

Induktionsthermografie zur automatisierten Rissprüfung von Flugzeugstrukturen aus Aluminium

Christian ŠRAJBR *, Stefan MEHLER **

* edevis GmbH, Stuttgart

** Lufthansa Technik AG, Rhein Main Airport, Frankfurt

Kurzfassung. Die Induktionsthermografie bietet sich mit sehr niedrigen Prüfzeiten und einer defektselektiven sowie berührungslosen Wirkungsweise zur Rissprüfung in metallischen Strukturen an. Die Interaktion der induzierten Wirbelströme mit den Rissen erzeugt hohe thermische Signale an den Rissspitzen, die eine sehr robuste automatisierte Risserkennung mittels mathematischer Algorithmen zur Bildverarbeitung ermöglichen.

Das präsentierte Anwendungsbeispiel der Induktionsthermografie ist ein Prüfkopf, der in einen, sich autonom über Flugzeugrümpfe bewegenden, Roboter integriert wird. Mit diesem Prüfgerät sollen die manuellen und zeitaufwändigen Wirbelstromprüfungen zur Detektion von Ermüdungsrissen in Flugzeugrümpfen aus Aluminium ersetzt werden, die im Rahmen des Wartungsplans zur Aufrechterhaltung der Lufttichtigkeit bei einigen Verkehrsflugzeugtypen vorgeschrieben sind.

Die von der edevis GmbH entwickelte Prüftechnik ist dabei direkt auf die Anforderungen der mobilen Prüfung ausgelegt und optimiert worden. Die luftgekühlten und gekapselten Induktoren wurden speziell mit Blick auf die optimale Orientierung der Wirbelströme und Geometrie des Prüfbereichs designt. Auch das mobile Versorgungssystem, bestehend aus luftgekühltem Induktionsgenerator, Signalgenerator und Mess- und Steuerungs-PC, wurde hinsichtlich der Anforderungen auf minimales Gewicht und geringe Größe optimiert und in eine mobile Einheit integriert.

Einführung

Die Zelle von Flugzeugen mit Druckkabine in Aluminiumbauweise kann aufgrund von Ermüdung im Verlauf des Lebensdauerzyklus Risse aufweisen. Um die Lufttichtigkeit der Flugzeuge zu gewährleisten werden daher durch Hersteller und Luftfahrtbehörden für kritische Bereiche Prüfintervalle vorgeschrieben, um evtl. auftretende Risse in einem Zustand des stabilen Risswachstums zu detektieren. Werden die Risse zu groß, kann es zu einem plötzlichen lokalen Versagen der Rumpfaußenhaut während des Flugs kommen, was wiederum zu einem Verlust des Kabinendrucks führen würde.

Da das Risswachstum aufgrund des spezifischen Aufbaus und Belastungen von der Rumpffinnen- zur Außenseite verläuft und der Prüfbereich von der einzig zugänglichen Seite (Rumpfaußenhaut) zudem lackiert ist, sind Farbeindring- und visuelle Prüfungen nur bedingt anwendbar. Aktuell kommen daher für die Inspektionen händisch durchgeführte Wirbelstrom-Prüfungen zum Einsatz. Nachteile dieser Prüfungen sind jedoch der hohe

Zeitaufwand, resultierend in hohen Kosten durch die Standzeiten des Flugzeugs, die aufwändige Einrüstung des Flugzeugs um dem Prüfer den Prüfbereich zugänglich zu machen und die subjektive Interpretation der Prüfsignale.

Das Paper zeigt eine Lösungsmöglichkeit des Prüfproblems basierend auf einer automatisierten Prüfung mit Induktionsthermografie auf. Der speziell entwickelte Prüfkopf wird dabei in einen Roboter integriert, der die Prüfbereiche autonom erreichen kann. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgt ebenfalls automatisiert mittels Methoden der Bildauswertung.

