

Neue Algorithmen für die dynamische Thermographie und ihre Anwendung

Sergey LUGIN, Michael KRÖNING und Udo NETZELMANN, Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Saarbrücken

Kurzfassung. Für die Pulsthermographie werden neue Algorithmen für die Rekonstruktion der Fehlerform und für die Datenkompression vorgeschlagen. Der Algorithmus für die Rekonstruktion der Fehlerform basiert auf einem iterativen Ansatz unter Verwendung eines numerischen Simulationsmoduls und kann sowohl 2D- als auch 3D-Fehlerformen rekonstruieren. Er wurde an experimentellen Daten getestet, die an einer Platte aus rostfreiem Stahl mit einem definierten Wandstärkenprofil gewonnen wurden. Die Rekonstruktion der Fehlergestalt erwies sich als schnell konvergierend und genau. Für die Kompression von thermographischen Bildsequenzen wurden zwei Algorithmen entwickelt. Der erste arbeitet verlustbehaftet und erreicht bei hohen Kompressionsverhältnissen eine sehr treue Reproduktion der Originaldaten. Der zweite Algorithmus wurde für verlustfreie Kompression ausgelegt. Beide Algorithmen wurden an typischen Bildsequenzen der dynamischen Thermographie getestet, wobei die erreichten Kompressionsverhältnisse denen von existierenden Algorithmen signifikant überlegen waren.

1. Einführung

Die Pulsthermographie (PT) ist eine zerstörungsfreie Prüftechnik, die auf einer kurzen thermischen Stimulation eines Prüfobjekts und der nachfolgenden Beobachtung des Abkühlprozesses basiert [1]. Durch ihre speziellen Eigenschaften wie der berührungsfreien Arbeitsweise, der großflächigen Prüfung und durch hohe Prüfgeschwindigkeiten hat diese Technik bereits in den letzten Jahren große Aufmerksamkeit und einige industrielle Anwendungen gefunden. Der Messaufbau für PT besteht aus einer Heizquelle (in vielen Fällen werden Blitzlampen genutzt), einem Infrarotdetektor (Infrarotkamera), mit dem der Abkühlprozess beobachtet wird und einem Bilddatenrekorder. Diese Art der Prüfung wird z. B. für den Nachweis von oberflächennahen Fehlern, Einschlüssen und Schichtablösungen verwendet. Andere Anwendungen zielen auf die Werkstoffcharakterisierung. Der Prüfungsvorgang besteht gewöhnlich aus drei Phasen: 1) Thermische Anregung, 2) Aufzeichnung der thermischen Antwort und 3) Datenanalyse.

Das erste Problem, das hier betrachtet wird, ist die Rekonstruktion der Fehlerform von verdeckten Fehlern aus den Daten der gepulsten Thermographie. Als Lösung wird ein iterativer Rekonstruktionsalgorithmus vorgeschlagen [2]. In Hinblick auf die Anwendungsfelder kann man feststellen, dass dieser Algorithmus in nahezu allen Situationen angewandt werden kann, wo die Fehlertiefe oder die Fehlerform von Interesse ist. Zum Beispiel kann er im Kraftwerks- oder Luftfahrtbereich eingesetzt werden, um Restwandstärken über Kühlkanälen an Turbinenschaukeln zu bestimmen [3] oder um Innenkorrosion an Flugzeugwänden zu vermessen [4]. Diese Techniken können im Rahmen einer vorbeugenden Instandhaltung helfen, Wartungskosten zu reduzieren.

Das zweite hier betrachtete Problem ist die effiziente Datenkompression. Während der Prüfung zeichnet die Thermographiekamera eine Bildsequenz auf, die die Temperaturstrahlungsverteilung der zu prüfenden Oberfläche als Funktion der Zeit darstellt. Eine typische Bildsequenz enthält 100-400 Einzelbilder, die eine erhebliche Menge an Speicherplatz im Rohdatenformat erfordern. Bei der Prüfung von Massenteilen wird dadurch eine vollständige Dokumentation der Rohdaten unter Umständen aufwändig. Um das Problem zu lösen, wird hier ein verlustbehafteter und ein verlustfreier Kompressionsalgorithmus vorgeschlagen [5].

