmutzungen führen würde. Tests diesbezüglich konnten an einem Prüfteil mit einer neuen keramischen Beschichtung wegen der Kosten einer solchen Turbinenschaufel nicht durchgeführt werden.

4.1.9 Filterung einer Ultraschall-Thermografie mit einer Blitzthermografie

Das Ergebnisbild einer blitzthermografischen Verschmutzungserkennung kann in Zukunft als Zusatzuntersuchung z. B. für eine Ultraschall-Thermografie genutzt werden, um störende Signalartefakte zu maskieren, die ansonsten zu Fehlinterpretationen führen würden.

Wie in der Abb. 4.23 zu erkennen ist, kann ohne weitere Information über das Prüfteil nicht zwischen Anzeigen von Defekten und Verschmutzungen unterschieden werden. Deshalb soll die Verschmutzungsinformation aus Abb. 4.24 genutzt werden, um Verunreinigungen in einer Ultraschall-Thermografie zu maskieren, um somit Defekte wie Risse oder Delamination im Bauteil besser bewerten zu können.

Im Folgenden wird das Amplitudenbild aus Abb. 4.23 mit Hilfe des Ergebnisbildes aus der Kontaminationserkennung gefiltert, welches die Filtermaske darstellt.

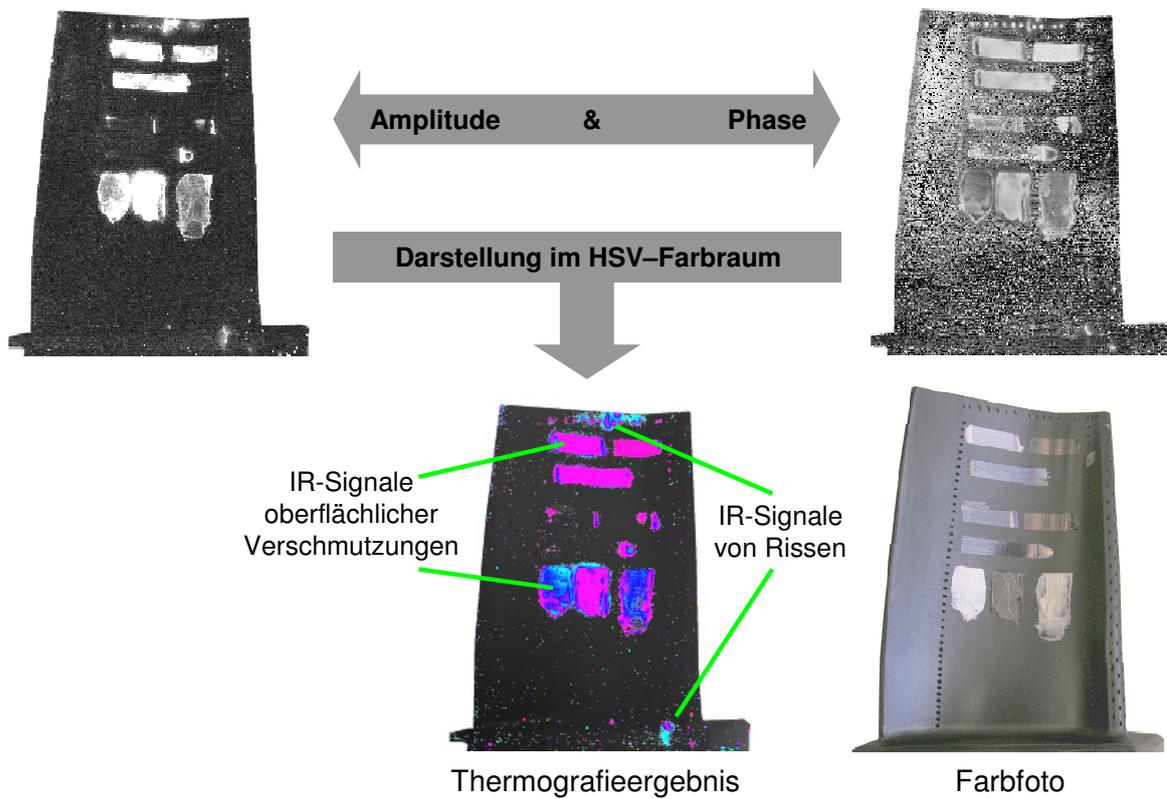


Abb. 4.23: Oben links: Amplitudenbild nach der Puls-Phasen-Auswertung. Oben rechts: Phasenbild der Puls-Phasen-Auswertung. Unten links: Darstellung des Amplituden- und des Phasenbildes im HSV-Farbraum. Unten rechts: Farbfoto des Prüfteils.

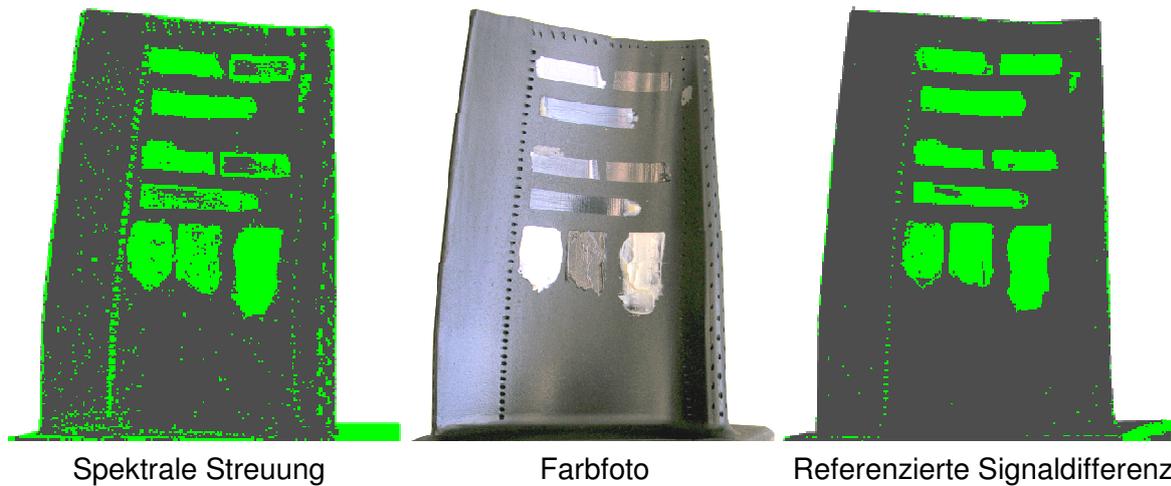


Abb. 4.24: Links: Schwellwertdarstellung der spektralen Verschmutzungserkennung. Mitte: Farbbild des Prüfteils. Rechts: Differenzbild der referenzierten Verschmutzungserkennung, welches 0,009 s nach der Anregung entstand. In grau das Prüfteil und in grün die detektierten Verschmutzungen.

Auswahl der Filtermaske

Für die Filterung der Ultraschall-Thermografie muss noch die geeignete Filtermaske gewählt werden, die entweder durch den referenzlosen oder den referenzierten Ansatz erstellt wird.

In Abb.4.24 links ist das Ergebnisbild einer referenzfreien spektral detektierenden Blitzthermografie dem Ergebnisbild einer referenzierten Blitzthermografie (Abb. 4.24 rechts) gegenübergestellt. Als Referenz diente eine das Prüfteil charakterisierende unverschmutzte Oberfläche. Ausgewertet wird für jedes Pixel die Differenz zum Mittelwert aller Pixel der Referenz und das für jedes einzelne Bild der Blitzthermografie, wie bereits in Kap. 4.1.1 besprochen wurde.

Um zum Ergebnis der spektralen Verschmutzungserkennung zu gelangen, werden zuerst für alle vier IR-Filtertransmissionsbereiche 100 Messungen gemittelt. Dann fittet man Geraden an den Signalverlauf eines jeden Pixels und anschließend wertet man die Streuung der vier Geradensteigungen aus, was zu dem gezeigten Endergebnis führt.

Das Ergebnisbild der referenzierten Kontaminationserkennung aus Abb.4.24 rechts ist gegenüber dem referenzfreien Ansatz aus Abb. 4.24 links besser, weil sich aufgrund der Beschichtung der Turbinenschaufel mit Fotolack die IR-Eigenschaften derart geändert haben, dass sich das IR-Signal der Turbinenschaufel sehr früh von allen Verschmutzungen trennt, wie in Abb.4.25 zu erkennen ist. In der Grafik trennen sich die IR-Signale für die Beschichtung und den Defekt sehr früh deutlich von den Signalen der anderen ROIs, wodurch fast alle Verschmutzungen erkannt werden.

Für die Filterung einer Ultraschall-Thermografie wird im Weiteren das bessere Ergebnisbild der referenzierten Blitzthermografie genutzt.

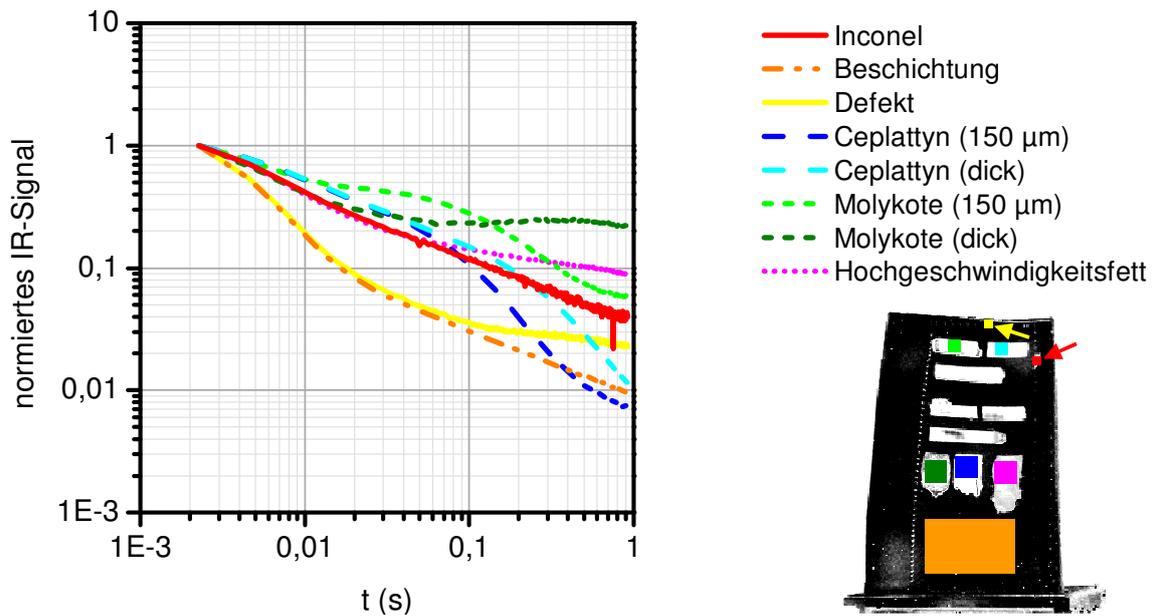


Abb. 4.25: Darstellung der normierten Blitzthermografieserie für ausgewählte ROIs. Position und Größe der ROIs sind im Bild unten rechts markiert. Die Serie wird mit Hilfe der referenzierten Verschmutzungserkennung ausgewertet, wodurch das Ergebnisbild in Abb. 4.24 rechts entsteht.

Filterung der Ultraschall-Thermografie

Da durch die Blitzthermografie Änderungen der Oberfläche im Vergleich zu einer Referenz detektiert werden, können mit folgendem Beispiel auch bewusst aufgebrauchte Markierungen wie Klebestreifen maskiert werden, um es dem Prüfer zu erleichtern, echte Defekte im Bauteil zu finden.

In der Abb. 4.26 wurden die folgenden Schritte durchgeführt, um vom Ausgangsamplitudenbild in Abb. 4.26 (a) zum Endergebnis in Abb. 4.26 (d) zu gelangen. In der mittleren Spalte sind die jeweiligen Filtermasken dargestellt.

Es folgen die verschiedenen Bearbeitungsschritte:

Schritt 1: Binarisierung des referenzierten Verschmutzungserkennungsergebnisses (Abb. 4.26 rechts oben) führt zum Ergebnis aus Abb. 4.24 rechts, welches jetzt die erste Filtermaske in Abb. 4.26 ist. Die Filtermaske wird dann auf das Amplitudenbild angewendet, in dem alle erkannten Verschmutzungen auf einen Zahlenwert gesetzt werden, wohingegen alle anderen Amplitudenwerte unverändert bleiben. Der Zahlenwert entspricht dem Wert des Amplitudenbildes für eine nicht defektbehaftete Turbinenschaufel. Dadurch werden alle blitzthermografisch erkannten Verschmutzungen schwarz eingefärbt, wodurch sie für den Prüfer nicht mehr erkennbar sind. Die in der obersten Filtermaske mit (1) markierte Stelle wird als Verschmutzung erkannt, weil sich dort die Fotolackbeschichtung

abgelöst hat, wodurch das IR-Signal nicht mehr mit der Referenz übereinstimmt. Das Gleiche trifft auf den unbeschichteten Turbinenschaufelfuß (2) und einen Papieraufkleber (3) zu.

Schritt 2: Die Bearbeitung der Filtermaske mit einem 3×3 Medianfilter ermöglicht die Auslöschung von einzelnen Pixeln. Der Medianfilter ist ein Rangordnungsfilter, der zur Klasse der nicht linearen Filter in der digitalen Bildverarbeitung gehört. Bei den Rangordnungsfiltern werden die Pixelwerte in einer definierten Umgebung eines Pixels aufgesammelt und der Größe nach sortiert. Anschließend wird ein Grauwert aus dieser Liste ausgewählt, welcher den Grauwert des aktuellen Pixels ersetzt. Beim Medianfilter wird der Grauwert genommen, welcher sich in der Mitte der Liste befindet. Dadurch lässt sich Rauschen unterdrücken ohne dabei Kanten zu glätten. Somit werden einzelne Pixel und kleine Pixelgruppen unter der Annahme gefiltert, dass diese Defekte des IR-Detektors sind und kein signifikantes IR-Signal darstellen. Auf diese Weise lassen sich die Kühlluftbohrungen aus der Filtermaske eliminieren, die man ansonsten wie Verschmutzungen behandeln würde.

Schritt 3: Da in (c) noch die Wärmeentwicklung zu sehen ist, die durch die Dämpfung der Anregung in der Verschmutzung entstand [97], welche sich dann lateral in der Turbinenschaufel ausbreitete, ist das detektierte IR-Signal bei der Ultraschall-Anregung größer als die tatsächliche Verschmutzung, wie sie durch die Blitzthermografie detektiert wird. Deshalb sind in (c) Signalartefakte, um die maskierten Verschmutzungen zu sehen. Das heißt, dass man einen Dilatationsfilter auf die Filtermaske anwendet, welcher das Amplitudensignal um die Verschmutzungen herum in einem größeren Bereich filtert als es ursprünglich der Fall ist.

Zur Abschätzung der Filterkerngröße lässt sich die Wärmediffusionsgleichung (2.25) in Kugelkoordinaten für eine periodische Anregung lösen.

Da nur der radiale Anteil von Interesse ist, wird bei der Berechnung nur dieser Term des dreidimensionalen Laplace-Operators Δ in der Wärmediffusionsgleichung betrachtet:

$$\Delta T - \frac{1}{\alpha_{\text{Diff}}} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (4.9)$$

Es lässt sich zeigen, dass (4.9) ebene Wellen mit der Frequenz f als Lösung besitzt mit:

$$T(r, t) = \frac{A}{r} \exp(-\gamma r) \exp(i2\pi ft) \quad (4.10)$$

$$\gamma = (1 + i) \frac{1}{\mu_e} \quad (4.11)$$

$$\gamma^2 = \frac{2i}{\mu_e^2} \quad (4.12)$$

$$\mu_e = \sqrt{\frac{\alpha_{\text{Diff}}}{\pi f}} \quad (4.13)$$

Die vollständige Lösung mit der Konstanten A lautet damit:

$$T(r, t) = \frac{A}{r} \exp\left(-\frac{r}{\mu_e}\right) \exp\left(i\left[2\pi ft - \frac{r}{\mu_e}\right]\right) \quad (4.14)$$

Um die thermische Diffusionslänge exakt anzugeben, wird wegen der $1/r$ Abhängigkeit ein Wert für die Kontaminationsgröße benötigt. Für den Fall, dass die Verschmutzungsausdehnung größer als μ_e ist, bilden sich ebene Wellen mit der thermischen Diffusionslänge nach (4.13) aus. Für den Fall, dass der Verschmutzungsradius sehr viel kleiner als μ_e ist, muss die $1/r$ -Abhängigkeit mitbetrachtet werden und man muss für eine Lösung die Ausdehnung der Verschmutzung angeben.

Für die Reichweite der Wärmewelle μ_e bei einer periodischen Anregungsfrequenz von 4 Hz in Inconel 738 mit einer thermischen Leitfähigkeit von $12 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, einer Dichte von 8200 kg m^{-3} und einer spezifischen Wärmekapazität von $420 \text{ W s kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ lässt sich mit (2.26) und (4.13) die thermische Diffusionslänge zu 0,53 mm berechnen. Da die betrachteten Verschmutzungen größer als der berechnete Wert sind, gibt (4.13) die thermische Diffusionslänge nach den oben genannten Überlegungen in guter Näherung wieder. Es lässt sich in etwa eine radiale Ausdehnung von 0,75 Pixel berechnen. Für eine gute visuelle Abgrenzung der Verschmutzungen ohne Restsignal im Randbereich sollen 80 % des Amplitudensignals um die Verschmutzungen mit der Dilatation gefiltert werden, wodurch die Ausdehnung mindestens 1,2 Pixel haben muss. Deshalb wird der in Abb. 4.26 gezeigte Filter angewendet.

Der Vergleich des originalen mit dem bearbeiteten Amplitudenbild in Abb. 4.27 (a) und (c) und die Zusammenführung mit dem Phasenbild (b) im HSV-Farbraum in (d) und (f) zeigt den Vorteil der Filterung einer Ultraschall-Thermografie mit einer blitzthermografischen Verschmutzungserkennung.

Bild (d) zeigt die Ausgangssituation, in welcher die echten Defekte nicht von oberflächlichen Verschmutzungen getrennt werden können.

In der Darstellung (f), wurden die Kontaminationen mit Hilfe der referenzierten Verschmutzungserkennung maskiert. Dadurch ist das IR-Signal der Verschmutzungen vom

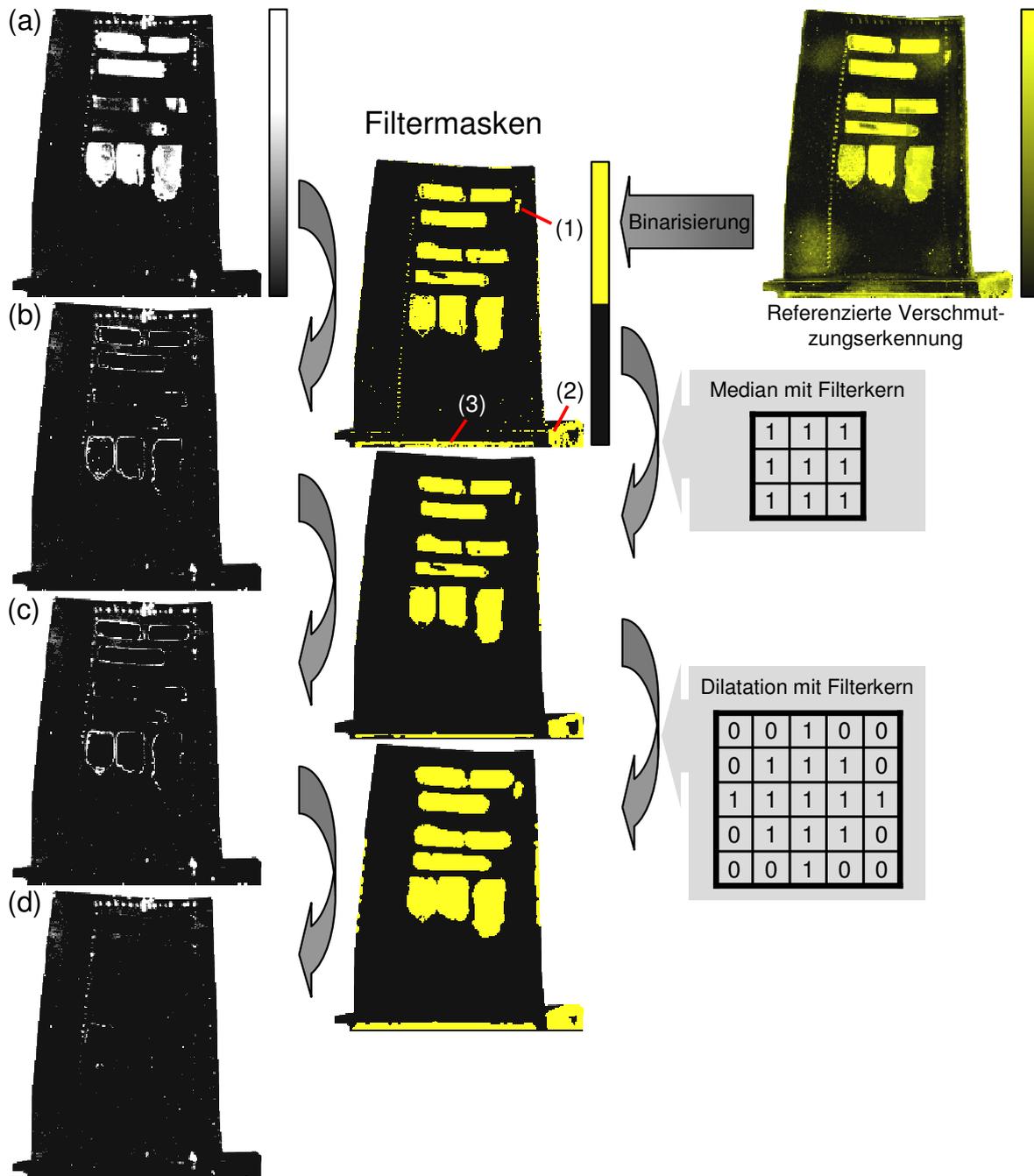


Abb. 4.26: Bild (a): Amplitudenbild in Falschfarbendarstellung. Bilder (b) – (d): Ergebnisbild nach der Anwendung der jeweiligen Filtermaske (schwarz-gelb). Rechts oben: Falschfarbendarstellung des Ergebnisbildes aus Abb. 4.24 rechts.

