

# Ringversuche zur Blitzthermografie

Nick ROTHBART<sup>1</sup>, Christiane MAIERHOFER<sup>1</sup>, Mathias RÖLLIG<sup>1</sup>,  
Martin SENGEBUSCH<sup>2</sup>, Matthias GOLDAMMER<sup>3</sup>, Felix HOHLSTEIN<sup>4</sup>,  
Joachim KOCH<sup>5</sup>, Igor KRYUKOV<sup>6</sup>, Guido MAHLER<sup>7</sup>, Bernhard STOTTER<sup>8</sup>,  
Günter WALLE<sup>9</sup>

<sup>1</sup> BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

<sup>2</sup> Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin

<sup>3</sup> Siemens AG Corporate Technology, München

<sup>4</sup> Block Materialprüfungsgesellschaft mbH, Berlin

<sup>5</sup> edevis GmbH, Stuttgart

<sup>6</sup> Universität Kassel, Fachgebiet für Trennende und Fügende Fertigungsverfahren, Kassel

<sup>7</sup> InfraTec GmbH Infrarotsensorik und Messtechnik, Dresden

<sup>8</sup> FH Oberösterreich, Wels, Österreich

<sup>9</sup> Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

**Kurzfassung.** Im Rahmen des INS-Projekts „Durchführung von Ringversuchen zur Normung und Standardisierung der aktiven Thermografie mit Blitzlichtanregung“ wurden Ringversuche durchgeführt, die die Zuverlässigkeit, Vergleichbarkeit und Effektivität der Blitzthermografie für unterschiedliche Prüfprobleme nachweisen sollten. Weiterhin sollten diese Untersuchungen als Methodvalidierungsstudie die Richtigkeit und Präzision der Blitzthermografie nachweisen und Vergleichsinformationen unterschiedlicher Geräteausstattungen liefern. Im Normausschuss NA 062-08-27 AA „Visuelle und thermografische Prüfung“ des DIN werden die Ergebnisse die Erarbeitung eines Normentwurfs zur Blitzthermografie unterstützen. In diesem Beitrag werden die Ringversuche beschrieben und ausgewählte Ergebnisse präsentiert.

## 1. Einführung

Mit der Blitzthermografie steht ein schnelles, berührungsloses und vollständig zerstörungsfreies Prüfverfahren zur Verfügung, das aufgrund seiner guten Automatisierbarkeit großes Potential hat, direkt in Fertigungsabläufe integriert zu werden. Die hohe Nachweisempfindlichkeit im oberflächennahen Bereich und gegenüber Fehlstellen mit paralleler Ausrichtung zur Oberfläche (Delaminationen, Hohlstellen) ermöglicht z.B. die effiziente Prüfung von Klebungen, Beschichtungen oder von Strukturen aus Faserverbundwerkstoffen [1]. Daneben kann das Verfahren aber auch sehr gut zur Prüfung metallischer Werkstoffe eingesetzt werden, z.B. zur Qualitätssicherung von Punkt- und Laserschweißverbindungen [2], zur Ortung von schräg einlaufenden Rissen und Überwetzungen oder zur Kontrolle von Lötverbindungen [3]. Häufig kann das Verfahren daher auch komplementär zu anderen ZfP-Verfahren genutzt werden. Trotz des großen Potentials fehlen bisher Prüfnormen, Referenzprobekörper und Ringversuche zur Vereinheitlichung von Vorgehensweisen.



