

Flying-spot Lock-in Thermographie

Udo NETZELMANN

Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP

Campus E3 1, 66123 Saarbrücken

udo.netzelmann@izfp.fraunhofer.de

Kurzfassung. Mit einem per xy-Scanner bewegten Laserstrahl wurde eine Prüfbahn auf der Oberfläche des Prüfobjekts periodisch abgefahren. Die thermische Antwort wurde mit einer Infrarotkamera aufgezeichnet. Mit Hilfe eines Lock-in Thermographie Algorithmus wurden Amplituden- und Phasenbilder entlang der Prüfbahn erzeugt. Das Phasenbild muss auf Grund von Artefakten durch die Bewegung korrigiert werden. Als eine erste Anwendung wird die berührungsfreie Bestimmung von Blechdicken an den Kanten von Umformteilen aus Stahl gezeigt. Blechdicken um 0,75 mm wurden bei einer Modulationsfrequenz von 1,56 Hz geprüft. Die Blechdicken wurden mit Hilfe eines analytischen Modells der thermischen Transmission auf Phasenkontraste kalibriert, so dass aus dem Phasenbild ein Plot der Dickenverteilung an den Kanten entstand.

Einführung

Aktive thermographische Techniken, bei denen ein Laserstrahl mit fester Bahngeschwindigkeit über eine Prüfobjektoberfläche bewegt wird ("Flying-spot Technik"), sind attraktiv, da man auch senkrechte Oberflächenrisse erkennen kann, die bei flächiger Anregung verborgen blieben. Ein anderer Vorteil liegt darin, die verfügbare Anregungsleistung auf die Regionen eines Prüfobjekts zu konzentrieren, wo wirklich eine Prüfung nötig ist. Das kann z. B. entlang von Schweißnähten sein, an Bereichen, wo die Materialdicke kritisch ist oder allgemein an bekannt fehleranfälligen Bauteilbereichen.

Die Prüfaufgabe des Nachweises senkrecht stehender Oberflächenrisse wurde in Arbeiten zur Flying-spot Thermographie eingehend betrachtet [1-6]. Eine Schwierigkeit bei dieser Technik liegt darin, dass dem Strahlungssignal multiplikative Störeinflüsse überlagert sein können. Dabei kann es sich um Emissivitätskontraste von Verschmutzungen, Korrosion oder Kratzern handeln. Andere Störungen dieser Art kommen durch örtlich veränderte Leistungsdichte der Anregungslaserstrahlung an gekrümmten Oberflächen zustande. In Vergangenheit wurden Ansätze beschrieben, einige dieser Störungen zu erkennen und zu unterdrücken [7-8]. Sie basierten auf einer einfachen Zeitanalyse der Kontraste. Während früher Infrarot-Einzeldektoren konzentrisch oder in einem gewissen Abstand zur bewegten Anregungsquelle eingesetzt wurden, dominiert heute der abbildende Nachweis mit Infrarotkameras. Durch Gradientenberechnung und spezielle Verarbeitung der Bildsequenzen wurde eine Verbesserung der Bildkontraste erreicht [9].

Die Anstrengungen, Emissivitätsstörungen zu unterdrücken, rühren auch daher, dass z. B. beim Nachweis von Oberflächenrisse über den thermischen Kontrast (Auswirkung des Wärmestaus an der Rissflanke) die Risskontraste meist klein gegenüber dem Kontrast auf fehlerfreiem Material sind. Dies gilt teilweise auch für den Kontrast ausgehend von den

Wärmestromkomponenten senkrecht zur Oberfläche, wenn Dickenschwankungen oder Bindefehler detektiert werden müssen.

Bei der flächigen Anregung haben sich Lock-in Technik und Puls-Phase Auswertungen vielfach bewährt. Bei der punktförmigen Anregung werden intensitätsmodulierte Laserstrahlen und Lock-in Technik in Wärmewellenmikroskopen [10] oder in photothermischen Schichtdickenmessgeräten eingesetzt [11]. Es entstehen Phasensignale und Phasenbilder mit der gewünschten Störunterdrückung. Auch wenn der Laser die Oberfläche sprunghaft oder kontinuierlich langsam abrastert, interpretiert man die Signale wie bei einer statischen Messung. Fehler, die durch die relative Bewegung zwischen Heizquelle und Prüfobjekt entstehen, werden als Störung behandelt [12-15].