2. Rekonstruktion der Fehlerform

In der Literatur wird das Problem der Fehlerrekonstruktion bei der PT hauptsächlich für zwei spezielle Fälle diskutiert: Zum einen die Flachbodenbohrung [6] und zum anderen der ebene, ausgedehnte Fehler [7]. An dieser Stelle betrachten wir jedoch den Fall eines Fehlers mit variierender Tiefe und Größe. Soweit den Autoren bekannt, wird nur in einer einzigen Arbeit dieses Problem (aus dem Blickwinkel der angewandten Mathematik) betrachtet und ein Rekonstruktionsalgorithmus beschrieben [8]. Die hier vorgeschlagene Lösung [2] zeichnet sich demgegenüber durch deutlich geringeren Rechenaufwand aus und liefert eine höhere Rekonstruktionsgenauigkeit.

Bevor der Algorithmus beschrieben wird, seien zwei Bemerkungen zur PT vorangestellt. Zum einen hängen bei der PT die Fehlernachweisbarkeit und die laterale Auflösung stark von der Tiefe ab. Betrachtet man Fehler von der Art von Flachbodenbohrungen, so besagt eine empirische Regel, dass der Radius des kleinsten nachweisbaren Fehlers mindestens doppelt so groß wie seine Tiefe unter der Oberfläche sein sollte [9]. Diese Regel vermittelt einen Eindruck von der Tiefenabhängigkeit des Nachweisvermögens. Zum anderen handelt es sich bei der Fehlerrekonstruktion um ein mathematisch schlecht gestelltes Problem. Dies bedeutet, dass zwei oder mehrere ähnliche Fehlerformen eine nahezu identische Temperaturantwort an der Probenoberfläche erzeugen können. Beide beschriebenen Eigenschaften sind prinzipieller Art und hängen mit der Natur des thermischen Diffusionsprozesses zusammen. Um die daraus resultierenden Einschränkungen bei der Entwicklung des Rekonstruktionsalgorithmus zu berücksichtigen, wird im Folgenden angenommen, dass die Fehler das oben gegebenen Auflösungskriterium erfüllen und außerdem die Fehlerform einen glatten Verlauf hat (keine scharfen Kanten beinhaltet).

Der vorgeschlagene Algorithmus rekonstruiert die Fehlerform in einer ansonsten homogenen Probe. Es wird angenommen, dass die thermischen Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Dichte) und die Geometrie der fehlerfreien Probe (Länge, Breite und Dicke) bekannt sind. Die thermischen Eigenschaften des Fehlers seien ebenfalls bekannt. Dabei kann der Fehler jede Art von Einschluss, innerem Hohlraum oder korrosionsbedingter Veränderung sein. Der Algorithmus ist grundsätzlich geeignet, eine Rekonstruktion in zwei oder drei Dimensionen durchzuführen.

2.1 Die Struktur des Algorithmus

Der entwickelte Algorithmus hat eine Struktur wie in Abb. 1 dargestellt. Er besteht aus einem Modul für die Korrektur der Fehlerform und einem Modul für die Simulation.