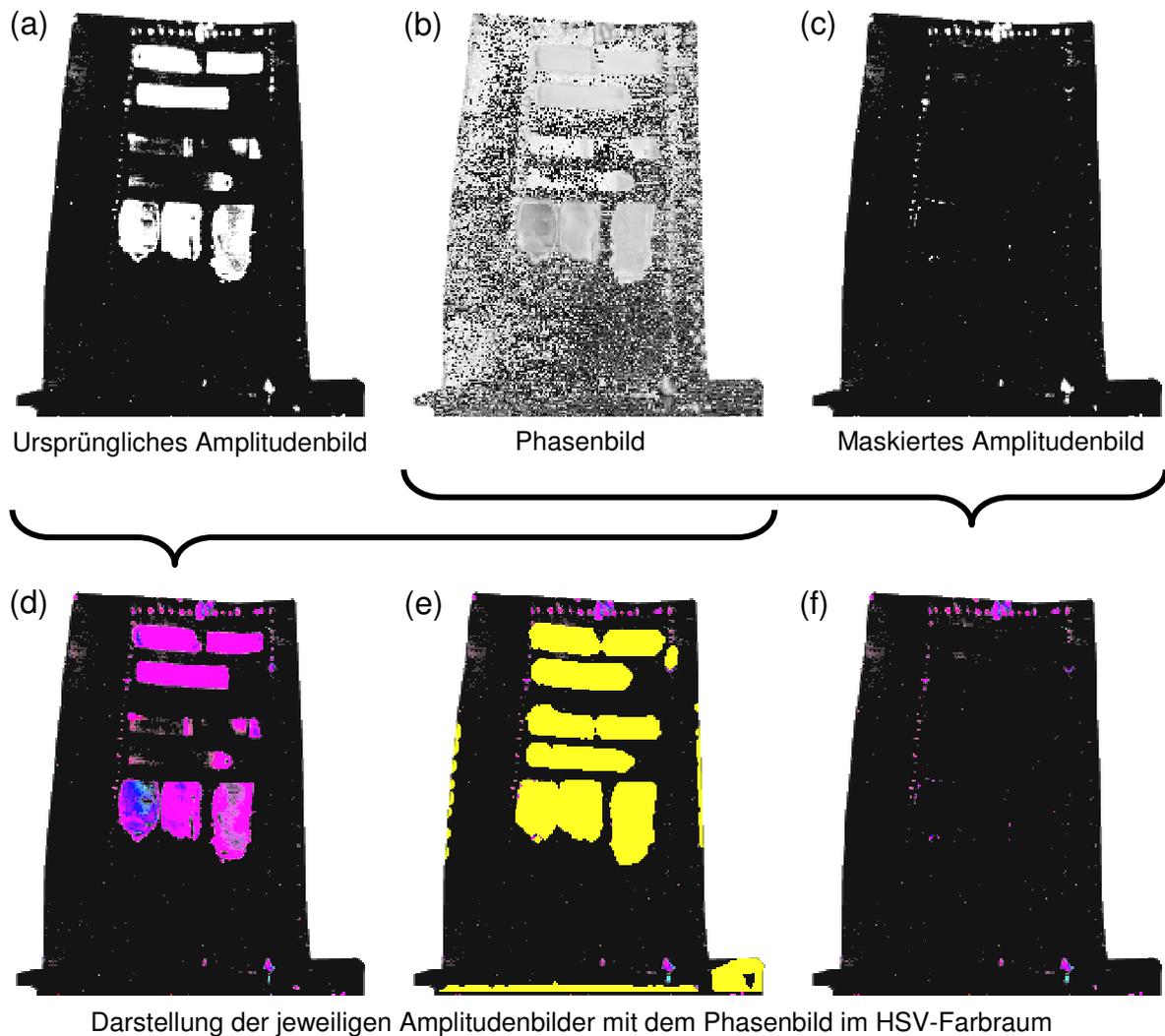


Abb. 4.27: Vergleich des ursprünglichen Amplitudenbildes (a) mit dem maskierten Amplitudenbild (c). Beide Bilder sind mit identischer Farbpalette und gleicher Kontrasteinstellung dargestellt. (d), (e) und (f): Vergleich der HSV-Darstellung von dem Phasenbild mit dem ursprünglichen (d), gefilterten (e) und maskierten (f) Amplitudenbild.

Signal der Risse eindeutig unterscheidbar. Darüber hinaus sind die Risse im oberen Teil der Turbinenschaufel gut erkennbar. Außerdem wurden die oberflächlichen Verschmutzungen inkl. der Signalränder entfernt, ohne dabei zu stark die Kühlluftbohrungen zu filtern. Zusätzlich ist am Schaufelfuß der Riss durch die Beseitigung des Rauschens deutlich besser zu erkennen.

Im Bild (e) in Abb. 4.27 sind die Verschmutzungen gelb maskiert um den Prüfer darauf hinzuweisen, dass sich unter diesen weitere Defekte befinden können, die noch nicht detektiert wurden.

4.1.10 Zusammenfassung der Verschmutzungserkennung

Mit dem Einsatz von vier IR-Bandpassfiltern, welche den Empfindlichkeitsbereich einer MWIR-Kamera in spektrale Banden unterteilen, kann man kalibrierfrei Kontaminationen auf Bauteilen nachprüfen. Ausgenutzt wird die spektrale Selektivität von Materialien, welche ein wellenlängenabhängiges IR-Signal nach der Anregung durch einen Blitzpuls emittieren, wodurch sie sich von metallischen spektral wenig aktiven Prüfteilen unterscheiden.

Der Erfolg der spektralen Verschmutzungserkennung hängt von den folgenden Faktoren ab: Das Basismaterial sollte eine möglichst hohe und wellenlängenunabhängige Emissivität haben, damit das emittierte IR-Signal maximal ist, um es so von allen anderen Kontaminationen robust zu unterscheiden.

Weiter hängt die Erkennbarkeit der Verschmutzungen von den spektralen Materialeigenschaften im Sichtbaren und Infraroten ab, worauf bereits in Kap. 2.8 eingegangen wurde. Die Anregung erfolgt mittels Blitzpuls im Sichtbaren und die Signaldetektion im Infraroten, d. h., dass man in Abhängigkeit der optischen Eigenschaften nicht nur die Oberfläche der Verschmutzung anregt, sondern auch die tieferen Lagen. Da Metalle im Sichtbaren opak sind, regt der Blitz nur oberflächlich an. Allerdings hängt es wegen der Detektion im Infraroten und damit von der IR-Teiltransparenz des Materials ab, wie weit man mit der IR-Kamera in das Material hineinschauen kann.

Je nachdem wie wellenlängenabhängig die Teiltransparenz und die IR-Emissivität ist, misst man nach der Anregung das IR-Signal über die Verschmutzungsschichtdicke integriert. Demzufolge braucht man für eine Kontaminierung mit geringer spektraler Aktivität eine höhere Schichtdicke, damit sich die wellenlängenabhängige Emissivität im IR-Signal zuverlässig messbar auswirkt. Jedoch wird für ein Material mit hoher spektraler Aktivität nur eine geringe Schichtdicke benötigt. Das heißt, dass die detektierbare Mindestschichtdicke von den Materialeigenschaften der jeweiligen Verschmutzung abhängt. So hat man abgesehen von den Schwierigkeiten, die beim Arbeiten mit IR-Filtern auftreten, eine komplizierte Mischung von Materialparametern, wie wellenlängenabhängige Emission, Transmission und Absorption sowohl für den sichtbaren als auch den infraroten Spektralbereich, welche die Zuverlässigkeit für beliebig spektral aktive Verschmutzungen einschränkt.

Da durch den Einsatz von Spektralfiltern das SNR gegenüber der Benutzung des gesamten Spektralbereichs abnimmt, hat man Geraden an den Signalverlauf nach dem Blitzpuls je Spektralbereich im Doppelt-logarithmischen gefittet und die Streuung der

Geraden in den vier Spektralbereichen ausgewertet. Dadurch wurden die Ergebnisse je nach Emissivität des Basismaterials signifikant gesteigert. Je geringer die Emissivität des Bauteils ist und demzufolge das detektierte IR-Signal, desto wirkungsvoller ist der Algorithmus, wie am Beispiel der keramisch beschichteten Turbinenschaufel demonstriert wurde.

Außerdem hat sich gezeigt, dass je nachdem welcher Spektralbereich betrachtet wird das SNR unterschiedlich hoch ist und gerade im kurzwelligen Spektralbereich, in dem sich oftmals die größte spektrale Aktivität nachweisen ließ, sehr niedrig ist, was das Zustandekommen eines rauscharmen Ergebnisbildes erschwert.

Jedoch konnte der kalibrierfreie Ansatz in soweit überzeugen, dass Schichtdickenunterschiede des spektral wenig aktiven Basismaterials unauffällig bleiben.

Darüber hinaus können gute Ergebnisse bei porösen Materialien erzielt werden, bei denen sich die Volumeneigenschaften durch das Eindiffundieren von Ölen oder Fetten ändern, die mit bloßem Auge schwer erkennbar sind. Dadurch wird selbst bei Verschmutzungen mit geringer spektraler Aktivität die Nachweisbarkeit durch die größere Kontaminatinschichtdicke erhöht.

Beim referenzierten Ansatz wird hingegen der gesamte Empfindlichkeitsbereich der IR-Kamera genutzt und die Abweichung des IR-Signals zur hinterlegten Referenz wird ausgewertet. Dies erfordert konstante Eigenschaften der Prüfteile im Vergleich zur Referenz. Allerdings ist der geringe Zeitaufwand bei der Messung vorteilhaft, der beim kalibrierfreien Ansatz mit dem gleichen Ergebnisbild nicht erreicht wird.

Das Ergebnisbild der blitzthermografischen Verschmutzungserkennung kann im Anschluss daran genutzt werden, um Fehlindikationen in einer Ultraschall-Thermografie zu filtern oder zu maskieren. Durch die Einbindung der Wärmeleitungseigenschaften des Prüfteils können zwei digitale Bildbearbeitungsfilter angepasst werden, um die laterale Wärmeausbreitung ausgehend von den Verschmutzungen in die Filtermaske der Verschmutzungserkennung miteinzubeziehen. Im Ergebnis kann dann zweifellos zwischen Fehlindikation, hervorgerufen durch oberflächliche Verschmutzungen, und echten Indikationen von Defekten eindeutig unterschieden werden.

4.2 Materialerkennung

In diesem Kapitel wird darauf eingegangen, wie mit Hilfe einer IR-Kamera und den vier dielektrischen IR-Bandpassfiltern die wellenlängenabhängige Emissivität ausgenutzt wird, um so Materialien berührungslos im MWIR zu unterscheiden. Auf diese Weise würde sich bei einem erkannten Material die dazu hinterlegte Wärmeleitfähigkeit nutzen lassen, um sie in einer aktiven Thermografie in der Auswertung als Parameter zu verwenden. Weitere Anwendungen liegen in der Sortierung von Eisenwaren oder der Mülltrennung [129].

4.2.1 Voruntersuchungen mit einem FTIR-Spektrometer

Für die Materialerkennung im Infraroten wird ausgenutzt, dass die wellenlängenabhängigen Strahlungsleistungen von unterschiedlichen Materialien bei gleicher Temperatur wegen deren Emissivitätsverlauf $\varepsilon(\lambda)$ unterscheidbar sind. Um diesen Sachverhalt zu untersuchen, wurden Emissionsmessungen an verschiedenen Proben bei unterschiedlichen Temperaturen mit Hilfe eines Infrarot-Spektrometers (Hersteller: Bruker, Modell: IFS 66v) durchgeführt, welches das für die Thermografie interessante Spektrum abdeckt ($500 - 5000 \text{ cm}^{-1}$, entsprechend $20 - 2 \mu\text{m}$). Neben der Verwendung der in der Spektrometrie üblichen Reflexionsgeometrie (DRIFT-Aufbau), war durch eine zusätzliche Emissionseinheit auch direkt die Messung der Emissionsspektren möglich.

Die in den gemessenen Spektren enthaltene Gerätecharakteristik muss kompensiert werden, um sie später mit den IR-Kameramessungen vergleichen zu können. Dazu werden die Spektren mit einer Referenzmessung an einer Grafitoberfläche verglichen, die in guter Näherung als ein grauer Strahler hoher Emissivität mit $\varepsilon = 0,98$ [55] angenommen werden kann. Dazu wird eine wellenlängenabhängige Funktion $c_G(\lambda, T)$ bestimmt, welche jeden Messwert von Grafit $I_G(\lambda, T)$ auf die berechnete Planck-Kurve $I_s(\lambda, T)$ abbildet:

$$c_G(\lambda, T) = \frac{I_G(\lambda, T)}{I_s(\lambda, T)} \quad (4.15)$$

Diese Funktion, die für eine bestimmte Temperatur gilt, wird dann auf die Spektren der anderen Materialien angewendet, um diese ebenfalls in eine Darstellung, welche der einer Planck-Kurve entspricht, zu überführen. In Abb. 4.28 sind die gemessenen Emissionsspektren von Grafit und die Simulationen der Planck-Kurven von Raumtemperatur bis $400 \text{ }^\circ\text{C}$ zu sehen.

Bei Betrachtung einer einzigen Wellenlänge ist zu erkennen, dass die durch das Spektrometer gemessenen temperaturabhängigen Intensitäten direkt proportional zur Temperatur T sind, wie anhand von Abb. 4.28 abgeleitet werden kann. Durch das Fitten einer Geraden je Wellenlängeneinheit an die temperaturabhängigen Messpunkte wird ein Zusammenhang zwischen gemessener Strahlungsintensität und Temperatur hergestellt. Dies ermöglicht die Berechnung des Messsignals für weitere Temperaturen. Mit Hilfe von (4.15) kann dann die dazu passende Planck-Kurve berechnet werden. Zuvor muss allerdings das passende c_G bestimmt werden, in dem auch das gemessene Spek-

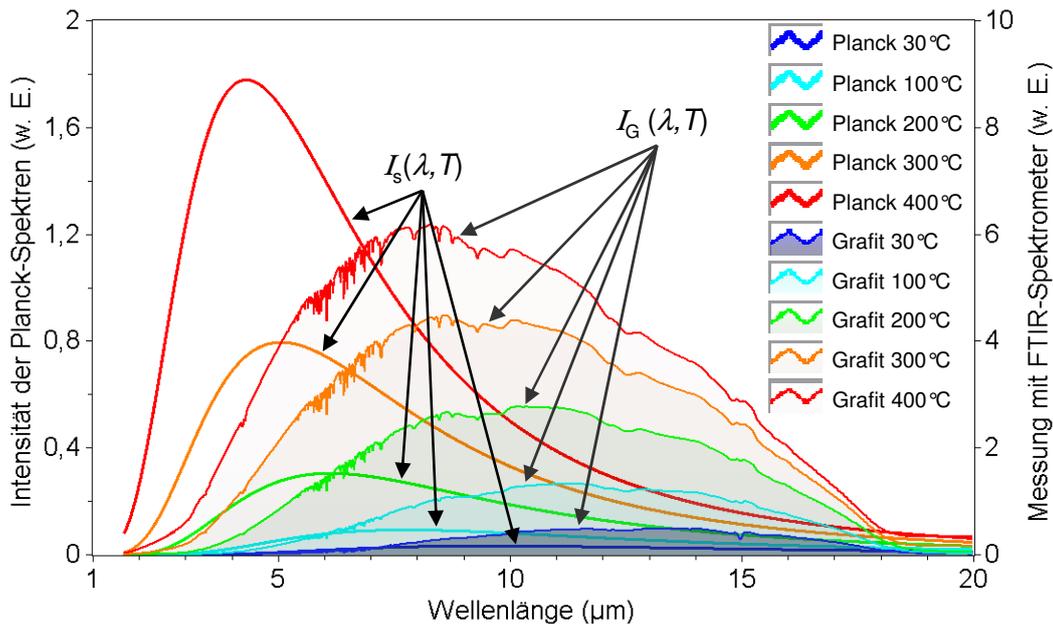


Abb. 4.28: Emissionsspektren von Raumtemperatur bis 400 C° für Grafit ($I_G(\lambda, T)$) und zusätzlich für die gleichen Temperaturen nach (2.6) berechnete Planck-Spektren ($I_s(\lambda, T)$).

trum der Referenz, welches in diesem Fall Grafit ist, für die betrachtete Temperatur berechnet wird, welches dann auf die entsprechende Planck-Kurve referenziert werden kann. Auf diese Weise lassen sich Planck-Kurven für verschiedene Materialien bei weiteren Temperaturen als nur den gemessenen berechnen.

In Abb. 4.29 (links) sind korrigierte Emissionsspektren für verschiedene Materialien bei 200 °C dargestellt. Man erkennt deutlich, dass durch die Kompensation die Emissionskurve von Grafit nun einer Planck-Kurve der entsprechenden Temperatur gleicht. Außerdem liegt die Emission der übrigen Materialien unter der von Grafit.

Anhand der Spektren lässt sich erkennen, dass jedes dieser Materialien eine unterschiedliche wellenlängenabhängige Emissionscharakteristik hat. Die Einflüsse der Atmosphäre (Absorptionslinien von CO₂ und H₂O zwischen 5 und 7 μm) wurden während der Messung durch die Evakuierung des Spektrometers weitgehend unterdrückt.

Zum Vergleich, wie sich die Spektren bei verschiedenen Temperaturen verhalten, sind in Abb. 4.29 (rechts) die Spektren von drei ausgewählten Materialien für jeweils 100 °C und 200 °C aufgetragen. Man kann deutlich erkennen, wie sich das Maximum der Kurven mit sinkender Temperatur zu größeren Wellenlängen hin verschiebt, und dabei gleichzeitig die Strahlungsintensität abnimmt (vgl. Abb. 2.2 und Abb. 2.4).

Im Folgenden wird überprüft, welche Messgenauigkeit mit der IR-Kamera aus Abb. 4.5 erreicht werden muss, um die genannten Materialien mit IR-Bandpassfilter (s. Abb. 4.4) zu unterscheiden. Die Kombination einer abbildenden ortsaufauflösenden IR-Kamera ist ohne größeren technischen Aufwand mit der wellenzahlauflösenden Eigenschaft eines Spektrometers nicht realisierbar.

