



Doctoral Thesis

## **Non-destructive testing of wood by means of neutron imaging in comparison with similar methods**

**Author(s):**

Mannes, David Christian

**Publication Date:**

2009

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005916121> →

**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 NO. 18563

**NON-DESTRUCTIVE TESTING OF WOOD BY MEANS OF NEUTRON  
IMAGING IN COMPARISON WITH SIMILAR METHODS**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

DAVID CHRISTIAN MANNES

Dipl. Forstwirt, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br. (D)

born July 21, 1974 in Luxembourg (G.D. of Luxembourg)

Citizen of Germany

Accepted on recommendation of

Prof. Dr. P. Niemz (examiner)  
Prof. Dr. J.G.M. Van Mier (co-examiner)  
Prof. Dr. A. Teischinger (co-examiner)  
Dr. E.H. Lehmann (co-examiner)

2009

## 1. Summary

Non-destructive testing (NDT) methods play an important role within all wood-related areas and can be classified into numerous categories. One such category, which largely benefited from the technical progress in recent years, unites methods based on the transmission measurement of radiation. Radiation, electromagnetic waves (e.g. X-ray) as well as particle radiation (e.g. neutrons) can in principle penetrate matter. To some extent, the radiation interacts with the material (by absorption or scattering) while other parts are transmitted. The degree of interaction and transmission depends on the type of radiation, its energy and the elemental composition and density of the irradiated material. Thus the transmitted radiation yields information on the inner structure and composition of this material.

While X-ray is established as NDT method in the area of wood research, other radiation types such as neutron radiation have scarcely been used so far. Although the transmission-based measurements of both radiation types follow similar working principles, the outcome can diverge considerably due to the different interaction behaviour of the X-ray photons and the neutrons with the atoms within the tested material. Interactions between neutrons and wood have not been described so far although they have to be taken into account in order to determine the basic conditions for successful experiments.

Within the scope of this thesis, the applicability of neutron imaging as NDT tool for wood research should be evaluated and the basic conditions to investigate wood using cold and thermal neutrons should be assessed. Based on the understanding of the fundamental working processes, potential fields of application should be determined and tested. At the same time, neutron imaging should be compared with other transmission-based methods such as X-ray and, in particular, synchrotron radiography and tomography. The latter has also been scarcely used in wood research, due to the lack of available facilities.

The experimental studies were carried out for the most part at the large-scale facilities of the Paul-Scherrer-Institute, Villigen (CH):

- Neutron imaging at the imaging beamlines NEUTRA (thermal neutron spectrum) and ICON (cold neutron spectrum) both fed by the neutron spallation source SINQ
- Synchrotron radiation microtomography at the TOMCAT beamline, fed by the Swiss light source (SLS)

- X-ray imaging at the NEUTRA beamline, which has a supplementary X-ray tube.

The principal part of the experimental findings is reflected in five articles:

*Paper I:* The basic working principles of neutron imaging were described including possible interactions between neutrons (thermal and cold) and the wood atoms as well as the necessary image / data processing. The degree to which a material attenuates the incoming radiation is described by the attenuation coefficient, which was experimentally determined for cold and thermal neutrons and different wood species with varying densities and extractives contents. The determined values were compared with values calculated using a theoretical model taking into account only carbon, oxygen and hydrogen as elemental wood components. The experimental results are in excellent agreement with the calculated ones. The attenuation coefficient linearly correlates with the density; the extractives contents only play a role as far as they influence the density. As neutrons are prone to scattering, this phenomenon has to be corrected for quantitative evaluation.

*Paper II:* The applicability of neutron imaging for tree-ring analyses was evaluated and compared with conventional X-ray measurements. The resulting density profiles in the radial wood direction (from pith to bark) obtained by both techniques are equivalent.

*Paper III:* Moisture transport processes in the longitudinal direction were examined by neutron imaging. Samples of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) were exposed to a differential climate, and the amount and distribution of the absorbed water was determined. The experimental results were further processed to calculate diffusion coefficients.

*Paper IV:* The working area of neutron tomography was compared to standard X-ray tomography and synchrotron radiation microtomography. Neutron tomography showed good contrasts between wood and wood adhesives for small to medium sized samples. X-ray tomography allows the examination of big samples, while synchrotron tomography can be used for microscopic investigations.

