

Numerische Verfahren für die aktive Thermografie zur Untersuchung von Rückwandgeometrien

Regina RICHTER*, Marc KREUTZBRUCK*, Christiane MAIERHOFER*
* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Unter den Eichen 87,
12205 Berlin, Kontakt: Regina.Richter@bam.de

Kurzfassung. In diesem Beitrag werden numerische Verfahren zur Erkennung und Charakterisierung von Fehlstellen, Schichtdicken, Wanddicken und Inhomogenitäten mittels aktiver Thermografie vorgestellt. Eine quantitative Beurteilung der nicht immer zugänglichen Rückwand eines Bauteils (Minderdicken) ist durch Inversion thermografischer Messdaten möglich. Diese quantitativen Informationen können durch iterative Methoden vom Gauß-Newton-Typ (Inversion) gewonnen werden. Als reale Prüfobjekte werden ca. 2 cm dicke PVC-Platten mit örtlich variierender Rückwandgeometrie untersucht. Die Erwärmung erfolgt mit Blitzlampen, welche die PVC-Platte kurzzeitig um mehrere K erwärmt. Ein wichtiger Teil der Inversion ist die Simulation des Experiments, welche mit Finite-Elemente-Methoden (FEM) in 2D realisiert wird. Da Inversion und aktive Thermografie automatisierbar sind, bietet die Kombination breite Anwendungsgebiete innerhalb der Industrie.

Einführung

Thermografische Verfahren sind berührunglos und haben damit bei empfindlichen oder nicht direkt zugänglichen Oberflächen einen entscheidenden Vorteil gegenüber z. B. gängigen Ultraschall-Verfahren, die z. B. bei der Untersuchung von Rohrwanddicken herangezogen werden. Eine Übersicht zu Methoden der aktiven Thermografie findet man in [1], wobei der Fokus der Literatur i.A. auf der Bestimmung von Tiefe und Durchmesser innerer Defekte liegt. Theoretische Diskussionen zur Rekonstruktion einer unzugänglichen Rückwandgeometrie findet man in [2]. Rekonstruktionen mit experimentell ermittelten Messdaten, die auf dem Modell der Thermischen Welle basieren, werden in [3] und [4] gezeigt.

In diesem Beitrag werden wir Rückwandgeometrien mit einer Methode rekonstruieren, die versucht, weitgehend unabhängig von dem Modell der thermischen Welle zu bleiben und sich direkt auf die Gesetze der Wärmeleitung zu stützen. Aufgrund der Wärmeleitungsgleichung haben wir ein schlechtgestelltes, nicht-lineares Problem [5]. Solche Probleme werden i.A. als Optimierungsprobleme behandelt oder mit Methoden der Inversen Probleme angegangen. In Abbildung 1 wird der komplette Verlauf der Inversion beschrieben. Basierend auf einer Messung folgt eine erste Annahme für die Rückwandgeometrie. Anschließend wird eine Vorwärtsrechnung (Simulation) durchgeführt, die mit den ursprünglichen Messdaten verglichen wird. Aus der Abweichung erfolgt die Rekonstruktion. Vorwärtsrechnung und Rekonstruktion erfolgen iterativ. Der Kreislauf wird gestoppt, wenn Simulation und Messung gut übereinstimmen, d. h. es werden

bestimmte vorgegebene Kriterien erfüllt: Die Rückwand wurde dann aus den thermografischen Messdaten erfolgreich rekonstruiert.