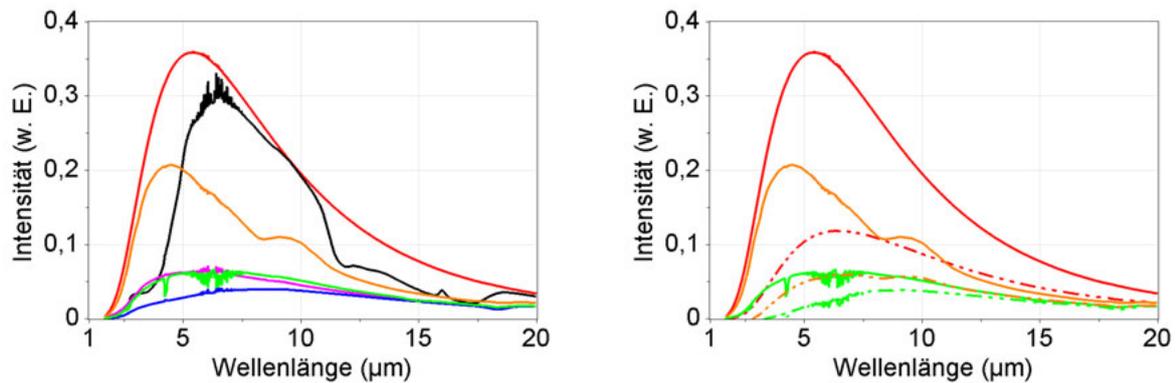


Abb. 4.29: Links: Auf Planck-Kurven (200 °C) bezogene Emissionsspektren für Grafit (rot), Aluminiumoxid Al_2O_3 600 µm stark (schwarz), VA-Stahl (pink), Aluminium (blau) und für Karosseriewerkstoffe aus der Automobilindustrie bereitgestellt durch die Volkswagen AG (VW)–Stahlblech feuerverzinkt (grün) und Stahlblech mit Aluminium-Silicium-Beschichtung (AlSi) (orange). Rechts: Spektren von Grafit (rot), Stahlblech feuerverzinkt (grün), Stahlblech AlSi beschichtet (orange) für jeweils 200 °C (durchgezogene Linie) und 100 °C (gestrichelte Linie).

Zur Überprüfung wurden die Transmissionskennlinien der breitbandigen Filter (s. Abb. 4.30) mit den kompensierten Messkurven multipliziert und über den gesamten Wellenlängenbereich integriert. Die so entstandenen Emissionsintensitäten sind für verschiedene Materialien bei einer Temperatur von 150 °C in Abb. 4.31 abgebildet.

Wie man erkennen kann, sind die jeweiligen Intensitäten in den Spektralbereichen der Filter bei einer Temperatur von 150 °C sowohl in der absoluten Höhe, als auch im relativen Verhältnis zueinander sehr verschieden. Um die geringen spektralen Unterschiede in den vier Spektralbereichen im Weiteren mit der IR-Kamera und den vier IR-Filtern sicher aufzulösen, wird eine Kalibrierung benötigt.

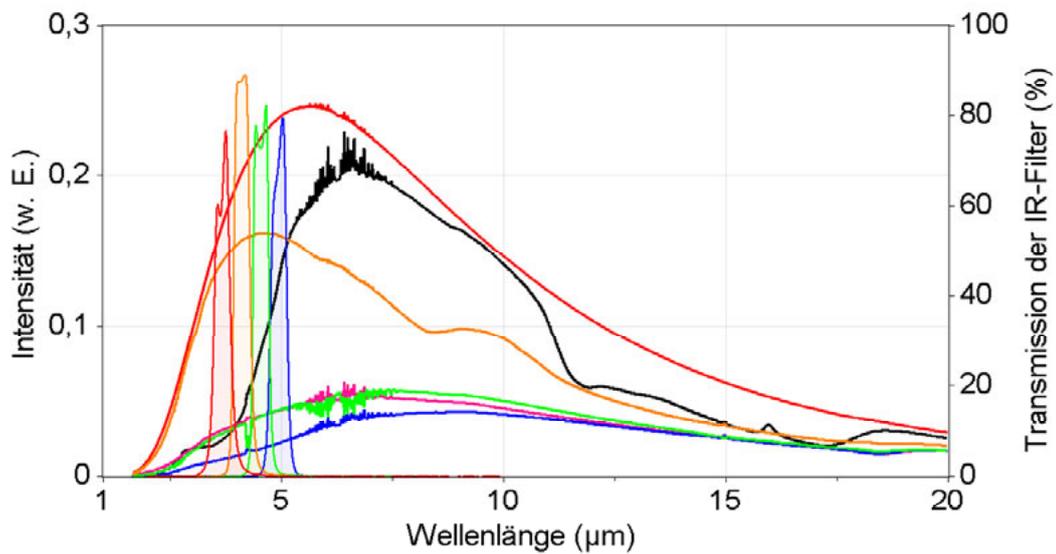


Abb. 4.30: Darstellung der auf Grafit bezogenen Spektren bei 150 °C für verschiedene Materialien. Zusätzlich sind die Transmissionskennlinien in Prozent der vier IR-Bandpassfilter zwischen 3–5 μm eingezeichnet. Grafit (rot), Al₂O₃ 600 μm stark (schwarz), VA-Stahl (pink), Aluminium (blau), Stahlblech feuerverzinkt (grün) und Stahlblech AlSi beschichtet (orange).

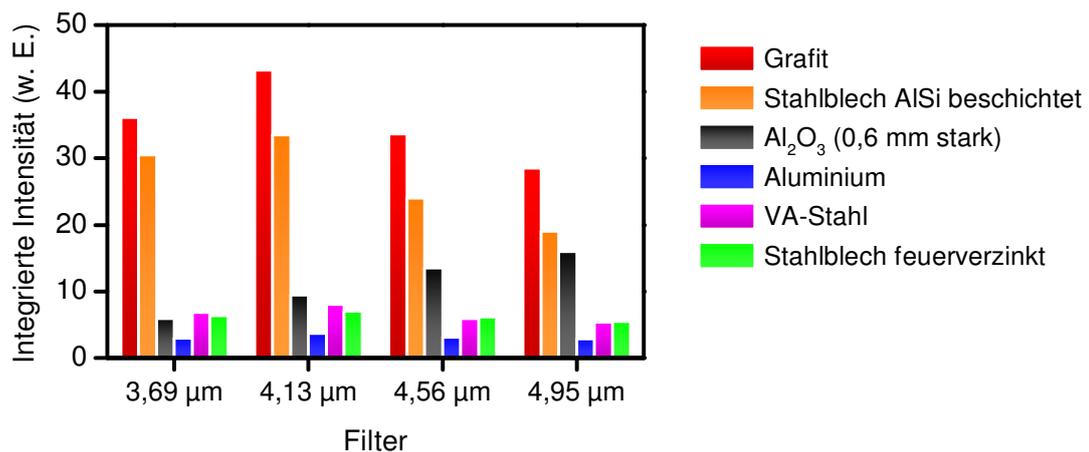


Abb. 4.31: Integrierte auf eine Planck-Kurve referenzierte IR-Strahlungsintensitäten für die sechs Materialien aus Abb. 4.30 im Transmissionsbereich des jeweiligen IR-Filters.

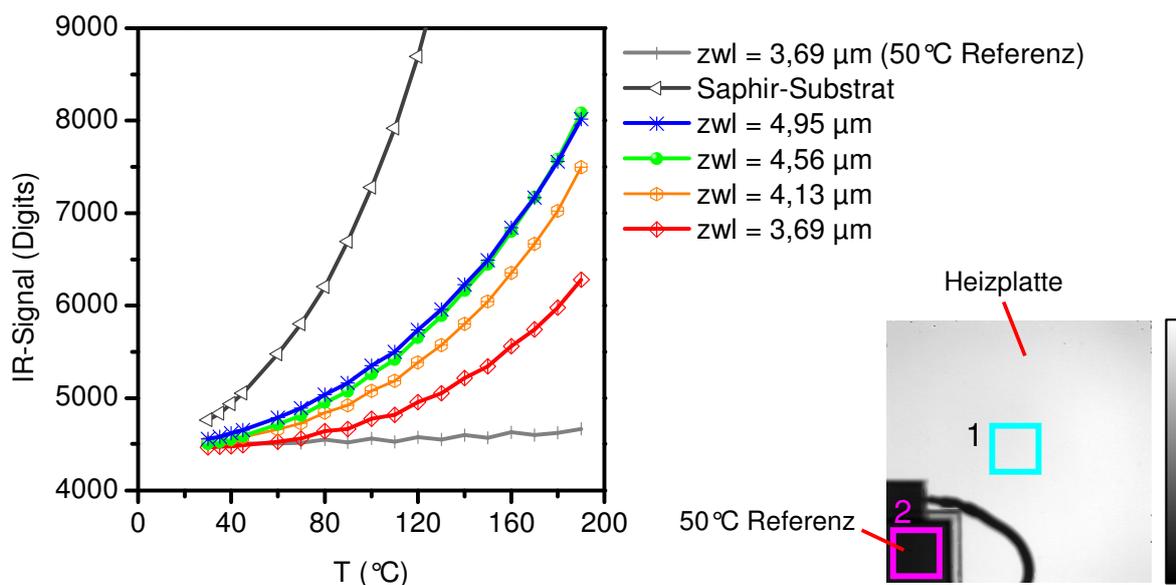


Abb. 4.32: Darstellung des gemessenen Signals in Abhängigkeit der Temperatur des schwarzen Strahlers (ROI1 unten rechts) im Transmissionsbereich der vier IR-Filter und des Saphir-Substrats. Zusätzlich ist eine 50 °C temperaturstabilisierte Referenz aufgestellt (ROI2 unten rechts). In der Grafik ist sie wegen der Übersichtlichkeit nur für den kurzwelligen IR-Filter eingezeichnet. Für die anderen Filter ist das Signal parallel nach oben versetzt.

4.2.2 Kalibrierung der „Farb“-IR-Kamera

Die Kalibrierung ermöglicht die Messungen direkt auf Grafit zu beziehen, wodurch die Messungen von der spektralen Gerätecharakteristik unabhängig sind. Dadurch können die Ergebnisse mit denen anderer Messapparaturen verglichen werden, ohne weitere Parameter zu berücksichtigen.

Als Vorbereitung für die Messung werden zu den einzelnen Filtern bei mindestens fünf Temperaturen Kalibrierbilder von einer mit Grafit beschichteten Heizplatte (schwarzer Strahler) aufgenommen, welche gleichzeitig als Referenzen dienen. Dadurch erhält man eine direkte Zuordnung vom detektierten IR-Signal zur Temperatur des Kalibrierstrahlers. Die Heizplatte ist PID-geregt (Proportional-Integral-Differential) und hat eine homogene Temperaturverteilung ($\pm 1^\circ\text{C}$) über die Oberfläche. In Abb. 4.32 ist das gemessene Signal der IR-Kamera in Abhängigkeit der Heizplattentemperatur dargestellt. Benutzt wurden die vier IR-Bandpassfilter und das breitbandig antireflexionsbeschichtete Saphir-Substrat. Man erkennt, dass durch den Einsatz der dielektrischen Filter nur noch ein relativ geringer Anteil des Signals im Vergleich zur Transmission des Saphir-Substrats gemessen wird. Um zu kontrollieren, ob die Messapparatur während der Messung zeitlich driftet, wurde ein zusätzlicher zweiter schwarzer Strahler vor der Heizplatte aufgestellt, an dem eine konstante Temperatur von 50 °C eingestellt war.

Wie zu erkennen ist, bleibt die Messapparatur annähernd zeitstabil bis auf einen minimalen Anstieg des gemessenen Signals in ROI2. Durch Auslesen des eingebauten

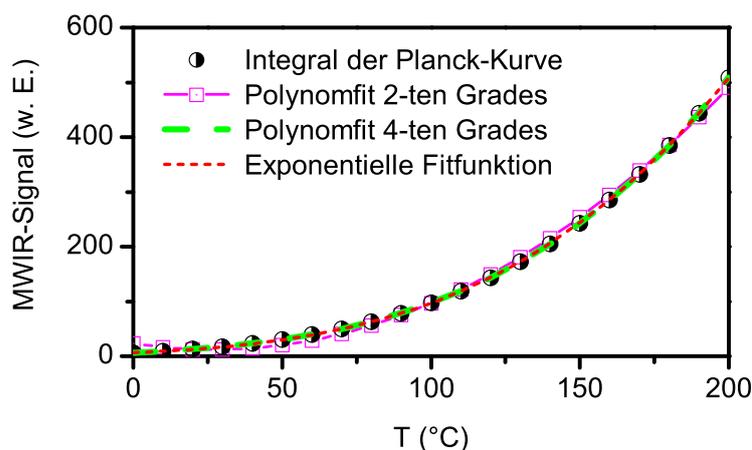


Abb. 4.33: Aufgetragen ist die integrierte Planck-Kurve im Empfindlichkeitsbereich der IR-Kamera. An die berechneten Datenpunkte wurde zum Einen ein Polynom zweiter und vierter Ordnung und zum Anderen die exponentielle Funktion nach (4.16) gefittet.

Messensoren an jedem IR-Filter wurde ein Temperaturanstieg von $4,3^\circ\text{C}$ je Filter für einen Temperaturanstieg des schwarzen Strahlers von 30°C auf 190°C gemessen. Das heißt, dass die Filter wie auch das Objektiv IR-Strahlung absorbieren und somit selbst zusätzlich IR-Strahler emittieren. Außerdem sieht man, dass im kurzwelligen Filter die gemessene Signalintensität am geringsten ist und mit größerer zwl des jeweiligen Filters ansteigt.

Mit den aufgenommenen Bildern kann nachträglich eine NUC (nonuniformity-correction) an der Messserie mittels eines pixelweisen Polynomfits an die Kalibrierbilder für jeden IR-Filter durchgeführt werden, wie in Abb. 4.34 schematisch aufgezeigt ist.

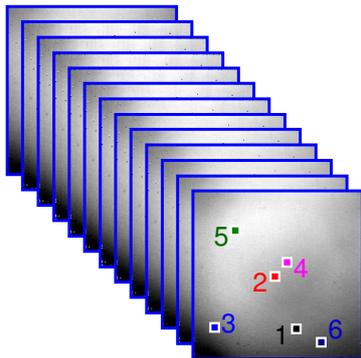
Zur Kalibrierung kann entweder ein Polynomfit oder eine exponentielle Fitfunktion benutzt werden, die pixelweise an den temperaturabhängigen Signalverlauf gefittet wird. Zur Entscheidung, welche der beiden Alternativen am Besten geeignet ist, sind in Abb. 4.33 beide Varianten gezeigt. Aufgetragen ist zum Einen das numerisch ausgewertete Integral über die Planck-Kurve im Empfindlichkeitsbereich der IR-Kamera von $3,4\text{--}5,1\mu\text{m}$, zum Anderen wurde an den berechneten Signalverlauf ein Polynom zweiter und vierter Ordnung wie auch die folgende exponentielle Funktion S [57] gefittet:

$$S = \frac{R}{\exp\left(\frac{B}{T}\right) - F} \quad (4.16)$$

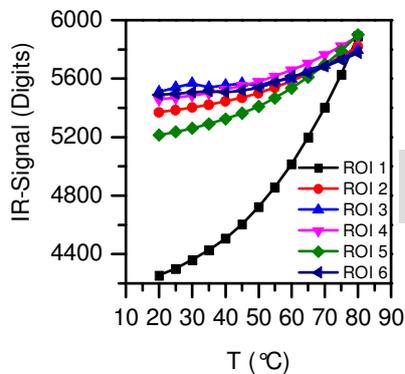
Dabei werden R (Antwortfaktor), B (spektraler Faktor) und F (Formfaktor) berechnet.

Daraufhin wird zur Kalibrierung ein Polynomfit vierter Ordnung genutzt, weil er eine ausgezeichnete Übereinstimmung mit dem Integral über die Planck-Kurve im Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 200°C hat und zudem einfacher in Software umzusetzen ist gegenüber dem Fitten einer Exponentialfunktion. Der Polynomfit zweiter Ordnung hingegen unterschätzt die Temperatur bzw. überschätzt sie ober- bzw. unterhalb von 100 Signaleinheiten.

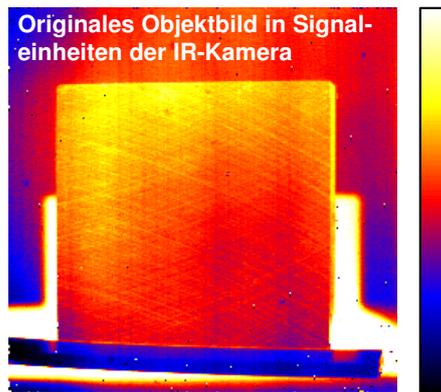
Kalibrierbilder eines schwarzen Strahlers bei verschiedenen Temperaturen



Pixelweiser Polynomfit an die Kalibrierbilder



Anwendung des berechneten Polynomfits auf das Originalbild



Originalbild

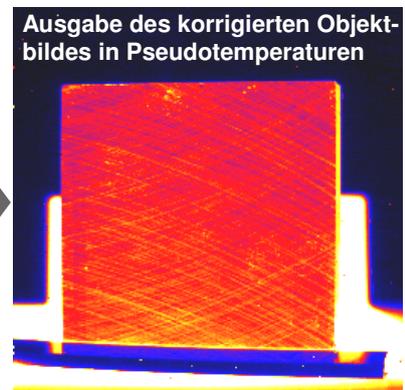


Abb. 4.34: Pixelweise wird an die 13 Kalibrierbilder des schwarzen Strahlers ein Polynom vierter Ordnung gefittet. Anschließend wird das IR-Kamerabild durch den Polynomfit in ein Temperaturbild bezogen auf die Temperatur des schwarzen Strahlers umgerechnet.

Durch die Kalibrierung wird der Effekt der Vignettierung durch das Objektiv, also das Abdunkeln des Bildrandbereichs, bei unterschiedlichen Temperaturen des Heizstrahlers korrigiert, so wie die Eigenstrahlung der IR-Filter und des Objektivs durch IR-Absorption als auch die Detektorempfindlichkeit. Gleichzeitig werden die gemessenen Intensitäten (Grauwerte oder Digits) der IR-Kamera in Temperaturen umgerechnet bezogen auf die des Heizstrahlers, und zwar einheitlich für jeden IR-Filter. Die verbleibenden Temperaturunterschiede bei der Betrachtung von Testkörpern mit homogener Temperatur resultieren aus Emissivitätsunterschieden der Materialien.

Da die Kamera auf Grafit geeicht ist, kann nur die Temperatur von Grafit korrekt bestimmt werden. Deshalb wird im Weiteren generell von Pseudotemperaturen gesprochen, da die Temperaturen aller anderen betrachteten Materialien ohne Kenntnis über deren wellenlängenabhängige Emissivität nicht bestimmt werden können.

Die Anwendung des Kalibrieralgorithmus auf den in Abb. 4.35 in seitlicher Ansicht dargestellten blanken rostfreien Stahlblock, dessen Oberfläche mit einem Fräskopf bearbeitet wurde und welcher auf einer 60 °C heißen Heizplatte steht, vereinheitlicht seine Temperatur in jedem der vier Spektralbereiche. Im Gegensatz zu den originalen Bildern, in denen der Temperaturgradient scheinbar willkürlich verläuft, ist er in den kompensierten Bildern korrekt in jedem Spektralbereich dargestellt. So fällt die Temperatur im korrigierten Bild von unten nach oben hin ab. Hinter dem Stahlblock wurde ein zweiter geschwärzter Stahlblock aufgestellt, der als Referenz dient und eine Temperatur von 60 °C hat. Wegen der geringeren Emissivität des blanken Stahlblocks wird eine geringere Temperatur gemessen, da die Messapparatur wie bereits erwähnt nur die Temperatur von Grafit korrekt darstellt.

Weiterhin wurde gleichzeitig der Hintergrund homogenisiert, der sich auf Raumtemperatur befindet.

Durch den Kompensationsalgorithmus wird ein direkter Zusammenhang zwischen dem gemessenen IR-Signal eines schwarzen Strahlers und seiner Temperatur hergestellt, der es sowohl ermöglicht den Signalbereich einer IR-Kamera korrekt zu interpolieren, als auch die Messapparatur zu kalibrieren.

Dies ist die Basis für die folgenden Messungen der spektralen Signaturen von unterschiedlichen Materialien.

