

Real-View-Induktionsthermografie

Lukas BIENKOWSKI, Matthias GOLDAMMER, Christian HOMMA,
Max ROTHENFUSSER
Siemens AG, Corporate Technology, 81739 München, Deutschland

Kurzfassung. Die Real-View-Technik wird als eine innovative Ergänzung der Induktionsthermografie bei der zerstörungsfreien Prüfung eingesetzt. Die Real-View-Vorrichtung besteht dabei aus einer IR-Kamera und einer Projektionseinheit, mit der Messergebnisse direkt auf den Prüfling projiziert werden.

Bei der Induktionsthermografie wird das Prüfteil nur in der Nähe des Induktors erwärmt, so dass jeweils nur ein Ausschnitt untersucht werden kann. Soll ein größerer Bereich oder der ganze Prüfling untersucht werden, muss der Induktor mehrmals verschoben und die Messung wiederholt werden. Dabei kommt es darauf an, den Induktor so zu positionieren, dass sich die Bereiche der Induktion überlappen, um keine Defekte zu übersehen. Es ist zu berücksichtigen, dass die Prüfung umso länger dauert, je kleiner die Verschiebungen des Induktors sind.

Dies kann mithilfe des Real-View-Verfahrens optimiert werden: Nach jeder Messung wird der Bereich bestimmt, in dem der Induktionseffekt ausreichend stark für eine sichere Defektdetektion war. Diese Bereiche werden übereinandergelegt und ergeben ein Maß für die Prüfbedeckung, die nach jeder Messung auf den Prüfling projiziert wird. Dadurch, dass der Prüfer ein Feedback bekommt, welche Bereiche des Prüflings bereits untersucht worden sind, wird gewährleistet, dass der gesamte Prüfbereich abgedeckt ist.

Sobald die gewünschte Abdeckung erreicht wurde, kann das komplette Ergebnisbild, das aus den Ergebnisbildern der einzelnen Messungen erstellt wird, wahlweise am Rechner oder direkt auf dem Prüfling ausgewertet werden.

Der Prüfer markiert auf dem Ergebnisbild die erkannten Defekte, die auch auf den Prüfling projiziert werden. Dadurch können False-calls, die z. B. aufgrund von Unregelmäßigkeiten in der Prüfteiloberfläche entstehen können, erkannt und ausgeblendet werden.

Einführung in die Real-View-Induktionsthermografie

Dieses Paper baut auf unseren früheren Veröffentlichungen [1] und [2] auf, in denen wir die Real-View-Technik als Ergänzung zu der klassischen akustischen Thermografie [3-5] sowie Induktionsthermografie vorgestellt hatten. Insbesondere bei der Induktionsthermografie entfaltet die RV-Technik ihr volles Potenzial hinsichtlich der Reduzierung des Einflusses des sogenannten menschlichen Aspektes auf die Messzuverlässigkeit sowie der Anzahl der Scheinanzeigen (engl. false calls).

Der menschliche Aspekt ist allgemein als der Einfluss des menschlichen Prüfers auf das Ergebnis der Untersuchung zu verstehen. Da jedoch danach gestrebt wird, unabhängig von dem Prüfer Messergebnisse mit gleicher Prüfqualität zu erzielen, sollte ein Prüfverfahren so optimiert sein, dass dieser menschliche Aspekt möglichst gering ist.



Bei der Induktionsthermografie zählen vor allem zwei Punkte zu dem genannten Aspekt: die Gewährleistung der vollständigen Messabdeckung und die korrekte Auswertung der Ergebnisbilder.

Als Messabdeckung bezeichnet man den Bereich, in dem der Induktionseffekt ausreichend stark ist, um eine Erwärmung zu generieren, die über dem Rauschniveau der IR-Kamera liegt. Dieser Bereich befindet sich jedoch nur in der Nähe des Induktors. Soll ein größerer Bereich oder der ganze Prüfling untersucht werden, muss der Induktor mehrmals verschoben und die Messung wiederholt werden. Dabei kommt es darauf an, den Induktor so zu positionieren, dass sich die Bereiche der Induktion überlappen, um keine Defekte zu übersehen. Die Positionierung wird von dem Prüfer durchgeführt, er muss gewährleisten, dass die gewünschte Messabdeckung gegeben ist.