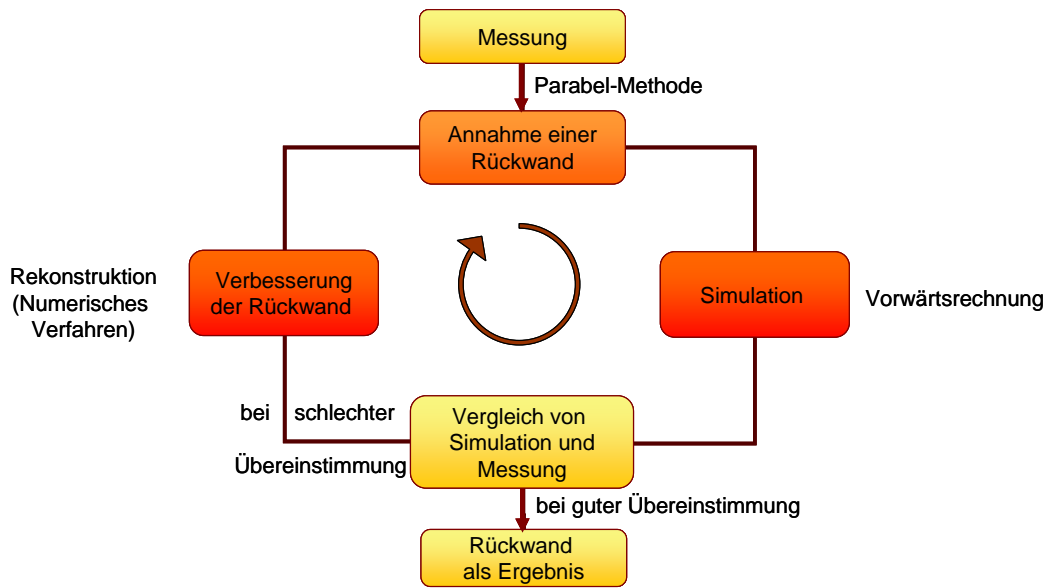


Abbildung 1. Kompletter Verlauf der Inversion

Das Herzstück der Inversion, das numerische Verfahren der Rekonstruktion, wird im folgenden Kapitel beschrieben. Die erste Annahme einer Rückwand unterscheidet sich dabei von der Rekonstruktion in den weiteren Iterationsschritten. Diese wird aus der in [3] beschriebenen Parabel-Methode direkt aus den Messdaten gewonnen. Dieser Algorithmus basiert auf dem Modell der thermischen Welle, welche senkrecht auf die Rückwand trifft und dort reflektiert wird. Die Vorwärtsrechnung berechnet mittels der Wärmeleitungsgleichung und FEM die Temperatur, die sich auf der Oberfläche und im Inneren des Probekörpers mit der aktuell angenommenen Rückwandgeometrie ergeben würde, Details in Kapitel 2.3 Simulation. Die Übereinstimmung von Simulation und Messdaten kann anhand der Summe der quadratischen Fehler - punktweise in Ort und Zeit – bewertet werden, um den Kreislauf der Inversion im Falle einer guten Übereinstimmung zu beenden.

1. Verbesserung der Rückwand durch ein Numerisches Verfahren der Inversion

Das hier eingesetzte Numerische Verfahren der Inversion basiert auf dem iterativen Verfahren vom Gauß-Newton-Typ, s. Abbildung 2, welches zu den typischen Verfahren der Inversion zählt und breite Anwendung, z.B. in der Geophysik, gefunden hat. In jedem Iterationsschritt wird durch den Vergleich des simulierten und des experimentellen Temperaturverlaufs eine Korrektur der vorgeschlagenen Rückwandgeometrie vorgenommen. Die Vektorfunktion F bezeichnet die eindeutige Zuordnung von Probekörpergeometrie (d.h. Wanddicke) zu Temperaturverteilung (örtlich und zeitlich auf der Vorderseite), wobei die Eindeutigkeit eine Folge von bekannten physikalische Gesetzmäßigkeiten ist, wie z.B. der Wärmeleitungsgleichung. Die Ableitung von F ist eine nicht-quadratische Matrix, welche pseudo-invertiert wird und dann mit einem hochgestellten $+$ markiert wird.

Die Messung findet in Reflexion statt: An der defektfreien Vorderseite des Probekörpers erfolgt zugleich die kurzzeitige Erwärmung durch Blitzlampen und die Messung der Temperatur, siehe Abbildung 5 und 6. Die Bildrate der Infrarotkamera liegt bei 1 Hz (durch Mittelung von 93 Bildern, die mit 93 Hz aufgenommen wurden) und ihre Bildgröße bei ca. 490 x 490 Pixel.



Abbildung 5. *Messaufbau.* Die Erwärmung erfolgt mit 2 Blitzlampen der Firma Hensel Studiotechnik, welche den Probekörper kurzzeitig um mehrere K erwärmen. Die Abkühlung wird mit der InSb-Kamera 640 SM von Thermosensorik aufgenommen.

2.2 Durchführung der Messung

Bei der Messung gab es verschiedene Versionen der Konfiguration, was die Anzahl der Messungen und den Standort der Blitzlampen betrifft, s. Kapitel 2.4 Auswertung.

Das Thermogramm in Abbildung 7, welches die Kamera 60 s nach dem Auslösen des Blitzes aufgenommen hat, zeigt, dass die PVC-Platte über dem Defekt wärmer ist. Durch Mittelung entlang der Nutfräsung (entlang z) der PVC-Platte verringern wir das Rauschen der thermografischen Daten.

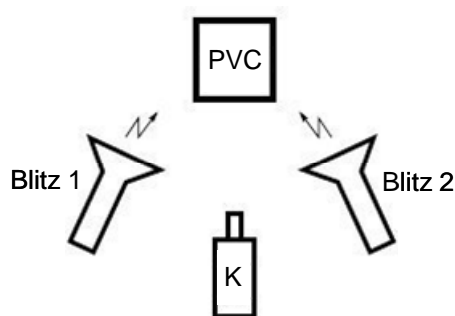


Abbildung 6. *Skizze* der Messung in Reflexion an der glatten Vorderseite der PVC-Platte. K steht für die Infrarotkamera.

