

Diss. ETH No. 14833

**Detection of defects in cylindrical structures using a
time reverse numerical simulation method**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH
for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by

TOBIAS F. LEUTENEGGER

Dipl. Masch.-Ing. ETH
born May 7, 1971
citizen of Chur, GR

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. J. Dual, examiner
Prof. Dr. W. Sachse, co-examiner

Zürich, 2002

ABSTRACT

In this thesis, a new method for non-destructive testing (NDT) of cylindrical structures is developed. The aim is the detection of defects as well as the determination of their positions. In order to avoid the time-consuming scanning of the whole structure, as it is done in classical ultrasonic testing methods, guided elastic waves are used instead. Structural waves are excited and propagated along the sample. These waves interact with a possible defect which results in a scattered wave field. This field is measured at different locations distributed equally around a circumference at a fixed axial coordinate. Instead of analyzing these complex time signals to determine the presence and position of a defect as is done in many other NDT methods, the recorded signals are evaluated with a time reverse numerical simulation (TRNS). This new combination of experiment, time reversal method and numerical simulation provides a fast and valuable tool for the NDT of large structures.

The main idea of the method is the time reversal of the wave propagation phenomena. This is applicable because the equations describing the wave propagation are time-reversal-invariant. If the time histories of a wave experiment with a point source are reversed in time and played back in the identical structure, the waves travel back the same path and interfere constructively which leads to an amplitude increase at their origin. This means that if one plays back the scattered field, generated by a defect, the retransmitted waves interfere exactly at the position of the defect.

Therefore, an experiment is performed in a defective tube and the displacements of the scattered field are measured at several points along the circumference at one end. Since the TRNS method only works if all three displacement components are played back, a three-dimensional vibrometer is built. The laser beam of a commercial interferometer is divided into three beams using two beamsplitters. Then, the three beams are guided from different directions onto one spot on the surface of the structure.

Instead of playing back the time histories in the experiment as is done in common time reversal applications, this step is replaced by a simulation. The main advantage of this new approach is the determination of the position of the interference and the maximum amplitude. While in an experiment, one would have to scan the structure to find the maximum, in a numerical simulation the displacement and stress components can easily

be monitored. Another benefit is that the accurate excitation of all three displacements in the corresponding points is very difficult in an experiment but easy in the numerical simulation.

To perform the simulations, the structure is implemented in a numerical code. Even if no defect is present in the simulated sample, the played back displacement histories interfere, and the maximum amplitude is reached at the exact position where the defect was located during the experiment. This works as long as the simulated structure and the sample used in the experiment are identical in terms of material and geometrical parameters and boundary conditions.

Due to the non-axisymmetric scattered fields and the implementation of part-through notches, a three-dimensional code in cylindrical coordinates is used in the present work. The applied algorithm is a displacement-stress finite-difference code. In order to determine the exact axial and circumferential position of the defects, the numerical simulation must be of high accuracy. Special care must be taken to eliminate errors due to numerical dispersion. Even though the implementation of a second-order accurate code is much easier, especially for the boundary conditions, a fourth-order algorithm is used. This is due to the fact that the fine grid, which is required for an accurate second-order code exceeds the computational hardware. Therefore, a three-dimensional code in cylindrical coordinates which is fourth-order accurate in axial and circumferential direction, and second-order accurate in radial direction and time has been implemented for the first time.

To verify the applicability of the TRNS method to the NDT of tubes, the entire procedure is simulated. This eliminates the errors caused by the experimental measurements and the uncertainties of the material and geometrical parameters of the test samples. The obtained result verifies the concept of the TRNS method.

Then, different experiments are performed with axial and circumferential notches as well as a notch that is orientated at a 45 degree angle with respect to the axis of the tube. The defects are at a distance of 0.8 m from the measurement position and are only part-through the thickness of the tubes. The waves are excited with an axisymmetric piezoelectric element glued to one end of the tube. However, since the time signals are not analyzed directly, there is no need to excite specific wave modes. Basically, any excitation that generates a scattered field at the defect can be applied.

The experimental results show that the defects are detected in all cases and that the axial, as well as the circumferential positions and the orientation of the defect could be determined with great accuracy. Even for very small defects with only 0.3% of the cross-sectional area removed, the TRNS method still provides good results.

The new NDT method of the present thesis is developed and tested for the case of cylindrical structures and homogeneous isotropic material. However, the idea can be applied to structures with other geometries and material behavior as well.

ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wird eine neue Methode zur zerstörungsfreien Detektion von Defekten in zylindrischen Strukturen entwickelt und vorgestellt. Im Gegensatz zur klassischen Ultraschallprüfung werden hier geführte, elastische Wellen verwendet. Dadurch kann das zeitaufwendige Abtasten der gesamten Struktur vermieden werden. Die Strukturwellen werden an einem Ende angeregt und breiten sich entlang des Probestückes aus. Im Falle eines Fehlers interagieren die Wellen mit dem Defekt, und es entsteht ein gestreutes Wellenfeld. Diese Verschiebungen werden an verschiedenen Punkten, entlang einem Umfang an einer fixen axialen Stelle, in Funktion der Zeit gemessen. Auf Grund der vielen Wellenmoden sind diese Zeitsignale sehr kompliziert und schwierig zu interpretieren. Deshalb werden sie, im Gegensatz zu vielen anderen Methoden, nicht direkt analysiert, sondern mit Hilfe einer numerischen Simulation der Zeitumkehr-Methode (*time reverse numerical simulation, TRNS*) ausgewertet um den Fehler zu detektieren und seine Position zu bestimmen. Diese neuartige Kombination von Experimenten, der Zeitumkehr-Methode und Simulationen liefert ein schnelles und wertvolles Werkzeug für die zerstörungsfreie Prüfung grosser Strukturen.

