

Zerstörungsfreie und berührungslose Charakterisierung von Fügeverbindungen mittels Lockin Thermografie

Thomas Zweschper*, Stuttgart

Thermografie in der Zerstörungsfreien Prüfung

Ziel der konventionellen Thermografie ist die Messung der Oberflächentemperatur eines Körpers. Das Thermografiesystem detektiert die vom Körper emittierte, temperaturbedingte infrarote Wärmestrahlung, die (je nach den spektralen Eigenschaften) in einer nur wenige Mikrometer tiefen Grenzschicht, der Absorptionslänge für diese Strahlung, unmittelbar an der Oberfläche entsteht. Die sogenannte passive Thermographie liefert damit nur Informationen über die Oberfläche eines Körpers. Bei den aktiven thermischen Meßverfahren in der zerstörungsfreien Prüfung geht es hingegen generell um Untersuchungen des zuvor im Prüfkörper angeregten Wärmeflusses, der durch einen Wärmepuls (Pulsthermografie [1-3]) oder durch sinusförmige Modulation (Lockin Thermografie) erzeugt wird, und insbesondere seiner Störung infolge verborgener Fehler [4-7].

Diese Untersuchungen erfolgen durch die berührungslose Erfassung von Temperaturfeldern mittels einer Thermografiekamera.

Lockin Thermografie

Das Messprinzip der Lockin Thermographie ist in Abbildung 1 dargestellt. Man unterscheidet die optisch angeregte Lockin Thermografie (OLT) von der Ultraschall angeregten Lockin Thermografie (ULT).

Um an der Prüflingsoberfläche ein sinusförmiges Temperaturfeld zu erzeugen, kommen bei der OLT ausschließlich externe Wärmequellen (z.B. Halogenlampen, Laser, etc.) zum Einsatz. Die Temperaturmodulation an der Oberfläche setzt sich als thermische Welle in das Probennere fort, wo sie gedämpft und an Grenzflächen und Defekten reflektiert wird (Abb. 1). Mittels einer Thermografiekamera und Lockin-Modul [8] ist die Bestimmung von

Amplituden- und Phasenlage jedes einzelnen Bildpunktes möglich. Über die Modulationsfrequenz der Anregungsquelle läßt sich die Eindringtiefe der thermischen Welle variieren [9, 10]. Der Phasenwinkel ist somit ein empfindlicher Indikator für oberflächennahe Diskontinuitäten, Defekte und Grenzflächenveränderungen.

Eine Messmethode, die speziell auf geschädigte Bereiche anspricht, ist die ULT (Abb. 2). Hierbei werden die veränderten mechanischen Eigenschaften eines Defektes zur modulierten Wärmeerzeugung eingesetzt [11-13]. Der physikalische Mechanismus, den man dafür ausnutzen kann, ist die Erhöhung des mechanischen Verlustwinkels („Hysterese-Effekt“) im Defektbereich. Hierzu leitet man Ultraschall in das Bauteil ein, der vorzugsweise im Defektbereich gedämpft wird und dabei Wärme erzeugt. Moduliert man die Amplitude des Ultraschalls mit einer tiefen Frequenz, so pulsiert die erzeugte Wärme, und der Defekt emittiert eine thermische Welle, die ihn selektiv im Sinne einer thermischen Dunkelfeldmethode hervortreten läßt.

Anwendungen

Seit ihrer Einführung hat sich die Lockin Thermografie ein breites Anwendungsspektrum erschlossen und sich auch außerhalb des Labors als praxistauglich erwiesen. Sie wird derzeit zur Charakterisierung von Laminatwerkstoffen (Delamination, Impactschäden), zur Riss- und Korrosionserkennung in Metallen und Keramikbeschichtungen, zur Erfassung von Klebefehlern und Einschlüssen bei Holzfurnieren oder zur Bestimmung von Schichtdickenvariationen lackierter Kunststoffe eingesetzt.

Die Phasenwinkelmessung der Lockin Thermographiemessungen kann aber auch zur Charakterisierung von Schraub- und Nietverbindungen herangezogen werden.

Schraub- und Nietverbindungen

In der Verbindungstechnik werden 70 % aller Fügevorgänge mittels Verschraubungen realisiert. Nietungen spielen im Flugzeugbau eine herausragende Rolle. An einen großen Teil dieser Verbindungen werden hohe Sicherheitsanforderungen gestellt. Schadhafte Nietverbindungen oder unzureichend vorgespannte Schrauben können zu Schäden mit erheblichen Folgekosten (z.B. in der Luftfahrt) führen.

