

# Aktive Thermografie zur zerstörungsfreien Prüfung von Lötverbindungen

Christiane MAIERHOFER\*, Mathias RÖLLIG\*, Henrik STEINFURTH\*,  
Mathias ZIEGLER\*, Simon Johannes HECK\*\*, Christian SCHEUERLEIN\*\*

\* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, FG 8.4

Unter den Eichen 87, 12205 Berlin, [Christiane.Maierhofer@bam.de](mailto:Christiane.Maierhofer@bam.de), Tel +49 3081041441

\*\* European Organization for Nuclear Research (CERN), TE-MS-C-SCD (Superconductor Section), CH-1211 Genf 23, Schweiz, [Christian.Scheuerlein@cern.de](mailto:Christian.Scheuerlein@cern.de)

**Kurzfassung.** In diesem Beitrag werden die Möglichkeiten der Ortung von Fehlstellen in Cu Lötverbindungen unterhalb verschiedener Cu Blechdicken mit aktiver Thermografie demonstriert. Dabei wurden die Anregung mit Blitzlicht und die periodische Anregung mit der Lock-In Technik miteinander verglichen. Die Vor- und Nachteile der Anwendung unterschiedlicher IR-Kamerasysteme, einer gekühlten InSb-Quantendetektor IR-Kamera und einer Mikrobolometer IR-Kamera, werden dargestellt. Als objektives Kriterium wurde das SNR für unterschiedliche Fehlstellengrößen herangezogen.

## 1 Einführung

Im Zusammenhang mit der Konsolidierung der Hauptstromverbindungen des Large Hadron Collider (LHC) [1,2] am CERN wurde aktive Thermographie als mögliches Verfahren für die Zerstörungsfreie Prüfung von Lötverbindungen untersucht.

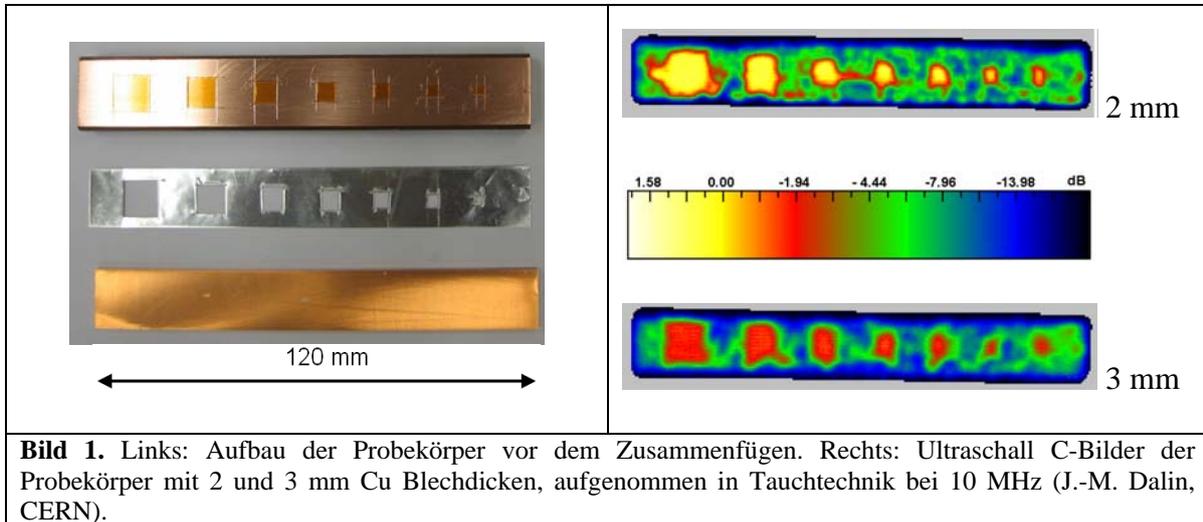
In diesem Beitrag werden die Ergebnisse der Messungen mit aktiver Thermografie an Probekörpern mit 2 und 3 mm dicken Shunt-Widerständen aus Kupfer und künstlichen Defekten unterschiedlicher Größe an der Lötverbindung zum Kupferstabilisator untersucht. Es wurden unterschiedliche Anregungen mit Blitzlicht und periodisch modulierten Halogenlampen eingesetzt. Nachweisgrenzen und Aufwand der Messungen unter Verwendung unterschiedlicher Thermografiemesssysteme werden im Folgenden beschrieben.