Die einzigen bisher bekannten Ringversuche zur aktiven Thermografie wurden an CFK-Probekörpern mit Impact-Schäden durchgeführt und 1998 und 2000 veröffentlicht [4, 5]. Ziel der Versuche der damaligen EUROTHERM-Arbeitsgruppe war der Vergleich unterschiedlicher Anregungs- und Auswertungstechniken der aktiven Thermografie über die Bewertung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses (SNR) der detektierten Fehlstellen und weiterer Leistungskennwerte. Unter anderem wurde dabei auch die Blitzthermografie bewertet. Untersuchungen an einer 2 mm dicken Probe im ersten Test zeigten, dass die längere stufenartige optische Anregung die höchsten SNR-Werte lieferte, die Blitzthermografie erlaubte aber eine höhere Ortsauflösung. Erst die Puls-Phasen-Auswertung (PPT) [6] führte bei der Blitzthermografie zu vergleichbaren SNR-Werten. Im zweiten Ringversuch wurden Proben mit Dicken bis 7 mm untersucht. Hier konnte keines der optischen Verfahren und damit auch nicht die Blitzthermografie den gesamten Impact-Schaden von der Vorderseite aus detektieren. Dies war nur mit der Ultraschallanregung möglich.

Zu konkreten Anwendung der Thermografie wurde 2007 der ASTM Standard ASTM E 2582-07 „Standard Practice for Infrared Flash Thermography of Composite Panels and Repair Patches Used in Aerospace Applications“ veröffentlicht. Auf die Durchführung der Prüfung mit Blitzlichtanregung sowie auf die Datenauswertung wird ausführlich eingegangen, es fehlen jedoch quantitative Angaben hinsichtlich der erforderlichen Anregungsenergie und der weiteren Messparameter. Auch auf die Grenzen des Verfahrens (u.a. Eindringtiefe, Nachweisempfindlichkeit) bezogen auf die thermischen Materialparameter wird nicht eingegangen.

Nachfolgend werden daher neue Ringversuche beschrieben, die in Anlehnung an die DIN EN ISO/IEC 17043:2010-05 als Methodvalidierungsstudie die Richtigkeit und Präzision der Blitzthermografie nachweisen und gleichzeitig Vergleichsinformationen über die Leistung unterschiedlicher Messgeräte liefern sollten. Es wurden daher 16 Probekörper aus verschiedenen Metallen (Edelstahl, Kupfer, Aluminium) und CFK mit unterschiedlichen Fehlstellenarten geplant und hergestellt, die die verschiedenen Prüfsituationen nachbilden und eine qualitative und teilweise auch quantitative Bewertung der Ergebnisse erlauben sollten. In einem umfangreichen Messprogramm wurden die Aufgabenstellungen festgelegt. Eine Auswahl der Ergebnisse wird in diesem Beitrag vorgestellt.

## **2. Messprogramm**

### *2.1 Teilnehmer der Ringversuche und Geräte*

An den Ringversuchen nahmen neun Teilnehmer aus verschiedenen Umfeldern teil. Dabei sind mit dem universitären Bereich, der Industrie und KMUs vielfältige Institutionen aus Forschung und Anwendung vertreten, die zusammen mit dem DIN als Projektträger in der Autorenschaft aufgelistet sind. In Tabelle 1 sind Messgeräte und -parameter von sieben Teilnehmern für die Messungen an einem 200 x 200 x 7,5 mm<sup>3</sup> großen Edelstahl-Probekörper mit Flachbodenbohrungen (siehe Kapitel 2.2) dargestellt.

Zur Anregung wurden ein bis vier Blitze mit Blitzdauern zwischen 2 und 11 ms verwendet, womit Gesamtenergien zwischen 6 und 24 kJ umgesetzt wurden. Damit wurden in einem mitgelieferten Sensorplättchen Temperaturerhöhungen ( $\Delta T$ ) von 4,2 bis 24 K bewirkt, was mit der bekannten Wärmekapazität des Sensorplättchens von 0,242 J/K und der Fläche von 1 cm<sup>2</sup> einen Energieeintrag zwischen 1 und 5,8 J/cm<sup>2</sup> bedeutet.

