

# Einfluss von Material, Messparametern und Umgebungsbedingungen auf die Nachweisempfindlichkeit der Blitzthermografie

Christiane MAIERHOFER, Philipp MYRACH, Henrik STEINFURTH  
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung  
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin  
christiane.maierhofer@bam.de

**Kurzfassung.** Dieser Beitrag fasst die Untersuchungsergebnisse zu den Verfahrensgrenzen der Blitzthermografie zur Ortung und Charakterisierung von Fehlstellen in Metallen zusammen. Regeln zur Abschätzung von Eindringtiefe und Tiefenauflösung werden vorgestellt und überprüft. Weiterhin werden Vorgehensweisen zur Optimierung des Intensitätskontrastes von Fehlstellenanzeigen vorgestellt. Einfache analytische Abschätzungen werden durch eine Vielzahl von experimentellen Untersuchungen an Kupfer- und Stahl-Probekörpern ergänzt. Dabei wurden sowohl die Parameter der Blitzlichtanregung als auch der Messwert-erfassung umfassend variiert.

## 1. Einführung

Die aktive Thermografie mit Blitzlichtanregung ist aufgrund ihrer hohen Messgeschwindigkeit, der direkten Bildgebung, der Berührungslosigkeit und damit der sehr guten Automatisierbarkeit ein Verfahren mit hohem Innovationsgehalt für die zerstörungsfreie Prüfung im industriellen Umfeld. Um eine effiziente Übertragbarkeit des Verfahrens auf neue Prüfprobleme zu ermöglichen, müssen die Anwendungsgrenzen und Einflussgrößen des Verfahrens bekannt sein und die Vorgehensweisen bei der Prüfung festgelegt werden. Bisherige Standards zur Thermografie in der zerstörungsfreien Prüfung beschränken sich auf allgemeine Geräte- und Verfahrensbeschreibungen [1, 2]. Untersuchungen zu den Grenzen der Blitzthermografie beziehen sich auf die maximal erreichbare Eindringtiefe und die theoretisch erreichbare Messgenauigkeit bei der Bestimmung von Materialdicke oder Temperaturleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Zeit- und der Temporaufauflösung der Infrarot(IR)-Kamera [3]. Die Einflüsse inhomogener Erwärmung und lateraler Wärmeleitungsprozessen können durch Normalisierung der gemessenen Intensitäten und Auswertung möglichst früher Temperaturkontraste (nicht erst den maximalem Kontrast abwarten) reduziert werden [4]. Ringversuche zur aktiven Thermografie wurden erstmals 1998 und 2000 an Probekörpern aus Kohlefaserverbundwerkstoffen mit Impact-Schäden durchgeführt [5, 6]. Hier wurden verschiedene optische Anregungen sowie die Ultraschallanregung miteinander verglichen. Die Blitzthermografie führte dabei mit zu den besten Ergebnissen. Bisher gibt es jedoch noch keinen systematischen Vergleich zu den Nachweisempfindlich-



keiten für unterschiedliche Fehlstellen und Materialien hinsichtlich der vom Prüfsystem vorgegebenen und zum Teil justierbaren Messparameter. Im Forschungsprojekt *Entwicklung von Normen und Standards für die aktive Thermografie mit Blitzlichtanregung* wurden eine Vielzahl von Materialsystemen (Metalle, Keramiken, Faserverbundwerkstoffe) mit unterschiedlichen Fehlstellen (Flachbodenbohrung, Ablösungen, Impact-Schäden) und verschiedenen Materialstärken (Stufenprobekörper) und Beschichtungen (Keramik) systematisch untersucht. Bei den Messparametern wurden die Anzahl der Blitzlampen, die Verwendung von Acrylglasplatten zur Reduzierung der Infrarotstrahlung der erwärmten Blitzlampen, die Integrationszeit und die Wellenlängen des IR-Kamerasystems variiert. Zur Optimierung der Emissivität wurden der Oberflächen teilweise geschwärzt. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse des systematischen Vergleichs verschiedener Messparameter an metallischen Probekörpern vorgestellt.