## 2 Experimentelles

### 2.1 Untersuchte Probekörper

Für die Untersuchungen mit aktiver Thermografie wurden zwei Probekörper basierend auf Kupferkabeln mit Abmessungen von  $120 \times 20 \times 10 \text{ mm}^3$  angefertigt. Als Shunt-Widerstände wurden Cu Bleche mit 2 und 3 mm Dicke mittels SnPb Induktionslöt aufgebracht. Unterschiedlich große Stücke aus Kapton-Folien simulieren acht Ablösungen mit den Abmessungen  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ ,  $8 \times 8 \text{ mm}^2$ ,  $6 \times 6 \text{ mm}^2$ ,  $5 \times 5 \text{ mm}^2$ ,  $4 \times 4 \text{ mm}^2$ ,  $3 \times 3 \text{ mm}^2$ ,  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  und  $1 \times 1 \text{ mm}^2$ . Entsprechende Aussparungen wurden in der Lötfolie berücksichtigt, s. Bild 1 links. Im Anschluss an die Herstellung wurden die Probekörper mit

Ultraschall in Tauchtechnik bei einer Frequenz von 10 MHz untersucht. Die entsprechenden C-Bilder in Bild 1 rechts zeigen, dass die tatsächlichen Abmessungen der Fehlstellen etwas von den geplanten abweichen. Für die Durchführung der Messungen mit aktiver Thermografie wurden die Oberflächen der Cu Bleche mit Graphit geschwärzt, wodurch eine Emissivität von 0,95 erreicht wurde.



**Bild 1.** Links: Aufbau der Probekörper vor dem Zusammenfügen. Rechts: Ultraschall C-Bilder der Probekörper mit 2 und 3 mm Cu Blechdicken, aufgenommen in Tauchtechnik bei 10 MHz (J.-M. Dalin, CERN).

## 2.2 Aufbau und Durchführung der Messungen mit aktiver Thermografie

Verfahren der aktiven Thermografie sind für die Untersuchung des Verbundes zwischen einzelnen Materialschichten sehr gut geeignet [3, 4, 5, 6, 7]. Dazu können generell sowohl die Impuls-Thermografie als auch die Lock-In Thermografie eingesetzt werden. Beide Anregungsverfahren haben ihre Vor- und Nachteile [8, 9]: Mittels Lock-In Anregung kann mehr Energie in das zu untersuchende Bauteil eingebracht werden, während hier die periodische Anregung mit nur einer Frequenz die Eindringtiefe und Tiefenauflösung begrenzt [10]. Im Gegensatz dazu ist die Frequenzbandbreite bei der Impuls-Thermografie wesentlich höher und mehr Informationen über die Tiefe von Fehlstellen können gewonnen werden. Bei der Impuls-Anregung ist jedoch der Energieeintrag begrenzt [11]. Um die für das Prüfproblem effizienteste Anregungsart zu ermitteln, wurden beide eingesetzt.

Die **Blitzanregung** wurde mit zwei Blitzlampen mit einer jeweiligen Energieaufnahme von 6 kJ durchgeführt. Die Dauer des Blitzes betrug ca. 2,5 ms. Um die durch die Erwärmung der Blitzlampen entstehende Störstrahlung im MWIR und LWIR abzuschirmen, wurden vor die Lampen Plexiglasscheiben montiert.

