Multimodale Defektquantifizierung

Stefanie HÜBNER*, Burkhard von STACKELBERG*, Theobald FUCHS*
* Fraunhofer Entwicklungszentrum Röntgentechnik, Dr.-Mack-Str. 81, 90762 Fürth

Kurzfassung. Thermographische Prüfmethoden haben sich in den letzten Jahren insbesondere zur Prüfung von Faserverbundwerkstoffen etabliert. Vielfach wurde gezeigt, dass verschiedenste Defekte wie zum Beispiel Delaminationen, Lunker oder Risse qualitativ detektiert werden können. Bislang sind quantitative Defektparameterbestimmungen oder geometrische Messungen in Thermographie-aufnahmen nur bedingt möglich. Profilometrische Vorgehensweisen liefern einen Ansatz, um die Tiefenlage von Strukturmerkmalen zu bestimmen. Laterale Defektausdehnungen hingegen sind bedingt durch thermische Diffusion schwer bestimmbar. In diesem Beitrag wird, durch die Kombination mit Röntgenprüfverfahren, eine Möglichkeit gezeigt, Ausdehnung und Tiefenlage von Defekten zu bestimmen.

Einführung

Wir stellen ein weiter entwickeltes Verfahren vor, das es ermöglicht aus einer Serie optisch angeregter Lock-In Thermographieaufnahmen die Tiefenlage von Defekten und Strukturmerkmalen zu bestimmen. Radioskopiebilder, die in ähnlicher Geometrie aufgenommen werden, dienen mit ihrer bekannten Abbildungsgeometrie als Referenz.
Diese Röntgendaten kombinieren wir mit den thermographischen Profilometriedaten durch Methoden der Bildverarbeitung. Anhand auffälliger Strukturmerkmale oder künstlich eingebrachter Registriermarken werden die tiefenaufgelösten Thermographiedaten auf die Röntgendaten registriert und mit Hilfe affiner Transformationen angeglichen. Dadurch erzeugen wir eine multimodale Visualisierung, die es ermöglicht, Defektgeometrien im Prüfobjekt zu quantifizieren.

Eingesetzte Prüfverfahren

Bei den verwendeten Prüfmethoden handelt es sich um die optisch angeregte Lockin Thermografie mit Halogenlampen als externe Wärmequelle und die Radioskopie. Aufgrund der physikalischen Verschiedenartigkeit der Messmethoden unterscheiden sich die Informationen, die in den verschiedenen Bildern beziehungsweise Datensätzen enthalten sind.

1.1 Optisch angeregte Lock-In Thermographie

Durch zeitlich modulierte Strahlungsanregung wird auf der Probenoberfläche eine Temperaturmodulation erzeugt. An Grenzflächen unter der Oberfläche wird diese thermische Welle reflektiert, weshalb sich diese Anregungsart gut eignet um Änderungen der thermischen Eigenschaften innerhalb der Probe aufzuspüren. Eine Prinzipskizze ist in Abbildung 1 zu sehen. Aus einer pixelweise vorgenommenen Fourieranalyse erhält man Amplitude und Phase der Wärmeantwort. Das Amplitudenbild ist abhängig von der

Lizenz: http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de

Absorption, der Emission und der Intensitätsverteilung der Strahlungsanregung. Im Phasenbild stören diese Einflüsse nicht. Der Phasenwinkel ist abhängig vom Laufweg der Wärmewelle, wodurch man Rückschlüsse auf die Tiefenlage eines Defekts ziehen kann.

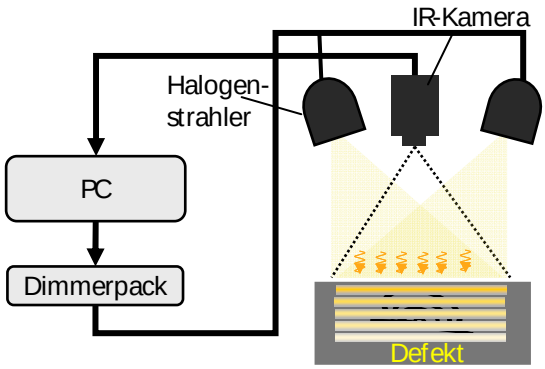

Abbildung 1: Prinzipskizze der optisch angeregten Thermographie

Die Methode eignet sich besonders für oberflächennahe Defekte und erlaubt selbst die Abbildung dünnster Schichten. Mit zunehmender Defekttiefe wird die Wärmeantwort unschärfer, womit sich tiefer liegende Defekte großflächiger und unschärfer darstellen.