Entstehung und Ausprägung der Ermüdungsrisse

Ältere Flugzeuge der Baureihe Boeing 737 „Classic“ können aufgrund der verwendeten Herstellungsweise in Kombination mit der für Kurzstreckenflugzeuge typischen hohen Anzahl von Starts und Landungen, sogenannten „flight cycles“, Ermüdungsrisse in der Rumpfaußenhaut ausprägen.

Diese Risse entstehen in der Aluminium-Außenhaut, in der Regel an den Kanten der sog. „Chemical-Milled-Pockets“, wo diese lokal durch einen zweischichtigen Aufbau (Aluminium-Doubler-Struktur) verstärkt wird. Diese Verstärkung wird durch Nieten bzw. Klebstoff mit der Außenhaut gefügt. Die Kombination aus Schub- und Innendruck-Belastungen im Betrieb und den dort vorliegenden Kerbwirkungen begünstigen dabei das Auftreten von Ermüdungsrissen, die in der Regel horizontal entlang des Dickensprungs verlaufen und aufgrund der vorliegenden geometrischen Bedingungen von der Innenseite zur Außenseite des Rumpfs fortschreiten. Abb. 1 stellt die beschriebene konstruktive Situation und den Ort der Rissentstehung, Abb. 2 den aus der lokalen Verstärkung resultierenden Dickensprung und die Rissentstehung am Außenblech im Querschliff dar.

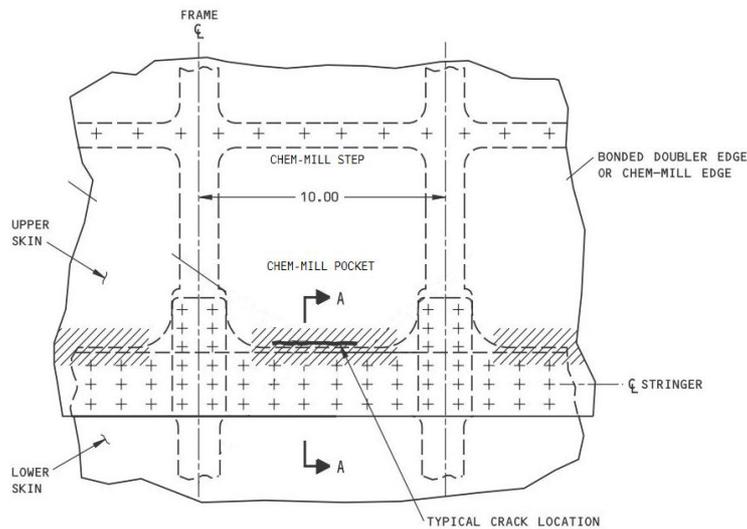


Abb. 1.: Chem-Mill Pockets und Ort der Rissentstehung

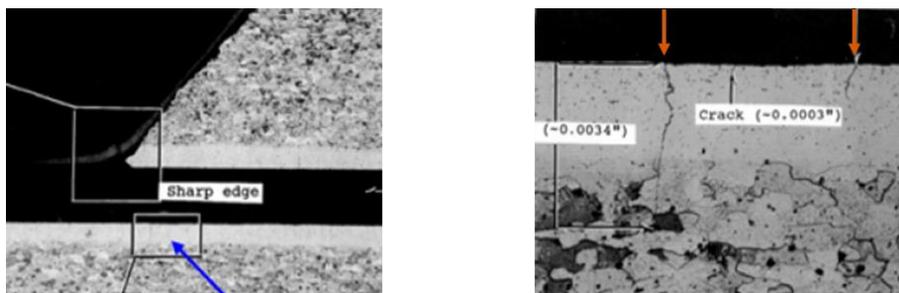


Abb2: Querschliff der Struktur im Bereich des Doublers und von Initialrissen im Außenblech