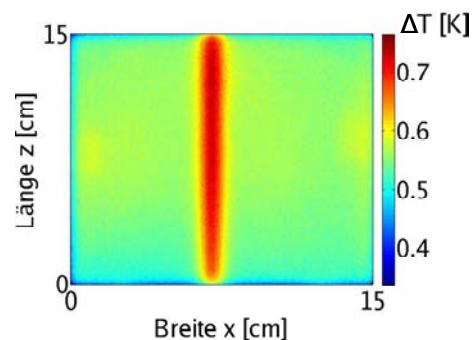


Abbildung 7. *Thermogramm* der erwärmten PVC-Platte für den Zeitpunkt $t = 60$ s nach dem Auslösen des Blitzes. Das Falschfarbenbild zeigt die Temperaturdifferenz der PVC-Platte zur Raumtemperatur.

2.3 Simulation

Die Simulations-Software Comsol benötigt 3,5 min für die 2D-Vorwärtsrechnung (PC mit 12 Kernen). Abbildung 8 zeigt die berechnete Temperatur im Inneren des 2D-Probekörpers

für den Zeitpunkt $t = 60$ s nach einer pulsartigen Erwärmung der Dauer $\Delta t = 170$ ms an der Vorderseite $y = 0$. Die Raumtemperatur (RT) beträgt $26,0^\circ\text{C}$.

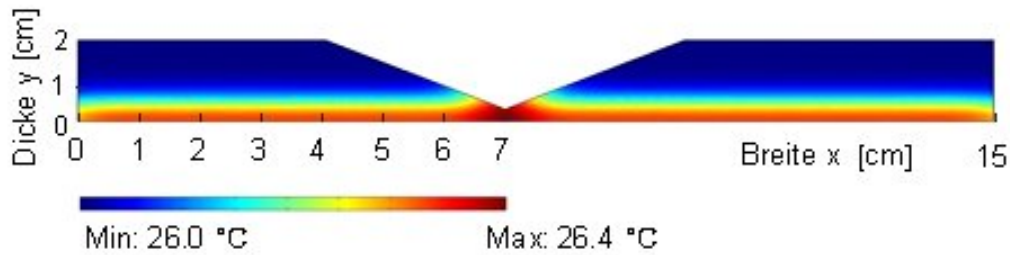


Abbildung 8. *Simulation des Temperaturverlaufs mit Comsol für $t = 60$ s und $RT = 26^\circ\text{C}$. Die Wärme, die an der Unterkante - d.h. Vorderseite - des Probekörpers aufgebracht wurde, ist ins Innere gedrungen. Die Maximaltemperatur befindet sich auf der Vorderseite bei $x = 7$ cm, wo die Minderdicke nur 3 mm beträgt. Der Grund ist die Reflexion der thermischen Welle an der Rückwand.*

2.4 Auswertung

Im Algorithmus ist festgelegt, dass die Wanddicke den Maximalwert von 2 cm nicht überschreitet. Der Kreislauf der Inversion wurde nach 16. Iterationen beendet, da die Rückwandgeometrie sich nach den ersten 8 Iterationen kaum noch geändert hat. Die cm-Auflösung der Rekonstruktion sorgt - im Vergleich zu einer feineren Auflösung - für eine kurze Auswertungsdauer von ca. 2 h. Das Abbruchkriterium des Kreislaufes (Diskrepanzprinzip, wie in der Einleitung beschrieben) kann damit definiert werden. Bei der Auswertung der thermografischen Daten eines einzigen Experimentes erhalten wir eine erste Rekonstruktion der Wanddicke, Abbildung 9. Die Rekonstruktion zeigt zwar schon recht gut den Ort des Defektes, stimmt mit der tatsächlichen Geometrie aber noch nicht gut überein (quadratischer Mittelwert der Abweichung $\pm 1,7$ mm, max. Abweichung 8 mm).