Messprinzip

In dem hier vorgestellten Ansatz wird die Flying-spot Anregung bei höherer Bahngeschwindigkeit mit der Lock-in Technik auf neue Weise kombiniert, um zu besserer Störunterdrückung zu gelangen. Es wird ausgenutzt, dass mit Hilfe von Galvanoscannertechnik, F-Theta Optiken und grafikbasierter Steuersoftware nahezu beliebige Bewegungen des Laserspots auf der Prüfobjektoberfläche mit in weiten Grenzen kontrollierbarer Bahngeschwindigkeit bequem programmiert und synchronisiert mit der Kamerabilderfassung ausgeführt werden können.

Zur Erläuterung sei angenommen, dass ein Laserstrahl mit Strahldurchmesser r_B sich auf einer der Einfachheit halber kreisförmigen Bahn mit Radius R mit der Bahngeschwindigkeit v bewegt (Abb. 1). Weist der Laser ein Gaußsches Intensitätsprofil

$$P = P_0 e^{-\left(\frac{\Delta r}{2r_B}\right)^2} \quad (1)$$

auf und gilt $r_B \ll R$, so erfährt ein fester Punkt auf der Laserbahn wie in Abb. 2 dargestellt zeitlich periodische Heizpulse. Diese weisen eine zeitliche Breite von $2r_B/v$ bezogen auf einen Anteil von $e^{-0.5}$ oder etwa 61% der Maximalintensität auf und wiederholen sich mit einer Periodendauer T , entsprechend einer Modulationsfrequenz f_M , wobei

$$T = \frac{2\pi R}{v} \quad f_M = \frac{v}{2\pi R} \quad (2)$$

Der Laserstrahl wird die Bahn nun mehrmals durchlaufen, für eine angemessene Anwendung der Lock-in Technik sollten es mindestens $n=10$ Durchläufe sein.

Mit einer Infrarotkamera wird das Strahlungsbild entlang der Prüfbahn nun über alle Durchläufe aufgezeichnet. Es muss mit einer Kamera mit snapshot-Detektor und ausreichend hoher Bildrate f_K aufgezeichnet werden, so dass die gesamte Bahn mit den Bildern möglichst lückenlos abgedeckt wird. Daraus resultiert ein Kriterium für die Bildrate der Kamera:

$$f_K \geq \frac{v}{r_B} \quad (3)$$

Bei größeren Fehlertiefen oder Materialdicken reicht jedoch auch eine geringere Bildrate aus.