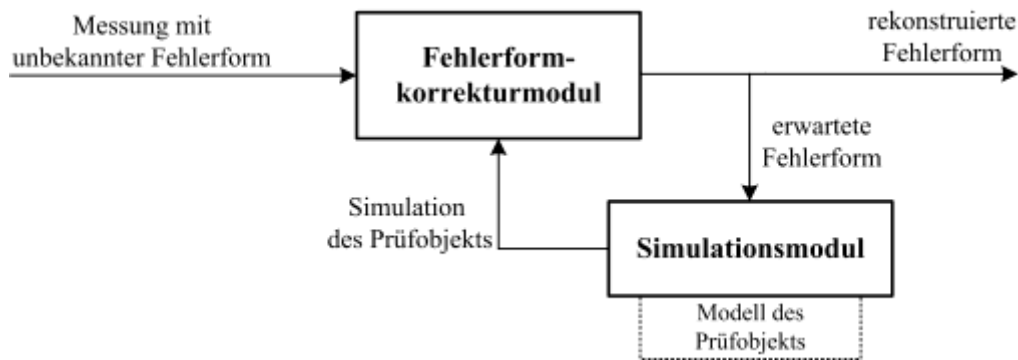


Abb. 1: Die Struktur des Algorithmus

Das Simulationsmodul basiert auf einem Modell des Prüfobjekts (Kenntnis der thermischen und geometrischen Größen) und kann das PT Experiment modellieren. Der Algorithmus arbeitet wie folgt: Das Messergebnis der PT mit der zunächst unbekannt Fehlerform wird von einem Korrekturmodul für die Fehlerform bearbeitet. Als Startpunkt erzeugt das Modul aus den Messdaten eine erste Annäherung an die Fehlerform und leitet sie an das Simulationsmodul weiter. Das Simulationsmodul setzt die genäherte Fehlerform in das Modell des Prüfobjekts ein und simuliert ein PT Experiment. Das berechnete Ergebnis wird anschließend an das Modul für die Korrektur der Fehlerform gesendet. Das Modul korrigiert die genäherte Fehlerform, nachdem es den Unterschied zwischen Messergebnissen und simuliertem Ergebnis vergleicht. Die korrigierte Fehlerform wird wieder an das Simulationsmodul gesendet. Der Prozess wird sinngemäß fortgeführt, indem die Fehlerform iterativ korrigiert wird bis sie schließlich zum Messergebnis hin konvergiert. Dabei sind nur einige wenige Iterationszyklen nötig, um die rekonstruierte Fehlerform zu erhalten.

Kern des Algorithmus ist es, eine Fehlerform zu finden, die in der Simulation dieselbe Oberflächentemperaturverteilung erzeugt wie die Messung.

2.1.1 Modul zur Korrektur der Fehlerform

Das Korrekturmodul für die Fehlerform hat zwei Aufgaben. Zu Beginn der Rekonstruktion erzeugt es eine erste Näherung der Fehlerform, und nach jeder Simulation korrigiert es diese Form. Beide Aufgaben basieren auf an sich bekannten Ansätzen, bei denen aus einer Analyse der Temperaturabklingkurven zu einer möglichst frühen Zeit Informationen gewonnen werden, bei der noch relativ wenig Verschmierung durch den thermischen Diffusionsprozess vorhanden ist.

An dieser Stelle wird der Begriff der *Echofehlerform* eingeführt (echo defect shape, EDS) [2]. Die Echofehlerform wird an allen Orten bestimmt, an denen eine Projektion des Fehlers auf die Oberfläche erscheinen würde. Zweck ist es, den Fehler zu detektieren und seine Tiefe unter der Oberfläche so zu bestimmen, als würde es sich um ein eindimensionales Problem handeln. Es spielt dabei keine Rolle, ob eine zwei- oder dreidimensionale Fehlerform vorliegt. Die EDS beinhaltet jedoch tatsächlich Information, die sowohl von am Fehler reflektierten Wärmeströmen in Normalenrichtung als auch von Wärmeströmen in lateralen Richtungen stammt.

Bei der ersten Simulation nutzt das Modul für die Korrektur der Fehlerform die berechnete EDS als anfängliche Fehlerform. Nachdem die erste Simulation berechnet wurde, analysiert das Modul die Temperaturverteilung aus dem Experiment mit der unbekannt Fehlerform im Vergleich zur Simulation mit der bis dahin bekannten Fehlerform. Zur Verfeinerung der Rekonstruktion addiert das Modul die Differenz der EDS

aus der Messung und der EDS aus der Simulation zur EDS der letzten Simulation. Da die EDS, wie oben erwähnt, Information aus normalen und lateralen Reflexionen von Wärmeströmen enthält, kann man davon ausgehen, dass bei erzielter Konvergenz das Modell alle normalen und lateralen Wärmeströme korrekt beinhaltet, mithin die EDS der Simulation auch die tatsächliche Fehlerform beschreibt.