## 2. Prinzip der Blitzthermografie

Das Prinzip der Blitzthermografie basiert auf einer sehr kurzen Erwärmung der Oberfläche der zu untersuchenden Struktur mit einem sehr kurzen Lichtimpuls und der anschließenden Beobachtung der zeit- und orts aufgelösten Temperaturverteilung auf der Oberfläche durch Erfassung der Wärmestrahlung mit einer Infrarot(IR)-Kamera. Sofern nicht sehr dünne Beschichtungen oder Materialien mit sehr hoher Temperaturleitfähigkeit untersucht werden, finden die wesentlichen Wärmeleitungsprozesse erst nach der Erwärmung durch den Blitz statt. Analytisch kann die Blitzthermografie über die Lösung der eindimensionalen Wärmeleitungsgleichung mit Erwärmung durch einen Dirac-Impuls relativ gut beschrieben werden [7, 8, 9]. Danach gilt bei eindimensionaler Betrachtung folgender Zusammenhang:

$$L = \sqrt{\pi \alpha t} \quad (\text{Gl. 1})$$

$$L_{\max} = \frac{Q}{\varepsilon} \sqrt{\alpha} \frac{1}{n \Delta T_{NETD}} \quad (\text{Gl. 2})$$

$\alpha$  ist die Temperaturleitfähigkeit,  $t$  die Messzeit bezogen auf die Anregung,  $L$  die in der Messzeit  $t$  erreichte Tiefe in der Probe und  $L_{\max}$  die maximale Eindringtiefe für ein Material mit der Effusivität  $\varepsilon = (\lambda \rho c)^{0,5}$  und der Temperaturleitfähigkeit  $\alpha = \lambda / (\rho c)$  bei einer absorbierten Energie  $Q$  und einer Temporauflösung  $\Delta T_{NETD}$  der verwendeten IR-Kamera.  $n$  liegt dabei für gewöhnlich zwischen 2 und 3 und gibt den Faktor an, den ein Signal größer als  $\Delta T_{NETD}$  sein muss, um erkannt zu werden.  $\lambda$ ,  $\rho$  und  $c$  sind die Wärmeleitfähigkeit, die Dichte und die spezifische Wärmekapazität des Materials.

## 3. Experimentelles

Die Untersuchungen erfolgten an zwei Probekörpern aus Kupfer und V2A-Stahl mit Flachbodenbohrungen (FBB) sowie an einem Probekörper aus V2A-Stahl mit simulierten Ablösungen unterschiedlicher Größe und mit unterschiedlichen Überdeckungen. Für die Messungen wurden ein IR-Kamerasystem mit gekühltem InSb-Quantendetektor sowie bis zu vier Blitzlampen eingesetzt.

### 3.1 Probekörper mit Flachbodenbohrungen

Es wurden jeweils ein Probekörper aus Stahl V2A S235 und aus Kupfer mit den Abmessungen  $136 \times 136 \times 25 \text{ mm}^3$  und jeweils vier FBB mit einem Durchmesser von 12 mm und Restwandstärken von ca. 2, 4, 6 und 8 mm hergestellt. Die Materialparameter sind Tabelle 1 zu entnehmen. Die Probekörper wurden vor den Messungen mit schwarzer Kaseinfarbe gleichmäßig dünn beschichtet.

**Tabelle 1.** Materialparameter der verwendeten Probekörper

Material	Temperaturleitfähigkeit $\alpha$ in $\text{m}^2/\text{s}$	Effusivität $\epsilon$ in $\text{W s}^{0,5}/(\text{m}^2 \text{K})$	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ in $\text{W}/(\text{K m})$	Dichte $\rho$ in $\text{kg}/\text{m}^3$	Spez. Wärmekapazität $c$ in $\text{J}/(\text{g K})$
Stahl V2A S235	$12,5 \times 10^{-6}$	13860	49	7841	0,50
Kupfer	$117 \times 10^{-6}$	36893	399	8930	0,382

### 3.2 Probekörper mit Ablösungen

Zur Simulation von Ablösungen in unterschiedlichen Größen und mit verschiedenen Überdeckungen wurde aus Stahl V2A S235 ein Quader mit den Abmessungen  $90 \times 40 \times 17 \text{ mm}^3$  hergestellt, von dem eine der beiden größten Flächen poliert wurde. In diese Oberfläche wurden fünf quadratische Vertiefungen mit einer Tiefe von 0,3 mm und Größen von  $2 \times 2$  bis  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  mittels Funkenerosion eingebracht. Platten mit ebenfalls polierten Unterseiten mit Dicken von 0,5 bis 3 mm können als Deckschicht mit dem Quader verschraubt werden. Die sehr glatten Oberflächen ermöglichen einen guten thermischen Kontakt [2]. Untersuchungen wurden mit und ohne schwarze Beschichtung der Platten durchgeführt. Für die Beschichtung wurde Graphit aufgesprüht.