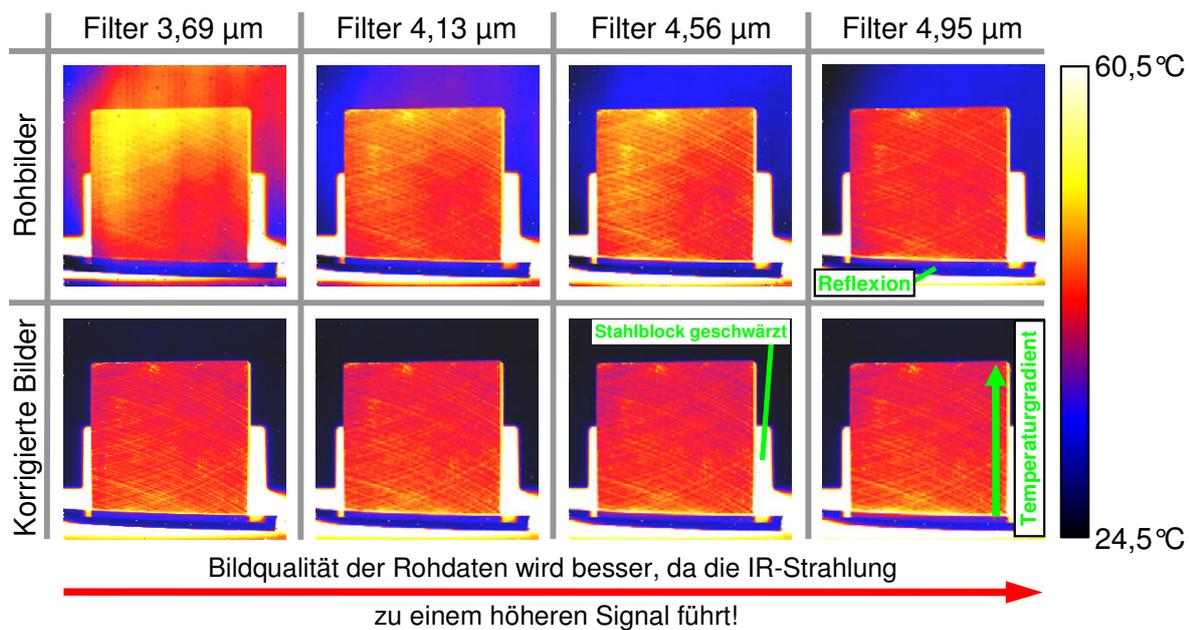


Abb. 4.35: Vergleich der originalen Rohbilder mit den korrigierten Bildern in der Matrixdarstellung für jeden der vier IR-Filter.

4.2.3 Ausnutzung der wellenlängenabhängigen Emissivität bei der passiven Thermografie

Mit dem in Abb. 4.36 links dargestellten Versuchsaufbau wird das von den Proben emittierte IR-Signal in den vier Spektralbereichen detektiert. Die Heizplattenoberfläche ist mit Grafit beschichtet. In der hier gezeigten Messung sind die Proben auf der Heizplatte in folgender Reihenfolge in Abb. 4.36 rechts angeordnet.

Entlang der Spalten von links oben nach rechts unten: Stahlblech mit KTL-Lack, VA-Stahlplättchen poliert, Stahlblech unbehandelt (teilweise korrodiert), Stahlblech feuerverzinkt, Stahlblech elektrolytisch verzinkt, warmumgeformtes Stahlblech mit AlSi-Beschichtung, Stahlblech schwarz lackiert, Aluminium blank, Aluminiumoxid-Plättchen (Al_2O_3) der Dicke 0,3 mm und Al_2O_3 -Plättchen der Dicke 0,6 mm (alle Stahlbleche wurden vom Projektpartner VW zur Verfügung gestellt).

In der Abb. 4.36 links ist der wesentliche Störeinfluss dargestellt, welcher die Materialbestimmung und auch eine Pseudotemperaturbestimmung erschwert. Dabei handelt es sich um die IR-Strahlung der Umgebung, die in Abhängigkeit der Emissivität der Probe mehr oder weniger stark in die Kamera reflektiert wird. So wird von der IR-Kamera immer die Summe aus der in die Kamera reflektierten Hintergrundstrahlung $\propto (1 - \varepsilon(\lambda))$ und der von der Probe emittierten IR-Strahlung $\propto \varepsilon(\lambda)$ gemessen. Deshalb ist es sinnvoll, den Messaufbau gegen Reflexionen aus der Umgebung abzusichern.

Messung und Nachbearbeitung der gemessenen Bilder mit Hilfe der Kalibrierbilder wurden wie folgt durchgeführt:

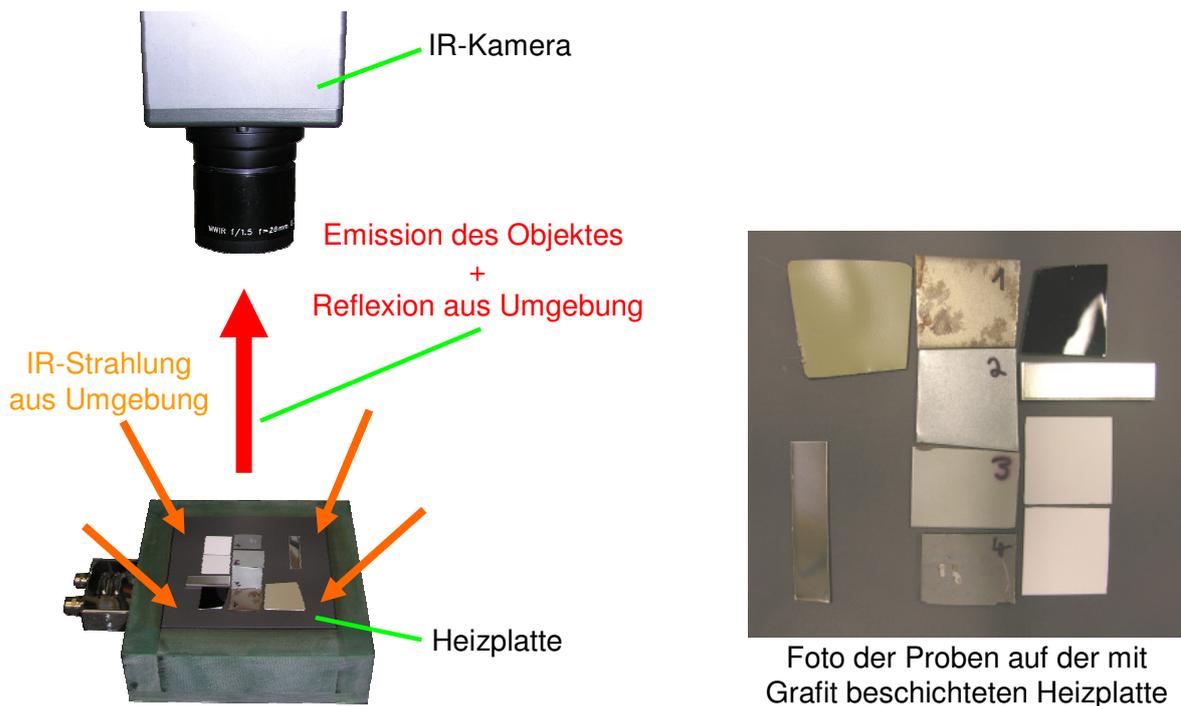


Abb. 4.36: Links: Messaufbau mit der IR-Kamera, die auf die Heizplatte herabschaut. Hier liegen die im Text genannten Proben. Rechts: Foto der Proben auf dem schwarzen Strahler.

1. Aufnahmen von Kalibrierbildern der Heizplatte für die vier IR-Filter ohne Proben bei verschiedenen Temperaturen.
2. Mit den vier IR-Filtern jeweils ein Bild der Heizplatte mit Proben aufnehmen.
3. Pixelweise Korrektur des Messbildes mit dem an die Kalibrierbilder gefitteten Polynomfits vierter Ordnung.
4. Durchführung der Materialerkennung.

Messung und Anwendung der Kalibrierung

Die Abb. 4.37 zeigt jeweils für ein korrigiertes und ein originales IR-Bild zwei LOIs (Lines of Interest), die den Pixelwert entlang der Linie darstellen (vgl. Kap. 4.2.2). Man sieht, wie sich das Bild durch die Anwendung einer Polynomfitkorrektur für den kurzwelligen IR-Filter ($3,69 \mu\text{m}$) verbessert. Der schwarze Strahler hat nun eine einheitliche Temperatur von 150°C , außerdem wurden die Temperaturwerte der übrigen Materialien homogenisiert.

Bei Anwendung der Korrektur auf die Messdaten für alle vier Spektralbereiche gelangt man zu den vier in Abb. 4.38 oben gezeigten auf Grafit bezogenen Pseudotemperaturbildern. Die Grafik in der Mitte zeigt für jeden Spektralbereich und jedes Material die entsprechende Pseudotemperatur. Lediglich die Temperatur des Grafits mit 150°C ist korrekt, da es schließlich auch zur Kalibrierung genutzt wurde. Die Positionen der

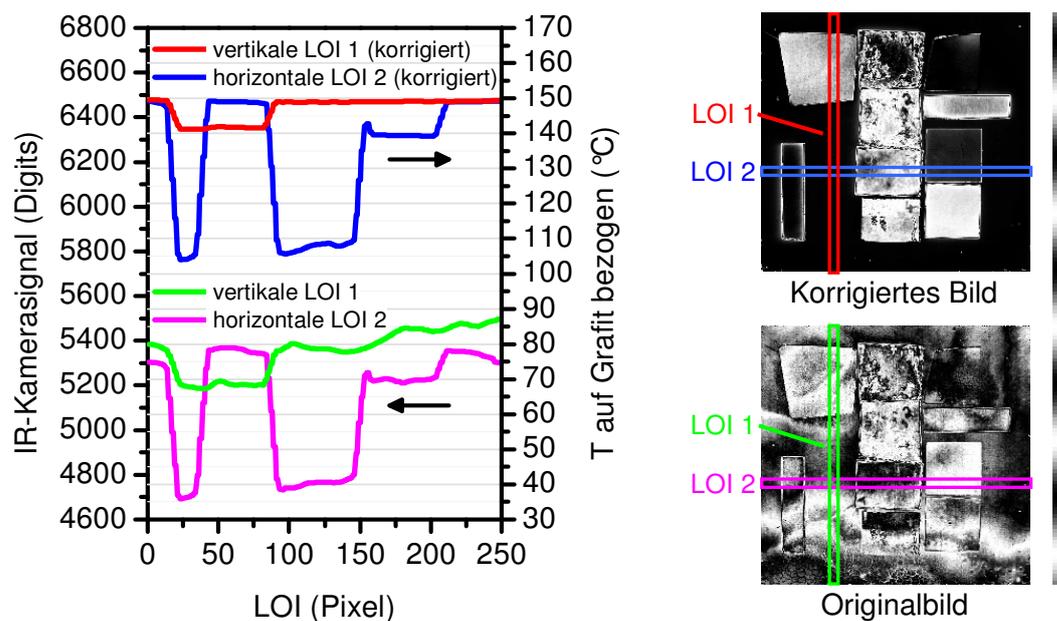


Abb. 4.37: Links: Grafische Darstellung der LOIs aus den rechten Bildern für den 3,69 μm Filter. Durch die Korrektur hat die Heizplatte eine einheitliche Temperatur von 150 $^{\circ}\text{C}$ im Gegensatz zum originalen Bild, in welchem der Grauwert der Heizplatte nicht einheitlich ist. Dasselbe gilt für die Proben: Die rote und blaue LOI in der Grafik bezieht sich auf die rechte y-Achse und die grüne und magenta farbene LOI auf die linke Ordinate. Rechts: Oben ist die Darstellung des korrigierten IR-Bildes und unten des unkorrigierten IR-Bildes mit den jeweiligen LOIs abgebildet.

ROIs sind im Bild rechts unten eingezeichnet. Die Grafik in der Mitte von Abb. 4.38 zeigt die spektrale Aktivität der Materialien. Die Aluminiumoxide als keramische Werkstoffe haben aufgrund ihrer bekannten Teiltransparenz ein deutlich unterschiedliches IR-Signal in den Spektralbereichen, das offensichtlich von der Materialdicke abhängt. Das mit hochglänzendem Lack beschichtete Stahlblech zeigt wegen der höheren Emissivität $\varepsilon(\lambda)$ gegenüber Grafit eine höhere Temperatur. Ansonsten besitzen noch das mit KTL-Lack und das mit AlSi beschichtete Stahlblech eine relativ hohe Emissivität im Vergleich zu den anderen Metallen, die sehr eng beieinander liegen und ein ähnliches spektrales Verhalten haben. Dies betrifft die ROIs 2, 3, 4, 5 und 8 in Abb. 4.38. Für die Materialerkennung ist es umso schwerer, je enger die Materialien beieinander liegen, wodurch selbst geringste Messfehler ins Gewicht fallen. Lediglich das 0,6 mm dicke Al_2O_3 (ROI 10) sollte relativ leicht erkannt werden, da es sich von allen anderen Materialien spektral sehr gut trennt. Ein Suchalgorithmus ordnet jetzt anhand der spektralen Signatur einer jeden Probe in den vier Spektralbereichen das jeweilige Material zu.

In Abb. 4.38 Mitte im unteren Bereich sinken die gemessenen Probertemperaturen vom kurz- zum langwelligen Filter. Beim Vergleich der Signale in den Rohdaten stellt man fest, dass die Metalle relativ zu Grafit im Kurzwelligen mehr emittieren als im Langwelligen, was darauf schließen lässt, dass dort deren Emissivität höher ist. Da

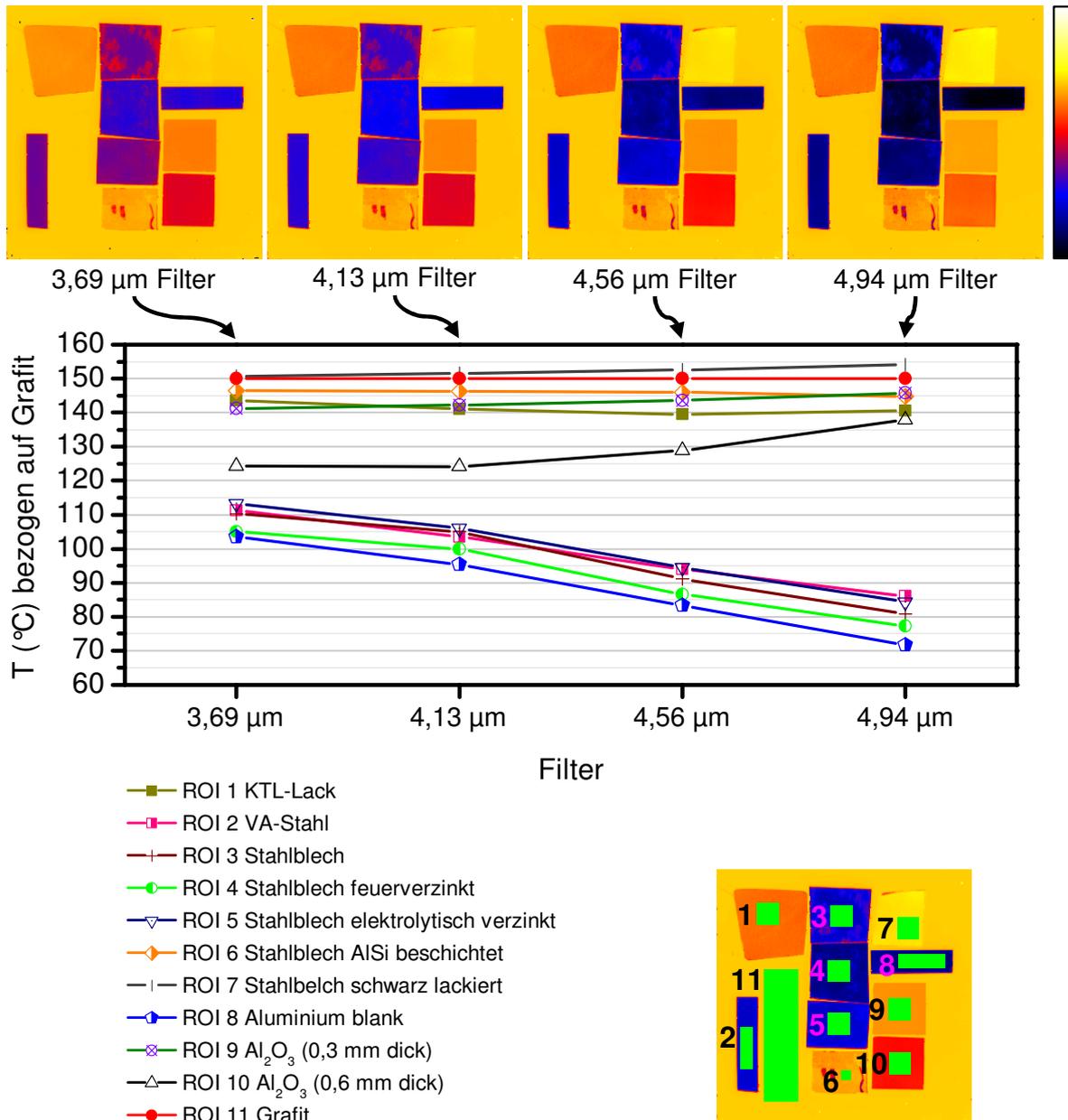


Abb. 4.38: Oben: Korrigierte IR-Bilder. Die Heizplatte hat eine konstante Temperatur von 150 °C. Mitte: Darstellung der gemessenen Temperaturen für alle Proben. Die Positionen der ROIs zeigt die Ansicht rechts unten und die Legende links unten stellt den Zusammenhang zwischen ROI-Nr. und Grafik her.

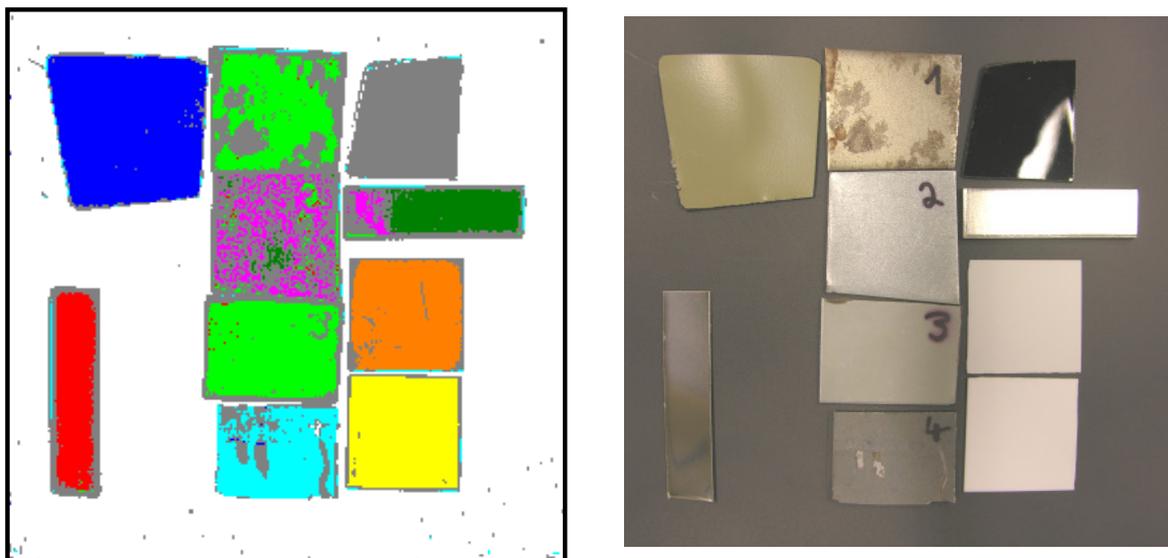


Abb. 4.39: Links: Ergebnisbild nach der Materialerkennung. Rechts: Foto der Proben auf der Heizplatte.

sich emissionsschwache Materialien aufgrund des niedrigen Signals am unteren Ende des Polynomfits befinden (vgl. Abb. 4.32), kann man sich vorstellen, dass sich bei ihnen eine gegebene Messunsicherheit stärker im Fehler einer Pseudotemperaturbestimmung niederschlägt, was eine Materialbestimmung erschwert. Auf diesen Aspekt wird noch in Kap. 4.2.5 eingegangen.

Algorithmus

Der Algorithmus ordnet die Materialien, wie in Abb. 4.38 Mitte zu sehen ist, anhand von zwei Kriterien zu. Das erste Kriterium wertet die Verhältnisse der Steigungen zwischen den Spektralbereichen aus, das zweite Kriterium bezieht die absolute Signalhöhe in jedem der vier Spektralbereiche mit ein.

So gelangt man zu drei Parametern, welche die relativen Änderungen von Spektralbereich zu Spektralbereich beschreiben und zu vier Parametern für die absolute Höhe des IR-Signals. Die erste Bedingung ist robuster, weil sich veränderte Kalibrierdaten auf die absolute Signalhöhe im Vergleich zur Abweichung der relativen Steigungen stärker auswirken. In dem umgesetzten Algorithmus sind beide Kriterien gleichberechtigt. Deshalb wird nach dem Material gesucht, bei dem nicht nur die Abweichung von den jeweiligen Verhältnissen der IR-Filterintensitäten sondern auch die Abweichung von der absoluten Signalhöhe für jeden Spektralbereich minimal ist. Um die Identifizierbarkeit der unterschiedlichen Materialien zu demonstrieren, wurde aus den korrigierten Intensitätswerten der vier Spektralbereiche das wahrscheinlichste Material aus einem vorher angelegten Datensatz ausgewählt und als Farbwert für das jeweilige Pixel dargestellt. Das Ergebnis dieser Rechnung ist in Abb. 4.39 links zu sehen.