Für die **Lock-In Anregung** wurden zwei Halogenlampen mit einer jeweiligen maximalen Leistungsaufnahme von 500 W eingesetzt. Die für Cu Schichtdicken von 2 und 3 mm optimalen Anregungsfrequenzen liegen zwischen 9 und 4 Hz. Da die Halogenlampen aufgrund ihrer Trägheit jedoch nur bis zu einer Frequenz von 1 Hz optimal betrieben werden können, wurden die Untersuchungen bei 1 Hz durchgeführt. Für jede Messung wurden 200 Perioden aufgenommen, was einer Messzeit von 200 s entspricht.

Für die Untersuchungen an den oben beschriebenen Probekörpern wurden zwei unterschiedliche IR-Kamerasysteme miteinander verglichen: **Kamera Nr. IR1** ist mit einem 640 x 512 Elemente großen Focal Plane Array basierend auf **InSb-Infrarotdetektoren** ausgestattet, die über einen Stirling-Kühler bei 77 K betrieben werden. Die Temperatureauflösung dieser Kamera beträgt 0,02 K. Die Messungen wurden im Vollbildmodus bei 93 Hz mit einer Integrationszeit von 0,63 ms durchgeführt. Es wurde ein 100 mm Objektiv

verwendet. Das gesamte System weist eine spektrale Bandbreite von 3,7 bis 5,3  $\mu\text{m}$  auf und war nicht temperaturkalibriert.

**Kamera Nr. IR2** enthält ein ungekühltes **Mikrobolometer-Array** mit 640 x 480 Pixeln, einer spektralen Empfindlichkeit zwischen 7,5 und 14  $\mu\text{m}$ , einer Temperaturauflösung von 0,05 K und einer Bildwiederholrate von 50 Hz. Das verwendete Objektiv hatte eine Brennweite von 50 mm. Im Vergleich zu Quantendetektorsystemen haben Mikrobolometer IR-Kameras eine geringere Temporaufklärung, ein deutlich höheres thermisches Übersprechen zwischen den einzelnen Detektoren (Pixeln) und in der Regel eine geringere Bildwiederholrate. Die wesentlichen Vorteile sind jedoch die geringeren Kosten, die geringere Masse sowie die Unempfindlichkeit gegenüber Erschütterungen und Stößen.

### 3 Ergebnisse

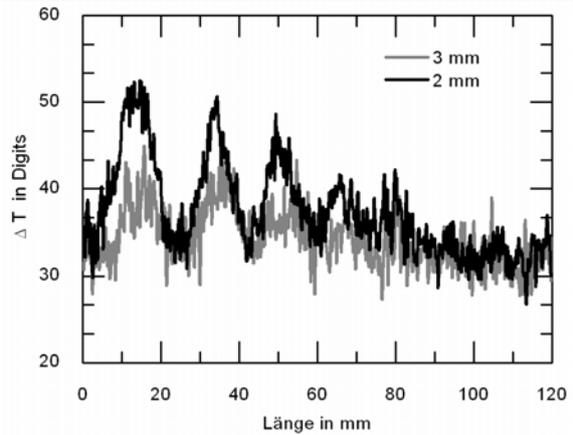
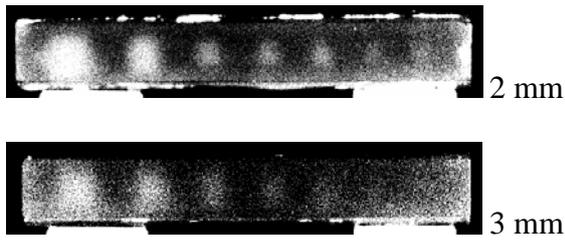
#### 3.1 Ergebnisse der Blitzanregung