### 3.3 Blitzlampen

Die thermische Anregung erfolgte mit bis zu vier Xenon-Blitzlampen (EH Pro 6000 Blitzlampe von Hensel) mit einem Aperturdurchmesser von 17 cm und einer Energieaufnahme von 6 kJ pro Blitz. Die Impulsbreite beträgt 2,4 ms im sichtbaren Wellenlängenbereich und verändert sich bei der Verwendung von zwei bis vier Lampen aufgrund der Synchronisation der Lampen nicht. Nachfolgend werden die Ergebnisse von Messungen mit zwei und vier Lampen miteinander verglichen. Das zeitaufgelöste Spektrum sowie die abgestrahlte Energiedichteverteilung wurden untersucht und zum Teil in [2] veröffentlicht. Um eine zusätzliche Erwärmung des Prüfobjektes nach der Blitzanregung durch die Restwärme der Blitzlampe zu vermeiden, können Acrylglasplatten vor die Blitzlampen montiert werden. Da auch diese sich erwärmen, können zwei hintereinander positionierte Glasplatten mit einem Luftspalt dazwischen die Wärmestrahlung noch besser abschirmen. Nachfolgend werden Messergebnisse ohne und mit ein und zwei Acrylglasplatten vor den Blitzlampen vorgestellt.

### 3.4 Infrarot-Kamera

Es wurde eine gekühlte InSb IR-Kamera mit einer Detektorgröße von  $640 \times 512$  Pixeln und einem 29 mm SMWIR Objektiv mit einem Öffnungswinkel von  $15,1^\circ \times 18,8^\circ$  verwendet (Fa. Thermosensorik). Vor dem Detektor befindet sich ein Filterrad, an dem die folgenden drei Bandpassfilter ausgewählt wurden: 1,6 bis  $5,4 \mu\text{m}$ , 3,7 bis  $5,4 \mu\text{m}$  und 4,4 bis  $5,4 \mu\text{m}$ . Die Integrationszeiten wurden im Bereich von 0,1 bis 1,2 ms variiert, im Folgenden werden Ergebnisse für 0,5, 0,75 und 1,0 ms vorgestellt. Die Bildwiederholrate im ITR (integrate-

than-read) Modus lag bei 93 Hz. Wird nichts anderes angegeben, wurden die Messungen mit vier Blitzlampen, einer Acrylglasplatte vor jeder Blitzlampe, einer Integrationszeit von 1 ms, bzw. 0,63 ms bei dem Probekörper mit den flachen Fehlstellen, und dem Filter 3,7 bis 5,4  $\mu\text{m}$  durchgeführt.