Prinzip der Induktionsthermografie

Die Induktionsthermografie ist eine Variante der aktiven Thermografie. Aktiv steht für eine gezielte - meist puls- oder sinusförmige - Erwärmung des Prüfbereichs, die diesem einen instationären Wärmetransport aufprägt. Inhomogenitäten oder Fehlstellen des Prüfobjekts erzeugen dabei kurzzeitig auftretende Temperaturunterschiede an der Oberfläche, die mit einer Infrarotkamera aufgezeichnet und bewertet werden. [1], [2] Die Einbringung der Anregungsenergie kann dabei durch unterschiedlichste Erwärmemechanismen erfolgen, typischerweise werden Anregungsquellen mit optischer (Halogen-, Blitzleuchten, Laser), mechanischer (Ultraschall), konvektiver (Heiß-/Kaltluft) oder wie hier beschrieben elektrischer (Induktion, Konduktion) Wirkungsweise verwendet. [1]

Die Induktionserwärmung kann zum einen für die Erzeugung einer gezielten Erwärmung des Prüfbereichs und einer daraus folgenden Wärmeleitung genutzt werden. Fehlstellen im Prüfbereich stören dabei den Wärmefluss und können somit detektiert werden. [3], [4] Für die Detektion von Rissen mittels der Induktionsanregung tritt das in ein metallisches Bauteil eingebrachte Wirbelstromfeld hingegen mit dem Defekt in eine direkte Wechselwirkung. Risse im Prüfbereich verändern die Wirbelstromverteilung, da diese an deren Spitzen in einer Einengung der Wirbelströme und somit erhöhten Stromdichte resultieren, die wiederum aufgrund von elektrischen Verlusten zu einer effektiven lokalen Erwärmung führt. [6], [7] In Kombination mit der Puls-Phasen-Auswertung erhält man eine schnelle, defektselektive, berührungslose und robuste Prüfmethode.

Abb. 3 stellt den verwendeten Prüfaufbau der Induktions-Riss-Thermografie dar. Die Wirbelströme zur Rissdetektion werden durch einen Induktor in Reflektionsanordnung in die Prüfteiloberfläche eingebracht und führen im Fall von Rissen im Bauteil zu einer starken lokalen Erwärmung, die mit der Infrarotkamera visualisiert werden kann. Besonders entscheidend für das Erzielen hoher Signalstärken ist bei der Induktions-Riss-Thermografie die zeitliche Synchronisation von Aufnahme (Mess-PC) und Anregung (Induktions-Generator) mittels des Signal-Generators, da hier sehr kurze Puls- und Aufnahmedauern vorliegen (typischerweise 0,05...0,1s).

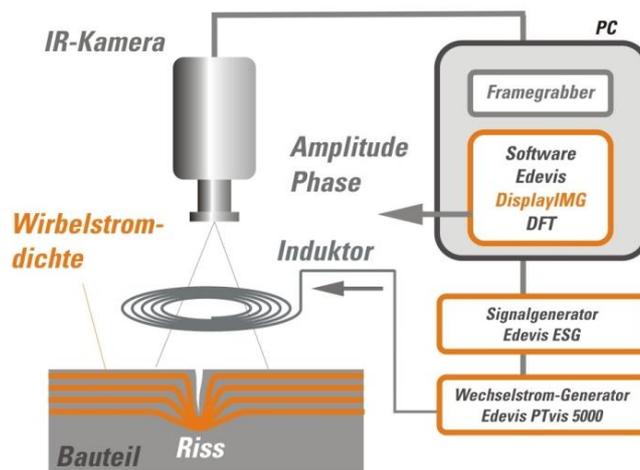


Abb. 3: Prinzipieller Aufbau der Rissprüfung mit Induktionsthermografie

Bei metallischen Werkstoffen beschränkt sich die Induktions-Riss-Thermografie in der Regel auf die Detektion von oberflächenoffenen Rissen, da die effektive Eindringtiefe der Wirbelströme durch eine der eingebrachten Wirbelströme entgegenwirkende Selbstinduktion begrenzt wird. [7] Dieser Effekt wird als Skin-Effekt, die daraus resultierende maximale Eindringtiefe der Wirbelströme als Skintiefe bezeichnet. Deren Wert ergibt sich nach Gl. 1 aus den elektrischen (spezifischer elektrischer Widerstand ρ)

und magnetischen (relative magnetische Permeabilität μ_R bzw. Permeabilitätskonstante μ_0) Eigenschaften des Werkstoffs und der Frequenz der Anregung f_{Ind} . [5]