Die Ergebnisse der Untersuchungen mit Blitzanregung an beiden Probekörpern zeigt Bild 2 für Kamera Nr. IR1 und Bild 3 für Kamera Nr. IR2. In den Thermogrammen auf der linken Seite der Bilder ist jeweils der maximale thermische Kontrast der Defekte unmittelbar nach dem Blitz dargestellt. In den Diagrammen auf der rechten Seite sind jeweils horizontale Linienprofile aus der Mitte der Thermogramme zu sehen. Sowohl in den Thermogrammen als auch in den Linienprofilen sind für das 2 mm dicke Cu Blech fünf bis sechs und für das 3 mm dicke Cu Blech 4 bis 5 der größeren Defekte zu erkennen. Dabei wird der thermische Kontrast mit abnehmender Defektgröße kleiner. Für den größten Defekt beträgt dieser 28 Digits für Kamera Nr. IR1 (entspricht ca. 0,4 K) und 0,4 K für Kamera Nr. IR2.

#### 3.2 Ergebnisse der Lock-In Anregung

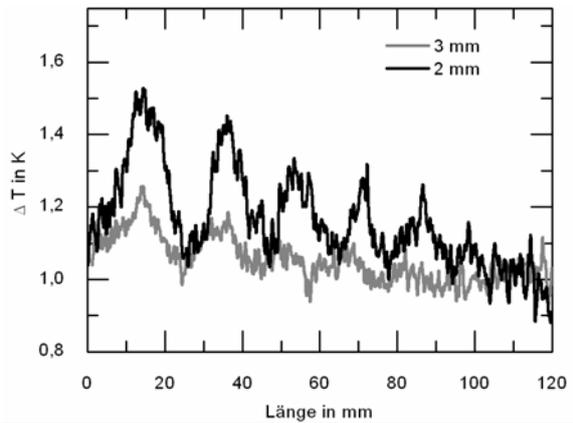
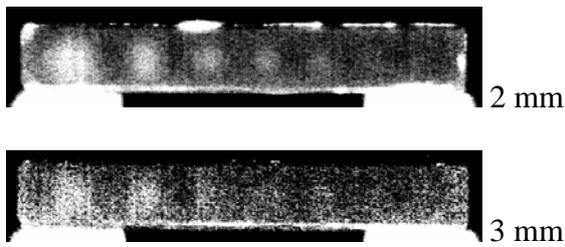
Die Ergebnisse der Lock-In Anregung für eine Frequenz von 1 Hz aufgenommen mit der Kamera Nr. IR1 und für eine Frequenz von 0,5 Hz aufgenommen mit Kamera Nr. IR2 sind in Bild 4 und 5 dargestellt. In Bild 4 links wurden die Phasenbilder mit Hilfe der on-line Korrelation direkt während der Messung gewonnen. Die Phasenbilder in Bild 5 wurden erst nach der Messdatenerfassung über eine FFT erstellt. Im Vergleich ist zu erkennen, dass mit Kamera Nr. IR1 für beide Cu Blechdicken wesentlich mehr Defekte in den Phasenbildern detektiert werden können als mit Kamera Nr. IR2.

### Blitzanregung, InSb IR-Kamera Nr. IR1



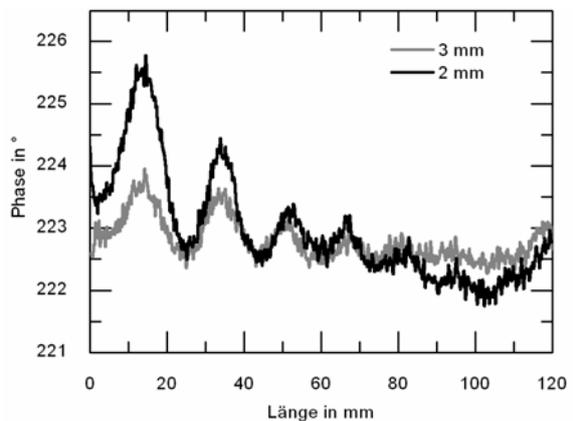
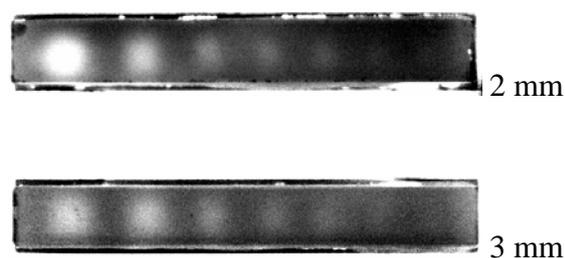
**Bild 2.** Thermogramme (links) und horizontale Linienprofile aus der Mitte der Thermogramme (rechts) zum Nachweis der Fehlstellen nach Blitzanregung, aufgenommen mit der InSb IR-Kamera Nr. IR1.