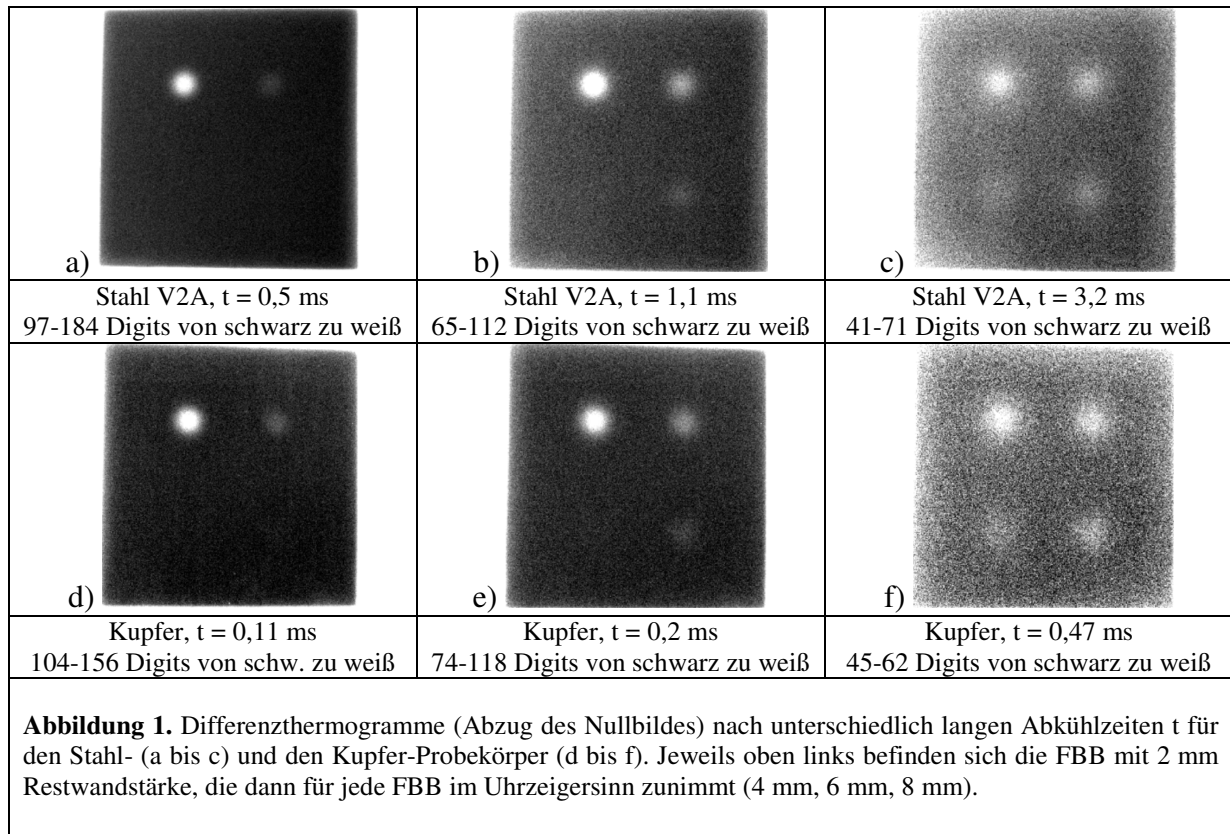
Zum Vergleich wurden einige Messungen auch mit einer Mikrobolometerkamera (InfraTec, VarioCam hr, 640 x 480 Pixel) mit einer max. Bildwiederholrate von 50 Hz durchgeführt.

#### **4. Ergebnisse des Probekörpers mit Flachbodenbohrung**

An den beiden Probekörpern aus Stahl (niedriger Temperaturleitfähigkeit) und Kupfer (hohe Temperaturleitfähigkeit) sollten der Einfluss der justierbaren Messparameter von IR-Kamera und Anregungsquellen auf den thermischen Kontrast der Fehlstellen untersucht werden. In Abbildung 1 sind die Thermogramme des Stahl- und des Kupfer-Probekörpers nach Blitzanregung jeweils vergleichbar für die besten Kontraste der unterschiedlich tiefen FBB dargestellt. Dabei wurde jeweils das Nullbild vor Beginn der Erwärmung abgezogen und es wurde über zehn aufeinanderfolgende Thermogramme gemittelt (bei d) wurde nur über fünf gemittelt), so dass hier nur Änderungen der Intensitätsverteilung durch die Erwärmung dargestellt sind. In beiden Probekörpern können alle vier FBB erkannt werden, d. h. es konnte in beiden Fällen eine Eindringtiefe von 8 mm erreicht werden. Aus Gl. 2 lassen sich die maximalen Eindringtiefen berechnen. Daraus ergibt sich in Kupfer eine um den Faktor 1,15 und damit nur geringfügig höhere Eindringtiefe als in Stahl, was mit den experimentellen Ergebnissen in etwa übereinstimmt. Aus den Zeitangaben ist zu erkennen, dass in Kupfer die Abkühlung deutlich schneller erfolgt als in Stahl.