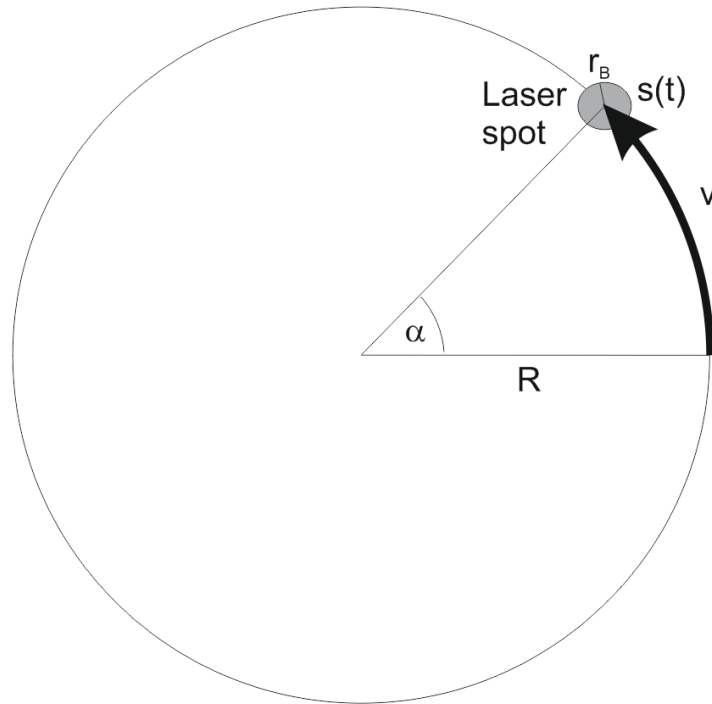


Abb. 1. Skizze zum Prüfansatz mit bewegtem Laserstrahl

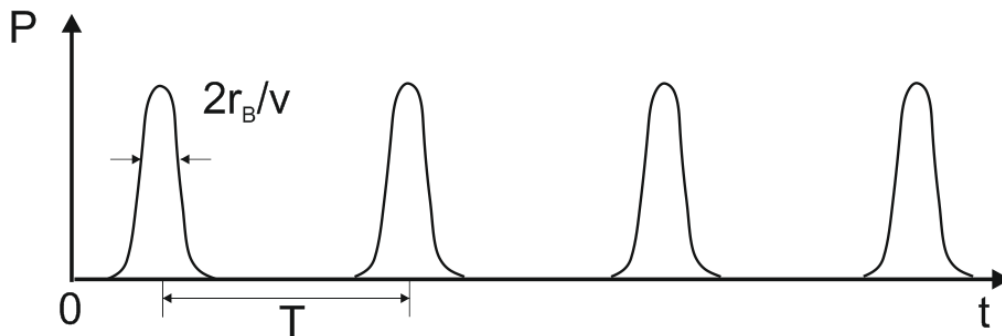


Abb. 2. Laserleistungsdichte P als Funktion der Zeit an einem Punkt auf der Bahn

Idealerweise ist der Start der Kameraaufzeichnung mit dem Start der Laserbewegung synchronisiert. Weiterhin muss die gesamte Aufzeichnung eine ganze Zahl n von Durchläufen erfassen. Generell ist es sinnvoll, vor Beginn der Aufzeichnung bereits einige Einschwingdurchläufe durchzuführen.

Die aufgezeichnete Bildsequenz wird nun mit einem üblichen Lock-in Analysealgorithmus bei der Frequenz f_M verarbeitet, worauf ein Amplituden- und ein Phasenbild entstehen. Das Amplitudenbild wird nur im Bereich der Laserspurs ein Signal zeigen. Das Phasenbild weist eine Besonderheit auf. Angenommen, der Zeitnullpunkt und Start der Laserspurs liegt dort, wo der Laserstrahl den Winkel $\alpha=0$ (s. Abb. 1) erstmals durchläuft, so kommt es zu einem ortabhängigen Hintergrundbeitrag zur Phase ϕ . Die Phase ist bei einer Kreisbahn, die gegen den Uhrzeigersinn durchlaufen wird:

$$\Phi_+ = \Phi_{therm} - \alpha \quad . \quad (4)$$

Dabei ist ϕ_{therm} die gesuchte Phasenverschiebung der Wärmeströme. Da α bei periodischen Bahnen stets von null bis 2π variiert und typische Phasenverschiebungen der gesuchten Messeffekte meist deutlich kleiner sind, können kleine lokale Störungen im Phasenbild ohne weiteres nicht gut erkannt werden. Dazu bieten sich zwei Auswege an. Zum einen kann über eine Bildkorrektur der Phasenoffset entlang der Bahn herausgerechnet werden, was im allgemeinen Fall möglicherweise aufwendig ist. In dieser Arbeit wurde ein anderer Ansatz gewählt: Die Messung wird zweimal durchgeführt, einmal mit Strahlbewegung gegen den Uhrzeigersinn und einmal mit Strahlbewegung im Uhrzeigersinn. Bei Strahlbewegung im Uhrzeigersinn ist die Phase

$$\Phi_- = \Phi_{\text{therm}} + \alpha \quad . \quad (5)$$

Die Phasenbilder beider Messungen werden dann numerisch gemittelt, unter Berücksichtigung der Periodizität der Phase mit 2π . Als Ergebnis entsteht ein rein thermisches Phasenbild:

$$\Phi = \frac{1}{2}(\Phi_+ + \Phi_-) = \Phi_{\text{therm}} \quad . \quad (6)$$

Grundsätzlich ähnliches gilt auch, wenn eine kompliziertere Bahn mit konstanter Bahngeschwindigkeit durchlaufen wird. In einem folgenden Abschnitt werden die mit der beschriebenen Vorgehensweise verbundenen Näherungen diskutiert.

Experimentelles

Für den Scan des Lasers wurde ein Laser-Scansystem der Fa. Amtron basierend auf einem Diodenlaser mit 250 W maximaler Ausgangsleistung bei einer Wellenlänge von 978 nm eingesetzt (Abb. 3). Die Lichtenergie wird per Glasfaser in einen xy-Scankopf mit Galvanospiegeln eingekoppelt, der über eine F-Theta Optik einen Arbeitsbereich von 250 mm x 250 mm erreicht. Im Fokus beträgt der Strahldurchmesser dabei 4 mm.

Mit Hilfe einer Software kann der Laserfleck auf beliebige Bahnen im Arbeitsbereich programmiert werden. Für die vorliegenden Experimente wurde der Laser mit einer CW-Laserleistung von 50 W betrieben. Vor der eigentlichen Messung kann die Prüfbahn mit Hilfe eines Pilotlasers auf dem Bauteil eingestellt und kontrolliert werden.