Bei den verwendeten Kameras handelte es sich mit Ausnahme einer Mikrobolometerkamera um Kameras mit Indiumantimonid (InSb)-Sensoren mit 320 x 256 bis zu 640 x 512 Pixeln. Als empfindlicher Spektralbereich wurde meist der MWIR-

Bereich (etwa 1,5 bis 5  $\mu\text{m}$ ), aber z.T. auch der LWIR-Bereich (7,5 bis 14  $\mu\text{m}$ ) genutzt. Für die Messungen am V2A-Probekörper sind Bildwiederholraten von 50 (empfohlene Bildwiederholrate) bis 353 Hz eingestellt worden. Die Integrationszeiten betragen zwischen 720 und 2500  $\mu\text{s}$ , woraus sich mit den eingestellten Parametern Temperaturauflösungen (NETD) zwischen 18 und 40 mK ergaben. Die Geometrie des Aufbaus unterscheidet sich zwischen den Teilnehmern nicht wesentlich. So betragen die Abstände der Probe zur Kamera und zum Blitz zwischen 48 und 70 cm bzw. zwischen 24 und 50 cm, wobei der Winkel zwischen Blitz und Probe zwischen 15 und 45° eingestellt wurde.

**Tabelle 1.** Verwendete Messgeräte und –parameter der Messungen am 200 x 200 x 7,5 mm<sup>3</sup> großen Edelstahl-Probekörper.

Teilnehmer	A	B	C	D	E	F	G
<b>Blitz</b>							
<b>Energie</b>	4 x 6 kJ	2 x 6,4 kJ	2 x 3 kJ	2 x 3 kJ	1 x 6 kJ	2 x 3 kJ	1 x 6 kJ
<b>Dauer</b>	2.6 ms	10 ms	2 ms	k. A.	11 ms	2 ms	10 ms
<b>Abstand</b>	30 cm	25 cm	30 cm	24 cm	36 cm	50 cm	35 cm
<b>Winkel</b>	15°	45°	30°	41°	40°	30°	30°
<b><math>\Delta T</math> (siehe Text)</b>	k. A.	8 K	11 K	4,2 K	k. A.	24 K	13,6 K
<b>Energieeintrag</b>	k. A.	1,9 J/cm <sup>2</sup>	2,6 J/cm <sup>2</sup>	1,0 J/cm <sup>2</sup>	k. A.	5,8 J/cm <sup>2</sup>	3,3 J/cm <sup>2</sup>
<b>Kamera</b>							
<b>Detektortyp</b>	InSb	InSb	InSb	Mikro-bolometer	InSb	InSb	InSb
<b>Wellenlängenbereich</b>	2 – 5 $\mu\text{m}$	2,5 – 5,1 $\mu\text{m}$	3 – 5 $\mu\text{m}$	7,5 – 14 $\mu\text{m}$	1,5 – 5,4 $\mu\text{m}$	3 – 5 $\mu\text{m}$	3 – 5 $\mu\text{m}$
<b>Arraygröße</b>	640 x 512	320 x 256	320 x 256	384 x 288	640 x 512	640 x 512	640 x 512
<b>Bildrate</b>	50 Hz	50 Hz	300 Hz	50 Hz	353 Hz	100 Hz	50 Hz
<b>Integrationszeit</b>	720 $\mu\text{s}$	800 $\mu\text{s}$	1000 $\mu\text{s}$	k. A.	2200 $\mu\text{s}$	2500 $\mu\text{s}$	2500 $\mu\text{s}$
<b>NETD</b>	< 25 mK	30 mK	< 20 mK	< 40 mK	18 mK	20 mK	< 20 mK
<b>Abstand</b>	65 cm	70 cm	70 cm	49 cm	64 cm	48 cm	67 cm
<b>Objektiv</b>	25 mm	27 mm	M25	25 mm	25 mm	25 mm	20° x 16° FOV