Die Heizplatte wird hier als die 150 °C heiße Referenz erkannt und ist weiß eingefärbt. Der schwache, dunkelgrün-gepixelte Kreis in der Mitte des Bildes von Abb. 4.39 ist der Kaltreflex der Kamera. Auf der feuerverzinkten Probe und am linken Rand des Aluminiums um den Kreis ist die Reflexion des Kameragehäuses zu erkennen. Das heißt, dass die IR-Kamera, welche sich in den Proben spiegelte, die Messungen verfälscht hat. Wie groß die Verzerrung ist, hängt von dem Grad ab, wie stark die jeweilige Probe in der Lage ist, IR-Strahlung in die IR-Kamera zu reflektieren. Je glatter die Proben sind, desto stärker spiegeln sie Strahlung, wodurch es zu stärkeren Signaländerungen kommen kann. Außerdem reflektieren Materialien stärker IR-Strahlung je geringer die Emissivität ist. Dies ist auch der Grund, warum die Proben auf eine Temperatur weit oberhalb der Raumtemperatur aufgeheizt wurden, da so die Umgebungsstrahlung im Verhältnis zur Eigenemission deutlich niedriger ist, wodurch die Messgenauigkeit steigt, ohne dabei die Bedingungen im Laborraum zu kontrollieren.

Es ist bemerkenswert, dass die Materialien wie in Abb. 4.38 Mitte zu sehen ist, trotz ihrer teilweise geringen spektralen Unterschiede gut getrennt werden können, so dass sich die Materialien zuweisen lassen. Außerdem tritt durch den Filterwechsel hier genauso wie im Kapitel über die Verschmutzungserkennung eine minimale Bildverschiebung auf, die eine zuverlässige Erkennung an Materialübergängen erschwert, die in Abb. 4.39 an den grauen Rändern um die Proben erkennbar ist.

4.2.4 Vergleich der Messungen zwischen FTIR-Spektrometer und „Farb“-IR-Kamera

Der Vergleich der FTIR-Spektrometer-Messungen zu Beginn des Kapitels mit denen der „Farb“-IR-Kamera ist möglich, weil beide Systeme auf die Emissionscharakteristik von Grafit geeicht wurden. Durch die Kalibrierung wird erreicht, dass beide Messsysteme eine direkte Zuordnung vom detektierten Signal zur Temperatur der Probe haben, ohne dabei die systemspezifischen Eigenschaften gesondert miteinzubeziehen.

Im Falle der IR-Kamera geschieht das direkt, da das Messsignal des schwarzen Strahlers bereits durch den jeweiligen IR-Filter in Transmission gemessen wird. Mittels eines Polynomfits an mehrere Kalibrierbilder kann dann jedes gemessene Bild in ein Pseudotemperaturbild, bezogen auf den benutzten Kalibrierstandard, umgerechnet werden. Beim FTIR-Spektrometer muss man noch die IR-Filtercharakteristik miteinrechnen, damit man die Messungen mit dem Spektrometer mit denen der IR-Kamera vergleichen kann.

Folgendermaßen wurde vorgegangen:

1. Für jede Wellenlänge einen temperaturabhängigen linearen Fit an die Messpunkte der Spektren legen.
2. Simulation des temperaturabhängigen Emissionsspektrums, welches die Gerätecharakteristik enthält (vgl. Abb. 4.28).

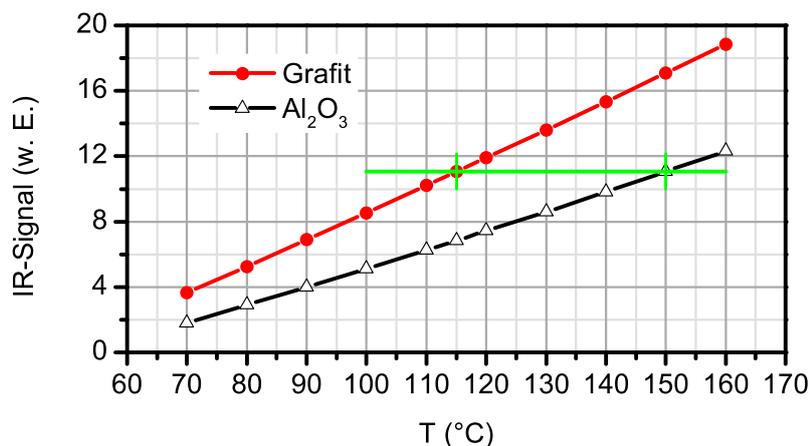


Abb. 4.40: Auswertung der FTIR-Spektren: Darstellung der Ergebnisse der Integrale für Graphit und Al₂O₃ in Abhängigkeit der Temperatur für den 4,94 µm IR-Filter. Die Horizontale stellt die Referenzierung von Al₂O₃ auf Graphit dar.

3. Multiplikation des simulierten Spektrums mit der Filterkennlinie und Integration über den gesamten Spektralbereich.
4. Das Ergebnis der Integration muss für das jeweilige Material auf Graphit referenziert werden.

Die Ergebnisse der Integrale für verschiedene Temperaturen im langwelligen Filter (4,94 µm) sind für Graphit und Al₂O₃ in Abb. 4.40 dargestellt. Die eingezeichnete Horizontale, die beide Materialien miteinander verbindet, stellt die Referenzierung von Al₂O₃ bei 150 °C auf die Temperatur von Graphit dar. Durch die Referenzierung jedes Materials auf die Temperatur von Graphit gelangt man zu den in Abb. 4.41 rechts aufgetragenen Werten für die Messungen mit dem FTIR-Spektrometer. In der Abb. 4.41 links ist zum Vergleich die mit der IR-Kamera gewonnene Ergebnisgrafik aus Abb. 4.38 Mitte wiedergegeben.

Bei den bisherigen Auswertungen in Kap. 4.2.1 wurde bereits Graphit als schwarzer Strahler angenommen. Dieser Schritt entfiel hier, so dass für jedes Material nur das Integral über die originalen Spektren multipliziert mit der Filtercharakteristik ausgewertet werden musste.

Die Materialien in den Grafiken in Abb. 4.41 zeigen ähnliches Verhalten in den vier Spektralbereichen. Graphit ist einheitlich bei einer Temperatur von 150 °C. Der VA-Stahl, das Stahlblech feuerverzinkt und Aluminium sind vergleichbar, obgleich deren niedrigen Emissivitäten den größten Anteil an Reflexionen aus der Umgebung in den Detektor bedeutet. Der Unterschied beim keramischen Al₂O₃ lässt sich dadurch erklären, dass es teiltransparent für IR-Strahlung ist. Beim Experiment mit der IR-Kamera lag die Probe auf der mit Graphit beschichteten Heizplatte und bei der Messung mit dem FTIR-Spektrometer war die Probe auf blankem Metall befestigt. Deshalb könnte die Probe bei der Messung mit der Heizplatte scheinbar mehr emittiert haben, weil Graphit die höhere Emissivität hat. Außerdem kommt bei der Messung mit dem Spektrometer

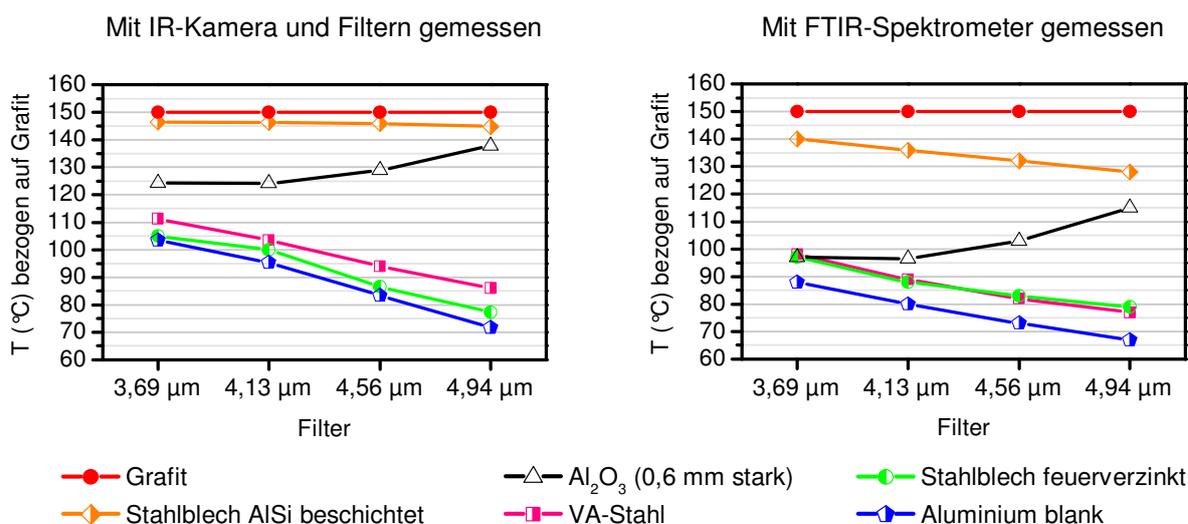


Abb. 4.41: Links: Mit der IR-Kamera und Filtern gemessene auf Grafit referenzierte Darstellung der Temperaturen. Rechts: Entsprechendes Ergebnisbild, welches mit dem FTIR-Spektrometer erlangt wurde.

hinzu, dass der Probenhalter selbst, ähnlich wie die Metalle, eine wellenlängenabhängige Emissivität hat, was sich in der veränderten Steigung niederschlägt. Bei der mit AISi beschichteten Probe kann die Oxidation der Oberfläche dazu beigetragen haben, dass sich die Emissivität der Probe bei den späteren Messungen mit der IR-Kamera gegenüber den Messungen mit dem Spektrometer erhöhte.

Der Vergleich der Ergebnisse zwischen der „Farb“-IR-Kamera und dem Spektrometer zeigt, dass man an dem Spektrometer Voraussagen treffen kann ob sich die untersuchte Probe mit einer IR-Kamera, welche mit IR-Filtern ausgestattet ist, messbar von anderen Proben unterscheiden lässt. Auf diese Weise können für zukünftige Anwendungen anhand von Voruntersuchungen in einem Spektrometer gezielt geeignete IR-Filter für die Messungen mit einer IR-Kamera ausgewählt werden. Durch dieses Vorgehen lässt sich im Übrigen auch überprüfen ob sich eine Anwendung für eine Dualband-IR- [35, 40–42] oder sogar eine Zweiwellenlängen-/Dualwavelength-IR-Kamera [7, 42, 43] eröffnet.

4.2.5 Theoretische Überlegungen zum Einfluss der Umgebung

Um den Einfluss der IR-Umgebungsstrahlung auf die Messungen mit den IR-Filtern zu simulieren, wurde mit Hilfe der durch die Probe emittierten (P'_E) und der durch die Probe reflektierten Strahlungsleistung P'_R der prozentuale Anteil der emittierten Strahlung nach (4.19) berechnet.

$$P'_E = P'(\lambda_1, \lambda_2) \quad (4.17)$$

$$P'_R = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) P'(\lambda_1, \lambda_2) \quad (4.18)$$

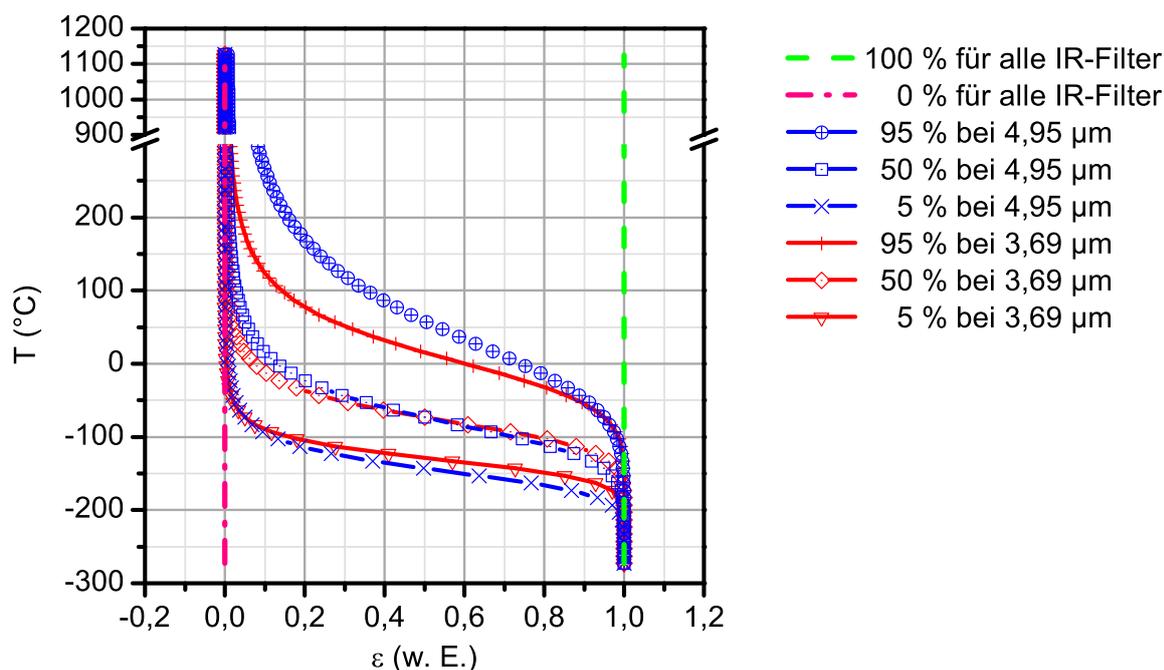


Abb. 4.42: Simulation des prozentualen Anteils der emittierten IR-Strahlung am gesamten Messsignal in Abhängigkeit der Wertepaare (ε, T) .

$$\begin{aligned} \text{Anteil der emittierten Strahlung} &= \frac{P'_E}{P'_E + P'_R} \\ &= \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L'_\lambda(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L'_\lambda(\lambda, T) d\lambda + \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L'_\lambda(\lambda, T) d\lambda} \quad (4.19) \end{aligned}$$

Der prozentuale Anteil der emittierten Strahlung in Abhängigkeit von T und ε wird angegeben als das Verhältnis der durch die Probe emittierten Strahlungsleistung zur Summe aus emittierter und reflektierter IR-Strahlungsleistung. Dabei wird ε vereinfachend als wellenlängenunabhängig angenommen. Einem hohen Anteil der emittierten IR-Strahlung an der Gesamtstrahlung entspricht dem Fall von geringer Reflexion der Umgebungsstrahlung und umgekehrt.

Die Umgebungsstrahlung wird näherungsweise als idealer schwarzer Strahler bei Raumtemperatur ($= 27^\circ\text{C}$) angenommen. Die Integrationsgrenzen ergeben sich aus den zentralen Wellenlängen und den Bandweiten des jeweiligen IR-Filters (s. Abb. 4.4). Das Ergebnis dieser Simulation in Abhängigkeit der Wertepaare (ε, T) ist in Abb. 4.42 gezeigt.

In der Abb. 4.42 sind gestrichelt, ohne Symbole, in grün ($\varepsilon = 1$) und pink ($\varepsilon = 0$) zwei Grenzfälle dargestellt. Der erste Grenzfall gilt für den idealen schwarzen Strahler mit einem $\varepsilon = 1$. Materialien mit dieser Emissivität reflektieren keine Umgebungsstrahlung, wodurch deren Temperatur immer korrekt gemessen werden kann. Der zweite Grenzfall

bezieht sich auf ein Material mit einem ε von null. Von diesen Materialien kann die Temperatur nicht bestimmt werden, da sie keine Eigenemission haben und nur die Umgebung zu 100 % reflektieren (s. Kap. 2.5). Beide Grenzfälle kommen in der Realität nur näherungsweise vor, so dass die relevanten Problemstellungen dazwischen liegen.

Bei der vorgestellten Materialerkennung wurden die Proben auf 150 °C aufgeheizt. Das bedeutet, dass nach der Simulation für ein Material mit einer Emissivität von $> 0,2$ mit dem 4,95 μm -Filter ein Anteil von $> 95\%$ des Messsignals von der Emission der Probe stammen. Für niedrigere Emissivitäten muss die Proben temperatur erhöht werden, um den gleichen prozentualen Anteil beizubehalten. Allerdings erreicht man den gleichen Wert für eine Probe mit derselben Emissivität bei Benutzung des 3,69 μm bereits für Temperaturen $> 75\text{ °C}$. Beim Einsatz des kurzwelligen Filters lassen sich Materialien mit einer tatsächlichen Temperatur von 150 °C und einer Eigenemission von 95 % bis zu einer Emissivität von etwa 0,05 bestimmen.

Die Simulation veranschaulicht, dass im betrachteten Wellenlängenbereich von 3,4–5,1 μm die Proben im Transmissionsbereich des langwelligen IR-Filters prozentual am meisten durch die Probe reflektierte Umgebungsstrahlung enthält und das in Verbindung mit dem größten detektierten IR-Signal, wie in Abb. 4.32 zu erkennen ist. Das gegenteilige Verhalten zeigt sich im Bereich des kurzwelligen IR-Filters. Die Simulationsergebnisse sowohl für den gesamten Empfindlichkeitsbereich der IR-Kamera, als auch für die zwei verbleibenden IR-Filter würden zwischen den aufgetragenen IR-Filterpaaren liegen.

Für Messungen ergibt sich daraus, dass die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse durch den wachsenden Anteil der Umgebungsstrahlung vom kurz- zum langwelligen IR-Filter sinkt, obwohl das detektierte IR-Signal (s. Abb. 4.32) wie auch die IR-Kameraempfindlichkeit (s. Abb. 4.5 rechts) steigen.

5 Zusammenfassung der multispektralen Thermografie

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, bereits existierende aktive und passive IR-Prüfsysteme um die Möglichkeit zu erweitern, die spektralen Eigenschaften von Materialien auszunutzen. Dazu wurden zwei Methoden ausgearbeitet: Im ersten Fall wird das sichtbare Spektrum mit dem Infraroten kombiniert, woraus sich die Hybrid-Kamera entwickelt. Im zweiten Fall teilt man den Spektralbereich einer IR-Kamera mit Hilfe von vier IR-Bandpassfiltern auf, um so die wellenlängenabhängige Emissionscharakteristik von Materialien im Infraroten zu analysieren. Damit lässt sich z. B. eine Verschmutzungs- und Materialerkennung realisieren.

5.1 Bispektrale Kameratechnik – Zusammenführung des infraroten und des sichtbaren Spektralbereichs

Wie in Abb. 5.1 schematisch zusammengefasst zu sehen ist, werden in der Hybrid-Kamera mit einem dichroitischen Strahlteiler die Bilder je einer im Sichtbaren und einer im MWIR empfindlichen Kamera zu einem neuen Hybrid-Bild kombiniert. Dabei sehen beide Kameras gleichzeitig das Prüfobjekt aus demselben Blickwinkel, wodurch eine positionsbestimmende Kalibrierung der Kameras zueinander entfallen kann.

Ein einheitlicher Datenübertragungsstandard wie auch eine gemeinsame Versorgungsspannung aller Kamerakomponenten ermöglichen die Kompatibilität mit einem handelsüblichen Laptop und außerdem erübrigen sich zusätzliche Daten- oder Stromkabel, wodurch das System funktional und portabel ist. Darüber hinaus reicht die Übertragungsrate selbst über ein Datenkabel aus, zeitlich synchronisierte Bilder mit einer Frequenz von maximal 12 Hz beider Kameras verlustfrei an einen Laptop zu übertragen, so dass, wie in Abb. 5.1 oben, schnelle Bewegungsabläufe ohne zeitlichen Versatz beider Kamerabilder zueinander aufgenommen werden können.

Dabei hat die IR-Kamera eine Auflösung von 640×512 Pixel² und die eingesetzte Farbkamera eine mehr als doppelt so große Auflösung von 1600×1200 Pixel², wodurch die Detailschärfe der Farbkamera höher als die der IR-Kamera ist.