### Blitzanregung, Mikrobolometer IR-Kamera Nr. IR2

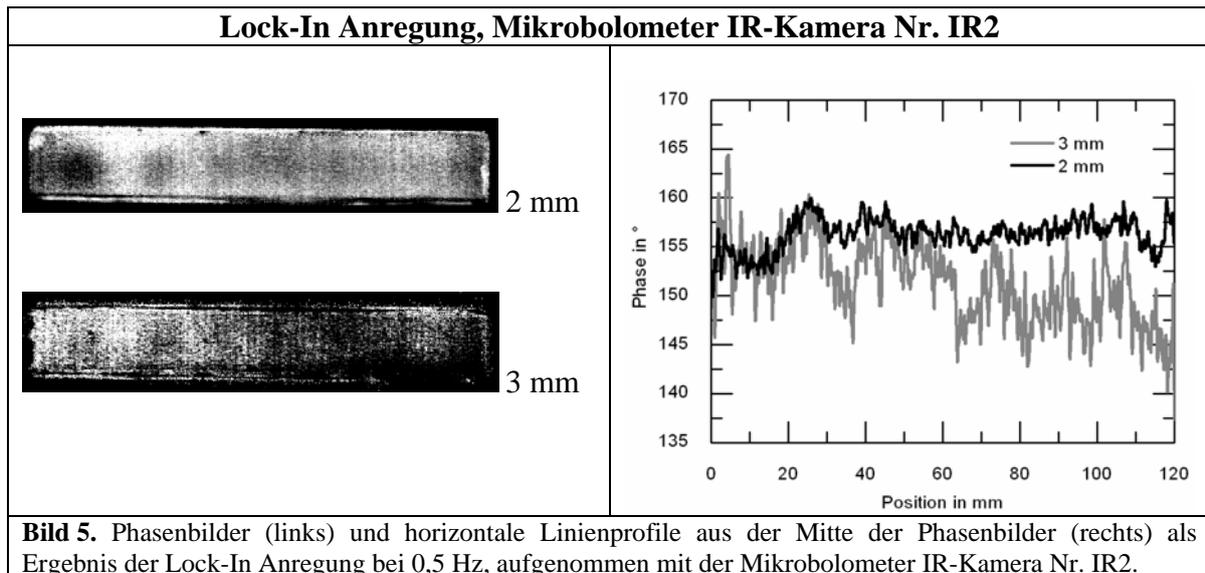


**Bild 3.** Thermogramme (links) und horizontale Linienprofile aus der Mitte der Thermogramme (rechts) zum Nachweis der Fehlstellen nach Blitzanregung, aufgenommen mit der Mikrobolometer IR-Kamera Nr. IR2.

### Lock-In Anregung, InSb IR-Kamera Nr. IR1



**Bild 4.** Phasenbilder (links) und horizontale Linienprofile aus der Mitte der Phasenbilder (rechts) als Ergebnis der Lock-In Anregung bei 1 Hz, aufgenommen mit der InSb IR-Kamera Nr. IR1.