## 2.2 Probekörper

Im Ringversuch wurden insgesamt 16 Probekörper aus verschiedenen Materialien mit verschiedenen Fehlstellen untersucht. Zur Gestaltung der Probekörper trugen die Ergebnisse des TNS Projekts Blitzthermografie [7] maßgeblich bei. Dabei handelt es sich u.a. um jeweils drei 200 x 200 x 7,5 mm<sup>3</sup> große und drei 100 x 100 x 4,5 mm<sup>3</sup> große Probekörper aus Aluminium, Kupfer und nichtrostendem Stahl (V2A) mit Flachbodenbohrungen verschiedener Größen. Die Durchmesser der Bohrungen liegen zwischen 8 und 32 mm bzw. zwischen 1 und 4 mm, die Restwandstärken zwischen 2 und 6 mm bzw. zwischen 0,2 und 3,5 mm. Auf die in Abb. 1 dargestellten V2A-Probekörper und die entsprechenden Ergebnisse wird im Folgenden näher eingegangen. Weiterhin gehören zu den verwendeten Probekörpern eine 200 x 200 x 6 mm<sup>3</sup> große Platte aus quasiisotropem CFK mit Flachbodenbohrungen, zwei Platten aus V2A bzw. Kupfer mit gekreuzten Nuten und einer Nutrampe (80 x 70 x 6 mm<sup>3</sup>), ein CFK-Stufenkörper mit künstlichen Delaminationen aus PTFE (200 x 200 x 1,5 bis 3,5 mm<sup>3</sup>) sowie je drei Platten aus quasiisotropem bzw. unidirektionalem CFK mit definierten Impactschäden mit Energieeinträgen zwischen 2,5 und 10 J (low velocity impact). Alle Probekörper wurden nach der Herstellung auf ihre Maße überprüft und durch Messungen mit Blitzthermografie mit dem an der BAM vorhandenen System erstmals untersucht. Bei den metallischen Probekörpern hat sich eine

Beschichtung mit Graphitspray vor der Durchführung der Messung zur Erhöhung der Emissivität als günstig erwiesen, die einheitlich in den Ringversuchen verwendet werden sollte.



**Abb. 1.** Rückseiten der V2A-Probekörper mit äußeren Abmessungen von 200 x 200 x 7,5 mm<sup>3</sup> (links) und mit 100x100x4,5 mm<sup>3</sup> (rechts) mit Flachbodenbohrungen verschiedener Durchmesser und Tiefen.

### 2.3 Messaufgaben

Die Messaufgaben des Ringversuchs umfassten Blitzthermografiemessungen an den Probekörpern vorwiegend in Reflexionskonfiguration, an einigen der CFK-Probekörper auch in Transmissionskonfiguration. Es wurden verschiedene Auswertungsschritte an ausgewählten Thermogrammen und Phasenbildern, die mittels PPT generiert werden sollten, vorgegeben. Die zuvor beschriebenen V2A-Probekörper sollten wie folgt untersucht werden:

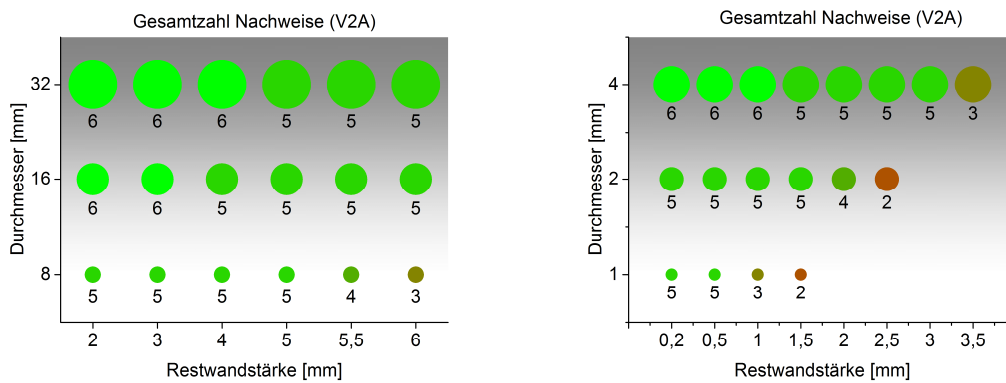
- Überprüfung der Homogenität der Beleuchtung mittels einer Pappwand sowie die Messung der Temperaturerhöhung an einem mitgelieferten Referenz-Sensorplättchen zum Vergleich der absolut eingebrachten Energie
- Auswahl von Thermogrammen aus den erfassten Abkühlungssequenzen mit jeweils optimalem Temperaturkontrast der Fehlstellen
- Anwendung der PPT und Auswahl geeigneter Phasenbilder
- Dokumentation der Nachweisbarkeit und Bestimmung des SNR aller Fehlstellen aus den ausgewählten Thermogrammen und Phasenbildern. Die Signalintensität ergibt sich dabei aus der maximalen Temperaturdifferenz und das Rauschen aus der Standardabweichung der Temperatur innerhalb eines ungestörten Bereichs des Probekörpers.
- Bestimmung der in den Thermogrammen gemessenen Durchmesser der Fehlstellen und der Zeitpunkte mit jeweils maximalem Kontrast in den Thermogrammen