1.2 Digitale projektive Radioskopie

Bei der Radioskopie erfolgt die Bildaufnahme mittels Röntgendurchstrahlung. Ein Röntgenkegelstrahl wird auf dem Weg durch den Prüfling abgeschwächt und in einem Flachbilddetektor registriert (siehe Abbildung 2). Die Intensitätsinformation in jedem Pixel hängt im Wesentlichen vom durchstrahlten Material und dessen Absorptionsvermögen ab. Man erhält somit Information aus dem Volumen des Objekts, weswegen es einen großen Unterschied macht in welcher Lage relativ zur Strahlungsquelle das Objekt aufgenommen wird.

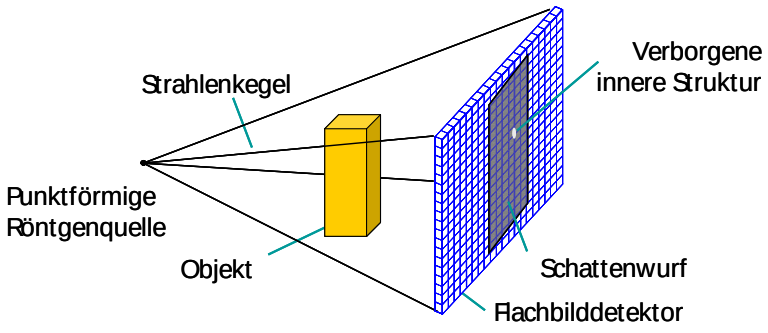

Abbildung 2: Prinzipskizze der digitalen Radioskopie

Diese Prüfmethode liefert durch die bekannte Vergrößerung genaue Information über die Geometrie des Prüfobjekts, sowie eine durch den Grauwert kodierte Information über die durchstrahlte Wanddicke des Materials. Diese Wanddickenbestimmung wird im folgenden Abschnitt ausführlicher behandelt.

2. Defekttiefenlagen- und Wanddickenbestimmung

In diesem Abschnitt wird eine Möglichkeit vorgestellt, aus Lock-In Phasenbildern die Tiefenlage von Defekten zu bestimmen. Des weiteren wird zum Vergleich ein Verfahren gezeigt, das aus digitalen projektiven Radioskopiedaten die durchstrahlte Wandstärke liefert.

2.1 Thermographische Defekttiefenlagebestimmung

Die Defekttiefenlagebestimmung in der optisch angeregten Lock-In Thermographie basiert auf einem Vergleich von berechneten Daten aus einer Modellfunktion mit kalibrierten Messdaten [5]. Die Kalibrierung basiert auf einer Referenzphasenmessung. Sie dazu dient, die Einflüsse des Laboraufbaus auszugleichen und wird unter Verwendung eines Referenzkörpers mit definierten Eigenschaften durchgeführt. Die Rekonstruktion der Tiefenlagen erfolgt aus mehreren Einzelmessungen (Profilometrie), basierend auf einem analytischen Modell der Wärmeleitung und durch eine initiale Parameterschätzung (siehe Skizze in Abbildung 3). Die Modellfunktion berechnet sich aus der Phase des Temperaturwellenfeldes:

$$\Theta = A \cdot \left(1 + R \cdot e^{\frac{-2 \cdot (1+i) \cdot d}{\mu}} \right) \qquad (1)$$

Die kalibrierte Messung wird nun mit der berechneten Antwort aus der Modellfunktion verglichen und die Parameter werden so lange variiert, bis die Abweichung minimal wird. Diese so bestimmte Defekttiefenlage wird dann ausgegeben.

