

Diss ETH. No 12 683

DETERMINATION OF MOISTURE DISTRIBUTIONS IN POROUS  
BUILDING MATERIALS – NEUTRON SIGNAL TRANSFER ANALYSIS

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

For the degree of  
Doctor of Technical Sciences

presented by  
Anna Helena Pleinert  
Dipl. Ing.  
born 11.11.1966  
citizen of Austria

accepted on the recommendation of  
Prof. Folker H. Wittmann, examiner  
Doz. Helmuth Böck, co-examiner  
Dr. Eberhard Lehmann, co-examiner

1998

## Abstract

Quantitative determination of moisture distributions in porous building materials is essential to the study of moisture transport in building structures because models can be tested by comparing experimental and simulation data. Both the quantity and spatial distribution of moisture have to be obtained from the experiment for unequivocal determination of the transport coefficients defined by the model used in the simulation. The validity of models and the accuracy of transport coefficients is critical to the quality of prognosis of the movement of moisture, which constitutes a critical factor affecting the durability of building structures.

This study presents a new technique called *neutron signal transfer analysis*, by which moisture distributions can be detected and determined quantitatively with high sensitivity at a good spatial resolution. The importance of avoiding a simplified approach in which the experimental and evaluation techniques are viewed as "black box" tools is emphasized. Instead, the physical understanding of the measurement and its mathematical modelization based on this understanding are considered essential to a correct interpretation and to the accuracy of quantitative evaluation of the data obtained in the experiment.

Neutron radiography is identified as a technique presenting the potential of high sensitivity to small amounts of moisture and position-sensitive moisture detection in building materials. A model of the measurement is formulated, distinguishing three classes of interactions of neutrons with building material and describing these physical processes by *neutron flux transfer functions*. In a further step of abstraction, two types of measurement are considered: one effectuated in the presence of the building material sample to be studied, and one carried out without the sample, and the data obtained in the first measurement is viewed as the result of the action of *neutron signal transfer functions* on the data recorded in the second measurement.

Then the general outline of a calculation procedure is defined. It consists of two phases: first the explicit forms of the transfer functions are determined, and then the actual evaluation is performed by recursive iteration. Particular emphasis is placed on an extensive uncertainty analysis. The neutron radiography facility of the *Atominstytut* of the Austrian Universities is elected as the location of the experiments, and the development of a CCD based detector is described. Then a concrete implementation of the neutron signal transfer method is presented. It is optimized for application to the study of moisture in three specific materials: brick, concrete and aerated concrete. In this implementation, moisture content down to  $10 \text{ mg cm}^{-3}$  can be detected at a spatial resolution of 1 mm.

The application of the method is demonstrated by a choice of examples showing the results from determination of moisture distributions in drying brick, in aerated concrete after initial drying and subsequent complete insulation of the sample, and in both concrete and aerated concrete during rehumidification by absorption of moisture from the atmosphere. A comparison to two conventional methods of quantitative evaluation of data from neutron radiography measurements shows that the precision obtained by neutron signal transfer analysis is higher by a factor in the order of 5 for one method, and in the order of 50 for the other.

# Zusammenfassung

Die quantitative Bestimmung von Feuchteverteilungen in porösen Baumaterialien ist für das Studium des Feuchtetransportes in diesen Materialien essentiell, weil Transportmodelle durch Vergleich von experimentellen und simulierten Daten getestet werden können. Sowohl der Feuchtegehalt als auch die räumliche Verteilung der Feuchte müssen gemessen werden, um im Modell definierte Transportkoeffizienten eindeutig bestimmen zu können. Die grundsätzliche Validierung der Modelle und eine genaue Kenntnis der Transportkoeffizienten sind von wesentlicher Bedeutung für korrekte Prognosen der Bewegung von Feuchtigkeit, welche einen wichtigen, die Dauerhaftigkeit von Bauwerken beeinflussenden Faktor darstellt.

Die vorliegende Arbeit präsentiert eine neue, *Neutronen-Signaltransferanalyse* genannte Methode, die es erlaubt, Feuchteverteilungen mit hoher Empfindlichkeit und guter räumlicher Auflösung zu bestimmen. Es wird betont, dass eine Betrachtung der experimentellen und analytischen Instrumente als "Black Box" Werkzeuge generell vermieden werden sollte. Im Gegensatz dazu werden das physikalische Verständnis des Messprozesses und dessen auf diesem Verständnis beruhende mathematische Modellierung als wesentliche Voraussetzungen einer korrekten Interpretation und präzisen quantitativen Auswertung von Messdaten gesehen.

Die Neutronenradiographie wird als eine potentiell hochempfindliche Messmethode zur Bestimmung von Feuchteverteilungen identifiziert. Es wird ein Modell der Messung formuliert, wobei drei verschiedene Prozesse der Wechselwirkung von Neutronen mit Baumaterial unterschieden und durch *Neutronenfluss-Transferfunktionen* beschrieben werden. In einem weiteren Abstraktionsschritt werden zwei Typen von Messungen betrachtet: eine Messung, die an einer Baumaterialprobe durchgeführt wird, und eine Messung mit der leeren Messapparatur ohne Probe, und die Messdaten aus der ersten Messung werden als Resultat der Wirkung von *Neutronensignal-Transferfunktionen* auf die Messdaten aus der zweiten Messung interpretiert.

Dann wird die Berechnungsvorschrift in ihrer allgemeinen Form definiert. Sie besteht aus zwei Schritten: zuerst werden die Signal-Transferfunktionen in ihrer expliziten Form berechnet, dann folgt die eigentliche Auswertung durch rekursive Iteration. Besondere Bedeutung wird der gründlichen Analyse der Unbestimmtheit zugemessen. Die Neutronenradiographie-Anlage des Atomintitutes der Österreichischen Universitäten wird als Standort der Experimente bestimmt, und die Entwicklung eines Detektors auf CCD-Basis wird beschrieben. Eine konkrete Implementation der Methode der Neutronen-Signaltransferanalyse wird vorgestellt. Sie ist für das Studium von Feuchteverteilungen in drei spezifischen Baumaterialien optimiert: Ziegelstein, Beton und Porenbeton. In dieser Implementation kann Feuchtegehalt bis zu einer Größenordnung von  $10 \text{ mg cm}^{-3}$  bei einer räumlichen Auflösung von 1 mm nachgewiesen werden.

Die Anwendung der Methode wird anhand von Beispielen illustriert: Trocknen von Ziegelstein, die Bewegung von Feuchtigkeit in einem ursprünglich trocknenden und dann vollständig abgeschlossenem Probenkörper aus Porenbeton, und das Wiederbefeuchten von Beton und Porenbeton durch Feuchtigkeitsaufnahme aus der Atmosphäre. Ein Vergleich der Methode mit zwei konventionellen Methoden der

quantitativen Bestimmung von Feuchteverteilungen aus mittels Neutronenradiographie erhaltenen Messdaten ergibt, dass die Neutronen-Signaltransferanalyse die beiden Methoden um einen Faktor in der Grössenordnung von 5, beziehungsweise 50 an Genauigkeit übertrifft.