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_E}{\mu_R \mu_0 \pi f_{Ind}}} \quad \text{Gl. 1 [5]}$$

Besonders die magnetische Permeabilität kann bei Metallen in Abhängigkeit des Werkstoffs stark variieren. So ist bei dem paramagnetischen Aluminium der Quotient aus spezifischem Widerstand und relativer magnetischer Permeabilität um rund zwei Zehnerpotenzen größer als bei ferromagnetischen Stahlwerkstoffen, was zusammen mit der Wahl einer Induktionsquelle im mittelfrequenten Spektrum in einer Eindringtiefe im Millimeterbereich resultiert. Damit ist hier die Voraussetzung gegeben, auch Risse unterhalb der Oberfläche zu detektieren, und somit dass die Anforderung des Prüfproblems erfüllt werden können. Abb. 4 visualisiert die unterschiedlichen Effekte der Rissdetektion im Vergleich von ferro- und paramagnetischen Metallwerkstoffen.

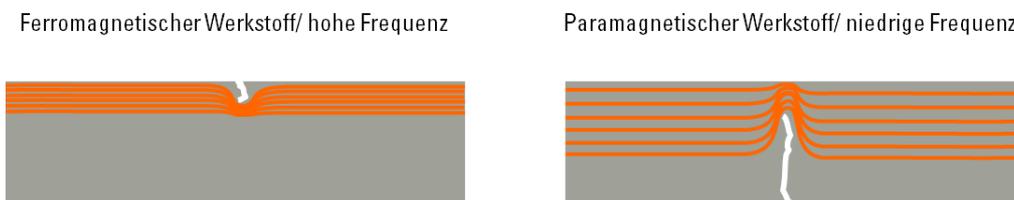


Abb. 4: Einfluss der Werkstoffeigenschaften und Induktionsfrequenz auf die Detektion verdeckter Risse

Ergebnisse der thermografischen Prüfung

Die thermografischen Ergebnisse der Versuche sollen drei generelle Anforderungen erfüllen bzw. die Grenzen der Erfüllbarkeit bestimmt werden: Die Detektion auch von verdeckten Rissen, die Detektion von Rissen mit möglichst geringer Risslänge und die Erkennbarkeit der Risse mit einer automatisierten Bildverarbeitung.

Detektion von Rissen unterhalb der Oberfläche

Für die Bestimmbarkeit der Detektion von Rissen, die nicht bis zur Oberfläche reichen, musste eine Möglichkeit der Simulation gefunden werden, da diese mit einem künstlich induzierten Risswachstum nur sehr schwer zu erzeugen sind und keine Realbauteile mit solchen Rissausprägungen vorhanden waren. Eine Möglichkeit der Qualifizierung des Prüfverfahrens für die Detektion solcher Risse wurde bei mit der Erzeugung von Prüfkörpern mit rückseitigen Schlitz gefunden, wie sie auch bei der Bestimmung von Detektionsgrenzen der klassischen Wirbelstromprüfung eingesetzt werden. Hierfür wurden Bleche aus der am Flugzeug verwendeten Aluminiumlegierung (2024T6) mit Originallackierung mittels Drahterosion mit Schlitz unterschiedlicher Breite und Tiefe versehen. Die Tiefe der Schlitz in dem $t = 1,0$ mm dicken Aluminiumblech variiert dabei von $0,1 \dots 0,9$ mm, so dass sich umgekehrt das gleiche Spektrum der Restwandstärke ergibt. Abb. 5 zeigt schematisch den Aufbau dieser Probekörper.

