



Doctoral Thesis

Wellenausbreitung in Holzbalken, Charakterisierung des Materials und Detektion von Fehlstellen

Author(s):

Veres, István A.

Publication Date:

2005

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005063342> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH Nr. 16233

Wellenausbreitung in Holzbalken, Charakterisierung des Materials und Detektion von Fehlstellen

Abhandlung zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN DER
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von
István A. Veres

Dipl. Bau-Ing. TU Budapest
geboren am 13. November 1975
in Gyula, Ungarn

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. M. B. Sayir, Referent
Prof. Dr. M. Fontana, Korreferent
Dr. P. Fromme, Korreferent

Zürich, 2005

Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der zerstörungsfreien Prüfung von Holz. Das Ziel ist zum einen eine Methode zu entwickeln, um das Holz zu charakterisieren; zum anderen soll eine Möglichkeit gefunden werden, um Fehlstellen in Holzbalken zu detektieren. Unter Charakterisierung wird hier die Bestimmung der elastischen Materialkennzahlen, der Elastizitätskonstanten, verstanden, wobei in den Experimenten rechteckige Holzbalken oder Holzstäbe als Probekörper verwendet werden. Dementsprechend kann die Arbeit in zwei geteilt werden: in der ersten Hälfte wird eine Methode vorgestellt, mit deren Hilfe die Elastizitätskonstanten eines Holzbalkens bestimmt werden. Im zweiten Teil der Arbeit werden zwei Methoden diskutiert, um Fehlstellen in Balken zu detektieren.

Die Elastizitätskonstanten werden mit Hilfe von Strukturwellen bestimmt. Die Strukturwellen breiten sich dispersiv aus, da die Wellengeschwindigkeit auch von der Frequenz abhängt. Diese Abhängigkeit kann anhand von Dispersionskurven dargestellt werden. Zudem hängen die Dispersionskurven von der Geometrie und von den Elastizitätskonstanten ab. Ein inverses Problem kann formuliert werden: die Elastizitätskonstanten sollten bestimmt werden, in Kenntnis der Geometrie und der Dispersionskurven. Dies kann mit Hilfe eines Optimierungsverfahrens, beispielsweise mit der Methode der kleinsten Quadrate, gelöst werden. Um diese Methode anwenden zu können, müssen die Dispersionskurven sowohl experimentell als auch theoretisch bestimmbar sein.

Die Dispersionskurven des Balkens werden in Experimenten gemessen. In Experimenten mit Holzbalken werden mittels Piezoelementen Biege- und Längswellen angeregt. Die Oberflächenverschiebungen des Balkens werden mit einem Laserinterferometer in zahlreichen Punkten entlang der Längsachse detektiert. Mit Hilfe der Linear Prediction Methode können aus den Messungen die Dispersionskurven bestimmt werden.

Das Optimierungsverfahren benötigt neben den gemessenen Kurven auch ein von den Elastizitätskonstanten abhängiges mathematisches Modell. Da das Wellenausbreitungsphänomen im anisotropen Festkörper ein sehr komplexes Problem darstellt, können die Dispersionskurven eines orthotropen Rechteckbalkens analytisch nicht berechnet werden. Mit Hilfe einer numerischen Methode können jedoch

die Kurven berechnet werden. Dazu wird die semi-analytische Finite Elemente Methode verwendet. Der Querschnitt des Balkens wird mit zweidimensionalen Finiten Elementen diskretisiert und in der Längsrichtung werden harmonische Ansätze verwendet.

Für das Optimierungsverfahren liefern die Experimente die gemessenen Kurven und die semi-analytische FEM das mathematische Modell. Die Elastizitätskonstanten dienen im Optimierungsverfahren als Parameter, sie werden in diesem Verfahren durch Fitten bestimmt.

Strukturwellen können auch zur Detektion von Fehlstellen eingesetzt werden. Fehlstellen sind Abschwächungen in der Struktur, die Reflexionen der Wellen verursachen. Diese reflektierten Wellen können aus dem Messsignal entnommen werden. Bei dispersiven Wellen, wie Strukturwellen es sind, können jedoch die einfallenden und reflektierten Wellen oft nicht getrennt werden, zudem sind zahlreiche Wellenmoden in einem Signal vorhanden.