2.1.2 Simulationsmodul

Das Modul simuliert die Wärmeleitungsvorgänge während der Pulsthermographie. Dazu setzt es Finite Elemente oder Finite Differenzen Methoden ein. Die wesentlichen Eingangsparameter in diesen Simulationen sind die Anregungszeit und -energie, thermische Eigenschaften des Prüfobjekts und des Fehlers sowie geometrische Abmessungen der Probe. Vor einer Rekonstruktion sollte gezeigt werden, dass das Simulationsmodul identische Ergebnisse zum Experiment an einer fehlerfreien oder genau bekannten Probe liefert, da nur dann der Rekonstruktionsalgorithmus genaue Ergebnisse liefern kann.

2.2 Ergebnisse der experimentellen Rekonstruktion von Fehlern

Unter realen experimentellen Bedingungen treten einige Erschwernisse wie Detektorrauschen, lateral ungleichmäßige Aufheizung und Pixelfehler des Kamerabildes auf. Diese können die Rekonstruktion stören. Um diese Einflüsse zu unterdrücken, wurde jede Messung in folgender Weise vorverarbeitet: 1) Medianfilterung der Bilder zur Entfernung defekter Pixel, 2) Tiefpassfilterung der Bilder zur Rauschunterdrückung, 3) Kompensation der ungleichmäßigen Aufheizung durch eine Referenzmessung. Danach konnte der Rekonstruktionsalgorithmus angewandt werden.

Um den Algorithmus unter Laborbedingungen zu testen, wurde eine Flachprobe aus Edelstahl (V2A) angefertigt, die auf der Rückseite ein zweidimensionales Profil aufweist, das eine Rückwandkorrosion simuliert (Abb. 2). Daneben war eine Referenzprobe mit konstanter Dicke aus demselben Werkstoff vorhanden. Die Probenabmessungen waren 100 mm x 100 mm, die Probendicke war 5 mm. Um die optische Absorption und Emission zu erhöhen, wurden die Probenvorderseiten mit einer dünnen Schicht aus schwarzem Lack versehen.

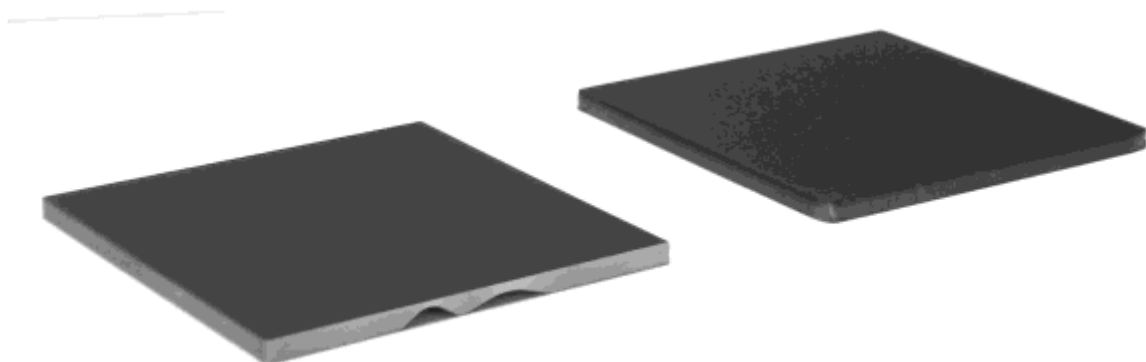


Abb. 2: Fotos der Stahlprobe mit einer künstlich erzeugten Korrosionskontur (links) und der Referenzprobe (rechts)

Nach diesen Probenvorbereitungen wurden die PT Messungen mit folgenden Parametern durchgeführt: Bildabstand 10 ms, 300 Einzelbilder, Aufheizzeit etwa 10 ms. Da zur Zeit der Experimente nur eine einzelne, seitlich einstrahlende Blitzlampe zur Anregung

zur Verfügung stand, war die Aufheizung ziemlich inhomogen und erforderte die erwähnte Korrektur. Aus den Messdaten wurde eine Zeile quer zum Rückwandprofil ausgewählt und für die Rekonstruktion verwendet. Der Algorithmus konnte die Fehlerform mit zufriedenstellender Genauigkeit rekonstruieren. Dies zeigt Abb. 3, in der im Querschnittsbild die reale Fehlerform (durchgezogene Linie) und die EDS (gestrichelte Linien) als Startwert und in drei Rekonstruktionsschritten dargestellt sind.