Die Messung wird bei der Induktionsthermografie üblicherweise mit einer Puls-Phasen-Analyse ausgewertet [6]. Das Ergebnis, in der Regel ein Phasenbild, liegt praktisch unmittelbar nach der Messung vor. Besteht eine Messreihe aus mehreren Messungen (erweiterte Messabdeckung), stehen auch mehrere Ergebnisbilder zur Verfügung, die einzeln ausgewertet werden müssen. So wie vorher erwähnt, ist nur in einem kleinen Bereich in der Nähe des Induktors das Signal-Rausch-Verhältnis groß genug für eine sichere Defektdetektion. Das hat wiederum zur Folge, dass ein Großteil des Ergebnisbildes nur aus Rauschen besteht und dadurch schwierig oder gar nicht auszuwerten ist (Abb. 1). Diese Tatsache kann insbesondere bei größeren Messreihen durch nachlassende Konzentration des Prüfers zu Fehlern führen.

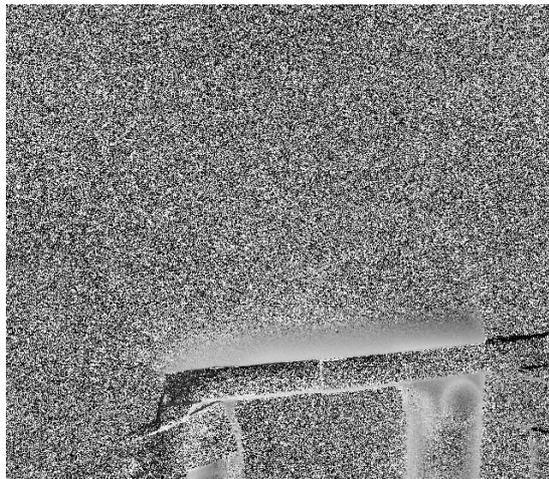


Abb. 1. Phasenbild einer induktionsthermografischen Messung. Der Induktionseffekt erfolgt nur in der Nähe des Induktors, wodurch der größte Teil des Bildes aus Rauschen besteht.

Des Weiteren verursachen Verunreinigungen der Prüflingsoberfläche z. B. durch Staubpartikeln oder organische Verschmutzungen häufig Anzeigen, die von echten Defekten sehr schwer zu unterscheiden sind. Diese sogenannten Scheinanzeigen können durch den Prüfer falsch klassifiziert werden, so dass Prüfteile fälschlicherweise von weiterer Nutzung ausgeschlossen werden. Da dieses Vorgehen zu enormen Kosten führen kann, muss die Scheinanzeigenrate möglichst klein gehalten werden. Bezogen auf die Induktionsthermografie ist dies mit einem großen Aufwand verbunden, da jeder auf dem Ergebnisbild erkannte Defekt visuell mit dem lokal zugehörigen Oberflächenzustand auf dem Prüfobjekt verglichen werden muss, um die genannten Scheinanzeigen ausschließen zu können. Mit Hilfe der Real-View-Technik können auch diese negativen Aspekte signifikant verbessert werden.

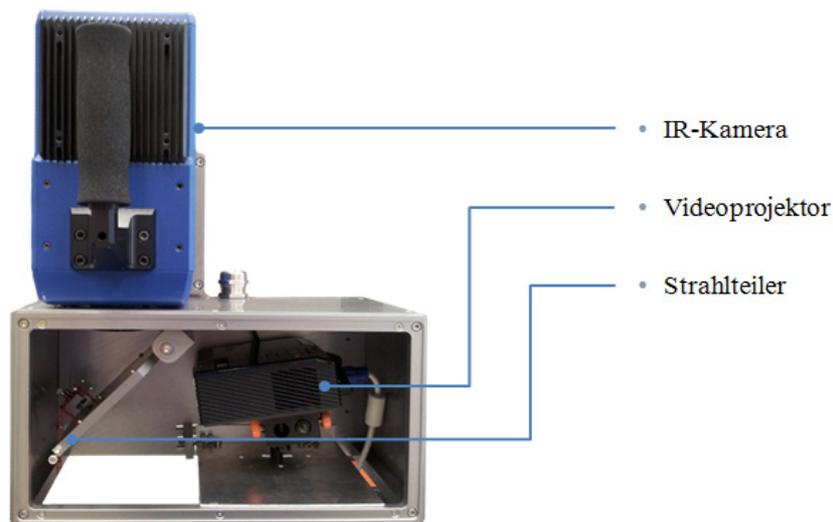


Abb. 2. Aufbau der RVT-Einheit, die aus einer IR-Kamera, einem Videoprojektor und einem Strahlteiler besteht.