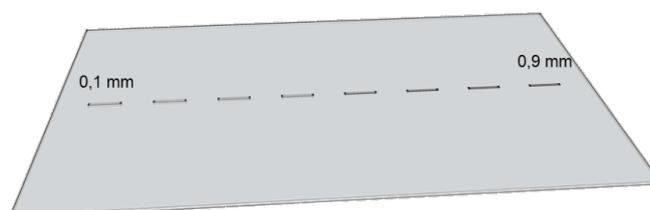


Abb. 5: Probekörper zu Bestimmung der Detektion von verdeckten Rissen

Die Ergebnisse der Prüfung dieser Probekörper bestätigen die theoretischen Überlegungen und somit das Potential der Induktionsthermografie bei paramagnetischen Werkstoffen auch Risse unterhalb der Oberfläche detektieren zu können. In dem beispielhaft abgebildeten Ergebnis (Abb. 6), erzielt mit einer Induktionsfrequenz von $f_{\text{Ind}}= 10 \text{ kHz}$ und einer Fourierfrequenz von $f_{\text{DFT}}= 7,5 \text{ Hz}$ können die Schlitze der Länge 13 mm auch von der Vorderseite detektiert werden. Mit zunehmender Restwandstärke nimmt die Signalstärke jedoch ab. Schlitze bis zu einer Restwandstärke von 0,5 mm lassen sich dabei noch gut detektieren, über 0,7 mm ist kein Signal mehr zu erkennen.

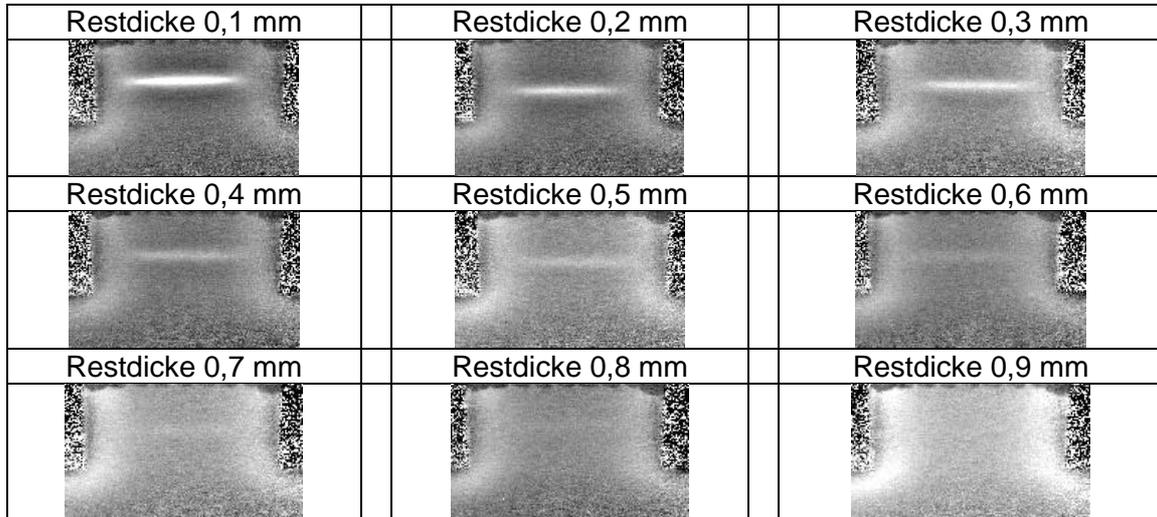


Abb. 6: Ergebnis der Prüfung von Blechen mit rückseitigen Schlitzen zunehmender Restwandstärke

Die dargestellten Ergebnisse lassen sich durch die Anwendung von Kantenfiltern weiter optimieren. Auf Grundlage dieser Ergebnisse ist zu erwarten, dass sich auch reale Risse mit vergleichbaren Ausprägungen detektieren lassen.

Ergebnisse der Detektion realen Rissen

Für die weitere Qualifizierung des Prüfverfahrens ist zudem die Bestimmung der minimal detektierbaren Risslänge eine zulassungsrelevante Fragestellung. Hier wurden für das Projekt zum einen Bleche mit künstlich in Dauerschwingversuchen erzeugten Rissen verwendet, zudem standen auch Realbauteile mit Rissen zur Verfügung. Das Ergebnis der Prüfung eines Realbauteils mit unterschiedlich langen Rissen ist in Abb. 7 dargestellt.