Während des Anziehens einer Schraubverbindung findet bis zum Erreichen der Vorspannkraft ein Einebnen von Oberflächenrauigkeiten der Auflageflächen unter Schraubenkopf und Mutter, sowie in den Trennfugen zwischen den Platten statt. Mit zunehmendem Drehmoment ändert sich der thermische Kontaktwiderstand der Grenzflächen. Dadurch ändert sich im Bereich der eingebneten Flächen der Wärmefluß. Dieser Grenzflächeneffekt kann mittels Lockin Thermografie detektiert werden, so daß für eine Schraubverbindung eine Zuordnung des Phasenwinkels (nach entsprechender Kalibrierung an Referenzproben) zum jeweiligen Anzugsmoment möglich ist.

Abbildung 3 zeigt sechs OLT-Phasenbilder bei 0,03 Hz einer geölten M8-Schraubverbindung, die ein verzinktes Stahlblech ($d = 2 \text{ mm}$) auf ein zweites, 4 mm dickes Stahlblech preßt. Das Anzugsmoment wurde mittels eines signalgebenden Drehmomentschlüssels schrittweise auf 30 Nm gesteigert. Mit zunehmenden Drehmoment erkennt man deutlich den Anstieg des Phasenwinkels im Bereich um den Schraubenkopf.

Der Phasenwinkel hängt jedoch nicht nur vom Anzugsmoment ab, sondern wird durch eine Reihe weiterer Parameter beeinflusst. Es konnte gezeigt werden, dass die Oberflächenqualität der Fügeteile, die Beschaffenheit der Trennfuge

* Träger der Schiebold-Gedenkmünze 2000

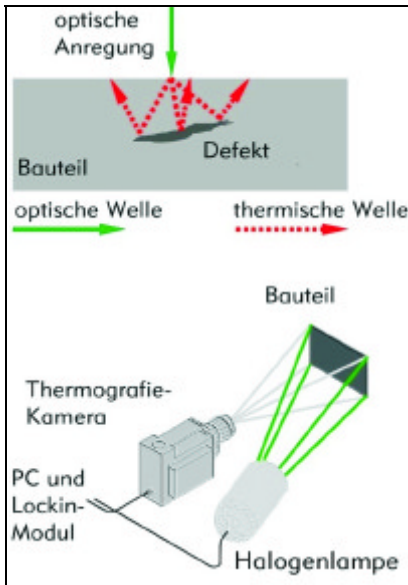


Abb. 1: Prinzip der Lockin Thermografie mittels optischer Anregung [7]

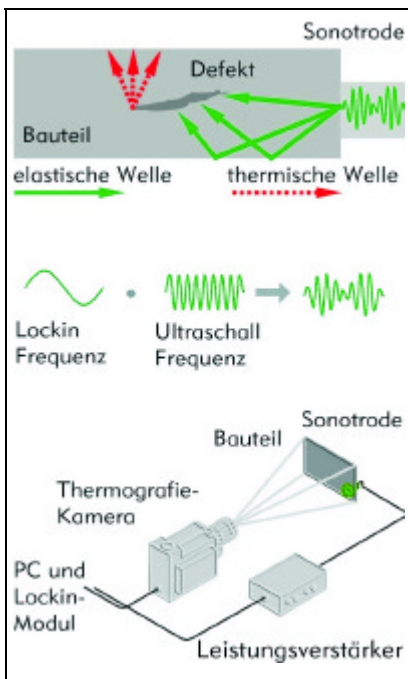


Abb. 2: Prinzip der Lockin Thermografie mittels Ultraschall-Anregung [13]

(eventuell vorhandene Dichtmedien, Korrosion), geometrische Abmessungen der Verbindungselemente, räumliche Nähe der Verbindungselemente zueinander etc. die Phasensignatur auf unterschiedlichste Art und Weise beeinflussen. Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Auswirkungen auf den Phasenwinkel einer exzentrisch verspannten Schraubverbindung.

Es ist jedoch zu beachten, dass für

die tatsächliche Güte der Verschraubung die Vorspannkraft der Schraube und nicht das Drehmoment ausschlaggebend ist. Weitere Faktoren, wie ungleichmäßige Reibungsverhältnisse im Gewinde und unter dem Schraubenkopf, Setzen der Mutter, Fließverhalten von Dichtungen und Flanschverformungen kommen noch hinzu. Für eine exakte Schraubenspannungsmessung empfiehlt sich demgegenüber die Ultraschall-Impuls-Echo-Methode. Hierbei wird die Laufzeitdifferenz longitudinaler Ultraschallwellen in ungespannter und gespannter Schraube ermittelt und so die tatsächliche Vorspannkraft errechnet. Dieses Verfahren ist deutlich zeitintensiver, da es für jede Schraube separat angewandt werden muss, während mit OLT ganze Schraubenreihen simultan berührungslos inspiziert werden.