1. RVT-Einheit

Die Real-View-Thermografie-Einheit (Abb. 2) ermöglicht eine Infrarotaufnahme eines Objektes sowie unabhängig davon eine Projektion im sichtbaren Lichtspektrum auf dieses. Sie besteht aus einer IR-Kamera, einem Beamer und einem Strahlteiler, der dafür sorgt, dass die optischen Achsen der beiden Geräte sich überlagern. Dadurch ist eine perfekte Überlagerung der Projektion mit dem Prüfling ohne eine geometrische Anpassung möglich. Der Strahlteiler dient im sichtbaren Lichtspektrum als ein Spiegel, wogegen er im für die IR-Kamera relevanten Infrarotspektrum (ca. 3–5 μm) über 60% der Strahlung transmittiert.

Beide Geräte sind an einen Laptop angeschlossen und werden über die im Hause Siemens entwickelte Thermografiesoftware SInE² angesteuert, was eine absolute Einsatzflexibilität der RVT-Einheit hinsichtlich anderer thermografischen Prüfverfahren, wie der akustischen Thermografie, gewährleistet.

2. Der menschliche Aspekt

2.1 Messabdeckung

Eine induktionsthermografische Untersuchung besteht in der Regel aufgrund der geringen Reichweite des Induktionseffektes aus mehr als einer Messung, so dass bei einer manuellen Prüfung die Messabdeckung nicht genau bekannt ist. Daher kann ein relevanter Teil auf dem Prüfling leicht übersehen werden, was im ungünstigsten Fall zu einem Übersehen sicherheitskritischer Defekte führen kann. Dies kann durch Einsatz der RV-Technik verhindert werden. Dabei wird die Messabdeckung unter Berücksichtigung aller bisher durchgeführten Messungen direkt auf den Prüfling dynamisch nach jeder Messung projiziert. Somit sieht der Prüfer direkt auf dem Bauteil und zu jeder Zeit, ob die gewünschte Abdeckung erreicht wurde oder ggf. weitere Messungen notwendig sind.

2.1.1 Ablauf der Messung mit Projektion der Messabdeckung

Die Messung beginnt mit der Positionierung des Induktors auf dem Prüfling in dem zu untersuchenden Bereich. Anschließend erfolgt eine Messung und der Bereich ausreichender Defektdetektierbarkeit (Messabdeckung) wird basierend auf den aufgenommenen Daten wie im nächsten Abschnitt beschrieben bestimmt. Im letzten Schritt wird dieser auf den Prüfling projiziert. In Abb. 3 ist die Messabdeckung in weißer Farbe dargestellt.

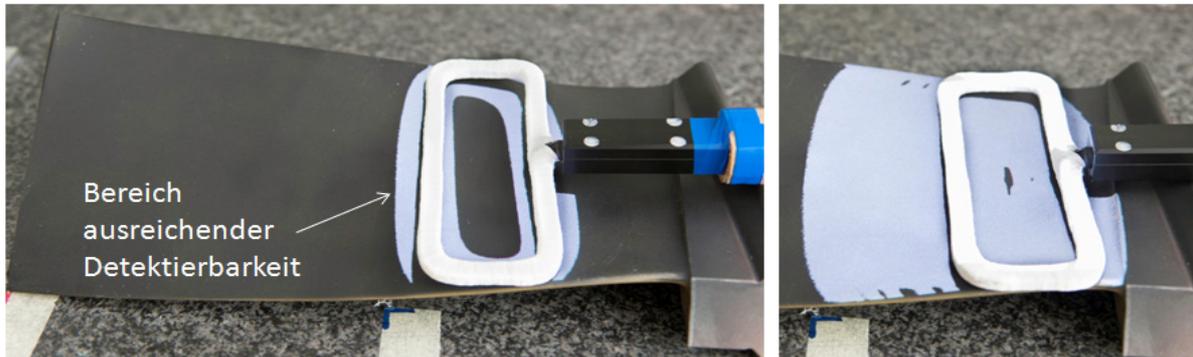


Abb. 3. Projektion der Messabdeckung, also des Bereichs ausreichender Detektierbarkeit, auf einen Prüfling nach einer Messung (links) und zehn Messungen (rechts).