Bei den anderen Probekörpern bestanden die Messaufgaben in der Angabe der nachgewiesenen Fehlstellen in Abhängigkeit von deren Größe und Überdeckung (Flachbodenbohrungen), der Bestimmung der Ortsauflösung (Kreuznuten) und der Eindringtiefen (Nutrampen) sowie der Bestimmung der Größe der Impactschäden. Für alle Messaufgaben wurden ausführliche Prüfanweisungen mit empfohlenen Messparametern und Prüfprotokolle zur Dokumentation der Ergebnisse und Messparameter angefertigt. Unter anderem zur Bestimmung des SNR und zur gleichmäßigen Beschichtung der Probekörper waren detaillierte Anleitungen vorhanden.

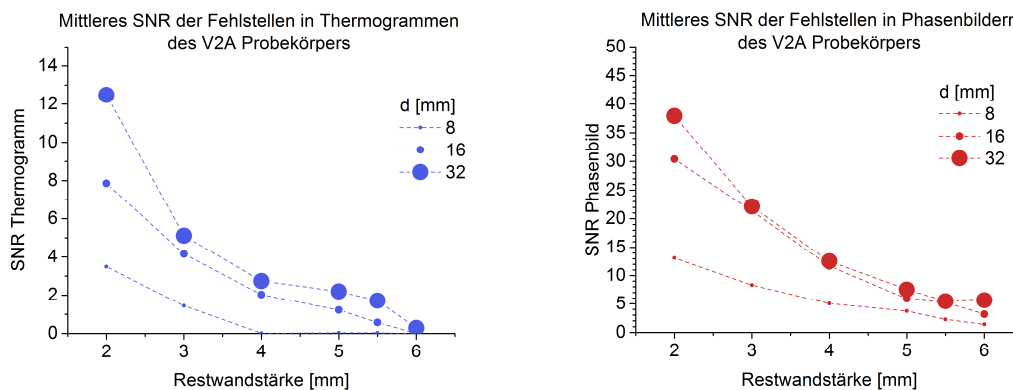
### 3. Ergebnisse an den V2A-Probekörpern

#### 3.1 Einfluss der Fehlstellengeometrie

Um den Einfluss der Fehlstellengeometrie quantitativ zu bewerten wurden die Nachweisbarkeit und das SNR aller Fehlstellen der V2A-Probekörper ausgewertet. Abb. 2 zeigt, wie oft die jeweiligen Fehlstellen von sechs Teilnehmern in den Phasenbildern der Reflexionsmessungen nachgewiesen wurden. Während die Fehlstellen mit einem Durchmesser von 32 mm und einer Restwandstärke von 2 bis 4 mm von jedem Teilnehmer nachgewiesen werden konnte, ist die Fehlstelle mit einem Durchmesser von 1 mm und einer Restwandstärke von 1,5 mm nur in zwei Fällen nachgewiesen worden. Die schlechtere Nachweisbarkeit tieferer Fehlstellen lässt sich durch die begrenzte Eindringtiefe der thermischen Wellen erklären. Hingegen werden Fehlstellen mit einem kleineren Durchmesser vergleichsweise schlechter nachgewiesen, da der Kontrast durch laterale Wärmetransportprozesse verringert wird.