Eine qualitative Charakterisierung von Schraub- und Nietverbindungen und zwar schnell, berührungslos und großflächig simultan, ist, wie die unten aufgeführten Beispiele zeigen, mit Lockin Thermografie durchaus möglich. Auch können Veränderungen in der Trennfuge im Sinne eines Schädigungsverlaufs sichtbar gemacht werden. Geht der Messung eine Kalibrierung an entsprechenden Referenzproben voraus, so ist in gewissen Grenzen eine qualitative Bewertung machbar.

Beispiele

Abbildung 5 zeigt einen genieteten Stringer (Al) eines Flugzeugbauteils und das dazugehörige ULT-Phasenbild der Ultraschall-Lockin-Messung (rechts). Der Vergleich mit dem Ergebnis einer Wirbelstromprüfung verdeutlicht die Vorteile der Lockin Thermografie. Während die Wirbelstromprüfung (links) nur die Rißlänge detektiert, zeigt sich bei der Ultraschall-Lockin-Messung (rechts) der tatsächlich geschädigte Bereich. Hier leuchten die Nietverbindungen mit verminderter Flächenpressung deutlich auf. Nach Entfernen der Nietverbindungen zeigt eine erneute Ultraschall-Lockin-Thermografie-Messung se-

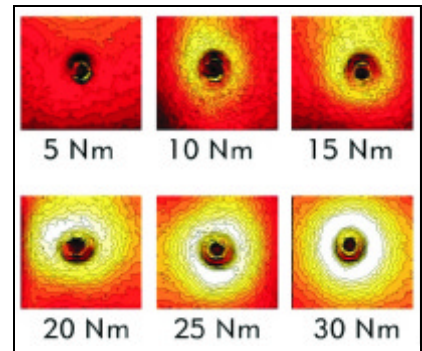


Abb. 3: OLT-Phasensignaturen einer M8 Schraubverbindung bei unterschiedlichen Anzugsmomenten [14]

ktiv die Risse im Aluminiumblech.

Abbildung 6 zeigt eine durch Scherung zerstörte Senknietverbindung (Überlappungsnietzung mit Dichtmasse in der Trennfuge, Blechstärke jeweils 3 mm, Al) und das dazugehörige ULT-Phasenbild. Die höheren Phasenwerte der äußeren Nietreihen deuten auf einen Verlust der Flächenpressung hin, der einem Versagen mehrreihiger Nietverbindung in den kritischen Bereichen vorausgeht. Ursache hierfür sind zusätzlichen Biegespannungen in einer auf Schub beanspruchten Überlappungsnietzung sowie ein eventueller Überstand der Senkköpfe aufgrund mangelnder Verarbeitungsgenauigkeit beim automatisierten Setzen der Niete. Dieser Überstand hat einen nicht zentrisch in der Bohrung sitzenden Niet zur Folge. Im Belastungsfall kommt es zu Spannungsspitzen und zum Materialversagen. Die mittlere intakte Nietreihe bleibt dagegen weitgehend unauffällig.

Abbildung 7 zeigt einen Ausschnitt eines Flugzeugbauteils an dem von der Rückseite her vier Niete mechanisch manipuliert, d.h. gelockert, wurden. Im OLT-Phasenbild zeichnen sich die schadhaften Niete durch deutlich höhere Phasenwerte aus. Auch die Materialverdickung der Überlappungsnietzung wird sichtbar.

Schlussbetrachtung

Lockin Thermografie ist ein empfindliches und aussagefähiges Prüfverfahren, das nicht nur die berührungslose zerstörungsfreie Erkennung von Beschichtungsfehlern,

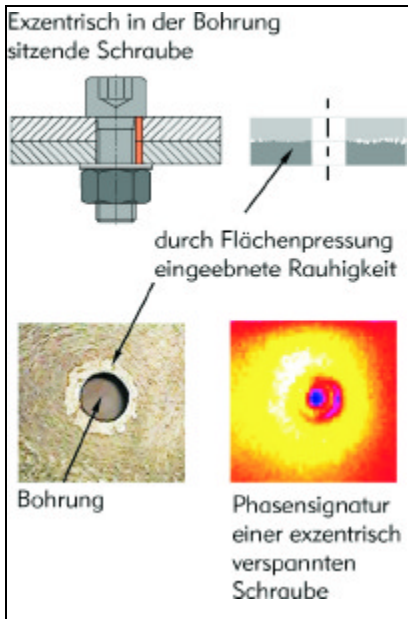


Abb. 4: Exzentrisch verspannte Verschraubungen bzw. eine ungleichmäßig um die Bohrung verteilte Flächenpressung verursacht exzentrisch verschobene Phasensignaturen (rechts OLT bei 0,03 Hz)