Der Prüfer orientiert sich an der Projektion der Messabdeckung und bewegt den Induktor so, dass ein weiterer Bereich der fehlenden Abdeckung erfasst wird. Dann wird die Messabdeckung der neuen Messung bestimmt, zu der aus der vorherigen Messung addiert und anschließend projiziert.

Nach zehn Messungen (Abb. 3 rechts) ist ein großer Teil des Prüflings abgedeckt, was durch die Projektion der Messabdeckung bestätigt ist. Der Prüfer kann sicher sein, dass kein Bereich zwischen einzelnen Messungen, z. B. durch zu weites Verschieben des Induktors verursacht, verpasst wurde. Es wird so weiter vorgegangen bis die gewünschte Messabdeckung erreicht wurde.

2.1.2 Bestimmung der Messabdeckung

Der Bestimmung der Messabdeckung liegt die bekannte Puls-Phasen-Analyse [6] zugrunde. Da diese aus der Literatur allgemein bekannt ist, beschränkt sich die folgende Erklärung auf das Wesentliche.

Bei der Puls-Phasen-Analyse wird das aufgenommene thermische Signal $f(t)$ vom Zeit- in den Frequenzraum transformiert. Dies kann mit folgenden Formeln ausgedrückt werden: $s(f) = \int f(t)\sin(2\pi ft)dt$ und $c(f) = \int f(t)\cos(2\pi ft)dt$. Abschließend können die Phase $\varphi(f) = \arctan\left(\frac{s(f)}{c(f)}\right)$ und die Amplitude $A(f) = \sqrt{s(f)^2 + c(f)^2}$ des Signals berechnet werden.

Eine thermografische Aufnahme besteht aus einer diskreten Folge aus N Bildern und jedes Bild wiederum beinhaltet ein Pixelarray als Funktion von x und y . Dementsprechend ergibt sich für ein diskretes Signal $F(x, y)$ die folgende Formel:

$$s(x, y) = \sum_{n=0}^{N-1} F(x, y)\sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \text{ und } c(x, y) = \sum_{n=0}^{N-1} F(x, y)\cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right).$$

Darauf basierend können das Phasenbild $\varphi(x, y) = \arctan\left(\frac{s(x, y)}{c(x, y)}\right)$ und das Amplitudenbild $A(x, y) = \sqrt{s(x, y)^2 + c(x, y)^2}$ berechnet werden, die wie bereits erwähnt auch als Ergebnisbilder bezeichnet werden.

Der Algorithmus zur Bestimmung der Messabdeckung besteht aus zwei Teilen (siehe Abb. 4): einer Rauschanalyse und einer Bestimmung des rauscharmen Bereichs. Die Rauschanalyse erfolgt einmalig vor der ersten Messung. Dabei wird eine thermografische Aufnahme aus N Bildern ohne induktive Anregung durchgeführt. Da es ohne Anregung zu keiner Erwärmung des Prüflings kommt, beinhaltet diese Aufnahme ausschließlich nur Rauschen. Im nächsten Schritt werden wie bei der Puls-Phasen-Analyse die Summen $s(x,y)$ und $c(x,y)$ berechnet. In Abb. 3 rechts sind die Histogramme beider Summen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass diese in guter Näherung einer Normalverteilung gehorchen. Davon ausgehend lassen sich für beide Summen die Erwartungswerte $\mu_{s(x,y)}, \mu_{c(x,y)}$ und Standardabweichungen $\sigma_{s(x,y)}, \sigma_{c(x,y)}$ bestimmen. Diese Parameter werden für die Bestimmung des rauscharmen Bereichs im zweiten Teil des Algorithmus herangezogen.