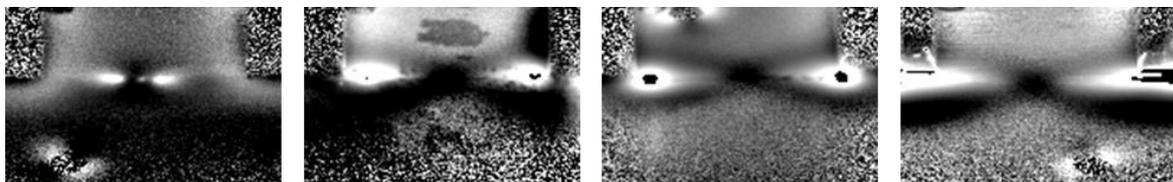


Abb. 7: Ergebnis der Detektion von realen Rissen mit Risslängen von 3 mm bis 40 mm

Hier wird zum einen die unterschiedliche Ausprägung des Ergebnissignals von erodierten Schlitzen (Abb. 5) und den realen Rissen (Abb. 6) deutlich. Während sich bei den nicht durchgängigen Schlitzen über den gesamten Defekt ein relativ gleichmäßiges Signal ausbildet, ergibt sich bei den realen Rissen ein typisches Rissignal, das sich aus einer Senke in der Rissmitte und starken Maxima an den Rissenden zusammensetzt. Die realen Risse erzeugen somit, zumindest in dem vollständig durchgerissenen Fall, ein noch deutlich effektiveres Signal als die simulierten Risse und lassen sich damit besser detektieren. Zum anderen zeigt sich, dass auch Risse mit sehr geringer Länge detektiert

werden können. Aktuell konnte in den Versuchen keine minimale Detektionsgrenze bestimmt werden, da bei den vorliegenden rissbehafteten Blechen auch die geringsten Risslängen (3 mm Länge) detektiert werden.

Integration der Prüftechnik in das Prüfgerät

Das Ziel des Projekts ist die Integration der Prüftechnik in einen sich autonom über das Flugzeug bewenden Roboter und somit die Entwicklung eines mobilen Prüfsystems. Dies beinhaltet auch die Optimierung der peripheren Anlagentechnik bezüglich eines möglichst guten Handlings. Hierzu wird als Anregungsquelle ein luftgekühlter Induktionsgenerator verwendet, der die Option von flexiblen elektrischen Verbindungen zu den Induktoren bis zu einer Länge von 12 m bietet. Der Induktionsgenerator ist mit dem Mess-PC und Signalgenerator in ein Transportcase integriert worden, siehe Abb. 8.



Abb. 8: Mobiles edevis ITvis Prüfsystem

Der eigentliche Induktionsthermografie-Prüfkopf wird als wechselbare Werkzeug-einheit in den Roboter integriert. Das Ziel ist dabei die simultane Prüfung von zwei benachbarten Prüfbereichen in einem Arbeitsschritt, bestehend aus Ober- und Unterkante zweier Chemical Milled Pockets, was somit die Induktorbreite vorgibt. Die Tiefe des prüfaren Bereichs eines Induktors beträgt rund 30 mm, somit müssen für diese Prüfung, vor allen mit Augenmerk auf eine evtl. Fehlpositionierung, zwei parallele Induktoren verwendet werden die jeweils eine Kante prüfen. Zudem ergibt sich aus der eingeschränkten Sichtbereich der Kamera (der Induktor bietet nur eine seitliche Sichtbarkeit des Prüfbereichs) die Notwendigkeit der Verwendung von IR-Spiegeln zur Umlenkung des Strahlengangs der Kamera. Neben der Rissdetektion können die thermografischen Aufnahmen zudem zur Orientierung des Roboters anhand der Erkennung der Nietreihen genutzt werden. Abb. 9 zeigt den entwickelten Prüfkopf.