Abbildung 2 a) zeigt den zeitaufgelösten Intensitätskontrast der FBB mit einer Restwandstärke von 2 mm für beide Probekörper. Hierbei wurde jeweils die Intensität oberhalb der FBB über 10x10 Pixel gemittelt und von der ebenfalls über 10x10 Pixel gemittelten Intensität einer ungestörten Referenzstelle in der Mitte des Probekörpers abgezogen. In Kupfer wird der maximale Kontrast der FBB deutlich früher erreicht und hat nur eine max. Intensität von 75% gegenüber Stahl. Dieses Verhältnis ändert sich nicht, wenn die Messung mit der Mikrobolometerkamera durchgeführt wird, s. Abbildung 2 b). Hier ist zu erkennen, dass aufgrund der geringeren Zeitauflösung bedingt durch die höhere Zeitkonstante und geringere Bildwiederholrate der Kontrast der FBB in Kupfer nicht mehr vollständig vom Anregungsimpuls getrennt werden kann. Aufgrund der schlechteren Temperaturauflösung der Mikrobolometerkamera wird hier erwartet, dass das Rauschen etwas größer ist als bei der gekühlten IR-Kamera. Dies kann jedoch nicht eindeutig beobachtet werden, was sich durch das wesentlich stärkere Übersprechen der einzelnen Pixel erklären lässt.

Den Einfluss unterschiedlicher Integrationszeiten bei der gekühlten IR-Kamera zeigt Abbildung 2 c), hier jedoch nur für die FBB in Stahl. Mit einer Verdopplung der Integrationszeit verdoppelt sich auch, wie erwartet, die Intensität. Gleichzeitig ist aber auch eine Zunahme des Rauschens zu beobachten, so dass das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) weniger als den Faktor 2 ansteigt. In Abbildung 2 d) wird der Einfluss des Bandfilters vor dem Detektor untersucht. Während eine Reduzierung des empfindlichen Wellenlängenbereichs der Kamera von 1,6 bis 5,4  $\mu\text{m}$  auf 3,7 bis 5,4  $\mu\text{m}$  nur zu einer geringen Abnahme der Intensität führt, bewirkt eine Filterung von 4,4 bis 5,4  $\mu\text{m}$  schon eine deutliche Reduzierung auf ca. 60 % gegenüber der größten Bandbreite. Dies bedeutet, dass die Strahlungsanteile zwischen 3,7 und 4,4  $\mu\text{m}$  schon wesentlich zum Signal beitragen.