Als Infrarotkamera wurde eine Thermosensorik QWIP 384 Dual-Band Kamera eingesetzt. Im Weiteren wurde nur das mid-wave IR Bild der Kamera im Wellenlängenbereich 4,4-5,2 μm ausgewertet. Die Bildaufnahme der Kamera mit 145 Bildern/s kann von der Steuersoftware des Lasers synchron zur Laserfleckbewegung gestartet werden. Die Kamera wurde so positioniert, dass der eingestellte Scanbereich voll im Bild erfasst wurde.

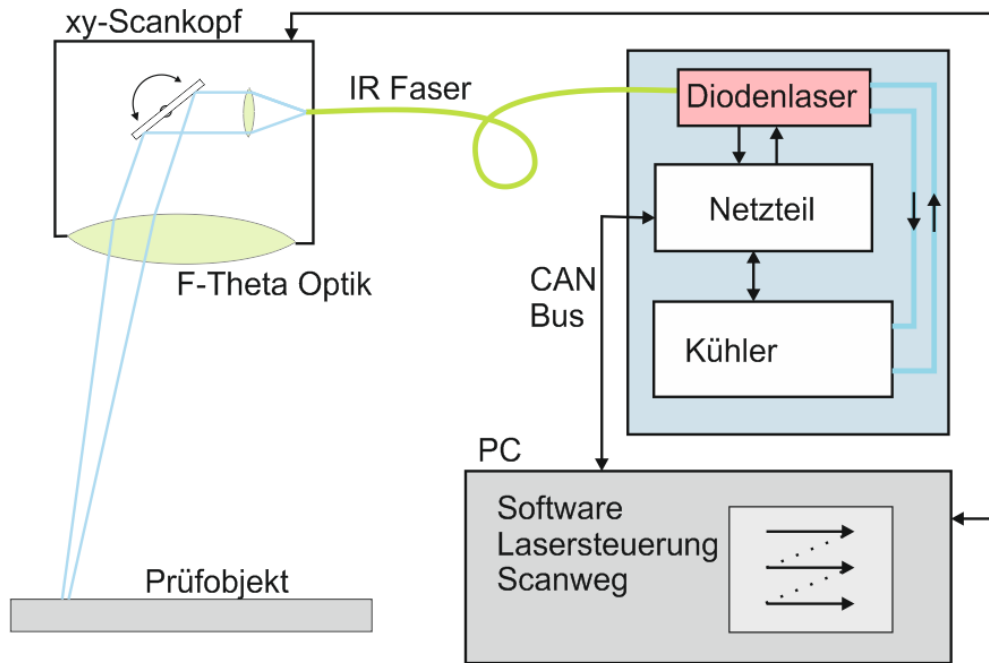


Abb. 3. Schematischer Aufbau des verwendeten Laser-Scan Systems

Prüfaufgabe und Ergebnisse

Bei der Umformung von Blechen an großen und komplexen Bauteilen kann es z. B. durch Chargenschwankungen und bei hohen Umformgraden zu unregelmäßig auftretenden und nur sehr schwer erkennbaren Einschnürungen und Reißern kommen. Als Prüfansatz für diese Fehler wurde unter anderem die aktive Thermographie ausgewählt. Im Folgenden werden nur die Ergebnisse der Erkennung von lokaler Reduktion der Materialdicke dargestellt. Zur thermographischen Untersuchung standen Musterbauteile aus Blech in Napfform mit Abmessungen von etwa 220 mm x 110 mm x 55 mm und 0,75 mm nomineller Blechdicke zur Verfügung. Je nach Prozessparametern konnten in den Bereichen mit starker Umformung am Napfboden Risse und Materialverdünnungen provoziert werden. Aus Platzgründen wurde eine thermische Transmissionsanordnung gewählt (Abb. 4). Da die Infrarotemission des Blechs lokal schwanken kann und an gekrümmten Bereichen eine winkelabhängige Emission vorliegt, ist die emittierte Infrarotstrahlung allein kein gutes Maß für die Schichtdicke oder das Vorhandensein von Rissen. Am Blech wird auch Fremdstrahlung aus der Umgebung störend reflektiert. Daher ist das oben beschriebene Lock-in Verfahren mit Phasenauswertung ein vielversprechender Prüfansatz.