Der zweite Teil des Algorithmus wird nach jeder neuen Messung m durchgeführt. In diesem Schritt wird jedes Pixel des Ergebnisbildes (Phase- und Amplitude) entweder dem Rauschen oder dem Signal zugeordnet. Die Messdaten der Messung m sind mit $F_m(x,y)$ bezeichnet. Es werden wieder die Summen $s_m(x,y)$ und $c_m(x,y)$ berechnet und mit den aus der Rauschanalyse gewonnenen Parametern verglichen werden. Ein Pixel $i_m(x,y)$ wird als Rauschen klassifiziert, wenn die Bedingung $B1_m(x,y)$:

$$\begin{aligned} \mu_{s(x,y)} - 2\sigma_{s(x,y)} \leq s_m(x,y) \leq \mu_{s(x,y)} + 2\sigma_{s(x,y)} \\ \wedge \\ \mu_{c(x,y)} - 2\sigma_{c(x,y)} \leq c_m(x,y) \leq \mu_{c(x,y)} + 2\sigma_{c(x,y)} \end{aligned}$$

erfüllt ist, oder als Signal falls diese nicht gegeben ist.

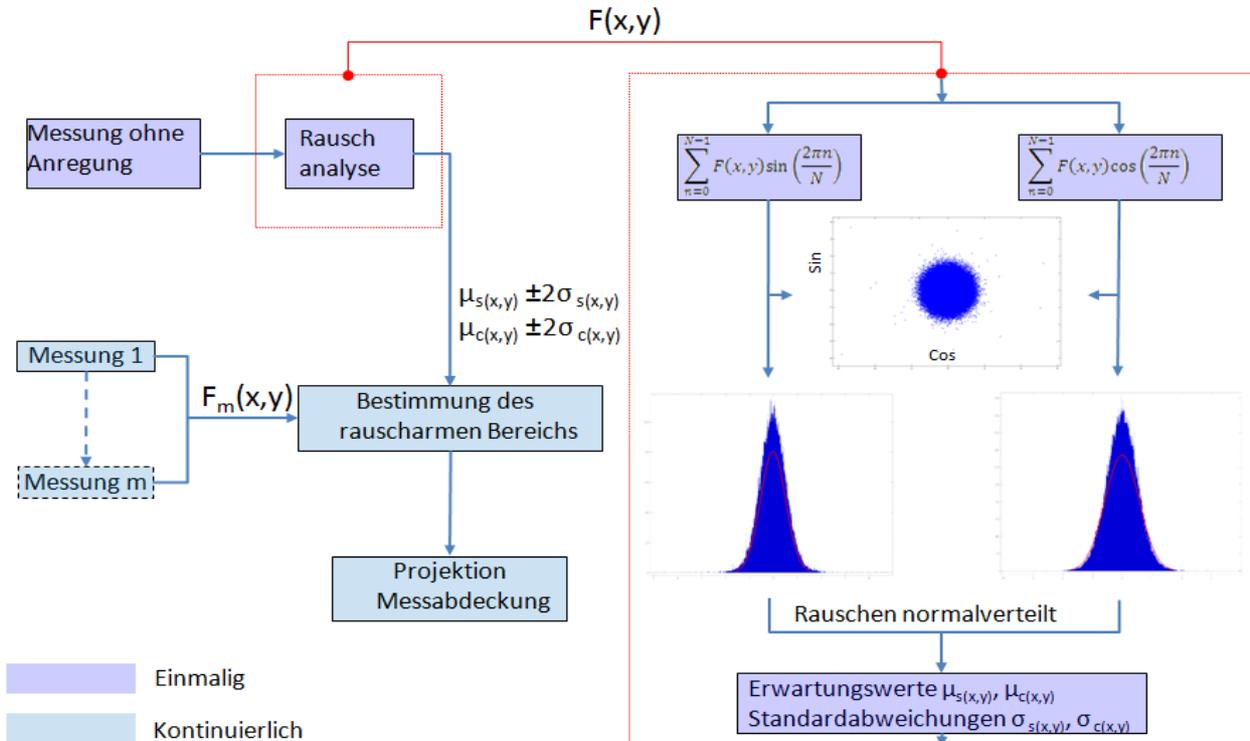


Abb. 4. Schematische Darstellung des Algorithmus zu der Bestimmung der Messabdeckung.