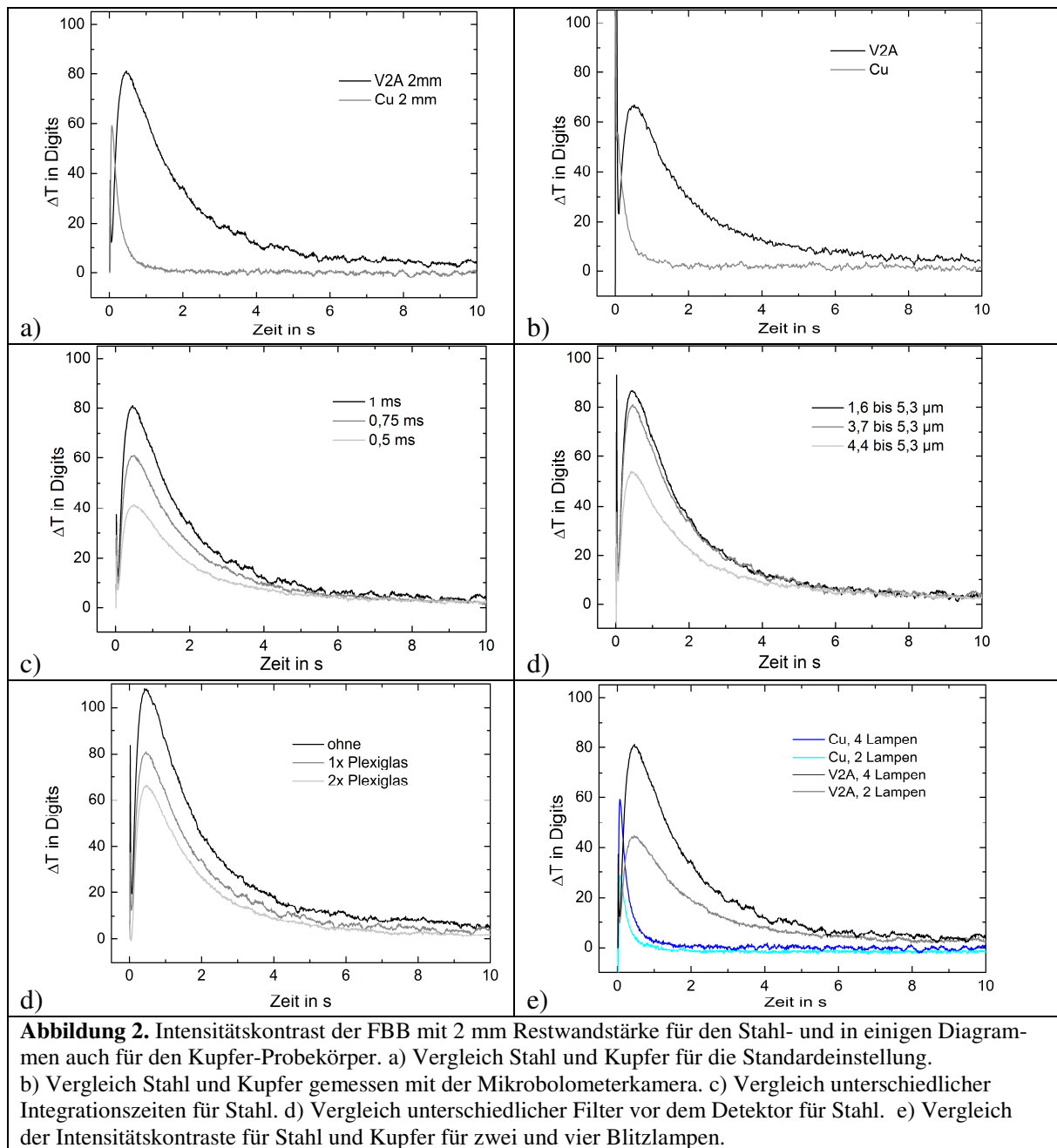


**Tabelle 2.** Zusammenfassung des Einflusses verschiedener Messparameter auf den Intensitätskontrast

Messparameter	Einfluss auf Intensitätskontrast
Integrationszeit	Der Intensitätskontrast nimmt proportional mit der Integrationszeit zu, gleichzeitig wird aber auch das Rauschen größer. Dadurch wächst das SNR langsamer als der Kontrast.
Filter vor dem Detektor der IR-Kamera	Wesentliche Intensitätsverluste treten beim Übergang vom 3,7-5,3 $\mu\text{m}$ zum 4,4-5,3 $\mu\text{m}$ Filter auf, d. h. wenn die Strahlungsanteile im Wellenbereich 3,7 bis 4,4 $\mu\text{m}$ herausgefiltert werden.
Acrylglasplatten vor den Blitzlampen	Mit zunehmender Gesamtdicke der Acrylglasscheiben nimmt der Intensitätskontrast ab. Auf die beobachtete Abkühlung haben die Platten nur einen geringen Einfluss.
Anzahl der Blitzlampen	Eine Verdopplung der Anregungsenergie führt zu einer Verdopplung des Intensitätskontrastes.

Abbildung 2 e) zeigt den Einfluss der Acrylglasscheiben. Sowohl Absorptionsverluste als auch Verluste durch Reflexionen führen insgesamt zu einer nichtlinearen Abnahme des Intensitätskontrastes. Die Abkühlung wird durch die Acrylglasscheiben nur geringfügig beeinflusst.