*Paper V:* Synchrotron microtomography was tested as non-destructive 3D-microscope and was very suitable for microscopic investigation on small samples. Structures in the micrometer range were easily resolvable. Furthermore, analysing wood / adhesives interaction yielded very promising results while experiments focussing on the penetration behaviour of wood preservatives were less successful.

In summary, neutron imaging proved to be a suitable NDT method for wood research. Due to its high sensitivity, the sample size is limited to small and medium sized specimens of few centimetres. Although a spatial resolution in the order of 30 to 50  $\mu\text{m}$  can be reached it is not possible to resolve the cellular structure of wood (with exception of large spring vessels in ring-porous species). Within its working range, the method is equivalent to standard X-ray techniques. The strength of neutron imaging is its high sensitivity towards hydrogen, which allows the quantitative assessment of dynamic processes between wood and another hydrogenous material such as water.

## **Zusammenfassung**

In allen Bereichen, die sich in irgendeiner Form mit Holz befassen, spielen Methoden zur zerstörungsfreien Prüfung eine bedeutende Rolle. Diese können in zahlreiche Kategorien unterteilt werden. Eine solche Kategorie, die in besonderem Masse vom technischen Fortschritt der letzten Jahre profitieren konnte, umfasst Methoden die auf Transmissions-Messungen von Strahlung basieren. Grundsätzlich kann Strahlung, sowohl elektromagnetische Wellen (z.B. Röntgenstrahlung) als auch Teilchenstrahlung (z.B. Neutronenstrahlung), Materie durchdringen. Hierbei interagiert ein gewisser Teil der Strahlung mittels Absorption oder Streuung mit der Materie, während ein anderer Teil diese unbeeinflusst passiert (Transmission). Zu welchem Anteil Strahlung mit der Materie interagiert bzw. diese passiert, ist abhängig von der Art der Strahlung, ihrer Energie sowie der elementaren Zusammensetzung und Dichte des bestrahlten Materials. Demzufolge enthält der transmittierte Teil der Strahlung Informationen über die Struktur und Zusammensetzung dieses Materials.

Während Untersuchungen mittels Röntgenstrahlen bereits häufig zur zerstörungsfreien Prüfung von Holz durchgeführt werden, ist der Einsatz anderer Strahlung, wie Neutronenstrahlung, relativ selten. Obwohl die Transmissions-Messung beider Strahlungsarten den gleichen Prinzipien folgt, können die Ergebnisse stark voneinander abweichen. Diese Unterschiede rühren von den unterschiedlichen Wechselwirkungen zwischen Röntgen-Photonen bzw. Neutronen einerseits und den Atomen innerhalb des untersuchten Materials andererseits. Bislang wurden diese Wechselwirkungen zwischen Neutronen und Holz nicht beschrieben, obwohl diese in betracht gezogen werden müssen um die Rahmenbedingungen für erfolgreiche Experimente festlegen zu können.

Im Rahmen dieser Doktorarbeit sollte daher die Eignung der Neutronenradiographie als zerstörungsfreie Prüfmethode für den Bereich der Holzforschung evaluiert werden und Rahmenbedingungen für Untersuchungen an Holz mittels kalter und thermischer Neutronen definiert werden. Zudem sollte die Methode mit ähnlichen transmissions-basierten Methoden wie Röntgen- und Synchrotron-Radiographie und -Tomographie verglichen werden. Hierbei sollte der Schwerpunkt auf Untersuchungen mittels Synchrotron-Licht gelegt werden, da diese aufgrund der geringen Zahl verfügbarer Anlagen nur relativ selten im Bereich der Holzforschung eingesetzt wird.

Die experimentellen Untersuchungen wurden zum grössten Teil an den Grossanlagen des Paul-Scherrer-Instituts (PSI), Villigen (CH), durchgeführt:

- Neutronenradiographie an den Radiographie-Strahllinien NEUTRA (thermisches Neutronenspektrum) und ICON (kaltes Neutronenspektrum), die beide von der Spallationsneutronenquelle SINQ gespeist werden.
- Synchrotronmikrotomographie an der Strahllinie TOMCAT, gespeist von der Synchrotron Lichtquelle Schweiz (SLS)
- Röntgenradiographie an der NEUTRA Strahllinie, die zusätzlich über eine Röntgenröhre verfügt.