Die hier durchgeführte Rekonstruktion wurde unter Verwendung eines kommerziellen Finite Elemente Programms auf einem PC nach derzeitigem Stand der Technik (Pentium 3,06 GHz, 512 MB RAM) durchgeführt. Das Gittermodell hatte etwa 5500 Finite Elemente, die drei Iterationen benötigten drei Minuten.

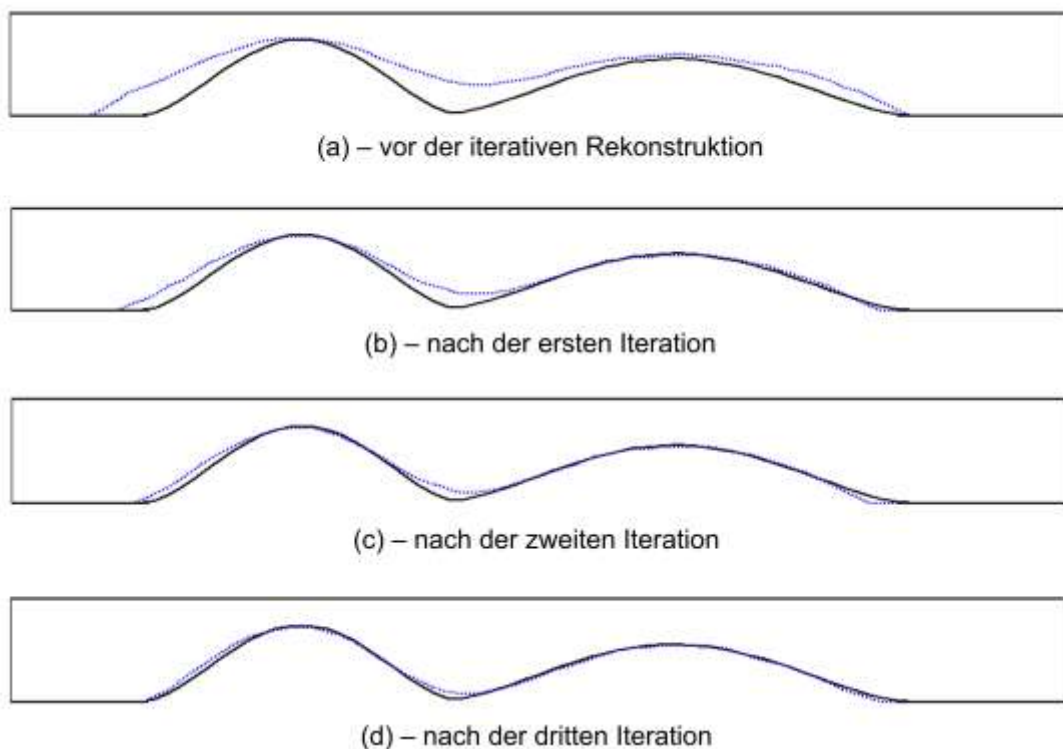


Abb. 3: Der Rekonstruktionsprozess der Rückwandform der Stahlprobe, dargestellt in vier Phasen

3. Datenkompression

Das zweite in diesem Beitrag beschriebene Problem ist das der effizienten Datenkompression bei der Pulsthermographie. Die im Rohdatenformat gespeicherten Bildsequenzen verbrauchen sehr viel Speicherplatz. Allerdings können PT Daten effizient komprimiert werden. Grundsätzlich ist das Problem ähnlich zu dem der Videodatenkompression, für das zahlreiche numerische Lösungen bekannt sind [10]. Derzeit verbreitete Videocodecs sind DivX (MPEG-4) und H.263. Allerdings sind die frei erhältlichen Versionen inkompatibel zu typischen Datenformaten von Infrarotkameras.