Nur der verrundete Übergang vom Napfboden zu den senkrechten Wänden ist von Interesse. Zur Erkennung von Wandstärkenunterschieden muss die eingesetzte Modulationsfrequenz an die Laufzeit der thermischen Welle durch das Blech angepasst werden. Bei den vorliegenden Messungen wird die Kante des Napfbodens von der Innenseite des Napfs her mit einer Scangeschwindigkeit von etwa 1000 mm/s periodisch abgetastet. Dabei werden genau 22 Perioden der Umlaufbewegung mit 2048 Kamerabildern aufgezeichnet. Dies entspricht einer Modulationsfrequenz von $f_M = 1,56$ Hz. Bei dieser Frequenz kann für eine Stahlblechdicke von 0,75 mm eine gute Empfindlichkeit der Signalphase auf Schichtdickenänderungen erwartet werden.

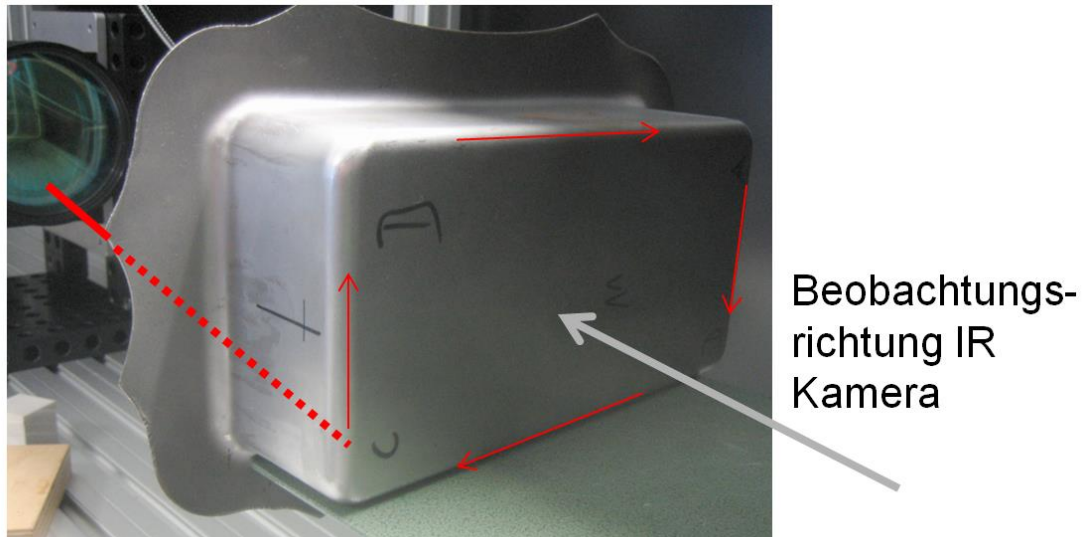


Abb. 4. Untersuchtes Blechbauteil bei der Prüfung. Die Anregung durch den Laser erfolgt auf der Napfnnenseite. Der Anregungslaserstrahl und die Laserfleckbahn sind in rot dargestellt

Die Bildsequenz wird nun mit einem konventionellen Lock-in FFT-Algorithmus bei der Modulationsfrequenz in ein Amplituden- und ein Phasenbild verrechnet. Ein Ergebnis mit Strahllaufrichtung nur gegen den Uhrzeigersinn ist in Abb. 5 dargestellt.