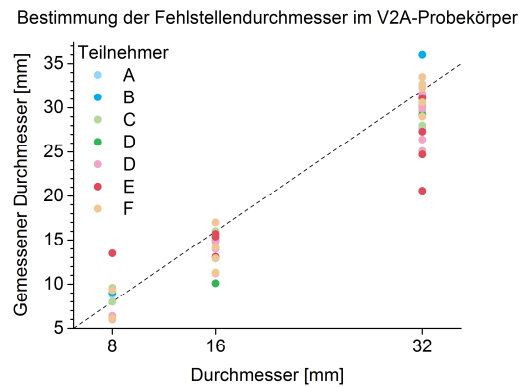
**Abb. 2.** Anzahl der Nachweise (von sechs) der Fehlstellen in den Phasenbildern in Abhängigkeit von ihren Geometrien. Größere Fehlstellen nahe der Oberfläche konnten häufiger nachgewiesen werden.



**Abb. 3.** SNR der verschiedenen Fehlstellengeometrien in Thermogrammen (links) und in Phasenbildern (rechts) am großen V2A-Probekörper. Die Werte sind aus den Daten aller ausgewerteten Teilnehmer gemittelt.

Dieser Zusammenhang wird in Abb. 3 quantitativ bestätigt, die das aus allen Teilnehmern gemittelte SNR der verschiedenen Fehlstellengeometrien in den Thermogrammen (links) und in den Phasenbildern (rechts) für den großen V2A-Probekörper zeigt. In beiden Fällen tragen sowohl ein großer Durchmesser  $d$  als auch eine geringe Restwandstärke zu einem hohen SNR und damit zu einer guten Nachweisbarkeit bei. Nicht in der Abbildung, jedoch in den Daten erkennbar ist, dass bei gleichem Aspektverhältnis Fehlstellen mit einem kleineren Durchmesser besser nachweisbar sind. Offensichtlich ist bei diesem Probekörper, dass die Phasenbilder die Fehlstellen mit einem wesentlich besseren SNR abbilden als die Thermogramme (siehe auch Abschnitt 3.2).

Abb. 4 zeigt die aus den Thermogrammen abgelesenen Durchmesser (FWHM) der Fehlstellen, wobei unterschiedliche Farben der Messpunkte unterschiedliche Teilnehmer repräsentieren. Es wird deutlich, dass die Streuung der gemessenen Werte unter den Teilnehmern mit bis zu 93 % sehr groß ist. Somit ist die objektive Bestimmung des Durchmessers aus den Thermogrammen sehr schwierig und es sollte z. B. auch der Zeitpunkt des entsprechenden Thermogramms festgehalten werden. Auch die gemessenen Werte jeweils eines Teilnehmers streuen sehr stark, da sich die Fehlstellen in unterschiedlichen Tiefen befinden, wodurch das Erscheinungsbild der Fehlstelle im Thermogramm aufgrund von lateralen Wärmetransportprozessen beeinflusst wird.



**Abb. 4.** Zusammenhang zwischen den tatsächlichen und den im Thermogramm gemessenen Durchmessern der Fehlstellen. Die Streuung der gemessenen Werte ist sehr groß.

### 3.2 Einfluss der Auswertungsmethode

Am V2A-Probekörper wurde auch der Einfluss der Auswertungsmethode auf die Ergebnisse untersucht. So wurde das SNR der Fehlstellen sowohl in Thermogrammen als auch in Phasenbildern der PPT ausgewertet.