Die wichtigsten experimentellen Ergebnisse werden anhand von fünf Artikeln vorgestellt:

*Artikel I:* Die grundlegenden Funktionsprinzipien der Neutronenradiographie werden beschrieben. Hierbei werden mögliche Wechselwirkungen zwischen kalten bzw. thermischen Neutronen und den Atomen im Holz ebenso behandelt wie die notwendige Daten- und Bildverarbeitung. Ein Mass um die Abschwächung von Strahlung durch ein Material zu beschreiben, ist der sogenannte Schwächungskoeffizient. Dieser wurde in der vorliegenden Veröffentlichung experimentell für kalte sowie thermische Neutronen an Proben verschiedener Holzarten mit unterschiedlichen Dichten und Extraktstoffgehalten ermittelt. Diese Ergebnisse wurden mit rechnerisch ermittelten Werten verglichen. Diese beruhen auf einem theoretischen Modell, bei dem nur Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff als elementare Bestandteile von Holz berücksichtigt wurden. Die experimentellen und errechneten Werte stimmen in hohem Masse überein. Der Schwächungskoeffizient zeigt eine lineare Korrelation mit der Dichte; der Extraktstoffgehalt scheint nur insoweit eine Rolle zu spielen, wie er die Dichte beeinflusst. Es zeigte sich, dass es für quantitative Untersuchungen notwendig ist, die Streuung der Neutronen innerhalb der Probe und in der Messkammer zu korrigieren.

*Artikel II:* Die Anwendbarkeit der Neutronenradiographie für Jahrringuntersuchungen wurde evaluiert und mit konventionellen Röntgenuntersuchungen verglichen. Die mit beiden Verfahren ermittelten Ergebnisse, Dichteprofile in radialer Richtung (vom Mark zur Borke), erwiesen sich als gleichwertig.

*Artikel III:* Feuchtetransportprozesse in longitudinaler Richtung wurden mittels Neutronenradiographie untersucht. Hierfür wurden Probenkörper von Fichte (*Picea abies* [L.]

Karst.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.) einem Differenzklima ausgesetzt und die Menge und Verteilung des absorbierten Wassers ermittelt. Die experimentellen Ergebnisse wurden anschliessend zur Berechnung von Diffusionskoeffizienten verwendet.

*Artikel IV:* Die Arbeitsbereiche von Neutronen- und Röntgentomographie sowie Synchrotronmikrotomographie wurden miteinander verglichen. Die Neutronentomographie zeichnete sich durch hohe Kontraste zwischen Holz und Holzklebstoffen bei kleinen und mittelgrossen Proben aus. Die Röntgentomographie erlaubt Untersuchungen an grossen Probenkörpern, während sich die Synchrotronmikrotomographie hervorragend für mikroskopische Untersuchungen eignet.

*Artikel V:* Die Eignung der Synchrotronmikrotomographie als zerstörungsfreies 3D-Mikroskop wurde untersucht. Die Methode erwies sich als hervorragend geeignet zur mikroskopischen Untersuchung kleiner Probenkörper. Strukturen im Mikrometerbereich konnten ohne weiteres aufgelöst werden. Darüber hinaus lieferte die Untersuchung von Holz-Klebstoff-Wechselwirkungen vielversprechende Ergebnisse. Untersuchungen zum Eindringverhalten von Holzschutzmitteln erwiesen sich als weniger erfolgreich.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Neutronenradiographie eine geeignete zerstörungsfreie Prüfmethode zur Untersuchung von Holz darstellt. Aufgrund der hohen Sensitivität der Methode ist die Grösse von Probenkörpern auf kleine bis mittelgrosse Proben von wenigen Zentimetern beschränkt. Obwohl eine Ortsauflösung von 30 bis 50  $\mu\text{m}$  erreicht werden kann, ist es noch nicht möglich Zellstrukturen zu erkennen (mit Ausnahme der grossen Frühholzgefässe in ringporigem Holz). In ihrem Arbeitsbereich ist die Methode konventionellen Röntgenmethoden ebenbürtig. Die Stärke der Neutronenradiographie liegt aber eindeutig in ihrer hohen Sensitivität gegenüber Wasserstoff, welche die quantitative Ermittlung dynamischer Prozesse zwischen Holz und anderen wasserstoffhaltigen Materialien, insbesondere Wasser, erlaubt.