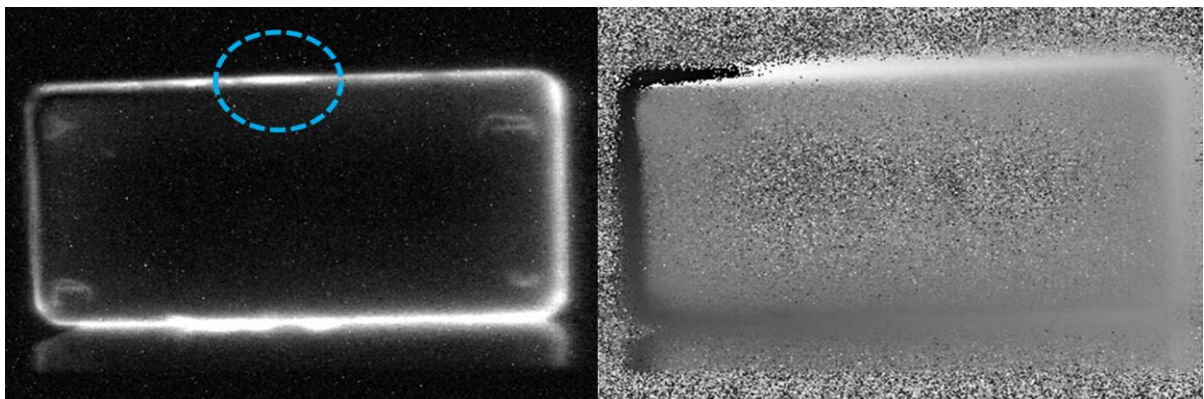


Abb. 5. Thermisches Amplitudenbild (links) und Phasenbild (rechts) des Blechbauteils. Die Phasenskala reicht von -180° (schwarz) bis $+180^\circ$ (weiss)

Im Amplitudenbild erscheint wie zu erwarten nur der in der Wärmeeinflusszone des Laserstrahls liegende Bereich der Napfbodenkante. Es sind lokale Inhomogenitäten zu erkennen. Im Bereich der Markierung, aber auch an anderen Stellen, sind die Inhomogenitäten auch durch sichtbare leichte Oberflächenkorrosion des Stahlblechs zu erklären. Das Phasenbild in Abb. 5 ist dominiert durch den entlang der Bahn linear ansteigenden Phasenterm α . Oben links im Phasenbild ist der Sprung von -180° nach $+180^\circ$ zu erkennen.

Es wird nun die zweite Messung mit entgegengesetztem Drehsinn des Strahls durchgeführt. Die gesamte Messzeit beträgt damit etwa 30 s. Anschließend berechnet man wie oben beschrieben nach (6) das gemittelte Phasenbild und gelangt zum in Abb. 6 dargestellten Ergebnis. In diesem Bild wurden Phasenwerte an Stellen, wo die Amplitude einen Schwellwert unterschreitet, unterdrückt und zu 0° gesetzt.

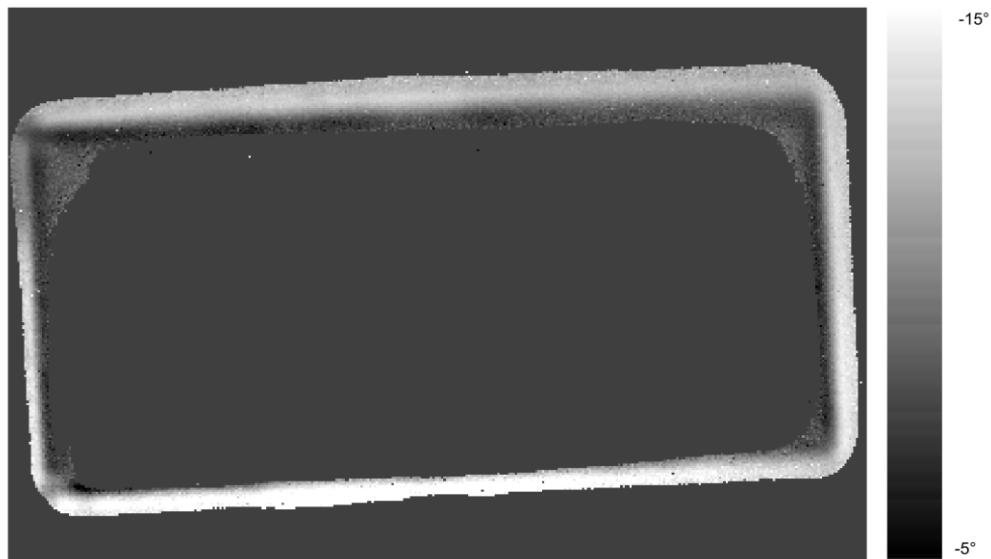


Abb. 6. Flying-spot lock-in Phasenbild des Blechbauteils

Im Phasenbild sind nun lokale Unterschiede der Phase entlang der Kante zu erkennen. Der Kontrast von der Beschriftung (Buchstaben A bis D), der im Amplitudenbild in Abb. 5 noch sichtbar ist, ist dagegen unterdrückt. Um die Phasenkontraste weiter zu verarbeiten und in ein Blechdickenbild umzusetzen, wurde eine analytische Berechnung der Wärmewellentransmission durch das Blech durchgeführt. Man erhält daraus die in Abb. 7 dargestellte Kalibrierkurve für die Frequenz von 1,56 Hz.