Es wurde sowohl ein verlustbehafteter als auch ein verlustfreier Kompressionsalgorithmus für PT Bildsequenzen entwickelt [5]. Im Falle des verlustbehafteten Algorithmus wurde ein reiner verlustbehafteter Bildkompressionsalgorithmus (JPEG2000) [11] in einer besonderen Weise für die Kompression der PT Bildsequenzen angewandt. JPEG2000 wurde wegen des hohen

Kompressionsverhältnisses und der hohen Reproduktionstreue gewählt. An anderer Stelle wurde der neu entwickelte Algorithmus auch mit DivX im Grauwertmodus [12] und mit der für die PT vorgeschlagenen TSR (Thermographic Signal Reconstruction) Methode [13] kritisch verglichen. Im Falle der verlustfreien Technik wurde wiederum ein konventioneller Kompressionsalgorithmus (ZIP) in Kombination mit einer speziellen Datentransformation vorgeschlagen, was ebenfalls das Kompressionsverhältnis erhöht. Beide Algorithmen wurden mit typischen experimentellen Thermographiedaten getestet.

3.1 Verlustbehaftete Datenkompression

Ein herausragender Aspekt dieses Algorithmus ist es, die räumliche und zeitliche Information in den Abkühlsequenzen geeignet zu kombinieren. Der nachfolgend angewandte JPEG2000 Algorithmus komprimiert dann sowohl zeitlich als auch räumlich variierende Daten.

Zur Kompression der Rohdaten werden drei Schritte durchgeführt:

1) Extraktion des dynamischen Anteils in den Daten

In diesem Schritt wird bereits ein großer Teil der Redundanz der Rohdaten reduziert.

2) Space/time mapping (STM)

Durch eine spezielle Abbildung wird der dynamische Anteil der Bildsequenz in ein einzelnes Bild mit langsam räumlichen Veränderungen transformiert.

3) JPEG Kompression

Das erhaltene Bild wird mit dem Algorithmus JPEG2000 komprimiert.

Diese Schritte sind in [5] detailliert beschrieben.

Um die Effizienz des Algorithmus zu bewerten, wurden die Kompressionsergebnisse mit denen der TSR Methode [13] und mit der Anwendung von DivX Codecs [12] verglichen. Die TSR Methode unterwirft die Abklingkurven einer logarithmischen Transformation und approximiert sie dann durch ein Polynom. Die Anwendung des DivX Codecs ersetzt die oben beschriebenen Schritte 2 und 3. Letzteres wurde durchgeführt, um die Effizienz des STM in Verbindung mit JPEG2000 zu demonstrieren.

Zur experimentellen Verifikation dienten zwei Bildsequenzen, die mit Pulsthermographie an Proben mit künstlichen Fehlern in PVC und in PE erhalten wurden. Als Fehler dienten längliche Nuten in PVC (Probe 1) und Flachbodenbohrungen verschiedener Tiefe in PE (Probe 2). Nach Kompression der Rohdaten und anschließender Expansion wurde der Reproduktionsfehler mit Hilfe eines Maßes RMSE, des mittleren quadratischen Fehlers über der lokalen Temperaturabklingkurve, bewertet. Aus diesen pixelweise bestimmten Fehlern kann für die verglichenen verlustbehafteten Kompressionsverfahren wiederum ein Grauwertbild erzeugt werden, das bei idealer Reproduktionstreue schwarz wäre (Abb. 4). Tatsächlich treten jedoch Abweichungen und Artefakte bei der Reproduktion auf, die teilweise an den Fehlerorten besonders hoch sind. Aus Abb. 4 und auch aus Tabelle 1 geht jedoch hervor, dass die STM-JPEG Technik das höchste Kompressionsverhältnis bei niedrigsten Kompressionsverlusten aufweist.