#### 4 Diskussion

Für einen objektiven Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Anregungsarten mit beiden IR-Kameras wurden für alle nachgewiesenen Defekte die Signal-zu-Rausch Verhältnisse (SNR) ermittelt, s. Bild 6. Das SNR berechnet sich aus dem Verhältnis des mittleren maximalen Signalkontrastes  $\Delta T_{max}$  (der Intensität oder der Temperatur) und der Standardabweichung des Rauschens  $\sigma_R$ :

$$SNR = \frac{\Delta T_{max}}{\sigma_R} \quad \text{Gl. 1}$$

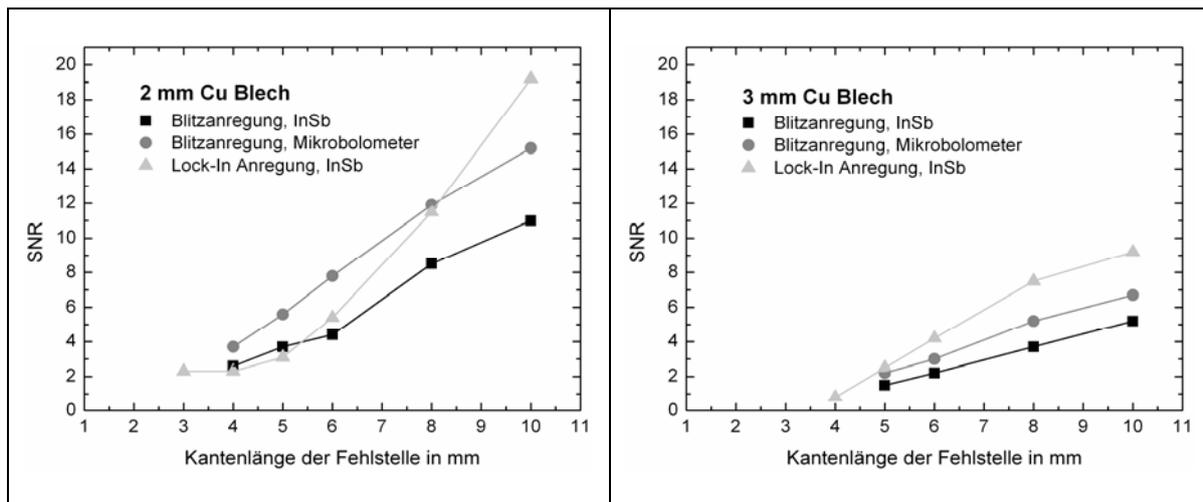
Der Kontrast  $\Delta T_{max}$  ergibt sich aus der Differenz der mittleren maximalen Temperatur des Defektes und der mittleren Temperatur eines ungestörten Referenzbereiches zur gleichen Zeit. Hierbei wurde jeweils über  $11 \times 11$  Pixel gemittelt. Für die Thermogramme der Blitzanregung kann das Rauschen  $\sigma_R$  aus der Differenz zweier aufeinanderfolgender Thermogramme A und B berechnet werden:

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{\sum_i \sum_j (\varepsilon_{ij} - \bar{\varepsilon})^2}{NM}} \quad \text{Gl. 2}$$

mit

$$\varepsilon_{ij} = |A(i, j) - B(i, j)| \quad \text{Gl. 3}$$

Dabei sind  $A(i, j)$  und  $B(i, j)$  die Werte der jeweiligen Pixel in zwei aufeinanderfolgenden Thermogrammen mit  $N \times M$  Pixeln.  $\bar{\varepsilon}$  ist der Mittelwert aller  $\varepsilon_{ij}$ . Da diese Berechnung nicht für die Phasenbilder durchgeführt werden kann, wurde hier das Rauschen aus der Differenz zweier paralleler Linien oberhalb und unterhalb der Defekte im Phasenbild berechnet.



**Bild 6.** Darstellung der SNR für das 2 mm dicke Cu Blech (links) und das 3 mm dicke Cu Blech (rechts) in Abhängigkeit von der geplanten Kantenlänge der Defekte. In jedem der Diagramme sind die Ergebnisse für die Blitzanregung mit Kamera Nr. IR1 und Nr. IR2 sowie für die Lock-In Anregung mit Kamera Nr. IR1 aufgetragen.