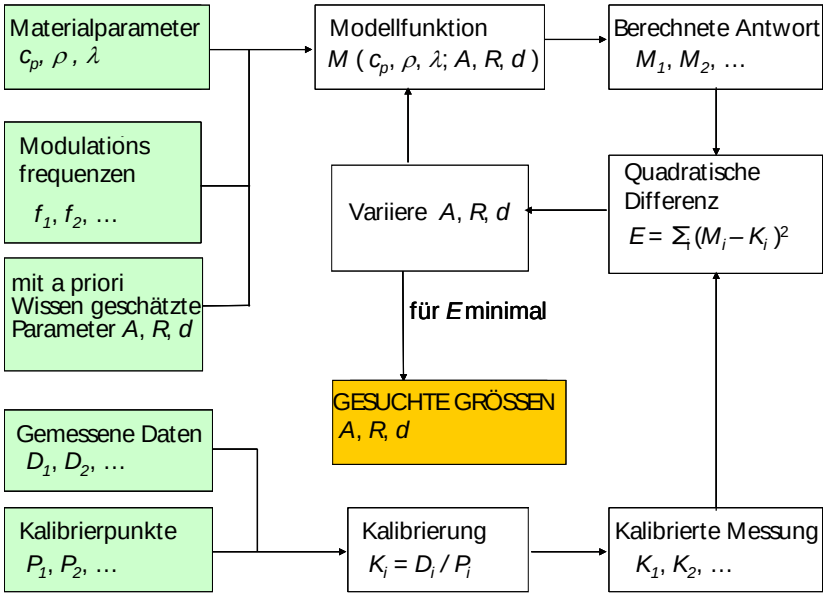

Abbildung 3: Ablaufdiagramm der thermographischen Tiefenlagebestimmung

2.2 Radioskopische Wanddickenbestimmung

Aus den Radioskopiedaten wird über die Schwächung der Röntgenstrahlung im Material die durchstrahlte Wandstärke errechnet. Dies ist für eine Parallelstrahlgeometrie in Abbildung 4 gezeigt.

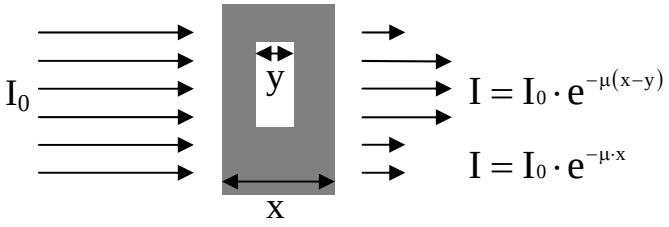

Abbildung 4: Prinzip der Strahlschwächung in der Radioskopie für Parallelstrahlgeometrie

Für die meist gebräuchliche Kegelstrahlgeometrie sind einige geometrische Korrekturen notwendig, da hier die durchstrahlte Wandstärke *x'-y'* nicht der Dicke *x-y* des Materials entspricht, wie in Abbildung 5 zu sehen ist. Daher werden zur Berechnung der Materialdicke der Fokus-Detektor-Abstand FD, sowie die Pixelanzahl des Detektors #N und die echte geometrische Größe der Pixel Δ_{px} benötigt. Zur Berechnung des Schwächungskoeffizienten μ ist die ungeschwächte Intensität I_0 und die Materialdicke im Zentralstrahl nötig.

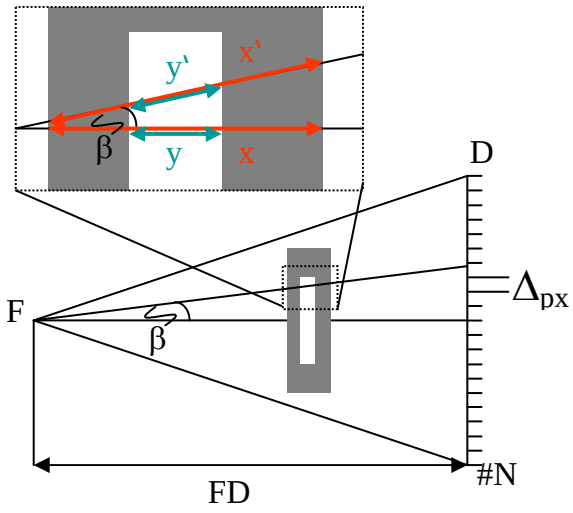

Abbildung 5: Skizze zur geometrische Korrektur für die Wanddickenbestimmung in Kegelstrahlgeometrie

Allgemein gilt für die durchstrahlte Wanddicke:

$$x'-y' = \frac{1}{\mu} \cdot \ln\left[\frac{I_0}{I}\right] \tag{2}$$

Um daraus die reale Wanddicke zu berechnen muss geometrisch mit

$$x'-y' = \frac{x-y}{\cos\beta} \tag{3}$$

korrigiert werden. Der Winkel β errechnet sich für jedes Pixel aus dessen Abstand zum Zentralstrahl und der Pixelgröße.

$$\tan\beta = \frac{(N - N/2)\cdot \Delta_{px}}{\overline{FD}} \tag{4}$$

Damit kann für jedes Pixel die reale Wanddicke berechnet werden.

$$x - y = \frac{\ln I_0 - \ln I}{\mu} \cdot \cos\left(\arctan\left(\frac{(N - N/2)\cdot \Delta_{px}}{\overline{FD}}\right)\right) \tag{5}$$

Diese Methode funktioniert nur für Lufteinschlüsse (Bläschen, Poren, Lunker), und nicht für Einschlüsse aus stärker absorbierenden Material, da nur ein Material berücksichtigt wird.