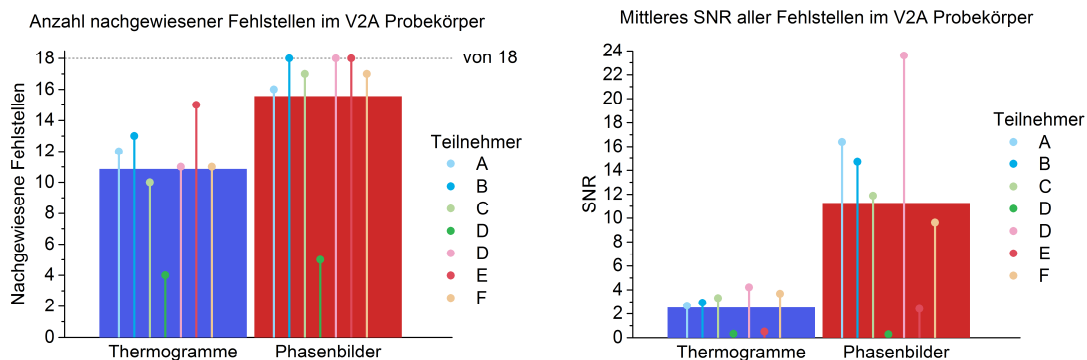
Thermogramme		
Teilnehmer D (2,9 s)	Teilnehmer G (4,5 s)	Teilnehmer E (4,6 s)
Phasenbilder		
Teilnehmer D (0,05 Hz)	Teilnehmer G (0,1 Hz)	Teilnehmer E (0,07 Hz)

**Abb. 5.** Ausgewählte Thermogramme (oben) und Phasenbilder (unten) verschiedener Teilnehmer. Die Qualität der Bilder ist unterschiedlich, wobei die Phasenbilder augenscheinlich stets die besseren Ergebnisse liefern.

Abb. 5 zeigt Thermogramme (oben) und Phasenbilder (unten) von drei verschiedenen Teilnehmern. In allen Fällen liefern die Phasenbilder jeweils bessere Ergebnisse, da mehr Fehlstellen deutlich erkennbar sind. In den Bildern des Teilnehmers D (links) ist ein sehr hohes Rauschen und insbesondere im Thermogramm eine sehr

inhomogene Beleuchtung zu erkennen. Im Phasenbild sind entsprechend nur fünf Fehlstellen nachweisbar. Dahingegen sind im Phasenbild des Teilnehmers E (rechts) alle 18 Fehlstellen deutlich sichtbar. Dabei ist z.T. innerhalb der großen Fehlstellen eine Phasenumkehr des Kontrasts von hell/dunkel zu dunkel/hell erkennbar. Die dazugehörigen Zeitpunkte und Frequenzen der dargestellten Thermogramme und Phasenbilder mit jeweils bester Nachweisbarkeit der Fehlstellen betragen v. l. n. r. 2,9 s, 4,5 s und 4,6 s bzw. 0,05 Hz, 0,1 Hz und 0,07 Hz.

Um den oben beschriebenen Eindruck quantitativ zu belegen, sind in Abb. 6 die Anzahl der nachgewiesenen Fehlstellen von insgesamt 18 (links) sowie das mittlere SNR aller Fehlstellen (rechts) jeweils in den Thermogrammen und den Phasenbildern des großen V2A-Probekörpers dargestellt. Dabei wurden nicht nachgewiesene Fehlstellen mit einem SNR von 0 bewertet. In den Diagrammen sind sowohl die Einzelergebnisse der Teilnehmer in verschiedenen Farben als auch der Mittelwert aus allen Teilnehmern (breite Balken) eingetragen. Es zeigt sich sehr deutlich und übereinstimmend bei allen Teilnehmern, dass die Phasenbilder bessere Ergebnisse liefern (s. auch Abb. 3). Im Mittel konnten in den Thermogrammen etwa 11, in den Phasenbildern etwa 16 Fehlstellen nachgewiesen werden. Das mittlere SNR ist in den Phasenbildern mit etwa 11 sogar um mehr als das Vierfache größer als in den Thermogrammen (etwa 2,5). Dabei fällt auf, dass die Streuung der Einzelergebnisse in den Phasenbildern deutlich größer ausfällt als in den Thermogrammen. Dies könnte an der Vielzahl veränderlicher Parameter liegen, die bei der Erstellung der Phasenbilder aus den Thermogrammen gewählt werden können.



**Abb. 6.** Darstellung der im Mittel nachgewiesenen Fehlstellen (links) und des mittleren SNR (rechts) in den Thermogrammen und Phasenbildern des großen V2A-Probekörpers. Übereinstimmend können in den Phasenbildern mehr Fehlstellen mit höherem SNR nachgewiesen werden.