Delaminationen (in CFK, GFK, Holz,...), Impactschäden, Stringerablösung und anderer Defekte im oberflächennahen Bereich auch großer Bauteile erlaubt, sondern auch den Verlust der Festigkeit einer Fügeverbindung (selektive Abbildung schadhafter Nietverbindungen oder Verlust der Flächenpressung bei Verschraubungen...) ermöglicht. Die Verfahren der Lockin Thermografie mit optisch oder akustisch erzeugten thermischen Wellen eignen sich somit für den Einsatz in der Qualitätssicherung bei Wartung und Instandhaltung.

Trotz dieser Erfolge sollte erwähnt werden, daß die mechanische Einkopplung des Ultraschalls derzeit noch ein Schwachpunkt ist, der die Größe der inspizierbaren Bauteile begrenzt. Hier ist noch weitere Forschungsarbeit zu leisten.

Danksagung

Der Autor bedankt sich bei Herrn Dr. Richter, WIWEB, Erding und bei EADS, Bremen für die großzügige Bereitstellung des Probenmaterials.

Mein Dank gilt außerdem Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. G. Busse, sowie Herrn Dr.-Ing. D. Wu und Herrn Dipl.-Phys. A. Dillenz für die fachliche Unterstützung.

Literatur

[1] Vavilov, V. and Maldague, X.: Optimization of Heating Protocol in Thermal NDT, Short and Long Heating Pulses: A Discussion. In: Research In NDE. Vol. 6. Columbus, OH: American Society for NDT (1994), pp. 1-17.

[2] Favro L. D., Xiaoyan Han, Yingxia Wang, Kuo P. K., and Thomas R. L.: Pulse-Echo Thermal Wave Imaging. In: Review of progress in quantitative NDE, Vol. 14 edited Thompson D. O. and Chimenti D., Plenum, New York, (1995), pp. 425-429.

[3] Lau S. K., Almond, D. P., and Milne, J. M. NDT & E Int. 24, (1991) pp. 195.

[4] Carlomagno G.M., and Berardi P.G.: Unsteady thermotopography in non-destructive testing. In: Proc. 3rd Biannual Information Exchange, Aug. 24-26, St. Louis USA, (1976): pp. 33-39.

[5] Beaudoin J. L., Merienne E., Danjoux R., and Egee M.: Numerical system for infrared scanners and application to the subsurface control of materials by photothermal radiometry. Infrared Technology and Applications SPIE Vol. 590 (1985): p. 287.

[6] Kuo P.K., Feng Z. J., Ahmed, T., Favro L. D., Thomas R. L., and Hartikainen J.: Parallel thermal wave imaging using a vector lock-in video technique. In: Photoacoustic and Photothermal Phenomena. Ed. P. Hess and J. Pelzl. Heidelberg: Springer-Verlag. (1987): pp. 415-418.

[7] Busse G., Wu D., and Karpen W.: Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography. In: J. Appl. Phys. Vol. 71 (1992): pp. 3962-3965.

[8] BMBF Projekt Nr. 03N8006B0: Entwicklung thermischer Tomographie mittels phasenempfindlicher Modulationsthermographie zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung von Schichtwerkstoffen.

[9] Rosencwaig A., Gersho A.: Theory of photoacoustic effect with solids. In: J. Appl. Phys. 47 (1976) pp. 64-69.

[10] Busse G., Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal. In: Appl. Phys. Lett. 35, (1979), pp. 759-760.

[11] Mignogna R. B., Green R. E., Duke J., Henneke E. G., and Reifsnider K. L.: Thermographic investigations of high-power ultrasonic heating in materials. In: Ultrasonics 7, (1981), pp. 159-163.

[12] Rantala J., Wu D., Busse G.: Amplitude modulated lock-in vibrothermography for NDE of polymers and composites. In: Res. Nondestr. Eval. (1996) 7, Springer-Verlag New York, pp. 215-228.