Die Methode basiert auf der zeitlichen Umkehr von Wellenausbreitungsphänomenen. Wenn man die aufgenommenen Zeitsignale aus einem Wellenexperiment mit Punktanregung zeitlich umkehrt und in derselben Struktur zurückspielt, laufen die Wellen den gleichen Weg zurück und interferieren konstruktiv an ihrem Ursprung, was zu einer detektierbaren Amplitudenüberhöhung führt. In Bezug auf gestreute Wellenfelder von Defekten bedeutet dies, dass die zurückgespielten Wellen an der Stelle des Fehlers fokussiert werden.

Zuerst werden in einem Experiment mit Hilfe eines piezoelektrischen Elementes Strukturwellen in einem fehlerhaften Rohr angeregt. Die Verschiebungen des gestreuten Wellenfeldes werden in mehreren Punkten entlang einem Umfang aufgenommen. Eine Voraussetzung für ein korrektes Interferieren in der Zeitumkehr-Simulation ist, dass alle drei Verschiebungskomponenten zurückgespielt werden müssen. Deshalb wurde ein Vibrometer gebaut, das drei Verschiebungsrichtungen messen kann. Der Laserstrahl eines herkömmlichen Laserinterferometers wird durch zwei Strahlteiler in drei Strahlen aufgeteilt, welche dann mittels Spiegeln von drei verschiedenen Richtungen auf einen

Punkt der Struktur fokussiert werden.

Anstatt die zeitlich umgekehrten Wellen wieder in dem Experiment zurückzuspielen, wie dies üblicherweise bei Zeitumkehr-Experimenten der Fall ist, wird dieser Schritt durch eine Simulation ersetzt. Dieser neue Ansatz hat die beiden folgenden Vorteile. Die Anregung aller drei Verschiebungsrichtungen in den entsprechenden Punkten des Prüfkörpers ist im Experiment sehr schwierig, in der Simulation jedoch einfach zu realisieren. Ausserdem müsste man im Experiment die gesamte Oberfläche der Struktur während dem Zurückspielen abtasten, um den Ort der Amplitudenüberhöhung zu finden. Dieses Abtasten kann eliminiert werden, da die Verschiebungs- und Spannungskomponenten in der Simulation einfach visualisiert und beobachtet werden können.

Dazu wird das Testobjekt mittels einem numerischen Modell beschrieben. Solange sowohl Geometrie, als auch Materialdaten und Randbedingungen der simulierten Struktur genau mit denjenigen des Testobjektes übereinstimmen, interferieren die zurückgespielten Wellen genau an der Stelle, wo der Fehler im Experiment war, auch wenn gar kein Fehler in der Simulation implementiert wird. Aufgrund des nicht axialsymmetrischen, gestreuten Feldes ist ein dreidimensionaler Algorithmus in Zylinderkoordinaten notwendig. Hier wurde ein Verschiebungs-Spannungs-Finite-Differenzen Code verwendet. Um die genaue Position der Fehler zu bestimmen, muss der Algorithmus eine hohe Genauigkeit aufweisen. Insbesondere müssen die Fehler aufgrund der numerischen Dispersion klein gehalten werden. Da das feine Gitter, welches für eine genügende Genauigkeit des 2. Ordnung-Codes notwendig wäre, an die Grenzen der Computerleistungen stösst, wird eine Approximation höherer Ordnung verwendet. Dazu wurde zum ersten Mal ein dreidimensionaler Algorithmus in Zylinderkoordinaten mit einer Genauigkeit von 4. Ordnung in axialer und tangentialer Richtung und 2. Ordnung in radialer Richtung und der Zeit implementiert.

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit der TRNS-Methode zur zerstörungsfreien Prüfung von Rohren, wird der gesamte Ablauf, d.h. auch der experimentelle Teil, simuliert. Die genauen Resultate verifizieren das Prinzip der entwickelten TRNS-Methode.

Experimente an Aluminiumrohren mit verschiedenen Nuten, welche in Bezug auf die Wandstärke nicht durchgehend sind, wurden durchgeführt. Die Defekte befinden sich jeweils etwa 0.8 Meter von der Mess- und Anregungsstelle entfernt. Obwohl in den Experimenten ein axialsymmetrisches Piezoelement verwendet wurde, kann im Prinzip eine beliebige Anregung verwendet werden. Dies ist möglich, da die Zeitsignale nie direkt analysiert werden müssen und darum keine definierten Wellenmoden notwendig sind. Die experimentellen Resultate zeigen, dass nicht nur alle Nuten erkannt wurden, sondern dass sowohl deren axiale, als auch tangentiale Position und die Orientierung der Fehler genau bestimmt werden können. Sogar bei sehr kleinen Nuten, wo nur gerade 0.3% der Querschnittsfläche entfernt wurde, kann die Position bestimmt werden.

Diese neue Methode zur zerstörungsfreien Prüfung, welche in der vorliegenden Arbeit anhand von homogenen, isotropen Rohren hergeleitet und getestet wurde, kann natürlich auch auf Strukturen andere Geometrien und Materialien angewendet werden.