#### 4. Schlussfolgerung

Es wurden Ergebnisse zweier ausgewählter Probekörper aus Edelstahl aus den Ringversuchen vorgestellt. Da unterschiedliche Messkonfigurationen von den Teilnehmern verwendet wurden, streuen die erzielten Ergebnisse entsprechend stark. Es ist aufgrund der Vielzahl der Parameter und der unterschiedlichen Ergebnisse in verschiedenen Messaufgaben schwierig, eine allgemeingültige Aussage über den Einfluss der einzelnen Parameter zu treffen. Allerdings ist erkennbar, dass das niedrigste SNR mit dem höchsten NETD und dem niedrigsten gemessenen Energieeintrag korreliert. Damit kommt diesen Parametern eine relativ große Bedeutung zu, um ein hohes SNR zu erzielen. Eine niedrige NETD lässt sich wiederum durch einen sensitiven Detektor der IR-Kamera und z.B. durch eine möglichst große Integrationszeit realisieren. Um einen hohen Energieeintrag ins Material zu erreichen, sollten Blitze mit möglichst hoher Blitzenergie in einem möglichst geringen Abstand zur Probe verwendet werden.

Im Vergleich zu den Thermogrammen sind in den Phasenbildern noch stärkere Streuungen bei den Ergebnissen zu beobachten, da viele Parameter wie die Länge der genutzten Bildsequenz, die Bildwiederholrate oder der Startpunkt der FFT die Puls-Phasen-Transformation beeinflussen. Insgesamt zeigt der Vergleich zwischen Thermogrammen und Phasenbildern, dass durchweg in den Phasenbildern mehr Fehlstellen mit einem höheren SNR nachgewiesen werden konnten. Weiterhin wurde der Einfluss der Fehlstellengeometrie systematisch untersucht, wodurch sich die Nachweisgrenzen der Fehlstellen abschätzen lassen. Die hier untersuchten Fehlstellen konnten bis auf vier mit einem Durchmesser von 1 mm und Restwandstärken > 1,5 mm alle nachgewiesen werden, wobei kleinere und tiefere Fehlstellen weniger oft nachgewiesen wurden. So wurde die kleinste detektierte Fehlstelle (Durchmesser 1 mm, Restwandstärke 1,5 mm) nur von zwei von sechs Teilnehmer nachgewiesen.

## Danksagung

Das Projekt wurde im Programm **Innovationen mit Normen und Standards** (INS 1255) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert. Projektverantwortlich im DIN e. V. ist der Normenausschuss Materialprüfung (NMP).

## Referenzen

- [1] Maierhofer, C., Röllig, M., Ehrig, K., Meinel, D., Céspedes-Gonzales, G.; Validation of flash thermography using computed tomography for characterizing inhomogeneities and defects in CFRP structures. *Composites Part B: Engineering*, Volume 64, August 2014, Pages 175-186
- [2] Jonietz, F., Ziegler, M., Philipp Myrach, P., Suwala, H., Rethmeier, M.; Untersuchung von Punktschweißverbindungen mit aktiver Thermografie. DGZfP Tagungsband zur DACH-Tagung 2015, im Druck
- [3] Maierhofer, C., Röllig, M., Steinfurth, H., Ziegler, M., Kreuzbruck, M., Scheuerlein, C., Heck, S.; Non-destructive testing of Cu solder connections using active thermography. *NDT&E International* 52 (2012) 103–111.
- [4] 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
- [5] 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>
- [6] Maldague, X., Galmiche, F., Ziadi, A.; Advances in pulsed phase thermography. *Infrared Physics & Technology* 43 (2002) 175–181.
- [7] Maierhofer, C., Myrach, P., Ziegler, M., Krankenhagen, R., Steinfurth, H., Reischel, M.; Abschlussbericht zum Vorhaben Entwicklung von Normen und Standards für die aktive Thermografie mit Blitzlichtanregung; Berlin, Hannover Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, August 2013, <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb15/815242689.pdf>