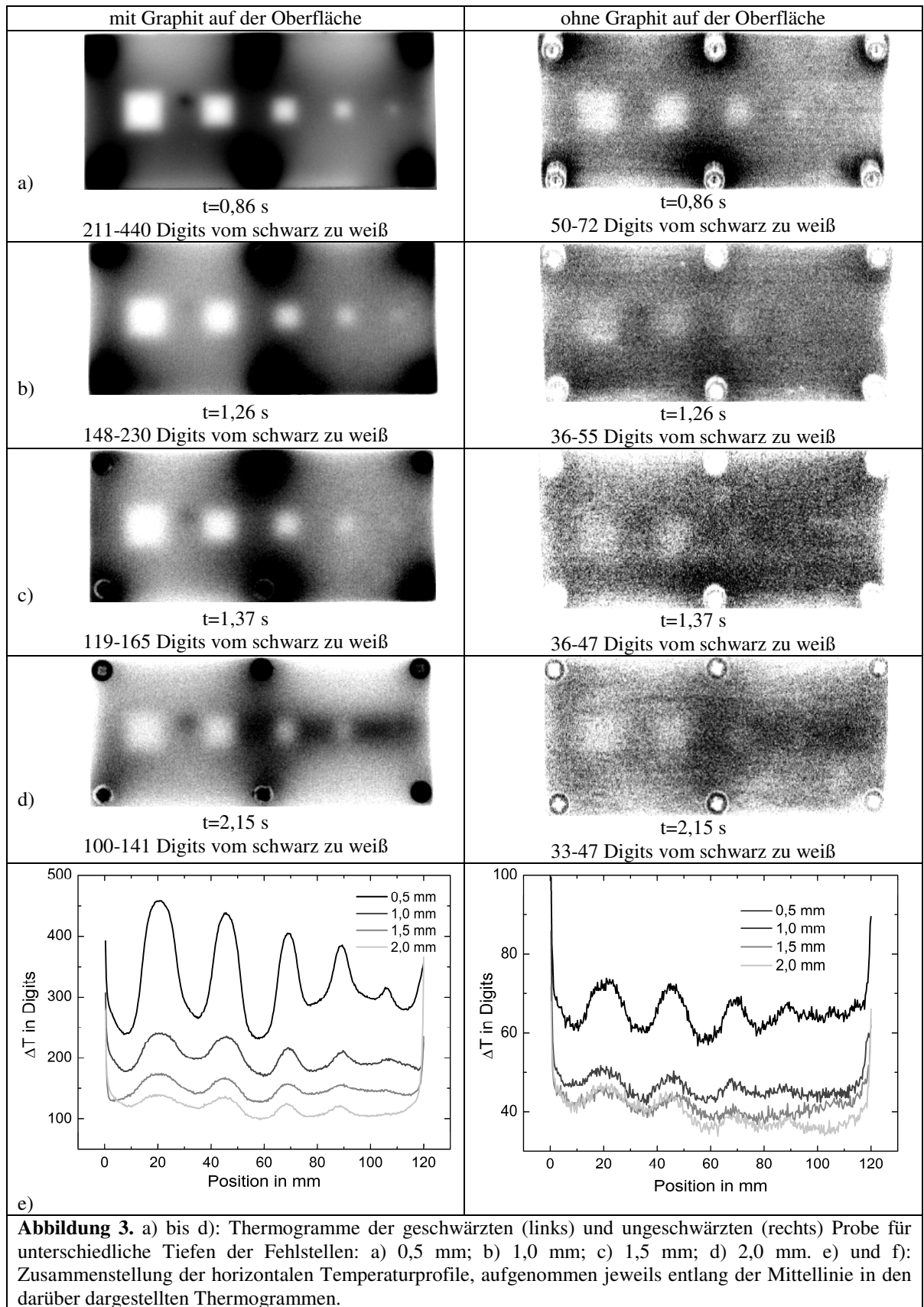
Die Ergebnisse der Untersuchungen mit zwei und vier Blitzlampen, jede Lampe mit einer Energie von 6 kJ, zeigt das Diagramm in Abbildung 2 e). Wie erwartet verdoppelt sich die Intensität des Temperaturkontrastes, wenn vier statt zwei Blitzlampen synchron eingesetzt werden. In Tabelle 2 sind die in Abbildung 2 beobachteten Ergebnisse zusammengefasst.



## 5. Einfluss von Materialüberdeckung und Oberflächenbehandlung

In Abbildung 3 sind oben die Thermogramme mit dem jeweils besten Temperaturkontrast der Fehlstellen für unterschiedliche Plattendicken und damit Fehlstellentiefen dargestellt. Dabei sind links die Thermogramme der Probe mit Schwärzung und rechts ohne Schwärzung zu sehen. Die Temperaturprofile entlang einer horizontalen Linie in der Mitte der Thermogramme sind zum besseren Vergleich in Abbildung 3 unten zusammengefasst. Dargestellt ist jeweils der Temperaturkontrast bezogen auf das Nullbild.

In der linken Spalte ist deutlich zu erkennen, wie mit zunehmender Fehlstellentiefe der Kontrast der Fehlstellen abnimmt. Die kleinste Fehlstelle mit einer Größe von  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  kann bis zu einer Tiefe von 1,5 mm nachgewiesen werden. Auch ohne Schwärzung sind zumindest die größeren Fehlstellen in einer Tiefe von 0,5 mm noch gut zuerkennen (rechte Spalte) und auch in einer Tiefe von 2 mm können die beiden größeren Fehlstellen noch detektiert werden.