Wegen des parallaxenfreien Blickfeldes beider Kameras auf das Prüfobjekt können Arbeitsabstände von $10 \text{ cm} - \infty$ realisiert werden. Somit treten keine Abschattungen bei Prüfobjekten mit komplexer Oberfläche auf. Deshalb lassen sich selbst im Prüfobjekt liegende Risse, wie in Abb. 5.1 rechts oben, lokalisieren und untersuchen, wobei die

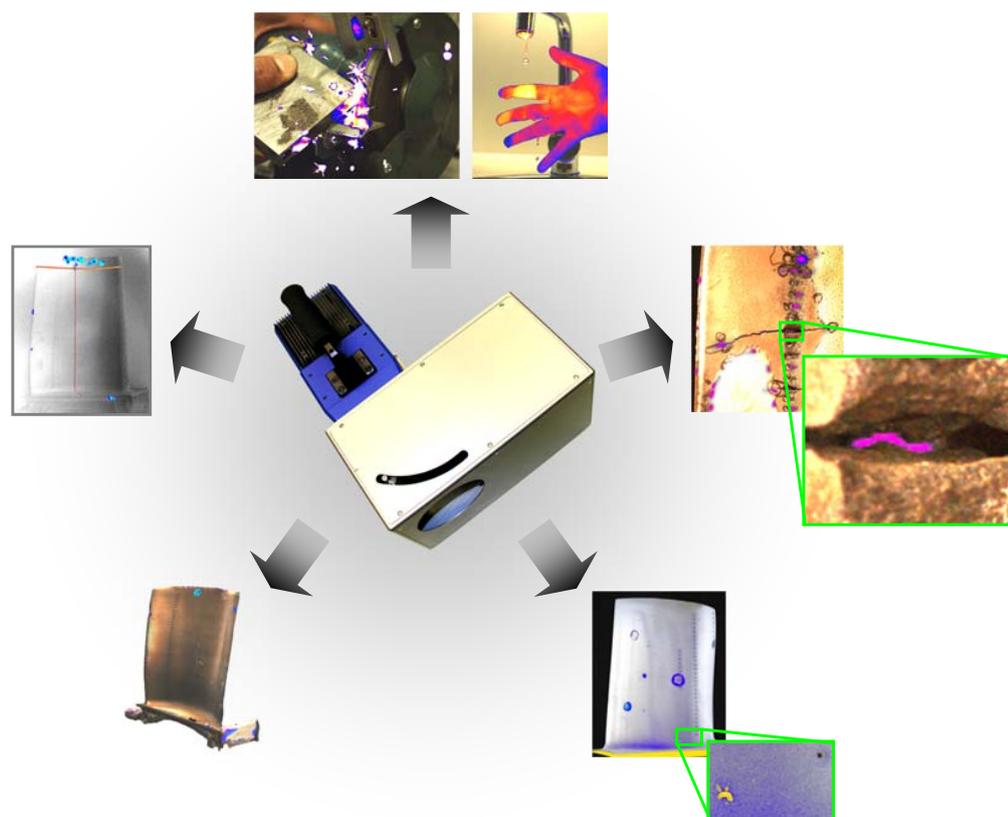


Abb. 5.1: Hybrid-Kamera im Zentrum und Beispiele für deren Anwendung außen herum.

höhere Auflösung der Farbkamera und die Farbwiedergabe helfen, sich besser auf dem Prüfteil zu orientieren. Weiterhin wird wegen der geringen Verzeichnung der verwendeten Objektive und der eingebauten manuellen Ausrichtungshilfen auf den Einsatz von zusätzlichen bildentzerrenden oder merkmalsorientierten bildausrichtenden Algorithmen verzichtet, so dass eine Zweipunktkalibrierung mit einer Halogenlampe ausreicht.

Die erreichte Passgenauigkeit beider Bilder zueinander erlaubt die pixelweise Auswertung von IR- und RGB-Kamerabild, so dass der Prüfer nach der Auswertung einer Blitzthermografie auf Indikationen von Defekten farblich hingewiesen wird, deren Ursache dunkle oberflächliche Verschmutzungen sind, wie Abb. 5.1 rechts unten zeigt.

Außerdem ermöglicht die Hybrid-Kamera zusammen mit der eingebauten Farbkamera die Erlangung der 3D-Oberflächeninformation über ein Laserschnittverfahren, bei dem auf verfügbare Software zurückgegriffen werden kann. Anschließend lässt sich auf die so gewonnene 3D-Oberfläche als Textur eine Kombination aus Farb-, IR-Bild und IR-Defektbild aus einer aktiven Thermografie projizieren (s. Abb. 5.1 links unten), wodurch die Darstellung des Testkörpers noch näher an der Realität ist. Durch die 3D-Oberflächeninformation ist man befähigt Risse und Schichtablösungen insbesondere bei komplex geformten Prüfteilen computergestützt zu vermessen, um so die Anforderungen an die Qualität des Bauteils zu erfüllen.

In einer weiteren Anwendung werden die Spektralbereiche der Farbkamera genutzt, um eine rote Laserlinie zu filtern, da gleichzeitig im Infraroten und Sichtbaren kei-

ne Möglichkeit besteht eine Lichtmarkierung zu setzen, die sowohl in 0,5 m als auch in 10 m Entfernung mit beiden Kameras erkennbar ist. Die mit der Farbkamera gefilterte Laserlinie kann dann in das IR-Bild eingeblendet werden. Dadurch ist der Defekt sowohl im IR- und RGB-Bild als auch in der Prüfszene markiert. Dies wird genutzt, um kalibrierfrei ein Laserkreuz zu steuern, das anhand der Markierung im IR-Bild die Stelle des Defekts in der Messumgebung kennzeichnet. Das ist in der Bauthermografie von Bedeutung, da feuchte Stellen im Mauerwerk, die im Sichtbaren nicht erkennbar sind, sowohl im IR-Bild als auch in der Prüfszene markiert werden können.

Außerdem kann die Hybrid-Kamera zu Raum- und Prozessüberwachungszwecken genutzt werden, indem bei Über- oder Unterschreitung einer Temperaturschwelle ein Alarm ausgelöst wird. Der Ort an welchem die Temperatur nicht dem Sollwert entspricht, lässt sich dann mit der zusätzlichen Farbbildinformation einfacher auffinden.

Die Mitbenutzung eines passgenauen, parallaxenfreien Farbkamerabildes bietet bei der Bauteilqualifizierung Vorteile, da auch die nachträgliche Bewertung am PC vereinfacht wird, dadurch dass man das IR-Ergebnisbild bei schwierigen Entscheidungen nicht mehr vor Ort mit dem Prüfteil abgleichen muss. Auch zu Dokumentationszwecken ist diese Technik gewinnbringend, da beispielsweise oberflächliche Verschmutzungen bei Gasturbinenschaufeln, die extremen Temperaturbelastungen ausgesetzt sind, unter Umständen zum frühzeitigen Versagen der keramischen Wärmedämmschicht führen können.

Derzeitig wird die Hybrid-Kamera im Portfolio der Siemens Corporate Technology im Bereich Corporate Research and Technologies zu Messungen vor Ort eingesetzt. Dabei wird zusätzlich zu einer gewöhnlichen aktiven Thermografie ein Farbbild aufgenommen. Die Auswertung der Daten muss dann nicht mehr direkt im Anschluss an die Messungen erfolgen, da oberflächliche Verschmutzungen, Unterschiede in der Oberflächenbeschaffenheit, Schichtdickenunterschiede bei teiltransparenten Materialien und nachbearbeitete Stellen des Prüfteils im Farbbild sichtbar sind und zu Veränderungen des Thermografieergebnisses führen können. Dadurch ist die Prüfteilqualifizierung für den Prüfer einfacher und gegenüber dem Auftraggeber überzeugender, weil Entscheidungen nicht mehr nur anhand der IR-Messung begründet werden müssen. Aus Zeitgründen wurde bisher oftmals auf ein Farbfoto verzichtet. Darüber hinaus entstand das Farbkamerabild bei kurzen Arbeitsabständen aus einem ungünstigen Blickwinkel, weshalb die Information für einen späteren Bericht oftmals nicht die gewünschte Aussagekraft hatte oder wegen Abschattungen des Prüfteils wichtige Details nicht von der Kamera erfasst wurden.

Außerdem ergeben sich neue Anwendungen durch die parallele, zeitsynchrone Aufnahme von IR-, RGB- und Hybrid-Videos, wodurch Schweiß- und Lötprozesse untersucht werden können. Dabei können Temperaturunterschiede im IR-Bild auf Emissivitätsunterschiede durch den Vergleich mit einem Farbbild abgeschätzt werden. Gleichzeitig können echte Temperaturunterschiede verifiziert werden.

Für weitere potenzielle Applikationen der Hybrid-Kamera wurde sowohl zu Siemens Energy als auch zu Siemens Industry Kunden in Dänemark, Schweden und den USA Kontakt aufgenommen.

Bei der Hybrid-Kamera wurden der sichtbare und der infrarote Spektralbereich mit einem dichroitischen Strahlteiler kombiniert, wodurch die spektralen Materialeigenschaften beider Bereiche ausgenutzt werden konnten. In der anderen, in dieser Arbeit realisierten Methode, wird mittels vier dielektrischer IR-Bandpassfilter der Empfindlichkeitsbereich einer MWIR-Kamera in mehrere Banden aufgeteilt. Dadurch lässt sich sowohl eine Verschmutzungs- als auch eine Materialerkennung realisieren.

5.2 Spektral aufgelöste Thermografie

Verschmutzungserkennung

Bei der Verschmutzungserkennung werden blitzthermografisch spektral aktive Verschmutzungen, wie organische Stoffe, von spektral geringfügig aktiven Materialien, wie es die meisten Metalle sind, unterschieden. Das Ergebnisbild daraus (Abb. 5.2 auf halber Höhe links und rechts) wird genutzt, um in einer Ultraschall-Thermografie (Abb. 5.2 oben) Fehlindikationen, verursacht durch Kontaminationen der Prüfteiloberfläche, zu maskieren (Abb. 5.2 unten links) oder zu filtern (Abb. 5.2 unten rechts).

Bei der blitzthermografischen Verschmutzungserkennung wurden zwei Vorgehensweisen untersucht: Die erste Methode benutzt eine Referenz und den gesamten Empfindlichkeitsbereich der IR-Kamera. Anhand der Abweichung des detektierten IR-Signals zur hinterlegten Referenz entscheidet sich, welcher Bereich des Prüfteils kontaminiert ist. Dabei werden auch Schicht- und Materialdickenunterschiede, die nicht mit der Referenz übereinstimmen, gefiltert.

Da somit nicht nur oberflächliche Verschmutzungen, sondern auch prüfteilspezifische Eigenschaften wie Kühlluftbohrungen, der Kühlluftspalt oder auch geringe Materialdicken bei Rissen an einer Turbinenschaufel gefiltert werden, nutzte man bei der zweiten Methode die spektralen Materialeigenschaften im Infraroten mit Hilfe von IR-Bandpassfiltern aus, um unabhängig von lokalen Variationen in der Materialdicke des Prüfteils in Bezug auf die Referenz zu sein. Dadurch lassen sich kalibrier-/referenzfrei spektral aktive von spektral geringfügig aktiven Materialien unterscheiden. Ausgenutzt wird, dass das spektral selektiv detektierte IR-Signal nach einer Blitzpulsanregung, eines thermisch dicken und im sichtbaren Spektralbereich opaken Materials, in jedem der vier betrachteten Spektralbereiche im Doppelt-logarithmischen einer Geraden mit der Steigung $-1/2$ folgt. Da dies auf metallische Prüfteile weitgehend zutrifft, lassen sich Kontaminationen, die sich in mindestens einem der vier benutzten Spektralbereiche unterscheiden, als Verschmutzungen erkennen. Gleichzeitig wird durch die spektral detektierende Thermografie vermieden, dass Schicht- und Materialdickenunterschiede bei spektral wenig aktiven Materialien als Verschmutzungen identifiziert werden.

Jedoch verschlechtert sich durch den Einsatz der IR-Filter die detektierte Signalintensität so stark, dass Geraden an den doppelt-logarithmischen IR-Signalverlauf gefittet werden, um die Qualität des Endergebnisses für eine zuverlässige Verschmutzungserkennung zu verbessern. Dadurch konnte selbst minimale spektrale Aktivität in einem

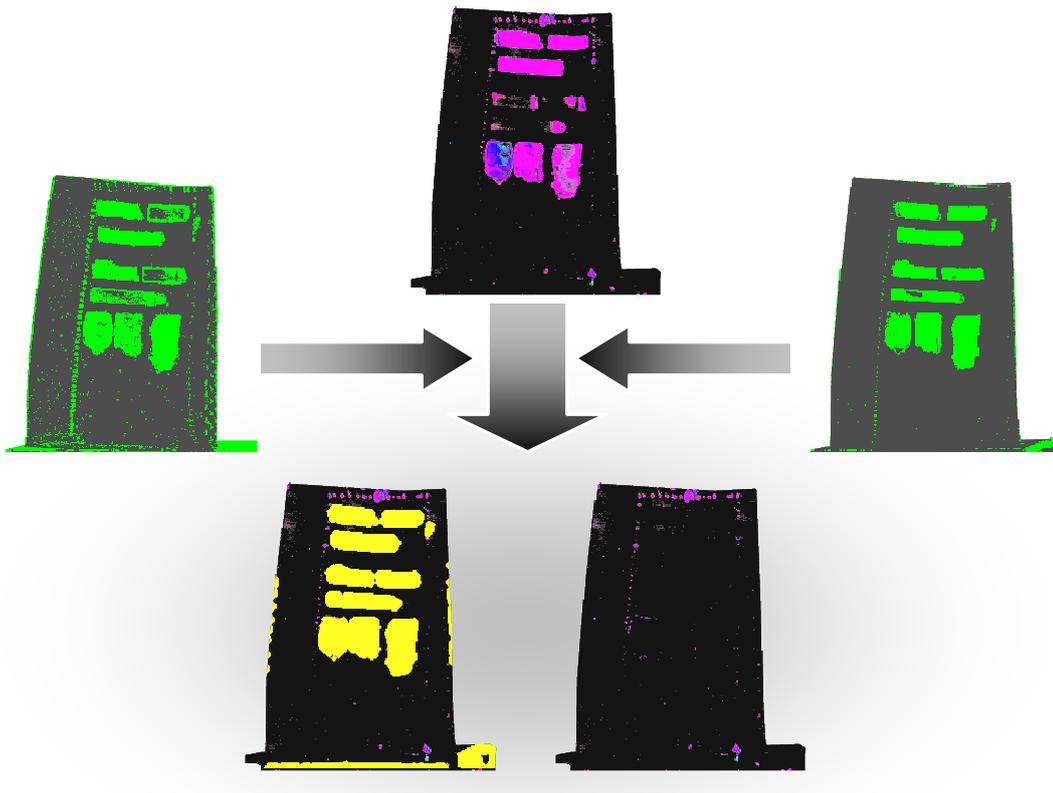


Abb. 5.2: Oben: Ergebnisbild einer mittels Puls-Phasen-Analyse ausgewerteten Ultraschall-Thermografie. Auf halber Höhe links: Ergebnisbild einer referenzfreien Verschmutzungserkennung. Auf halber Höhe rechts: Ergebnisbild einer referenzierten Verschmutzungserkennung. Unten links: Ergebnisbild der Ultraschall-Thermografie, in dem die oberflächlichen Verschmutzungen farbig maskiert sind. Unten rechts: Ergebnisbild der Ultraschall-Thermografie, in dem die gefundenen Verschmutzungen ausgeblendet sind.

spektral sehr gering aktiven Material bei entsprechender Schichtdicke nachgewiesen werden.

Unter dem Aspekt, dass sich Verschmutzungen mit einer größeren Schichtdicke einfacher nachweisen lassen, wurden poröse Beschichtungen, wie die keramische Wärmedämmschicht einer Gasturbinenschaufel auf Kontaminationen untersucht, welche in die Beschichtung diffundierten und somit die Materialeigenschaften nachweisbar änderten. Hierbei konnten gute Ergebnisse erzielt werden.

Der Vergleich zwischen referenzfreier und referenzierter Verschmutzungserkennung ergibt, dass für ein dünn beschichtetes Prüfobjekt mit nahezu konstanter Schichtdicke die referenzierte Erkennung besser ist, weil sich der Signalverlauf des Basismaterials schnell von den zu detektierenden Verschmutzungen trennt. Bei Prüfobjekten aus Metall ohne Beschichtung ist das Ergebnis der referenzfreien Untersuchung besser, weil sich Unterschiede in der Materialdicke nicht auf das Ergebnis auswirken. Aus demselben Grund ist die Methode auch bei spektral nicht aktiven Beschichtungen unabhängig in Bezug auf Änderungen der Schichtdicke. Unterschiede dieser Art sind in der refe-

renzierten Verschmutzungserkennung sichtbar, falls sie nicht von einer Referenz mit eingeschlossen werden.

Abschließend wurde das bessere Ergebnisbild der referenzierten Verschmutzungserkennung für das gewählte Prüfteil genutzt, um das mit einer Puls-Phasen-Analyse ausgewertete Ultraschall-Thermografieergebnis zu filtern. Dabei erreichte man durch den Einsatz eines Median-Filters, der einzelne Pixel aus der Defektmaske eliminiert, und eines Dilatationsfilters, welcher die Verschmutzungen in der Filtermaske vergrößert, ein ausgezeichnetes Endergebnis, wie in Abb. 5.2 unten dargestellt ist. Der zweite Bildbearbeitungsfilter ist notwendig, da durch Dämpfung während der Ultraschall-Anregung Wärme in der Verschmutzung erzeugt wird, die sich lateral in dem Prüfteil ausbreitet. Infolgedessen wirkt die Verschmutzung wegen der Ultraschall-Anregung größer als sie tatsächlich ist. Bei der Blitzthermografie hingegen lässt sich die reale Größe der Verschmutzung detektieren, dadurch dass die gesamte Oberfläche homogen angeregt wird, wodurch sich die Wärme in das Volumen des Prüfteils ausbreitet.

In Abb. 5.2 unten links ist die Defektmaske farbig eingeblendet, um den Prüfer auf Verschmutzungen hinzuweisen. Anhand von Abb. 5.2 unten rechts kann sich der Prüfer auf die detektierten Defekte fokussieren, da die Verschmutzungen ausgeblendet sind.

Infolge der Ausnutzung der spektralen Banden im Infraroten wird somit die Prüfteilqualifizierung signifikant verbessert, dadurch dass man dem Prüfer signalisiert, wo er einen Defekt gefunden hat und an welcher Stelle des Testteils eine Indikation lediglich aufgrund einer oberflächlichen Verschmutzung aufgetreten ist. Außerdem lassen sich damit in Zukunft poröse Materialien prüfen, deren Eigenschaften durch Verschmutzungen verändert wurden, was z. B. zum frühzeitigen Versagen von Wärmedämmschichten oder Diffusionsbarrieren führen kann.

Materialerkennung

Bei der Materialerkennung im Wellenlängenbereich von 3,4–5,1 μm wird mit den vier dielektrischen IR-Bandpassfiltern die spektrale Signatur von Materialien mit einer IR-Kamera (Abb. 5.3 oben links) gemessen. Durch Auswertung der relativen und absoluten Signalintensitäten kann unter Zugrundelegung einer vorherigen Kalibrierung mit Hilfe einer Materialbibliothek das entsprechende Material zugeordnet werden, wie in Abb. 5.3 unten gezeigt ist. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass selbst Metalle eine ausreichende spektrale Signatur besitzen, die es ermöglicht, sie anhand der vier Banden zu unterscheiden.

Die vorgestellten Ergebnisse mit der „Farb“-IR-Kamera (s. Abb. 5.3 oben links) konnten durch eine entsprechende Kalibrierung unter Benutzung eines schwarzen Strahlers direkt mit den Ergebnissen an einem FTIR-Spektrometer verglichen werden. In Abb. 5.3 oben rechts sind die auf Planck-Kurven referenzierten gemessenen Emissionsspektren dargestellt. Zusätzlich sind die Kennlinien der benutzten IR-Filter eingezeichnet.