3. Ergebnisse an Faserverbundwerkstoffproben

Es wurde eine Probenplatte aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) mit rückwärtigen Sacklochbohrungen untersucht. Da in diesem Fall die Defekttiefenlage der durchstrahlten Wanddicke entspricht, sind die Profilschnittbilder vergleichbar. In Abbildung 6 ist ein Foto der Rückseite der Probenplatte (links) und eines der Vorderseite (rechts) zu sehen. Die Gesamtdicke der Probenplatte beträgt 8 mm, die Bohrungen haben eine Tiefenlage von

1 mm bis 6 mm. Die optisch angeregten Lock-In Thermographieaufnahmen wurden von der glatten Seite (Vorderseite) aufgenommen.

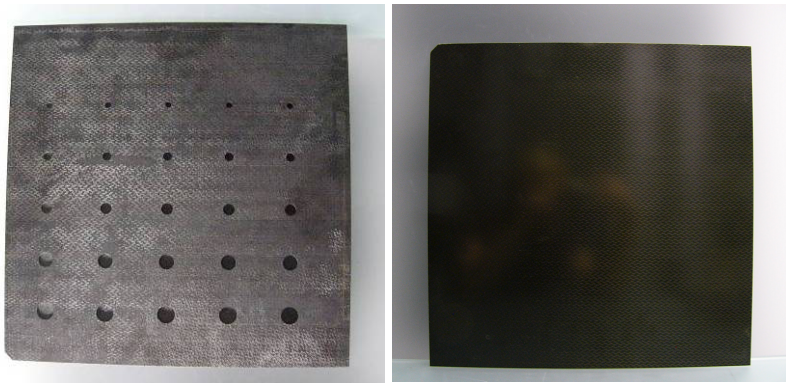

Abbildung 6: Foto der CFK Probenplatte: Rückseite (links) und Vorderseite (rechts)

Für die optisch angeregte Thermographie wurde nach oben beschriebenen Verfahren mit den Lock-In Frequenzen: 0,008 Hz, 0,01 Hz, 0,02 Hz, 0,04 Hz, 0,08 Hz, 0,1 Hz, 0,2 Hz die Tiefenlage der rückwärtigen Sacklochbohrungen von der glatten Seite aus bestimmt. Das Ergebnis dieser Berechnungen zeigt Abbildung 7 (links). Im Vergleich dazu ist in Abbildung 7 (rechts) das Ergebnis der Wanddickenberechnung der Radioskopie dargestellt. Deutlich sieht man in der Radioskopie die rechteckigen metallischen Einschlüsse, die eine höhere Absorption als das CFK aufweisen. Daher wird deren Dicke größer als in Wirklichkeit bestimmt, da das oben beschriebene Verfahren nur für homogene Werkstoffe gilt, und auf die verminderte Schwächung bei Fehlen von Material gründet. Da die Bohrungen einseitig eingebracht sind, ist sowohl die thermographisch ermittelte Tiefenlage als auch die radioskopisch bestimmte Wandstärke eine ermittelte Restwandstärke. Damit sind in diesem Spezialfall die Profile vergleichbar. In beiden Restwandstärkenbildern erkennt man bereits große Ähnlichkeit, was in den Profilschnitten in Abbildung 8 deutlicher wird.

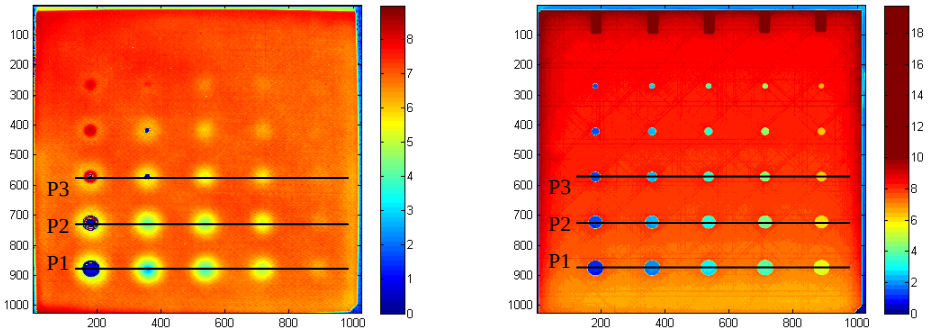

Abbildung 7: Errechnetes Defekttiefenbild aus der Thermographie (links), errechnete Restwandstärken aus der Radioskopie (rechts)

Im Profilschnitt durch die größten Bohrungen (Abbildung 8 links) ist deutlich die gute Übereinstimmung der Ergebnisse zu sehen. Je kleiner die Löcher werden, desto schlechtere Ergebnisse liefert die thermographische Tiefenlagebestimmung (siehe Abbildung 8 Mitte und rechts). Dies tritt besonders bei den tiefer liegenden Rückwandbohrungen auf, da hier ein deutliches Phasensignal der Bohrung erst bei niedrigeren Lock-In Frequenzen auftritt und das Signal sehr unscharf ist. Diese Unschärfe tritt auch bei den berechneten Tiefenlagebildern auf und ist in den Profilschnitten besonders im Vergleich zu den sehr steilen Bohrlochflanken aus der Radioskopie zu sehen.