Ein Vergleich der Temperaturprofile zeigt aber auch, dass die Schwärzung zu einem Intensitätskontrastanstieg um den Faktor 15 führt, damit also einen wesentlichen Beitrag zum Intensitätskontrast liefert. Dieser Anstieg setzt sich zusammen aus einer höheren

Absorption der Lichtenergie und einer höheren Emissivität der Oberfläche im Wellenlängenbereich der IR-Kamera.

## Zusammenfassung

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Nachweisempfindlichkeit des Verfahrens bezüglich Fehlstellen mit entsprechender Auswahl der Gerätetechnik und der Messparameter relativ einfach optimiert werden kann. Bei geringer Emissivität der Oberfläche führt eine Schwärzung zu einer wesentlichen Verbesserung des Intensitätskontrastes der Fehlstellen. Bei optischer Anregung führt die Schwärzung sowohl zu einer Erhöhung der absorbierten Energie als auch zu einer höheren Intensität der Wärmestrahlung der Probe. Die Eindringtiefe lässt sich durch Erhöhung der eingebrachten Energie und durch Verwendung einer IR-Kamera mit hoher Temporauflösung optimieren. Nach Gl. 2 hängt diese sonst nur noch vom Produkt der Dichte und der spez. Wärmekapazität des Materials ab, so dass sich z. B. für Kupfer und Stahl trotz sehr unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten vergleichbare Eindringtiefen ergeben. Im Gegensatz dazu hängt die Tiefenaufklärung sehr stark von der Temperaturleitfähigkeit ab und kann nur über die Bildwiederholrate der Kamera beeinflusst werden. Lange Integrationszeiten sowie eine geeignete Wahl der Filter vor dem Detektor der IR-Kamera sowie vor den Blitzlampen tragen wesentlich zur Optimierung des Intensitätskontrastes der Fehlstellen bei.

## Danksagung

Die hier vorgestellten Forschungsergebnisse entstanden im Projekt *Entwicklung von Normen und Standards für die aktive Thermografie mit Blitzlichtanregung*, das vom BMWi über die DLR als Projektträger gefördert wird. Herrn M. Sengebusch vom DIN e. V. danken wir für die Zusammenarbeit mit dem DIN Ausschuss.

## Referenzen

- [1] Maierhofer, Ch.: Neues aus der Normung zur Thermographie. ZfP-Zeitung 129, 2012, S. 8-9
- [2] Maierhofer, Ch., Reischel, M., Krankenhagen, R., Myrach, P., Röllig, M., Steinfurth, H.: Anwendungsbereiche und Grenzen der Blitzthermografie - Entwicklung eines anwendungsnahen Standards. Berichtsband 136-CD der DGZfP Jahrestagung 2012, Graz, Österreich
- [3] Shepard, S. M., Lhota, J. R., Ahmed, T.: Measurement limits in flash thermography. Proc. of SPIE Vol. 7299 72990T-1, 2009
- [4] Balageas, D. L.: Defense and illustration of time-resolved pulsed thermography for NDE. Quantitative Infrared Thermography Journal Vol. 9, No. 1, 2012, pp. 3-32
- [5] Vavilov, V. P., Almond, D. P., Busse G., Grinzato E., Krapez J.-C., Maldague X., Marinetti, S., Peng, W., Shirayev, V., Wu, D.: Infrared thermographic detection and characterisation of impact damage in carbon fiber composites: results of the round robin test. QIRT 1998, Lodz, Poland, <http://qirt.org/archives/qirt1998/papers/005.pdf>
- [6] Almond, D. P., Ball, R. J., Dillenz, A., Busse, G., Krapez, J.-C., Galmiche, F., Maldague X.: Round Robin comparison II of the capabilities of various thermographic techniques in the detection of defects in carbon fibre composites. QIRT 2000, <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2000/papers/065.pdf>
- [7] Carslaw, H. S., Jaeger, J. C.: Conduction of heat in solids. Second Edition, Oxford Science Publication, Oxford, GB, 1959
- [8] Parker, W. J., Jenkins, R. J., Butler, C. P., Abbott, G. L.: Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity. J. Appl. Phys. 32, pp.1679-1684, 1961, <http://dx.doi.org/10.1063/1.1728417>
- [9] Lau, S. K., Almond, D. P., Patel, P. M.: Transient thermal wave techniques for the evaluation of surface coatings. J. Phys. D: Appl. Phys. 24, 1991, pp. 428-436