2.1.3 Projektion der Messabdeckung

Da jedes Pixel des Ergebnisbildes nun klassifiziert ist, kann eine Maske $P(x,y)$ erstellt werden: $P(x,y) = \begin{cases} 1 \Leftrightarrow B1_m(x,y) = 0 \\ 0 \Leftrightarrow B1_m(x,y) = 1 \end{cases}$. Diese entspricht der Messabdeckung, also dem Bereich der ausreichenden Detektierbarkeit. Nach jeder Messung wird die Maske um neue Daten ergänzt und in Form eines binären Bildes (weiß, wenn $P(x,y) = 1$ und schwarz, wenn $P(x,y) = 0$) auf den Prüfling projiziert (Abb. 3). Die wichtigste Voraussetzung ist, dass das Bauteil zwischen den Messungen nicht bewegt werden darf, um die Gültigkeit der Projektion der Messabdeckung zu gewährleisten.

3. Evaluierung der Messergebnisse

Bei der RV-Induktionsthermografie, im Gegensatz zu der konventionellen Variante, soll der Prüfer ein einziges Ergebnisbild pro Kameraansicht auswerten. Dadurch kann der Prüfer im ersten Schritt seine Konzentration auf die Durchführung der Messungen richten. Darüber hinaus kann dank der Projektion der Messabdeckung eine vollständige Abdeckung erreicht werden, ohne auf den Computerbildschirm zu schauen. Erst danach geht der Prüfer über zur Auswertung der Ergebnisse auf das Computerdisplay.

3.1 Zusammenfassung der thermografischen Ergebnisbilder

Für eine Zusammenfassung der einzelnen Ergebnisbilder zu einem finalen Ergebnisbild wurde ein geeigneter Algorithmus auf Basis der einzelnen Phasen- und Amplitudenbilder entwickelt. Durch den Einsatz dieses Algorithmus lassen sich beliebig viele Messungen zu einem Ergebnisbild kombinieren, solange der Prüfling gegenüber der Kamera nicht bewegt wurde. Ein Beispiel ist in Abb. 5 zu sehen. Das dargestellte Phasenbild besteht aus zehn nacheinander durchgeführten Messungen mit Berücksichtigung der projizierten Messabdeckung. Bei manchen Materialien kommt es aber dabei zur Entstehung störender Artefakte, die links in Abb. 5 deutlich zu sehen sind. Um diese zu beseitigen, wurde in dem Algorithmus ein Filter implementiert, der diese Artefakte beseitigt. Als Resultat wird ein homogenes Ergebnisbild erreicht, das die Informationen aus allen Messungen enthält (Abb. 5 rechts).

In Abb. 5 wurden mit roten Pfeilen die durch die induktionsthermografische Untersuchung sichtbaren Defekte markiert. Es ist eindeutig erkennbar, dass diese auf dem rechten durch den Filter entstörten Ergebnisbild besser erkennbar sind.

Dieses Vorgehen verschafft dem Prüfer einen deutlich besseren Überblick über das ganze Bauteil, da der vermessene Bereich, im Vergleich zu einem Phasenbild einer einzelnen Messung, wesentlich kleiner ist. Die Auswertung kann somit schneller und einfacher erfolgen.

4. Scheinanzeigenanalyse

Nachdem der Prüfer alle auf dem zusammengefassten Phasenbild erkannten Anzeigen markiert hat, kann zum letzten Teil der Untersuchung, der Scheinanzeigenanalyse, übergegangen werden. Alle markierten Stellen werden direkt auf den Prüfling projiziert, sodass ein einfacher Abgleich mit dem Prüfling ohne Einsatz des Computerbildschirmes erfolgen kann (Abb. 6 rechts oben). Der Prüfer kontrolliert die durch die Projektion gekennzeichneten Stellen nach Verunreinigungen oder Beschädigung einer Beschichtung,

die im Phasenbild ähnliche Form wie Defekte aufweisen und dadurch schwer zu identifizieren sind.