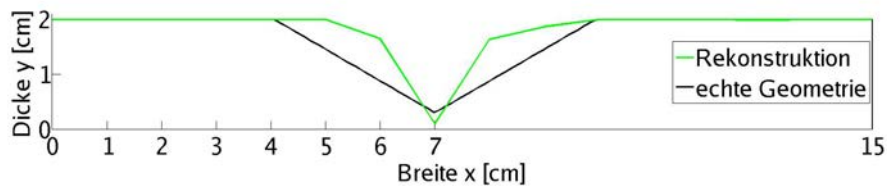


Abbildung 9. *Rekonstruktion der Rückwand mittels thermografischer Messdaten aus einem **einzigem Experiment**. Der Vergleich mit den bekannten Maßen des Profils zeigt, dass die Wand sehr gut rekonstruiert wird, wenn kein Defekt vorhanden ist, jedoch die Nut nur mäßig gut rekonstruiert wird.*

Gründe für die Abweichung:

- Vorwärtslösung geht von idealer (homogener) Erwärmung aus
- Signal-Rausch-Verhältnis ist im Falle der geringen Erwärmung bei einer Einzelmessung unzureichend. Die Erwärmungsquellen dürfen jedoch nicht näher an die PVC-Platte gestellt werden, um eine inhomogene Erwärmung zu verhindern und chemische Veränderungen des PVCs durch Überhitzung zu vermeiden.

Lösungsansatz:

- Wiederholungsmessungen mit Austauschen der Blitze 1 und 2 (Abbildung 6)

Das Ziel, die Wanddicke zuverlässig zu bestimmen, erreichen wir durch eine Mittelung von 20 Messungen mit Austausch der Blitze. Durch Mittelung der Daten verringert sich nicht nur die Auswirkung der leicht inhomogenen Wärmeverteilung, sondern auch das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert sich. Somit ist es möglich, die Wanddicke sehr gut für jede Defekttiefe zu rekonstruieren (quadratischer Mittelwert der Abweichung $\pm 0,6$ mm, max. Abweichung von 1,8 mm), Abbildung 10.

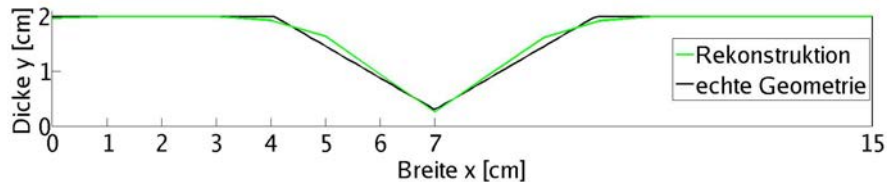


Abbildung 10. Rekonstruktion der Rückwand mittels gemittelter thermografischer Messdaten aus **20 Experimenten**. Der Vergleich mit den bekannten Maßen des Profils zeigt, dass die komplette Wand sehr gut rekonstruiert wird.

3. Zusammenfassung und Ausblick

Das numerische Inversionsverfahren vom Gauß-Newton-Typ mit einer Tikhonov-Regularisierung hat sich bei 2D-Rekonstruktionen im Falle von 20 gemittelten Wiederholungen von Messungen mit Blitzlampentausch als erfolgreich erwiesen. Die Wanddicke kann bei maximal 2 cm dicken PVC-Platten fast auf mm-Genauigkeit (max. Abweichung 1,8 mm) aus thermografischen Daten rekonstruiert werden. Die Rekonstruktion dauert dank effizienter Approximation der Ableitung (Broyden-Verfahren) insgesamt ca. 2 h für die hier gewählte cm-Auflösung. Als nächstes möchten wir die Inhomogenität der Erwärmung in die Simulationen einbeziehen. Es werden weitere Probekörpergeometrien rekonstruiert, um die Güte der Rekonstruktion für vielfältige Anwendungen gewährleisten zu können. Wir werden u.U. schnellere numerische Verfahren, wie das Verfahren der konjugierten Gradienten, anwenden und optimieren.

Dank

Für ihre fachliche Unterstützung danken wir unseren Kollegen Dr. M. Ziegler, Herrn Dipl.-Ing. M. Röllig, Herrn Dipl.-Ing. H. Steinfurth, Dr. G. Kervalishvili, Dr. M. Blome, Dr. R. Krankenhagen, Herrn Dipl.-Math. J. Offtermatt und Prof. Dr. B. Kaltenbacher.

Referenzen

- [1] J. G. Sun, *Analysis of Pulsed Thermography Methods for Defect Depth Prediction*, J. Heat Transfer, 128, Nr.4, 329-338, 2005
- [2] K. Bryan, L. Caudill, *Reconstruction of an unknown boundary portion from Cauchy data in n dimension*, Inverse Problem 21 (2005), 239-255
- [3] S. Lugin, U. Netzelmann, *A defect shape reconstruction algorithm for pulsed thermography*, NDT&E International 40 (2007), 220-228
- [4] S. Götschel, M. Weiser, C. Maierhofer, R. Richter, M. Röllig, *Fast defect shape reconstruction in travel time pulsed thermography*, to be printed in NDTMS 2011
- [5] A. Rieder, *Keine Probleme mit Inversen Problemen*, Vieweg, 2003
- [6] B. Kaltenbacher, A. Neubauer, O. Scherzer, *Iterative Regularization Methods for Nonlinear Ill-Posed Problems*, de Gruyter (2008)