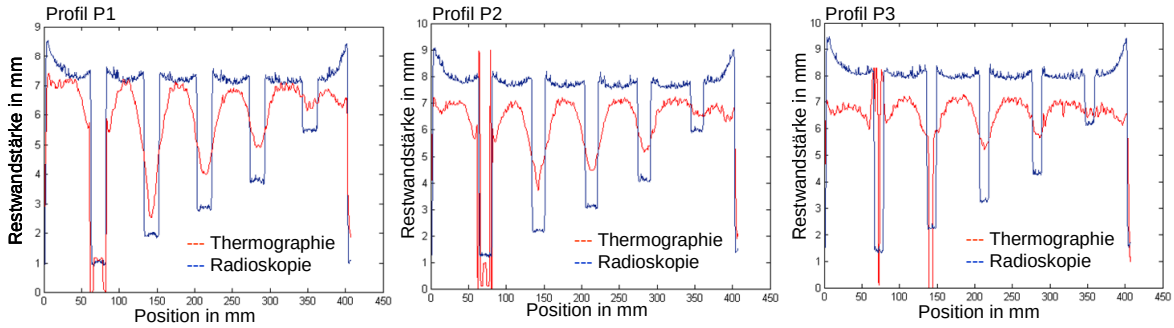

Abbildung 8: Profilschnitte durch die unteren drei Lochreihen, mit Profil P1 durch die größten Löcher (20 mm), Profil P2 (17 mm) die zweitgrößten und Profil P3 (13 mm) die mittlere Lochreihe.

Die Kombination der beiden Prüfmethoden bietet hier insbesondere die Möglichkeit die Defekttiefenlage aus der Thermographie mit einer Gesamtwandstärkenbestimmung, also dem Fehlen von Material, aus der Radioskopie zu verknüpfen, wodurch Defekte sowohl in Hinblick auf ihre Tiefenlage, als auch auf ihre Tiefenausdehnung hin, sowie ihre laterale Größe quantifiziert werden können.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Kombination von Röntgendaten mit thermographischen Profilometriedaten ist es möglich, Defektgeometrien im Prüfobjekt zu quantifizieren. Die Defekttiefeninformation aus der Thermographie wird mit der lateralen Geometrieinformation sowie der absoluten Materialstärke verknüpft, so dass Defekte genau gemessen werden können. Durch die Verknüpfung dieser beiden flächenhaften Verfahren kann die Prüfung von größeren plattenförmigen Prüflingen verbessert werden, die anderen quantifizierenden Prüfmethoden nur schwer zugänglich sind oder lange Prüfzeiten benötigen.
Des Weiteren kann diese Kombination verwendet werden, um die Unschärfe abhängig von der Tiefenlage in der Thermographie zu bestimmen, und damit die thermographische Profilometrie geometrisch zu kalibrieren. Da bisher nur die Kombination von zweidimensionalen Prüfmethoden untersucht wurde, ist es für die Zukunft eine interessante Herausforderung, die profilometrischen Thermographiedaten mit Computer-tomographiedaten zu verknüpfen und deren Chancen und Vorteile zu evaluieren.

Referenzen

[1] A. Gleiter, C. Spiessberger, G. Busse: “Phase Angle Thermography for depth resolved defect characterization” in: QIRT 2008 proceedings, S. 435
[2] C. Spiessberger, A. Gleiter, G. Busse: “Data Fusion of Lockin-Thermography Phase Images“ in: QIRT 2008 proceedings, S. 483
[3] C. Zöcke, A. Langmeier, R. Stößel, W. Arnold: “A new technique to reconstruction of the defect shape from Lock-in theromography phase images” in: QIRT 2008 proceedings, S. 507
[4] T.M. Buzug, Einführung in die Computertomographie, Springer, 2004
[5] B. v.Stackelberg, S. Hübner,T. Fuchs, U. Haßler: “Tiefenlagebestimmung in der optisch angeregten Thermographie” in: Tagungsband Thermographie-Kolloquium 2009