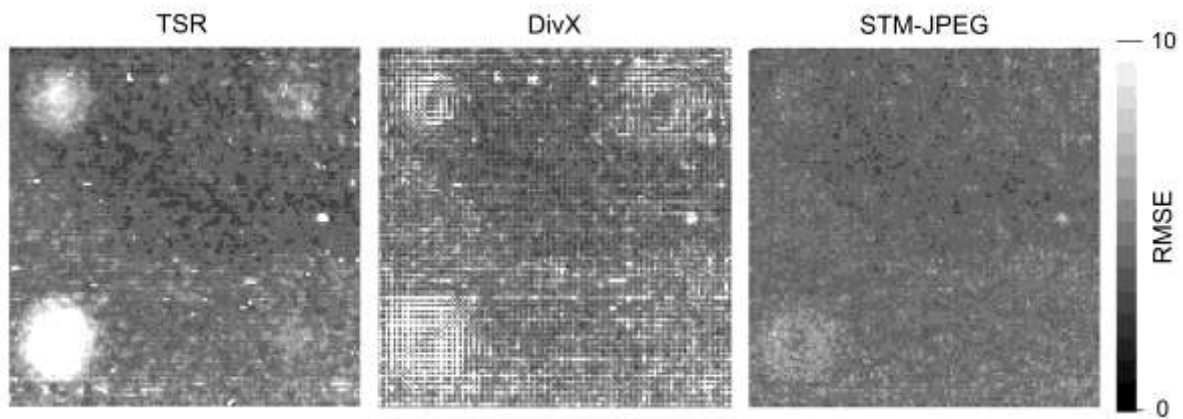


Abb. 4: Darstellung der lokalen Kompressionsverluste über der Probe 2 für die drei verglichenen Algorithmen

Tabelle 1: Ergebnisse der verlustbehafteten Kompression
(RL ist der über das Bild gemittelte Reproduktionsfehler)

Probe		Algorithmus		
		TSR	DivX	STM-JPEG
Probe 1	Dateigröße, KB	320	33	32
	Kompressionsverluste (RL)	5,95	10,32	5,50
Probe 2	Dateigröße, KB	320	59	59
	Kompressionsverluste (RL)	5,02	5,5	4,55

3.2 Verlustlose Datenkompression

Das Problem der verlustfreien Datenkompression wurde in der Literatur breit behandelt. Heute sind die bekanntesten Algorithmen unter den Namen Huffman, LZW und "arithmetic coding" bekannt [14]. Bei den verschiedenen Ansätzen sind die erzielbaren Kompressionsverhältnisse stark von den Daten abhängig. Insbesondere eine hohe Zahl von Wiederholungen von Zahlenwerten oder Mustern begünstigt ein hohes Kompressionsverhältnis. Daher wird mit geeigneten Transformationen gelegentlich die Zahl der Wiederholungen erhöht. In Pulsthermographiedaten ist die Zahl der natürlichen Wiederholungen eher gering. Daher wird auch bei dem hier vorgeschlagenen Algorithmus eine spezielle Transformation verwendet. Sie wird als "dynamically changing data transformation (DCDT)" bezeichnet. Es schließt sich eine wohlbekannte ZIP-Kompression [15] an. Alle Schritte sind im Detail in [5] beschrieben.

Auch dieser Algorithmus wurde auf die oben beschriebenen, an den Proben 1 und 2 erhaltenen Thermographiebildsequenzen angewandt. Gegenüber der reinen ZIP-Kompression ist der Vorteil durch die vorangehende Transformation in Tabelle 2 deutlich erkennbar.

Tabelle 2: Ergebnisse der verlustfreien Kompression

Probe	Dateigröße, MB		
	Daten in Rohformat (unkomprimiert)	ZIP Kompression	DCDT-ZIP Kompression
Probe 1	5,88	3,15	1,55
Probe 2	3,06	1,37	0,84

4. Zusammenfassung und Ausblick

Ein neuer Algorithmus für die Fehlerrekonstruktion wurde vorgestellt, der iterativ auf der Basis von Simulationen des Pulsthermographieexperiments arbeitet. Auch wenn bisher nur die Rekonstruktion eines zweidimensionalen Fehlers demonstriert wurde, kann er auch auf kompliziertere Fehlerformen angewandt werden und unterstützt so die Fehlerbewertung bei der aktiven Thermographie. Die Robustheit und schnelle Konvergenz wurde an Hand von experimentellen Daten an simulierten Korrosionsproben demonstriert.