Sollte eine Scheinanzeige erkannt werden (wie in der Abb. 6 unten), kann die Markierung nachträglich durch den Prüfer entfernt werden.

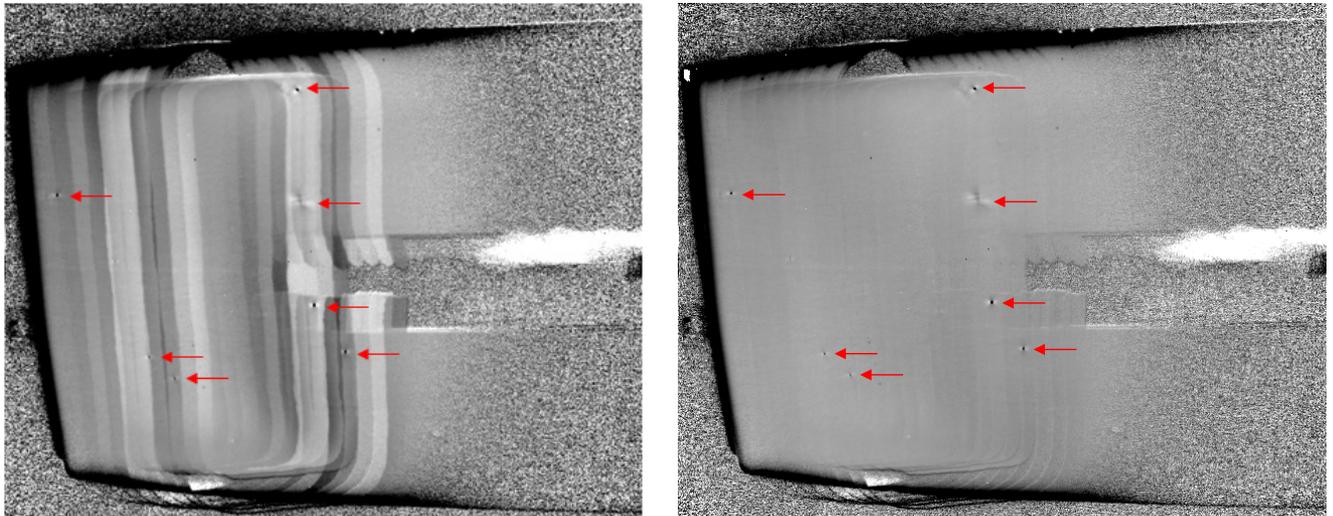


Abb. 5. Das aus zehn Messungen zusammengefasste Phasenbild eines Prüflinges ohne (links) und mit (rechts) einem Filter. Die roten Pfeile markieren die durch die induktionsthermografische Untersuchung sichtbaren Anzeigen, die auf dem rechten Bild durch die Filterung wesentlich besser sichtbar sind.