Zwei Methoden werden in dieser Arbeit verglichen. Die erste Methode verwendet die Linear Prediction Methode und analysiert die in der Zeit-Ort-Ebene gemessenen Signale. Die Linear Prediction Methode kann die verschiedenen Wellenmoden und ihre Laufrichtungen identifizieren. Mit Hilfe eines Hanningfensters, das in der Zeit schrittweise verschoben wird, kann die Methode zudem die evaluierten Wellenmoden in Funktion der Zeit darstellen. Die einfallenden und reflektierten Wellen können anhand des Vorzeichens voneinander unterschieden werden und aus dem Zeitunterschied zwischen den Ankünften der einfallenden und der reflektierten Wellen kann die Entfernung der Fehlstelle bestimmt werden.

Die zweite Methode basiert auf die Idee der *time-reversed acoustic*. Für diese Methode müssen die verschiedenen Wellenmoden nicht mehr identifiziert werden. Wenn die Wellen mit der Fehlstelle wechselwirken, werden die reflektierten Wellen gestreut und bilden eine divergierende Wellenfront. In einer numerischen Simulation, basierend auf der Finite Differenzen Methode, werden die in der Zeit umgekehrten reflektierten Wellen zurückgespielt. Die Wellen in der Simulation bilden eine konvergierende Wellenfront, als Zeitumkehrung der divergierenden Wellen, und fokussieren sich in ihrem Ausgangspunkt, d.h. an der Fehlstelle.

Beide Methoden werden auch experimentell eingesetzt, um Fehlstellen in einem isotropen bzw. orthotropen Balken zu detektieren.

Abstract

The presented work deals with the non-destructive testing of wood. On the one hand the main goals of this work are to develop a method to characterize the material wood. On the other hand a possibility has to be found to detect a defect in a wooden bar. Therefore the work includes two parts: in the first part the determination of the elastic constants of a wooden bar is considered. In the second part two methods are presented to detect a crack in a bar. The characterization of the wood will be limited to the determination of the elastic constants. In the experiments rectangular wooden bars have been used.

Guided waves are used to evaluate the elastic constants. These waves are dispersive because their phase velocity depends on the frequency. This relationship can be illustrated by the dispersion curves. Furthermore the dispersion curves also depend on the geometry and on the elastic constants. An inverse problem can be defined: the elastic constants should be determined if the geometry and the dispersion curves are known. The problem can be solved using an optimization process, such as the Least Squares Method. For this formalism the dispersion curves have to be experimentally and theoretically determinable.

The dispersion curves of the bar can be determined by measurements. Transverse and longitudinal waves are excited by piezoelectric transducers. The displacements or velocities of the surface of the bar are measured in several points along the longitudinal axis of the bar by a laser interferometer. The dispersion curves are evaluated from the measurement using the Linear Prediction Method.

A mathematical model of the dispersion curves depending on the elastic constants and the measured dispersion curves are needed to be able to fit the elastic constants. Wave propagation in anisotropic media is a complex problem and the dispersion curves of an orthotropic rectangular bar can not be determined analytically. However, by using a numerical method the curves can be calculated. The semi-analytical finite element method is applied. The cross-section of the bar is discretized by two-dimensional finite elements and in the longitudinal direction harmonic functions are applied.

This numerical model can be applied as mathematical model in the optimization process. Using this model and the measured curves the elastic constants can be fitted

as parameters.

Guided waves can also be applied to detect cracks in structures. Cracks are weakness in a structure and cause reflections of the waves. These reflections can be identified in the measurement signal. However, using dispersive guided waves the incident and reflected waves can not be separated usually. Moreover, in a measured signal usually there are several different wave modes.

Two methods are presented and compared in this work. The first method is an application of the Linear Prediction Method. This method analyzes the time-space measurement series and is able to identify the different waves and their propagation directions. The method uses a sliding Hanning window and plots the evaluated wave modes in function of the time. The incident and reflected waves can be distinguished by their signs. The distance to the origin of the reflected wave can be calculated from the time difference of the arrival times of the incident and reflected waves.

The second method is based on the idea of the time-reversed acoustics. To apply this method the identification of the different wave modes is not necessary. The interaction of the waves with the crack causes diverging reflected waves. In a numerical simulation based on the Finite Difference Methode the reflected waves are played back. These waves build a converging wave front and focus in their origin at the position of the crack.

Both methods are applied also in experiments to detect a crack in an isotropic or orthotropic bar.