Bei der „Farb“-IR-Kamera lässt sich mit Hilfe der Kalibrierung ein direkter Zusammenhang zwischen dem gemessenen Signal und der Temperatur eines schwarzen Strah-

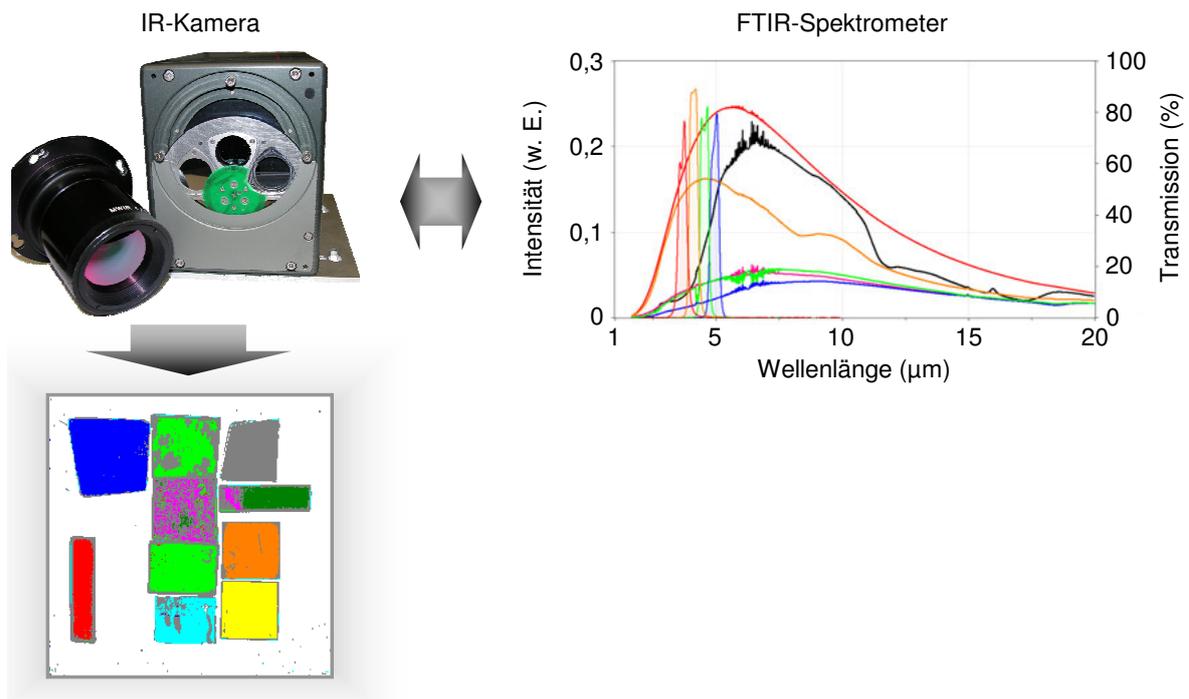


Abb. 5.3: Oben links: IR-Kamera mit abgenommenem Objektiv und integriertem Filterrad. Oben rechts: Auf Planck-Kurven referenzierte Emissionsspektren, die mit einem FTIR-Spektrometer aufgenommen wurden. Zusätzlich sind die Transmissionskennlinien der vier in der IR-Kamera benutzten Filter eingezeichnet. Unten: Farbkodiertes Ergebnisbild der Materialerkennung.

lers herstellen. Infolgedessen werden Vignettierungseffekte des Objektivs, Transmissionscharakteristiken der IR-Filter und die Empfindlichkeitscharakteristik des Detektors kompensiert. In gleicher Weise lassen sich auch beim FTIR-Spektrometer die gerätespezifischen Eigenschaften unter Ausnutzung des schwarzen Strahlers kalibrieren, so dass die Ergebnisse beider Techniken vergleichbar sind.

In dem hier gezeigten Beispiel wurde ausschließlich eine passive Thermografie mit spektraler Information durchgeführt. Dadurch ist es bereits möglich, eine Materialidentifizierung zu erreichen, die dann leicht mit einer aktiven Thermografie gekoppelt werden kann. So könnte deren Auswertung von der Kenntnis des Materials profitieren, indem die Wärmeleitungseigenschaften in die Auswertung miteinbezogen werden. Auf diese Weise ließe sich z. B. eine Schichtdickenmessung von unterschiedlichen Beschichtungen im gleichen Kamerabild realisieren. Der zusätzliche Aufwand für die spektrale Messung bleibt dabei überschaubar, da nur ein Satz Filter und eine entsprechende Wechselmöglichkeit in der Kamera nötig sind.

Literaturverzeichnis

- [1] ROTHENFUSSER, M.; NETZELMANN, U.; EISLER, K.; NEUMANN, J.; HOMMA, C.; STÖSSL, R.; CARL, V.; ABUHAMAD, M.; GOLDAMMER, M.; KARCH, C.; MOOSHOFFER, H.; SIEMER, U.; HEISSENSTEIN, H.; WALLE, G.: *Optische Mess- und Prüftechniken im infraroten Spektralbereich für den Einsatz in der Produktentwicklung, der Produktion und im Service*. In: ROTHENFUSSER, M.; NETZELMANN, U. (Hrsg.): *Technische Informationsbibliothek und Universitätsbibliothek Hannover – Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojektes (Bundesministerium für Bildung und Forschung)*, 2011. – 107 S. – Förderkennzeichen BMBF 02PU2500-2505. – Verbund-Nr. 01059440
- [2] EISLER, K.; GOLDAMMER, M.; ROTHENFUSSER, M.; HOMMA, C.; ARNOLD, W.: *Wie bringt man Farbe in die Thermografie?* In: *Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e. V. (Berlin) – Jahrestagung*, 2010. – Berichtsband 122-CD, Poster 38
- [3] EISLER, K.; GOLDAMMER, M.; ROTHENFUSSER, M.; ARNOLD, W.; HOMMA, C.: *Parallaxenfreie Bildfusion des infraroten und des sichtbaren Spektralbereichs ohne Kenntnis der 3D-Oberflächeninformation*. In: *Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e. V. (Berlin) – Jahrestagung*, 2011. – Berichtsband 127-CD, Poster 48
- [4] EISLER, K.; GOLDAMMER, M.; ROTHENFUSSER, M.; ARNOLD, W.; HOMMA, C.: *Combining Spectral Material Properties in the Infrared and the Visible Spectral Range for Qualification and Nondestructive Evaluation of Components*. In: THOMPSON, D. O.; CHIMENTI, D. E. (Hrsg.): *AIP Conference Proceedings – Review of Quantitative Nondestructive Evaluation* Bd. 1430, 2011, S. 475–482
- [5] EISLER, K.; GOLDAMMER, M.; ROTHENFUSSER, M.; ARNOLD, W.; HOMMA, C.: *Nutzung der multispektralen Eigenschaften von Materialien zur Qualifizierung und zerstörungsfreien Prüfung von Komponenten*. In: *Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e. V. (Berlin) – Thermographie-Kolloquium*, 2011. – Berichtsband 130-CD, Vortrag 16
- [6] GOLDAMMER, M.; EISLER, K.; HOMMA, C.; ROTHENFUSSER, M.; MOOSHOFFER, H.; ARNOLD, W.: *Wie bringt man Farbe in die Thermografie?* In: *Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e. V. (Berlin) – Thermographie-Kolloquium*, 2009. – Berichtsband 119-CD, Vortrag 1

- [7] BREITER, R.; CABANSKI, W. A.; MAUK, K.-H.; RODE, W.; ZIEGLER, J.; SCHNEIDER, H.; WALTHER, M.: Multicolor and Dual-Band IR Camera for Missile Warning and Automatic Target Recognition. In: WATKINS, E. R.; CLEMENT, D.; REYNOLDS, W. R. (Hrsg.): *Targets and Backgrounds VIII: Characterization and Representation* Bd. 4718, SPIE, 2002, S. 280–288
- [8] KRUSE, P. W.: *Uncooled Thermal Imaging Arrays, Systems, and Applications*. Bd. TT51. SPIE Press Book, 2001. – 110 S.
- [9] WAXMAN, A. M.; AGUILAR, M.; FAY, D. A.: Solid-State Color Night Vision: Fusion of Low-Light Visible and Thermal Infrared Imagery. In: *Lincoln Laboratory Journal* 11 (1998), Nr. 1, S. 41–60
- [10] TOET, A.; HOGERVORST, M. A.: Towards an Optimal Color Representation for Multiband Nightvision Systems. In: *12th International Conference on Information Fusion*. (Hrsg.): *International Society of Information Fusion – IEEE Computer Society Press*, 2009, S. 1417–1423
- [11] *Produktseite der FLIR Systems, Inc.. Stand: 2011.* <http://www.flir.com/cvs/eurasia/de/>. – abgerufen am 18. Dezember 2011
- [12] *Wärmebildkameras Fluke TiR-Serie mit IR-Fusion-Technologie der FLUKE Corporation. Stand: 2011.* <http://www.fluke.com/Fluke/dede/W%C3%A4rmebildkamera/Fluke-TiR-Series.htm?PID=56191>. – abgerufen am 18. Dezember 2011
- [13] Ó CONAIRE, C.; COOKE, E.; O’CONNOR, N. E.; MURPHY, N.; SMEATON, A. F.: Fusion of Infrared and Visible Spectrum Video for Indoor Surveillance. In: *6th International Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services (WIAMIS) – CD-Proceedings*. (Hrsg.): *SuviSoft Oy Ltd.*, 2005
- [14] TOET, A.; IJSPEERT, J. K.; WAXMAN, A. M.; AGUILAR, M.: Fusion of Visible and Thermal Imagery Improves Situational Awareness. In: VERLY, J. G. (Hrsg.): *Enhanced and Synthetic Vision 1997* Bd. 3088, SPIE, 1997, S. 177–188
- [15] BENNETT, E. P.; MASON, J. L.; MCMILLAN, L.: Multispectral Bilateral Video Fusion. In: *IEEE Transaction on Image Processing* 16 (2007), Nr. 5, S. 1185–1194
- [16] IRANI, M.; ANANDAN, P.: Robust Multi-Sensor Image Alignment. In: *Proceedings of the Sixth International Conference on Computer Vision*. (Hrsg.): *IEEE Computer Society Press*, 1998, S. 959–966
- [17] ZHANG, J.; HAN, Y.; CHANG, B.; YUAN, Y.: Region-Based Fusion for Infrared and LLL Images. In: *InTech* 14 (2011), S. 285–302
- [18] RIBARIĆ, S.; MARČETIĆ, D.; VEDRINA, D. S.: A Knowledge-Based System for the Non-Destructive Diagnostics of Façade Isolation Using the Information Fusion of Visual and IR Images. In: *Expert Syst. Appl.* 36 (2009), S. 3812–3823

-
- [19] BURT, P. J.; KOLCZYNSKI, R. J.: Enhanced Image Capture Through Fusion. In: *Computer Vision, 1993. Proceedings., Fourth International Conference on Computer Vision.* (Hrsg.): IEEE Computer Society Press, 1993, S. 173–182
- [20] *Kapitel 6.3.2. Korrosionsprüfung von metallischen Überzügen.* In: SCHULZ, W.-D.: *Korrosion und Korrosionsschutz.* WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009, S. 3646–3653
- [21] ADAMS, K. H.: *Oberflächenvorbehandlung – Lackieren, Kleben, Emaillieren.* WILEY-VCH, Weinheim, New-York, 1999
- [22] HOFMANN, H.; SPINDLER, J.: *Verfahren der Oberflächentechnik.* Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl., 2004
- [23] WOBRAUSCHEK, P.; AIGINGER, H.: Totalreflexions-Röntgenfluoreszenzanalyse. In: *X-Ray Spectrometry* 8 (1979), Nr. 2, S. 57–62
- [24] HOFMANN, S.; JEHN, H. A.: Oxidation Behavior of CrNx and (Cr,Al)Nx Hard Coatings. In: *Materials and Corrosion* 41 (1990), Nr. 12, S. 756–760
- [25] ZACHMANN, G.: Qualitätskontrolle von Halbleitermaterialien unter Anwendung der FT-IR Spektroskopie. In: *productronic – Die Fachzeitschrift für Elektronik-Fertigung und Test* 11 (1987), S. 78–85
- [26] SCHUMANN, P. A.; SCHNEIDER, C. P.: Measurement of Silicon Epitaxial Layers Less Than 1- μ Thick by Infrared Interference. In: *J. Appl. Phys.* 41 (1970), Nr. 8, S. 3532–3535
- [27] COOPER, J. J.: The Role of Infrared Spectroscopy in the Ceramic Industry. In: *Interceram* 41 (1992), Nr. 4, S. 271–273
- [28] GÜNZLER, H.; GREMLICH, H. U.: *IR-Spektroskopie: Eine Einführung.* Wiley-VCH, 2003
- [29] OZAKI, Y.; MCCLURE, W. F.; CHRISTY, A. A.: *Near-Infrared Spectroscopy in Food Science and Technology.* Wiley-Interscience, 2007
- [30] SMITH, E.; DENT, G.: *Modern Raman Spectroscopy: A Practical Approach.* J. Wiley, 2005
- [31] STOREY, R. A.; YMÉN, I.: *Solid State Characterization of Pharmaceuticals.* John Wiley & Sons, 2011
- [32] HERTEL, I. V.; SCHULZ, C. P.: *Springer-Lehrbuch. Bd. 2: Atome, Moleküle und Optische Physik 2: Moleküle und Photonen-Spektroskopie und Streuphysik, Band 2.* Springer, 2010

- [33] SEELENBINDER, J.: Exoscan FT-IR Instrument System Can Easily be Used in the Lab or Taken to the Field for Routine Analysis. In: *Spectroscopy Solutions for Materials Analysis—The Application Notebook*. (Hrsg.): *Advanstar Communications, Inc.* 24 (2009), S. 14–15
- [34] SCHANZ, G.W.: *Sensortechnik aktuell 2007: Trends, Produkte und Entscheidungshilfen*. Oldenbourg Industrieverlag, 2007
- [35] CABANSKI, W. A.; BREITER, R.; KOCH, R.; MAUK, K.-H.; RODE, W.; ZIEGLER, J.; SCHNEIDER, H.; WALTHER, M.; OELMAIER, R.: Third-Generation Focal Plane Array IR Detection Modules at AIM. In: ANDRESEN, B. F.; FULOP, G. F.; STROJNIK, M. (Hrsg.): *Infrared Technology and Applications XXVII* Bd. 4369, SPIE, 2001, S. 547–558
- [36] SCHREER, O.; ZETTNER, J.; SPELLENBERG, B.; SCHMIDT, U.; DANNER, A.; PEPPERMUELLER, C.; LÓPEZ SÁENZ, M.; HIERL, T.: Multispectral High-Speed Midwave Infrared Imaging System. In: ANDRESEN, B. G.; FULOP, G. F. (Hrsg.): *Infrared Technology and Applications XXX* Bd. 5406, SPIE, 2004, S. 249–257
- [37] ROSENBAUM, T.: *Thermografische Messung der Temperatur metallischer Oberflächen*. Bd. 27. TUDpress, Verlag der Wissenschaften GmbH, 2007
- [38] ABUHAMAD, M.: *Spektrale Information in der Thermographie*, Fakultät 8 – Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät III, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Dissertation, 2011
- [39] KHAN, M. A.; ALLEMAND, C.; EAGAR, T. W.: Noncontact Temperature Measurement. II. Least Squares Based Techniques. In: *Rev. Sci. Instrum.* 62 (1991), Nr. 2, S. 403–409
- [40] GUNAPALA, S. D.; BANDARA, S. V.; SINGH, A.; LIU, J. K.; RAFOL, B.; LUONG, E. M.; MUMOLO, J. M.; TRAN, N. Q.; TING, D. Z.-Y.; VINCENT, J. D.; SHOTT, C. A.; LONG, J.; LEVAN, P. D.: 640×486 Long-Wavelength Two-Color GaAsAlGaAs Quantum Well Infrared Photodetector (QWIP) Focal Plane Array Camera. In: *Electron Devices, IEEE Transactions on Electron Devices* 47 (2000), S. 963–971
- [41] GUNAPALA, S. D.; BANDARA, S. V.; LIU, J. K.; MUMOLO, J. M.; HILL, C. J.; RAFOL, S. B.; SALAZAR, D.; WOOLAWAY, J.; LEVAN, P. D.; TIDROW, M. Z.: Towards Dualband Megapixel QWIP Focal Plane Arrays. In: RUTT, H. N. (Hrsg.): *Infrared Physics and Technology—Fourth International Workshop on Quantum Well Infrared Photodetectors* Bd. 50, Elsevier B.V., 2007, S. 217–226
- [42] CABANSKI, W.; BREITER, R.; KOCH, R.; GROSS, W.; MAUK, K.-H.; RODE, W.; ZIEGLER, J.; SCHNEIDER, H.; WALTHER, M.; OELMAIER, R.: Third Gen Focal Plane Array IR Detection Modules at AIM. In: *Infrared Physics and Technology* 43 (2002), Nr. 3–5, S. 257–263

- [43] CABANSKI, W. A.; BREITER, R.; MAUK, K.-H.; RODE, W.; ZIEGLER, J.; SCHNEIDER, H.; WALTHER, M.; OELMAIER, R.: Status of Third-Generation Focal Plane Array IR Detection Modules at AIM. In: ANDRESEN, B. F.; FULOP, G. F. (Hrsg.): *Infrared Technology and Applications XXIX* Bd. 5074, SPIE, 2003, S. 72–82
- [44] *Produktseite der Specim–Spectral Imaging Ltd.. Stand: 2011.* <http://www.specim.fi/>. – abgerufen am 18. Dezember 2011
- [45] HINNRICHS, M.; MASSIE, K. H.: New Approach to Imaging Spectroscopy Using Diffractive Optics. In: DESCOUR, M. R.; SHEN, S. S. (Hrsg.): *Imaging Spectrometry III* Bd. 3118, SPIE, 1997, S. 194–205
- [46] HOLMA, H.; HYVÄRINEN, T.; LEHTOMAA, J.; KARJALAINEN, H.; JASKARI, R.: Advanced Pushbroom Hyperspectral LWIR Imagers. In: DRUY, M. A.; BROWN, C. D.; CROCOMBE, R. A. (Hrsg.): *Next-Generation Spectroscopic Technologies II* Bd. 7319, SPIE, 2009, S. 731907.1–731907.12
- [47] FISCHER, C.; KAKOULLI, I.: Multispectral and Hyperspectral Imaging Technologies in Conservation: Current Research and Potential Applications. In: *Reviews in conservation* 7 (2006), S. 3–16
- [48] FARLEY, V.; BELZILE, C.; CHAMBERLAND, M.; LEGAULT, J. F.; SCHWANTES, K. R.: Development and Testing of a Hyperspectral Imaging Instrument for Field Spectroscopy. In: SHEN, S. S.; LEWIS, P. E. (Hrsg.): *Imaging Spectrometry X* Bd. 5546, SPIE-Int. Soc. Opt. Eng, 2004, S. 29–36
- [49] FARLEY, V.; CHAMBERLAND, M.; LAGUEUX, P.; VALLIERES, A.; VILLEMAIRE, A.; GIROUX, J.: Chemical Agent Detection and Identification with a Hyperspectral Imaging Infrared Sensor. In: SHEN, S. S.; LEWIS, P. E. (Hrsg.): *Optics and Photonics for Counterterrorism and Crime Fighting V* Bd. 6661, SPIE, 2007, S. 66610L
- [50] BRADLEY, K. C.; BOWEN, S.; GROSS, K. C.; MARCINIAK, M. A.; PERAM, G. P.: Imaging Fourier Transform Spectrometry of Jet Engine Exhaust with the Telops FIRST-MWE. In: *Aerospace conference.* (Hrsg.): *IEEE Computer Society Press*, 2009, S. 1–8
- [51] *Produktseite der Firma TELOPS. Stand: 2011.* <http://www.telops.com/>. – abgerufen am 18. Dezember 2011
- [52] MONTEMBEAULT, Y.; LAGUEUX, P.; FARLEY, V.; VILLEMAIRE, A.; GROSS, K. C.: Hyper-Cam: Hyperspectral IR Imaging Applications in Defence Innovative Research. In: *Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), 2nd Workshop on.* (Hrsg.): *IEEE Computer Society Press*, 2010, S. 1–4

- [53] BAEHR, H. D.; STEPHAN, K.: *Wärme- und Stoffübertragung*. Bd. 6. neu bearbeitete Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996
- [54] ALMOND, D. P.; PATEL, P. M.: *Photothermal Science and Techniques*. Chapman & Hall, 1996
- [55] MALDAGUE, X.: *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. Wiley, 2001 (Wiley series in microwave and optical engineering)
- [56] ZINTH, W.; KÖRNER, H. J.: *Optik, Quantenphänomene und Aufbau der Atome*. Oldenbourg, 1998 (Physik: Einführungskurs für Studierende der Naturwissenschaften und Elektrotechnik)
- [57] VOLLMER, M.; MÖLLMANN, K.-P.: *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. WILEY-VCH, 2011. – 540 S.
- [58] GARDNER, J. L.; JONES, T. P.; DAVIES, M. R.: A Six-Wavelength Radiation Pyrometer. In: *High Temp. High Pressures*. 13 (1981), Nr. 4, S. 459–466
- [59] COATES, P. B.: Multi-Wavelength Pyrometry. In: *Metrologia* 17 (1981), Nr. 3, S. 103–109
- [60] KOLLIE, T. G.; WEAVER, F. J.; MCELROY, D. L.: Evaluation of a Commercial, Portable, Ambient-Temperature Emissometer. In: *Rev. Sci. Instrum.* 61 (1990), Nr. 5, S. 1509–1517
- [61] TAKAHASHI, T.; HASHIMOTO, M.; YANO, K.; TAMURA, T.; IWATA, M.; KITAGAWA, K.; ARAI, N.: Temperature Measurement of Ceramics in Furnaces by 3-Color Thermography. In: MALDAGUE, X. P.; ROZLOSNIK, A. E. (Hrsg.): *Thermosense XXIV* Bd. 4710, SPIE, 2002, S. 72–79
- [62] NETZELMANN, U.; ABUHAMAD, M.: Pulsed Thermography in Multiple Infrared Spectral Bands. In: *Journal of Physics: Conference Series* 214 (2010), S. 012095
- [63] ABUHAMAD, M.; NETZELMANN, U.: Dual-Band Active Thermography on Infrared Transparent Materials. In: *Quantitative InfraRed Thermography Journal* 7 (2010), Nr. 2, S. 189–200
- [64] BENNETT JR., C. A.; PATTY, R. R.: Thermal wave interferometry: A Potential Application of the Photoacoustic Effect. In: *Appl. Opt.* 21 (1982), Jan, Nr. 1, S. 49–54
- [65] HELANDER, P.: Theoretical Aspects of Photoacoustic Spectroscopy with Light Scattering Samples. In: *J. Appl. Phys.* 54 (1983), Nr. 6, S. 3410–3414
- [66] STUKE, A.: *Optimierung der Reflektivität keramischer Wärmedämmschichten aus Yttrium-teilstabilisiertem Zirkoniumdioxid für den Einsatz auf metallischen Komponenten in Gasturbinen*, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2007