Aus dem Vergleich der beiden Diagramme in Bild 6 ist zu erkennen, dass das SNR der Defekte unterhalb des 2 mm dicken Cu Blechs deutlich höher ist als für das 3 mm dicke Cu Blech, in vielen Punkten fast doppelt so hoch.

Vergleicht man die SNR für beide IR-Kameras für die Blitzanregung, dann sind diese für die Kamera Nr. IR2 im Mittel etwa um den Faktor 1,4 höher. Dies erscheint zunächst etwas widersprüchlich, da die Kamera Nr. IR1 eine höhere Temporalauflösung als die Kamera Nr. IR2 hat. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Pixel der Kamera Nr. IR2 (Mikrobolometer) ein größeres thermisches Übersprechen aufweisen, was eine Glättung der thermischen Signalantwort bewirkt und so bei gleichzeitiger Reduzierung der räumlichen Auflösung zu einer Verbesserung des SNR beiträgt.

Die Lock-In Anregung mit 200 Perioden bei einer Frequenz von 1 Hz führt im Vergleich zur Blitzanregung zu einem höheren SNR, insbesondere für das 3 mm dicke Cu Blech. Dies lässt sich dadurch erklären, dass hier die Anregungsfrequenz von 1 Hz noch näher an der optimalen Frequenz für diese Tiefe liegt als für das 2 mm Cu Blech. Für diese ist zu beobachten, dass das Verhältnis des SNR von Lock-In zur Blitzanregung erst mit zunehmender Fehlstellengröße größer wird.

Weiterhin fällt auf, dass mit der Kamera Nr. IR2 bei der Lock-In Anregung die Defekte in den Phasenbildern kaum zu erkennen sind, s. Bild 5. Daher sind diese SNR Werte auch nicht in den Diagrammen in Bild 6 dargestellt. Dieses Ergebnis ist überraschend, da die Defekte mit dieser Kamera nach Blitzanregung sehr gut zu erkennen sind. Ein Grund könnte die bei diesem System nicht vorhandene Korrelation zwischen dem Anregungssignal und der Bildrate der Kamera sein. Daher wurden die Messungen mit einer ähnlichen Mikrobolometer Kamera und mit Korrelation der Signale zueinander aufgenommen. Es wurden jedoch die gleichen Messergebnisse erzielt, die fehlende Korrelation bei der Lock-In Anregung ist hier also nicht die Ursache. Eine zweite Erklärung könnte der Temperaturdrift der Mikrobolometer Kamera sein, der zwar in regelmäßigen Zeitabständen während der Messung korrigiert wurde (NUC), aber trotzdem die Messergebnisse beeinflusst. Weiterhin kann der Auslesemodus dieser Kamerasysteme (Rolling Frame) die Phasenbeziehung beeinflussen.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden Cu Lötverbindungen an Probekörpern mit Cu Blechdicken von 2 und 3 mm untersucht, die der geplanten Konsolidierung der LHC Hauptverbindungen entsprechen. Im Rahmen der Entwicklung einer effizienten Prüfstrategie für diese Lötverbindungen wurden verschiedene Anregungsverfahren der aktiven Thermografie sowie verschiedene Kamerasysteme miteinander verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass für Cu Blechdicken von 2 mm mit Blitzanregung mit anschließender Auswertung des Temperaturkontrastes eines Thermogramms direkt nach der Anregung Fehlstellen bis zu einer Kantenlänge von 4 mm nachgewiesen werden können. Diese können bereits mit einer Mikrobolometer IR-Kamera detektiert werden. Ein Vorteil der Blitzanregung sind die sehr kurzen Messzeiten, das Verfahren kann jedoch nur bei dünneren Blechen eingesetzt werden.