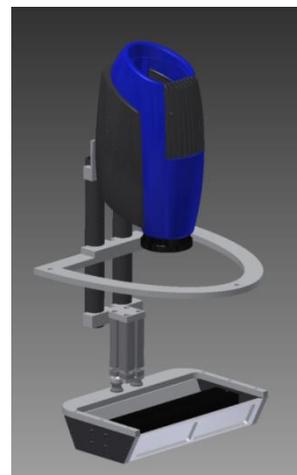
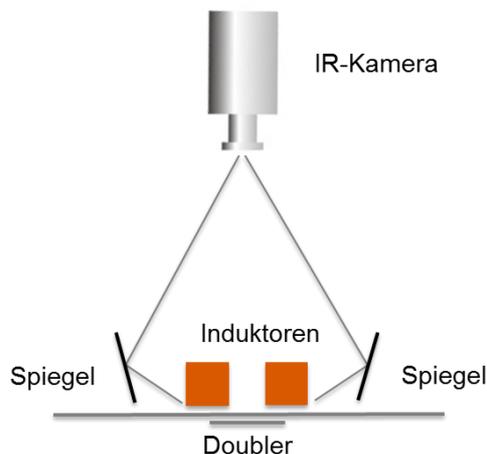


Abb. 9: Prinzipieller Aufbau und CAD Modell des Prüfkopfs

Zusammenfassung

Für die vorgeschriebene intervallweise Prüfung des Aluminiumrumpfs der Boeing 737 „Classic“ auf mögliche Ermüdungsrisse stehen aktuell nur schlecht automatisierbare Prüfmethoden zur Verfügung, deren Einsatz für den Betreiber mit hohen Kosten verbunden ist. Der vorgestellte Ansatz nutzt daher ein modernes Prüfverfahren, die Induktions-Riss-Thermografie. Mit dieser Prüftechnik ist bei dem Rumpfwerkstoff eine hochgenaue Detektion auch von Rissen mit sehr geringem Rissfortschritt und verdeckten Rissen unterhalb der Oberfläche möglich. Zudem ist eine relativ große Prüffläche in einem wenige Zehntelsekunden langem Prüfschritt bewertbar. Somit bietet die Induktions-Riss-Thermografie eine exzellente Umsetzbarkeit für eine automatisierte Prüfung des Flugzeugrumpfs.

Mit der Integration der Prüftechnik in einen wechselbaren Prüfkopf eines sich autonom auf dem Flugzeugrumpf bewegenden Roboters und der Entwicklung einer mobilen Prüf-peripherie entsteht ein Prüfgerät, das eine sehr gute Alternative zu der aktuell vorgeschriebenen Prüfung darstellt.

Referenzen

- [1] Maldague, X. P. V.: *Infrared and Thermal Testing - Volume 3: Nondestructive Testing Handbook – Third edition*; American Society for Non-destructive Testing; 2001
- [2] Wu, D.: *Lockin-Thermografie für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Werkstoffcharakterisierung*, Dissertation am IKT der Universität Stuttgart, 1996
- [3] Riegert, G.: *Induktions-Lockin-Thermografie - ein neues Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung*, Dissertation am IKT der Universität Stuttgart, 2007
- [4] Šrajbr, C., Dilger, K., Dillenz, A. et al.: *Zerstörungsfreie Prüfung von Fügeverbindungen mit Induktions-Puls-Phasen-Thermografie*, Thermografiekolloquium 2011
- [5] Davies, J.; Simpson, P.: *Induction Heating Handbook*. London: McGraw-Hill, 1979 – ISBN 0-07-084515-8
- [6] Vrana, J.: *Grundlagen und Anwendungen der aktiven Thermographie mit elektromagnetischer Anregung*, Saarbrücker Reihe Materialwissenschaft und Werkstofftechnik * Band 18 (2009); Aachen: Shaker
- [7] Walle, G.; Valeske, B.; Netzelmann, U.; et al.: *Eine thermische Prüftechnik zur Oberflächenrissprüfung leitfähiger Materialien*; In: MP 51 (2009) 9; p. 293-602; München: Hanser Verlag