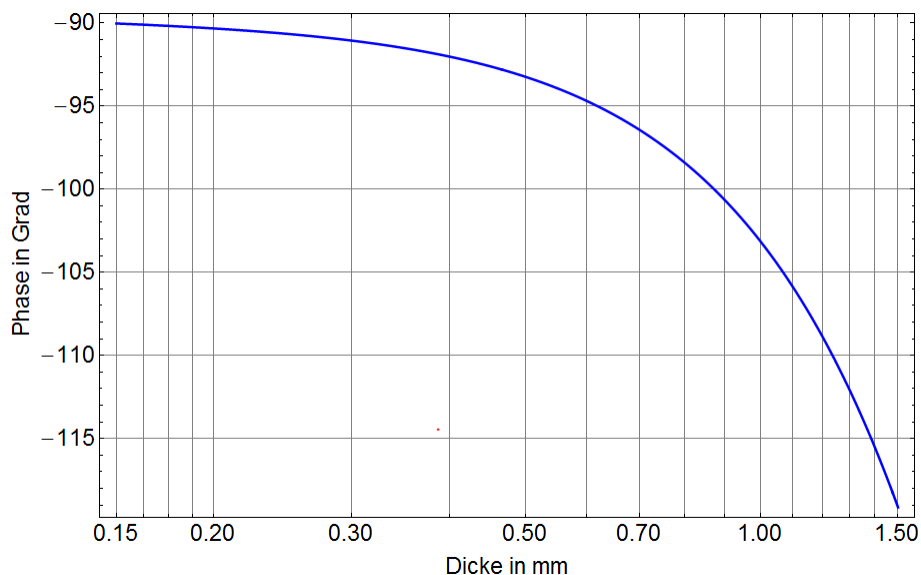


Abb. 7. Berechnete Kennlinie Blechdicke-thermischer Phasenwinkel bei einer Modulationsfrequenz von 1,56 Hz

Diese Kurve muss noch an einem Referenzpunkt mit Hilfe einer konstanten Offsetphase an die Messung angepasst werden, um feste Phasenverschiebungen im System auszugleichen. Dieser Referenzpunkt wurde mit Hilfe eines Hochfrequenz-Ultraschall Schichtdickenmessgeräts QuintSonic gefunden, mit dem bei einiger Mühe an manchen Stellen der gekrümmten Kante eine Blechdickenmessung in Aufsatztechnik durchgeführt

werden konnte. Schließlich gelangt man vom Phasenbild zu dem Bild in Abb. 8, das den Blechdickenverlauf an der Kante zeigt. An der unteren Kante ist die Blechdicke demnach etwas geringer als an der oberen. In den Probenecken sind links lokale Blechdickenveränderungen auffällig.

Die gemessene Variation der Blechdicke ist in der Ultraschallmessung aber etwas geringer als die in Abb. 8 dargestellte.



Abb. 8. Aus dem Phasenbild mit Hilfe einer berechneten Kalibrierfunktion erstelltes Bild der Blechdicke an der Napfkante

Diskussion

Im Folgenden sollen Näherungen und offene Fragen zur beschriebenen Vorgehensweise angesprochen werden.

Eine Abweichung von der klassischen Lock-in Technik liegt darin, dass nicht sinusförmig, sondern mit periodischen Pulsen angeregt wird, wie auch Abb. 2 zeigt. Es ist bekannt, dass dies zu zusätzlichen Phasenoffsets führt, da mit den üblichen FFT-Algorithmen auch die höheren Harmonischen im Signal Phasenbeiträge liefern. Man wird also im Vergleich mit analytischen monofrequenten Rechnungen Abweichungen zumindest bei der Absolutphase erwarten müssen. Ob die lokalen Phasenänderungen durch Blechdickenschwankungen oder in der Nähe von Fehlern davon stark betroffen sind, ist bisher kaum untersucht.

Die Strahlbewegung führt ebenfalls zu Phaseneffekten, ähnlich wie bei photothermischen Messungen an bewegten Objekten [15]. Auch dies bleibt noch weiter zu untersuchen. Bei der Wärmeausbreitung in der Richtung senkrecht zur Prüfbahn treten ebenfalls Phasenverschiebungen auf, die zur Fehlinterpretation der Dicke führen können. Beim thermisch isotropen Werkstoff sollte der Strahldurchmesser groß gegen die Schichtdicke sein. Es sei angemerkt, dass die vorliegenden Messungen mit Péclet-Zahlen (Verhältnis des Flusses durch Bewegung der Quelle zum diffusiven Fluss) von 100 durchgeführt wurden, während klassische Flying-spot Messungen zum Rissnachweis mit Werten unter 1 durchgeführt werden sollten [16].