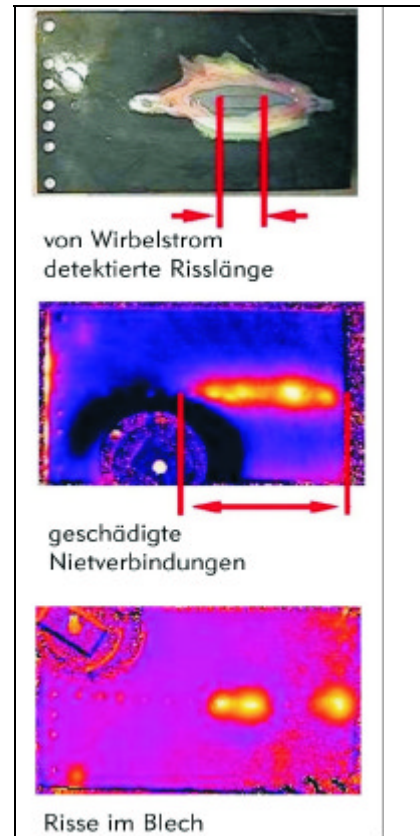


Abb. 5: Vergleich einer Wirbelstrommessung (oben) mit einer Ultraschall-Lockin Thermografie Messung (mitte). Das Phasenbild bei 0,5 Hz (unten) zeigt eine Wiederholungsmessung nach entfernen der Nietreihen. Risse im Blech leuchten dann selektiv auf

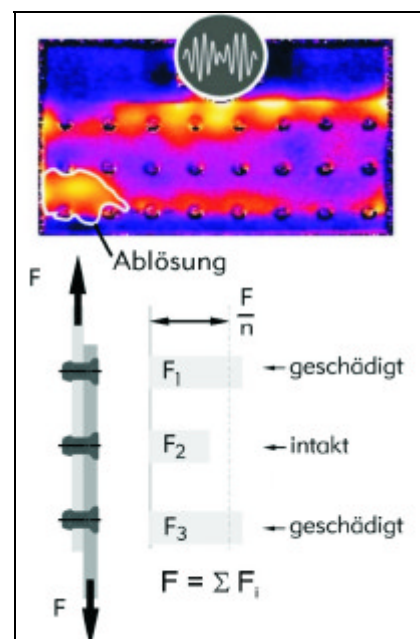


Abb. 6: Kraftverteilung in einer dreireihigen Senknietverbindung und das ULT-Phasenbild bei 0,5 Hz nach dem Schubversuch

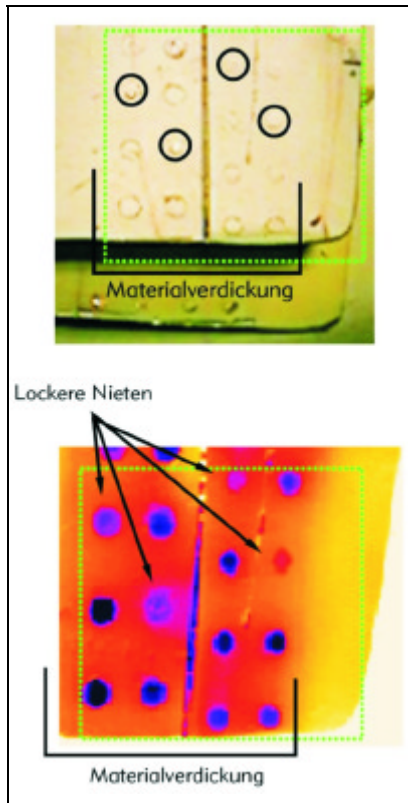


Abb. 7: Oben Flugzeugbauteil (Überlappungsniertung, Aluminium, $d = 2 \text{ mm}$, lackiert) und unten das dazugehörige OLT-Phasenbild bei $0,03 \text{ Hz}$. Die gelockerten Nietverbindungen erscheinen hell

[13] Stoessel R., Dillenz A., Krohn N., and Busse G.: Zerstörungsfreie Prüfung mit defekt-selektiven Abbildungsverfahren. Materialprüfung 42 (2000) 1/2, S. 38-44.

[14] Zweschper Th., Wu D., and Busse G.: Detection of tightness of mechanical joints using lockin thermography. In: Diagnostic imaging technologies and industrial applications. SPIE Vol. 3827 (1999) pp. 16-21.

Anschrift:

Dipl.-Ing. Thomas Zweschper
Institut für Kunststoffprüfung und
Kunststoffkunde, Abt. ZfP

Pfaffenwaldring 32

D-70569 Stuttgart

Tel.: (0711) 685 2669

Fax: (0711) 685 2066

Email: zweschper@ikp.uni-stuttgart.de

Der Autor:



Geboren 1968, studierte Maschinenwesen an der Universität Stuttgart und ist derzeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kunststoffkunde und

Kunststoffprüfung in der Abteilung Zerstörungsfreie Prüfung tätig.