- [67] TOM, R. D.; O'HARA, E. P.; BENIN, D.: A Generalized Model of Photothermal Radiometry. In: *J. Appl. Phys.* 53 (1982), Nr. 8, S. 5392–5400
- [68] CARSLAW, H. S.; JAEGER, J. C.: *Conduction of Heat in Solids*. Second. Oxford University Press, 1986 (Oxford science publications). – 520 S.
- [69] MANDELIS, A.: *Diffusion-Wave Fields: Mathematical Methods and Green Functions*. Springer Verlag, 2001
- [70] *Datenblatt für FLIR SC7600-MB. Stand: 2009.* http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography/MMC/Brochures/T559240/T559240_EN.pdf. – abgerufen am 18. Dezember 2011
- [71] *Datenblatt für AVT GE1660 C. Stand: 2011.* <http://www.alliedvisiontec.com/de/produkte/kameras/gigabit-ethernet/prosilica-ge/ge1660.html>. – abgerufen am 18. Dezember 2011
- [72] *Datenblatt für einen 45° cold mirror verkauft durch THORLABS. Stand: 17. März 2009.* http://www.thorlabs.de/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=897. – abgerufen am 18. Dezember 2011
- [73] *Datenblatt für ein Saphirfenster verkauft durch THORLABS. Stand: 2011.* http://www.thorlabs.de/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=3982. – abgerufen am 18. Dezember 2011
- [74] *Überblick über optische Fenster verkauft durch die Hind High Vacuum Co. Pvt Ltd.. Stand: 2011.* <http://www.indiamart.com/hindhig/optical-windows.html>. – abgerufen am 18. Dezember 2011
- [75] *Datenblatt für ein Bariumfluoridfenster verkauft durch THORLABS. Stand: 2011.* http://www.thorlabs.de/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=4845. – abgerufen am 18. Dezember 2011
- [76] *Datenblatt für ein Calciumfluoridfenster verkauft durch THORLABS. Stand: 2011.* http://www.thorlabs.de/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=3978. – abgerufen am 18. Dezember 2011
- [77] *Datenblatt für ein Zinkselenidfenster verkauft durch THORLABS. Stand: 2011.* http://www.thorlabs.de/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=3981. – abgerufen am 18. Dezember 2011
- [78] *Materialeigenschaften von Diamantfenstern verkauft durch die Diamond Materials GmbH. Stand: 2011.* http://www.diamond-materials.de/propopt_de.htm. – abgerufen am 18. Dezember 2011
- [79] *Datenblatt für ein antireflexionsbeschichtetes Siliciumfenster verkauft durch THORLABS. Stand: 2011.* http://www.thorlabs.de/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=3979. – abgerufen am 18. Dezember 2011

- [80] *Eigenschaften von Silicium. Stand: 08. Dezember 2011.* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Silicium&oldid=96872457>. – abgerufen am 18. Dezember 2011
- [81] *Datenblatt für ein antireflexionsbeschichtetes Germaniumfenster verkauft durch THORLABS. Stand: 2011.* http://www.thorlabs.de/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=3980. – abgerufen am 18. Dezember 2011
- [82] *Eigenschaften von Germanium. Stand: 13. Dezember 2011.* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Germanium&oldid=97074572>. – abgerufen am 18. Dezember 2011
- [83] *Optical Properties of Silicon der Virginia Semiconductor, Inc.. Stand: 2011.* <http://www.virginiasemi.com/pdf/Optical%20Properties%20of%20Silicon71502.pdf>. – abgerufen am 18. Dezember 2011
- [84] *Thickness dependence in transmission of silicon and optical properties der Firma TYDEX. Stand: 2011.* http://www.tydexoptics.com/materials1/for_transmission_optics/silicon/. – abgerufen am 18. Dezember 2011
- [85] ROST, R.: *Silicium als Halbleiter*. Berliner Union, 1966
- [86] *IR-Transmissionsspektrum für Silicium der Korth Kristalle GmbH. Stand: 2011.* <http://www.korth.de/index.php/material-detailansicht/items/32.html>. – abgerufen am 18. Dezember 2011
- [87] TIZIANI, H. J.: Optische Methoden der 3-D-Messtechnik und Bildverarbeitung. In: AHLERS, R.-J. (Hrsg.): *Bildverarbeitung: Forschen, Entwickeln, Anwenden; Symposium, 8. bis 10. November 1989. Ostfildern: Techn. Akad. Esslingen*, Universität Stuttgart, 1989, S. 7.1–7.26
- [88] JÄHNE, B.; MASSEN, R.; NICKOLAY, B.; SCHARFENBERG, H.: *Technische Bildverarbeitung-Maschinelles Sehen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1995
- [89] JÄHNE, B.: *Digitale Bildverarbeitung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2005
- [90] KENFACK, P.: *Implementierung und Vergleich verschiedener Algorithmen zur Bildsensorkalibrierung*, Fachbereich Angewandte Ingenieurwissenschaften, Fachhochschule Kaiserslautern, Diplomarbeit, Juni 2009
- [91] BRONSTEIN, I. N.; SEMENDJAJEW, K. A.; MUSIOL, G.; MÜHLIG, H.: *Taschenbuch der Mathematik*. Bd. 5., überarbeitete und erweiterte Auflage. Verlag Harri Deutsch, 2001
- [92] *Emissionsfaktoren der Komerci oHG. Stand: Dezember 2011.* http://www.komerci.de/bedienungsanleitungen/infrarot_thermometer_va-6532.pdf. – abgerufen am 18. Dezember 2011

- [93] *Emissionsfaktoren von NEC/Avio Infrared Technologies. Stand: Dezember 2011.* http://www.irpod.net/de/informationen/infrarot_handbuch/emissionsfaktoren.html. – abgerufen am 08. Dezember 2011
- [94] BUSSE, G.; DILLENZ, A.; ZWESCHPER, T.: Defect-Selective Imaging of Aerospace Structures with Elastic-Wave-Activated Thermography. In: *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering* Bd. 4360, SPIE, 2001, S. 580–586
- [95] BOVSUNOVSKY, A. P.; SURACE, C.: Considerations Regarding Superharmonic Vibrations of a Cracked Beam and the Variation in Damping Caused by the Presence of the Crack. In: *Journal of Sound and Vibration* 288 (2005), Nr. 4–5, S. 865–886
- [96] DILLENZ, A.; ZWESCHPER, T.; BUSSE, G.: Burst Phase-Angle Thermography with Elastic Waves. In: MALDAGUE, X. P.; ROZLOSNIK, A. E. (Hrsg.): *Thermosense XXIV* Bd. 4710, SPIE, March 2002, S. 572–577
- [97] HOMMA, C.: *Untersuchungen zu Mechanismus und technischer Umsetzung der akustischen Thermographie*, Fakultät 8 – Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät III, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Dissertation, Juli 2007
- [98] ROSENCWAIG, A.; GERSHO, A.: Theory of the Photoacoustic Effect with Solids. In: *J. Appl. Phys.* 47 (1976), Nr. 1, S. 64–69
- [99] YASA, Z. A.; JACKSON, W. B.; AMER, N. M.: Photothermal Spectroscopy of Scattering Media. In: *Appl. Opt.* 21 (1982), Nr. 1, S. 21–31
- [100] MANDELIS, A.; SUI, E.; HO, S.: Photoacoustic Spectroscopy of Thin SiO₂ Film Grown on (100) Crystalline Si Substrates. In: *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 33 (1984), Nr. 3, S. 153–159
- [101] ROTHENFUSSER, M.; HOMMA, C.: Acoustic Thermography: Vibrational Modes of Cracks and the Mechanisms of Heat Generation. In: THOMPSON, D. O.; CHIMENTI, D. E. (Hrsg.): *AIP Conference Proceedings–Review of Quantitative Nondestructive Evaluation* Bd. 760, 2005, S. 624–631
- [102] HOMMA, C.; ROTHENFUSSER, M.; BAUMANN, J.; SHANNON, R. E.: Study of Heat Generation Mechanisms in Acoustic Thermography. In: THOMPSON, D. O.; CHIMENTI, D. E. (Hrsg.): *AIP Conference Proceedings–Review of Quantitative Nondestructive Evaluation* Bd. 820, 2006, S. 566–573
- [103] HAN, X.; FAVRO, L. D.; THOMAS, R. L.: Sonic IR Imaging and Vibration Pattern Studies of Cracks in an Engine Disk. In: THOMPSON, D. O.; CHIMENTI, D. E. (Hrsg.): *AIP Conference Proceedings–Review of Quantitative Nondestructive Evaluation* Bd. 657, 2003, S. 513–516

- [104] CHEN, J. C.; KEPHART, J.; RIDDELL, W. T.: A Parametric Study of Crack Propagation During Sonic IR Inspection. In: THOMPSON, D. O.; CHIMENTI, D. E. (Hrsg.): *AIP Conference Proceedings—Review of Quantitative Nondestructive Evaluation* Bd. 820, 2006, S. 1577–1584
- [105] ZWESCHPER, T.; RIEGERT, G.; DILLENZ, A.; BUSSE, G.: Ultraschallangeregte Thermographie mittels frequenzmodulierter elastischer Wellen. In: *Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e. V. (Berlin) – Thermografie Kolloquium*, 2003. – Berichtsband 86-CD, Vortrag 5
- [106] ASTM INTERNATIONAL: *ASTM Standard C33 – Specification for Concrete Aggregates*
- [107] SHEPARD, S. M.: Flash Thermography of Aerospace Composites. In: RUCH, M. C. (Hrsg.): *IV Pan-American Conference for Non Destructive Testing—CD-Proceedings* Bd. 12, Argentine Association of Non Destructive and Structural Testing, 2007
- [108] OMAR, M. A.; ZHOU, Y.: A Quantitative Review of Three Flash Thermography Processing Routines. In: *Infrared Physics and Technology* 51 (2008), Nr. 4, S. 300–306
- [109] SHEPARD, S. M.; HOU, Y. L.; LHOTA, J. R.; WANG, D.; AHMED, T.: Thermographic Measurement of Thermal Barrier Coating Thickness. In: PEACOCK, G. R.; BURLEIGH, D. D.; MILES, J. J. (Hrsg.): *Thermosense XXVII* Bd. 5782, SPIE, 2005, S. 407–410
- [110] GOLDAMMER, M.; BAUMANN, J.: Analytical Modeling of Flash Thermography: Results for a Layered Sample. In: MEYENDORF, N.; BAAKLINI, G. Y.; MICHEL, B. (Hrsg.): *Nondestructive Evaluation and Reliability of Micro- and Nanomaterial Systems* Bd. 4703, SPIE, 2002, S. 211–218
- [111] MALDAGUE, X.; MARINETTI, S.: Puls Phase Infrared Thermography. In: *J. Appl. Phys.* 79 (1996), Nr. 5, S. 2694–2698
- [112] NETZELMANN, U.: Optimized Temporal Excitation Profiles in Active Thermography. In: *Analytical Sciences* 17 (2001), S. 432–435
- [113] ELDRIDGE, J. I.; SPUCKLER, C. M.; MARTIN, R. E.: Monitoring Delamination Progression in Thermal Barrier Coatings by Mid-Infrared Reflectance Imaging. In: *International Journal of Applied Ceramic Technology* 3 (2006), Nr. 2, S. 94–104
- [114] GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E.: *Digital Image Processing*. Prentice Hall International; Auflage: 3rd International edition, 2008
- [115] TRAVIS, D.: *Effective Color Displays: Theory and Practice (Computers and People)*. Academic Press Inc, 1991

-
- [116] KEPPEL, E.: Approximating Complex Surfaces by Triangulation of Contour Lines. In: *IBM Journal of Research and Development* 19 (1975), Nr. 1, S. 2–11
- [117] CURLESS, B.; LEVOY, M.: Better Optical Triangulation Through Spacetime Analysis. In: *Fifth International Conference on Computer Vision (ICCV'95), IEEE International Conference.* (Hrsg.): *IEEE Computer Society Press*, 1995, S. 987–994
- [118] CUILIERE, J. C.: An Adaptive Method for the Automatic Triangulation of 3D Parametric Surfaces. In: *Computer-Aided Design* 30 (1998), Nr. 2, S. 139–149
- [119] ARNOLD, J.; BRAUN, M.: Zukünftige Methoden bei der Spurensicherung. In: BURG, H.; MOSER, A. (Hrsg.): *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion.* Vieweg+Teubner, 2009, S. 835–847
- [120] WINKELBACH, S.: *Gradientenbasierte Rekonstruktion von 3D-Oberflächen*, Technische Universität Braunschweig-Institut für Robotik und Prozessinformatik, Diplomarbeit, 2001
- [121] CARL, V.; EISLER, K.: 3D-Formerfassung im Infraroten und Sichtbaren sowie Techniken zum Visualisieren. In: *Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e. V. (Berlin) – Thermographie-Kolloquium*, 2011. – Berichtsband 130-CD, Vortrag 18
- [122] SCHLICHTING, J.; MAIERHOFER, C.; KREUTZBRUCK, M.: Crack Sizing by Laser Excited Thermography. In: *NDT & E International* 45 (2012), Nr. 1, S. 133–140
- [123] SCHLICHTING, J.; ZIEGLER, M.; DEY, A.; MAIERHOFER, C.; KREUTZBRUCK, M.: Efficient Data Evaluation for Thermographic Crack Detection. In: *Quantitative InfraRed Thermography Journal* 8 (2011), Nr. 1, S. 119–123
- [124] Schulungsunterlagen des Kursus TT3 der Deutschen Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung vom 19.–29.04.2010. In: *Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e. V. (Berlin)* (2010)
- [125] *Software zur 3D-Oberflächenrekonstruktion der DAVID Vision Systems GmbH. Stand: Dezember 2011.* <http://www.david-laserscanner.com/>. – abgerufen am 18. Dezember 2011
- [126] CHEN, X.; NEWAZ, G.; HAN, X.: Damage Assessment in Thermal Barrier Coatings Using Thermal Wave Imaging Technique. In: *Proceedings of 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition AD-Vol. 66* (2001), Nr. 11–16, S. 239–246
- [127] NUSIER, S. Q.; NEWAZ, G. M.; CHAUDHURY, Z. A.; AHMED, T.: Composites and Functionally Grade Materials. In: *Proceedings of 1997 ASME International Mechanical Congress and Exposition MD-Vol. 80* (1997), Nr. 16–21, S. 401–408

- [128] TOLPYGO, V. K.; CLARKE, D. R.; MURPHY, K. S.: Evaluation of Interface Degradation During Cyclic Oxidation of EB-PVD Thermal Barrier Coatings and Correlation with TGO Luminescence. In: *Surface & Coatings Technology* 188–189 (2004), S. 62–70
- [129] WEBER, C.: Plastikmüll mit Infrarotspektroskopie sortieren. In: *Physik Journal* (2002), Nr. 7/8, S. 116–117

Publikationen

Begutachtete Konferenzen

Combining Spectral Material Properties in the Infrared and the Visible Spectral Range for Qualification and Nondestructive Evaluation of Components

K. EISLER, M. GOLDAMMER, M. ROTHENFUSSER, W. ARNOLD UND C. HOMMA
In: D. O. THOMPSON, D. E. CHIMENTI (Hrsg.): *AIP Conference Proceedings – Review of Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE)*, Vermont, USA, Bd. 1430, S. 475–482, 2011

Konferenzbeiträge

Wie bringt man Farbe in die Thermografie?

M. GOLDAMMER, K. EISLER, C. HOMMA, M. ROTHENFUSSER, H. MOOSHOFFER UND W. ARNOLD

Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e. V. (Berlin) – Thermographie-Kolloquium, Stuttgart

Berichtsband 119-CD, Vortrag 1, 2009

Wie bringt man Farbe in die Thermografie?

K. EISLER, M. GOLDAMMER, M. ROTHENFUSSER, C. HOMMA UND W. ARNOLD

Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e. V. (Berlin) – Jahrestagung, Erfurt
Berichtsband 122-CD, Poster 38, 2010

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

K. EISLER, M. GOLDAMMER, M. ROTHENFUSSER, W. ARNOLD UND C. HOMMA

Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e. V. (Berlin) – Jahrestagung, Bremen

Berichtsband 127-CD, Poster 48, 2011

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

K. EISLER, M. GOLDAMMER, M. ROTHENFUSSER, W. ARNOLD UND C. HOMMA

Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e. V. (Berlin) – Thermographie-Kolloquium, Stuttgart

Berichtsband 130-CD, Vortrag 16, 2011

3D-Formerfassung im Infraroten und Sichtbaren sowie Techniken zum Visualisieren

V. CARL UND K. EISLER

Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e. V. (Berlin) – Thermographie-Kolloquium, Stuttgart

Berichtsband 130-CD, Vortrag 18, 2011

Hybrid Camera and Real-View Thermography for Nondestructive Evaluation

L. BIENKOWSKI, C. HOMMA, K. EISLER UND C. BOLLER

In: X. P. MALDAGUE (Hrsg.): *É. du Cao, Les Éboulements, Québec, Canada, Conference Proceedings – 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT)*, Neapel, Italien, 2012 – Zur Veröffentlichung eingereicht (Stand: 01. Juni 2012)

Konferenzbeiträge nur mit Zusammenfassung (Abstract)

Combining Spectral Properties of Materials in the Infrared and the Visible Spectral Range for Qualification and Nondestructive Evaluation of Components

K. EISLER, M. GOLDAMMER, M. ROTHENFUSSER, C. HOMMA UND W. ARNOLD

12th Int. Symp. on Nondestructive Characterization of Materials (NDMC), Blacksburg, USA, 2011

Weitere Veröffentlichungen

Optische Mess- und Prüftechniken im infraroten Spektralbereich für den Einsatz in der Produktentwicklung, der Produktion und im Service

M. ROTHENFUSSER, U. NETZELMANN, K. EISLER, J. NEUMANN, C. HOMMA, R. STÖSSL, V. CARL, M. ABUHAMAD, M. GOLDAMMER, C. KARCH, H. MOOSHOFFER, U. SIEMER, H. HEISSENSTEIN UND G. WALLE

In: M. ROTHENFUSSER, U. NETZELMANN (Hrsg.): *Technische Informations- und Universitätsbibliothek Hannover – Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojektes (Bundesministerium für Bildung und Forschung)*, 107 S., 2011

Danksagung

Diese Dissertation wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Rahmenkonzeptes Forschung für die Produktion von morgen mit dem Förderkennzeichen 02PU2500-2505 gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Das Verbundprojekt InfraSpek hatte zum Thema die Optischen Mess- und Prüftechniken im infraroten Spektralbereich für den Einsatz in der Produktentwicklung, der Produktion und im Service. Zeitgleich zu dieser Arbeit promovierte Herr Dr. M. Abuhamad mit dem Thema Spektrale Information in der Thermographie mit Hilfe dieses Verbundprojektes.

Ich danke Herrn Dr. C. Homma für die Betreuung bei der Siemens AG. Sein Einsatz und sein Arbeiten sind für mich ein großes Vorbild.

Weiterhin danke ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. W. Arnold für seine permanente Unterstützung und seinen Einsatz während der vergangenen drei Jahre.

Ich danke ebenfalls den Herrn Dr. M. Goldammer, Dr. M. Rothenfusser und Dr. H. Mooshofer für jegliche Unterstützung und die zahlreichen konstruktiven Diskussionen.

Ebenfalls gilt mein Dank Herrn Dr. C. Laloni für die Möglichkeit sich im Global Technology Field Nondestructive Evaluation (GTF NDE) mit neuen Ideen einbringen zu dürfen.

Mein Dank gilt auch unserer Teamassistentin Frau C. Zeiser für deren unbürokratische Unterstützung, der Werkstatt für die zuverlässige, schnelle Arbeit und den Mitarbeitern der CTT DE HW 2 sowie den zahlreichen Doktoranden, Diplomanden und Werksstudenten für die tolle Atmosphäre und deren Hilfsbereitschaft.

Im Besonderen bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mich in allen meinen Entscheidungen vorbehaltlos unterstützen.

Als letztes bedanke ich mich bei meinen Freunden und im Besonderen bei meiner Freundin, für deren liebevolle Unterstützung während meiner Dissertation.

München, den 01. Juni 2012

Konstantin Eisler