Mit der Summation zweier Phasenbilder mit gegensätzlichem Anregungsdrehsinn bleibt die Signalamplitude unberücksichtigt. Möglicherweise muss hierbei vektoriell summiert werden.

Zusammenfassung

Mit einer periodischen, relativ schnellen Laserstrahlstahlbewegung entlang einer Prüfbahn können bei geeigneter Auswertung Amplituden- und Phasenbilder entlang der Bahn gewonnen werden. Bei der Anwendung an Umformteilen aus Stahl konnten auf diese Weise Störungen unterdrückt und ein Plot der Blechdickenverteilung erzeugt werden.

Die Flying-spot Lock-in Technik wird dort interessant sein, wo nicht auf der gesamten Fläche, sondern entlang von vorab bekannten Bereichen eine Prüfung nötig ist. Durch die lokale Wärmeeinbringung ist grundsätzlich auch eine Sensitivität für senkrecht zur Oberfläche liegende Fehler zu erwarten.

Danksagung

Wir danken der Europäischen Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. (EFB) und der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) für die Finanzierung dieser Arbeiten im Rahmen des Forschungsvorhabens EFB/AiF 16695N.

Referenzen

- [1] E. Kubiak, 'Infrared detection of fatigue cracks and other near-surface defects', Appl. Optics **7** (1968) 1743
- [2] I. Kaufman, P. T. Chang, H. S. Hsu, W. Y. Huang, and D. Y. Shyong, 'Photothermal radiometric detection and imaging of surface cracks', J. Nondestr. Eval. **6** (1987) 87
- [3] J. Hartikainen, J. Jaarinen and M. Luukkala, 'Delamination and crack detection by the synchronous heating method: theoretical aspects', Rev. Progr. QNDE **8B**, (1989) 1321
- [4] Y. Q. Wang, P. K. Kuo, L. D. Favro, and R. L. Thomas, 'Flying laser spot thermal wave IR imaging of horizontal and vertical cracks', Rev. Progr. QNDE **9**, (1990) 511
- [5] C. Gruss, F. Lepoutre, and D. Balageas, 'Non destructive evaluation using a flying spot camera', Proc. 6th ECNDT, Nice 1994, p. 657
- [6] T. Li, D. Almond, D. Rees, 'Crack imaging by scanning laser-line and laser-spot thermography', Meas. Sci. and Technology **22** (2011) 035701
- [7] F. Lepoutre and D. Balageas, 'Non destructive evaluation using a flying spot camera', Proc. 6th ECNDT, Nice (1994) 657
- [8] J.-C. Krapez, L. Legrandjacques, F. Lepoutre, and D. Balageas, 'Optimization of the photothermal camera for crack detection', QIRT open archives, Proc. 4th QIRT, Lodz, Poland, 1998, paper 48
- [9] M. Ziegler, M. Kreutzbruck, C. Maierhofer, M. Pelkner, J. Schlichting, 'Kameragestütztes Flying-Spot-Verfahren zur Risserkennung', Thermographie-Kolloquium 2011, Vortrag 12, DGZfP-Berichtsband **130-CD** (Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP, Berlin) 2011
- [10] U. Netzelmann and H. Zhang, 'Prüfung von Keramikoberflächen mit Wärmewellenmikroskopie', DGZfP Berichtsband 38, Jahrestagung 9.-11.5.1994, Timmendorfer Strand, (DGZfP, Berlin 1995) 745-751
- [11] H. Petry, 'Online-Messung von Lackschichten mit thermischen Wellen', tm **65**, 396 (1998)
- [12] G. Busse, 'Thermal-wave experiments on moving samples', Can. J. Phys. **64**, (1986) 1281
- [13] I. A. Sazonov, 'Propagation of Harmonic Thermal Waves in a Shear Flow', Acoustical Physics **40**, 735 (1994)
- [14] U. Netzelmann, 'Analysis of thermal wave propagation in coatings on moving objects', Progress in Natural Science (China) **6**, (1996) 235
- [15] C. Gruss, R. Hüttner, B. Bein, 'Theoretical and experimental analysis of a photothermal modulation technique for application on moving samples', Proc. 13th Int. Conf. on Thermal Engineering and Thermogrammetry, Budapest 2003
- [16] J.-C. Krapez, 'Résolution spatiale de la caméra thermique à source volante', Int. J. Therm. Sci. **38** (1999), 769-779