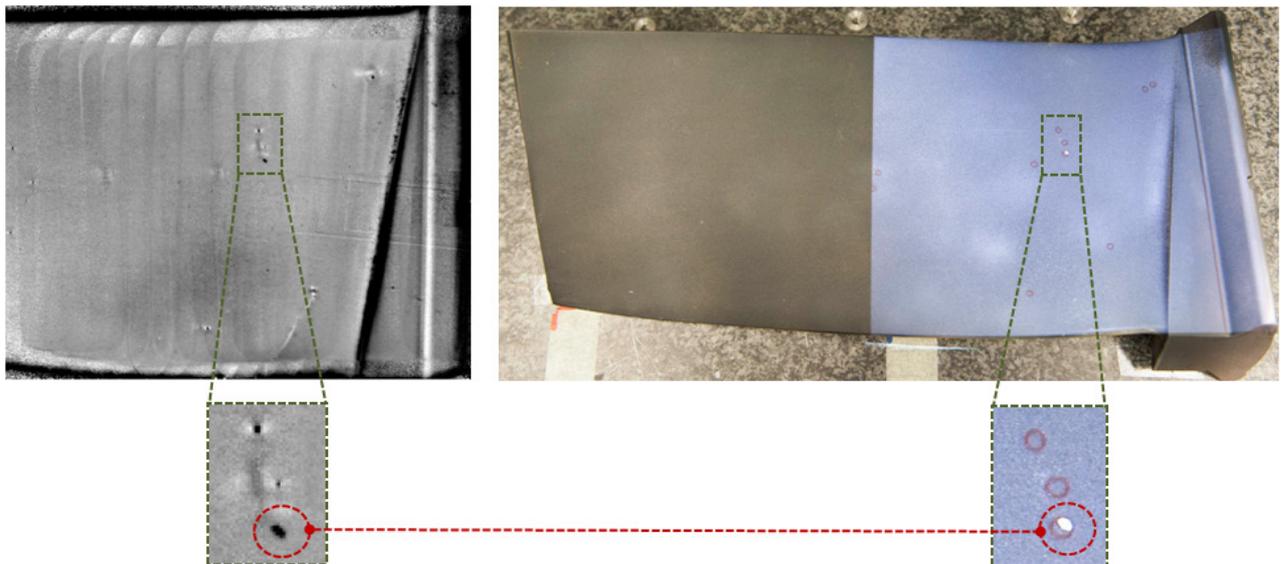


Abb. 6. Ein zusammengefasstes Phasenbild eines Prüflinges (links oben) und eine Projektion der durch den Prüfer markierten Stellen (rechts oben). Eine Anzeige im Phasenbild (links unten gestrichelt) ist erst durch den Vergleich mit dem Bauteil sicher als Verunreinigung und damit als Scheinanzeige zu identifizieren (rechts unten).

Zusammenfassung

Die Real-View-Induktionsthermografie bringt die konventionelle Induktionsthermografie einen Schritt weiter, indem der Einfluss der von dem Prüfer abhängigen Faktoren sowie der Scheinanzeigen auf die Zuverlässigkeit der Untersuchung minimiert wird.

Eine unzureichende Messabdeckung wirkt sich sehr negativ auf die Detektierbarkeit aus, da einige Defekte dadurch übersehen werden können. Um dies zu verhindern, wird aus

der thermografischen Aufnahme durch eine Rauschanalyse der Bereich bestimmt, in dem die Detektierbarkeit gewährleistet ist. Diese Information wird aufbereitet auf den Prüfling projiziert und gibt dem Prüfer stets die Kontrolle über der Messabdeckung. Ein versehentliches Verpassen eines Prüfbereichs ist somit ausgeschlossen.

Darüber hinaus werden im Gegensatz zu der konventionellen Prüfung alle Ergebnisbilder innerhalb einer Kameransicht zu einem Ergebnisbild kombiniert. Durch diese Maßnahme wird der verrauschte Bereich minimiert, was dem Prüfer mehr Übersicht verschafft und die Auswertung der Ergebnisse vereinfacht.

Zuletzt erlaubt die RV-Technik eine effiziente Scheinanzeigenanalyse. Hierbei wird durch Projektion der ursprünglich bei der Auswertung auf dem Computerbildschirm markierten Stellen nun die Analyse direkt auf dem Prüfobjekt durchgeführt. Dadurch lassen sich Verunreinigungen der Oberfläche sowie Beschädigung einer Beschichtung, die im Ergebnisbild den Defekten ähnlich erscheinen, eindeutig erkennen.

Referenzen

- [1] L. Bienkowski, C. Homma, K. Eisler, C. Boller, "Hybrid Camera and Real-View Thermography for Nondestructive Evaluation", *Quantitativ InfraRed Thermography* (2012), 254
- [2] L. Bienkowski, C. Homma, "Real View Thermography", *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation* 32 (2012), pp. 587-594
- [3] C. Homma, "Investigation of the Mechanism and Technical Implementation of Acoustic Thermography", Dissertation, University of Saarbrücken, 2007
- [4] M. Rothenfusser, C. Homma, "Acoustic Thermography: Vibrational Modes of Cracks and the Mechanisms of Heat Generation", *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation* 24 (2005), pp. 624–631
- [5] C. Homma, M. Rothenfusser, J. Baumann, R. E. Shannon, "Study of Heat Generation Mechanisms in Acoustic Thermography", *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation* 25 (2006), pp. 566–573
- [6] Maldague, X. P. V.: *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. John Wiley & Sons, Inc., 2001