Für die Zukunft ist geplant,

- den Algorithmus auf die Bestimmung der Wandstärke über Kühlkanälen in Turbinenschaufeln anzuwenden
- die Rekonstruktion auch auf Proben mit unbekanntem (thermischen) Fehlereigenschaften zu erweitern.

Neue Algorithmen wurden auch für die verlustbehaftete und verlustfreie Kompression von Bildsequenzen der Pulsthermographie entwickelt. Der STM-JPEG Algorithmus kombiniert dabei a priori Wissen über die Diffusionsvorgänge über eine spezielle Raum-/Zeit Darstellung mit einem etablierten Bildkompressionsalgorithmus. Man erzielt ein hohes Kompressionsverhältnis bei gleichzeitig hoher Reproduktionstreue. Der DCDT-ZIP Algorithmus beinhaltet ebenfalls eine spezielle Datentransformation und einen bewährten verlustfreien Kompressionsalgorithmus. Beide Algorithmen zeigten an experimentellen Daten eine deutliche Verbesserung gegenüber existierenden Lösungen. Man kann in Zukunft daran denken, bei der zerstörungsfreien thermographischen Prüfung bei vertretbarem Speicheraufwand die Rohdaten selbst von Massenteilen komplett zu dokumentieren.

Referenzen

- [1] X. Maldague. Theory and Practice of Infrared Technology for Non-Destructive Testing. John Wiley & Sons, 2001.
- [2] S. Lugin and U. Netzelmann. A Defect Shape Reconstruction Algorithm for Pulsed Thermography. NDT&E International, 40:220-228, 2007
- [3] V. Carl, E. Becker and A. Sperling. Quantitative Wallthickness Measurement with Impuls-Video-Thermography. Proceedings of 7-th European Conference on Non-Destructive Testing, Copenhagen, 1998.
- [4] X. Han, L.D. Favro and R.L. Thomas. Thermal Wave NDI of Disbonds and Corrosion in Aircraft. Proceedings of the Second Joint NASA/FAA/DOD Conference on Aging Aircraft , Williamsburg , Virginia, 1998.
- [5] S. Lugin and U. Netzelmann. Effective Compression Algorithms for Pulsed Thermography. Quantitative Infrared Thermography (QIRT), 3(2):201-217, 2006.
- [6] A.R. Hamzah, P. Delpuch, M.B. Saintey and D.P. Almond. An Experimental Investigation of Defect Sizing by Transient Thermography. Insight, 38(3):167-171, 1996.
- [7] R.L. Thomas, L.D. Favro, D.J. Crowther, P.K. Kuo. Inversion of Thermal Wave Infrared Images. Proceedings of Conference "Quantitative Infrared Thermography QIRT 92", France, Paris, 1992.
- [8] K. Bryan and L. Caudill. Reconstruction of an Unknown Boundary Portion from Cauchy Data in N-Dimension. Inverse Problems, 21(1):239-255, 2005.
- [9] V.P. Vavilov and R. Taylor. Theoretical and Practical Aspects of the Thermal Non-Destructive Testing of Bonded Structures. Research Techniques in Non-Destructive Testing, 5:238-279, 1982.
- [10] Y.Q. Shi and H. Sun. Image and Video Compression for Multimedia Engineering. CRC Press, 2000.
- [11] D.S. Taubman and M.W. Marcellin, JPEG2000: Image Compression Fundamentals, Standards and Practice, Kluwer Academic Publishers, 2002
- [12] www.divx.com
- [13] S.M. Shepard. Temporal Noise Reduction, Compression and Analysis of Thermographic Image Data Sequences. US Patent (6,516,084), 2003.

- [14] M. Nelson and J. Gailly. The Data Compression Book. M&T Books, 1995.
- [15] www.winzip.com