Mit Hilfe der Lock-In Anregung und der gekühlten InSb-Quantendetektor IR-Kamera kann das SNR deutlich verbessert werden, insbesondere für die 3 mm Blechdicke. In diesem Fall können Defekte bis zu einer Kantenlänge von 5 mm nachgewiesen werden. Nachteilig sind hier jedoch die deutlich längeren Messzeiten.

Im Vergleich mit den Ergebnissen der Ultraschalluntersuchungen in Bild 1 ist zu erkennen, dass hier die Geometrie der Fehlstellen mit deutlich höherer Ortsauflösung abgebildet werden kann. Dies kann mit aktiver Thermografie mit Lock-In Anregung durch die Verwendung höherer Anregungsfrequenzen erreicht werden. Hierzu wurden bereits Untersuchungen mit einem LED Array durchgeführt. Da zurzeit für diese Anregungsquellen aufgrund der geringen Leistungen die Messzeiten noch sehr lang sind, sind diese Systeme noch nicht praxisrelevant. Zukünftige Weiterentwicklungen werden sich jedoch mit der Optimierung von LED Anregungssystemen beschäftigen.

## Danksagung

Die Ultraschallmessungen in Tauchtechnik an den Probekörpern wurden dankenswerterweise von J.-M. Dalin (CERN EN-MME) durchgeführt.

## Referenzen

- [1] LHC Design Report Volume 1 „The LHC Main Ring“, CERN, 2004, ISBN 92-9083-224-0, <http://lhc.web.cern.ch/lhc/LHC-DesignReport.html> (2011-02-16)
- [2] Bertinelli F, Catalan Lasheras N, Fessia P, Garion C, Mathot S, Perin A, Scheuerlein C et al. Towards a Consolidation of LHC Superconducting Splices for 7 TeV Operation. In: Proc. of 1st Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'10), Kjoto, Japan, 2010, <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC10/papers/mopeb042.pdf> (2011-02-16)
- [3] Avdelidis NP, Almond DP, Dobbinson A, Hawtin BC, Ibarra-Castaneda C, Maldague X. Aircraft composites assessment by means of transient thermal NDT. Progress in Aerospace Sciences 2004;40(3):143-62.
- [4] Cernuschi F, Marinetti S. Discrimination between over-thickness and delaminations of thermal barrier coatings by apparent thermal effusivity thermographic technique. J. of Thermal Spray Technology 2010; 19(5):958-63.
- [5] Berglind H, Dillenz A. Detecting glue deficiency in laminated wood - a thermography method comparison. NDT & E Int. 2003;36(6):395-9.
- [6] Maierhofer C, Arndt R, Röllig M, Rieck C, Walther A, Scheel H, Hillemeier B. Application of impulse thermography for non destructive assessment of concrete structures. Cement and Concrete Composites 2006;28(4):393-401.
- [7] Krankenhagen R, Kervalishvili GN, Maierhofer C. Influence of air-gaps on the thermal behaviour of the plaster-concrete bond. In: Proc. of 10th Int. Conf. on Quantitative Infrared Thermography, 2010, <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2010/papers/QIRT%202010-067.pdf> (2011-02-16)

- [8] Ben Larbi W, Ibarra-Castanedo C, Klein M, Bendada A, Maldague X. Experimental Comparison of Lock-in and Pulsed Thermography for the Nondestructive Evaluation of Aerospace Materials. In: Proc. 6th Int. Workshop, Advances in Signal Processing for NDE of Materials, London, Ontario, Canada, 2009, Paper 15, <http://www.ndt.net/article/aspnde2009/papers/15.pdf> (2011-02-16)
- [9] Pickering S, Almond D. Matched excitation energy comparison of the pulse and lock-in thermography NDE techniques. *NDT & E Int.* 2008;41(7):501-9.
- [10] Wu D, Busse G. Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials. *Revue Generale de Thermique* 1998;37(8):693-703.
- [11] Maldague X, Galmiche F, Ziadi A. Advances in pulsed phase thermography. *Infrared Physics & Technology* 2002;43(3-5):175-81.