

DISS. ETH NO. 16809

**CORRECTION METHODS FOR THE
QUANTITATIVE EVALUATION OF
THERMAL NEUTRON TOMOGRAPHY**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
RENÉ KARIM HASSANEIN

Dipl. Phys. ETH

born June 14, 1966
citizen of Frauenfeld, TG

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Hannes Flühler, examiner
Dr. Eberhard Lehmann, co-examiner
Prof. Dr. Peter Böni, co-examiner

2006

Zusammenfassung

Die thermische Neutronenradiographie und -tomographie hat sich als Methode für die zerstörungsfreie Prüfung von Materialien in den letzten Jahren bewährt. Die rein qualitative Betrachtung hat schon wertvolle Ergebnisse geliefert, vor allem weil Materialien (z.B. Metalle) durchdrungen werden können, die für Röntgenstrahlung undurchsichtig sind. Umgekehrt ist die Empfindlichkeit für gewisse leichte Elemente (z.B. Wasserstoff) sehr gross, die für die Röntgenstrahlung praktisch nicht sichtbar sind. Häufig sind die Anwender jedoch nicht nur an qualitativen sondern auch an quantitativen Aussagen interessiert. In der Bodenphysik beispielsweise ist der Wassergehalt in der Bodenstruktur mit einer hohen räumlichen Auflösung wichtig für die Untersuchung des Stofftransports. Dank den heutzutage verwendeten digitalen Detektorsystemen sind solche Auswertungen grundsätzlich möglich, da die Radiographien als Graustufenbilder dargestellt werden, deren Grauwert proportional zum einfallenden Neutronenfluss ist.

Trotzdem sind genaue Aussagen über den Materialgehalt einer Probe nicht leicht zu machen, da das exponentielle Abschwächungsgesetz für den Neutronenfluss nur in erster Näherung stimmt. Es gibt einige Effekte, die dieses einfache Gesetz verzerren oder ihm überlagert sind.

Die Hauptursache für diese Abweichungen ist, dass die Neutronen von den Atomen nicht nur absorbiert oder ungestört durchdrungen, sondern auch gestreut werden können. Viele relevante Materialien (z.B. Wasser) haben sogar eine viel höhere Wahrscheinlichkeit für Streuung als für Absorption. Die gestreuten Neutronen können auf den Detektor treffen, wo sie für einen zu hohen Messwert sorgen. Diese scheinbar hohe Transmission wird als zu geringe Dicke oder Dichte der gemessenen Probe interpretiert.

Ein weiterer Grund für die Abweichung vom exponentiellen Schwächungsgesetz ist das polyenergetische Spektrum des Neutronenstrahls. Da im thermischen Bereich die meisten Wirkungsquerschnitte für tiefere Energien zunehmen, kann für

diese kein allgemein gültiger Wert angegeben werden. Ebenso sind die Wirkungsquerschnitte der Detektormaterialien energieabhängig. Diese spektralen Effekte beeinflussen den effektiven Wirkungsquerschnitt, mit dem aus dem gemessenen Neutronenfluss die quantitative Massendichte berechnet wird.

Damit diese störenden Effekte korrigiert werden können, müssen die Eigenschaften der experimentellen Anordnung bekannt sein. Für die Charakterisierung des Neutronenstrahls ist vor allem das Energiespektrum wichtig, aber auch die Strahlintensität und ihre räumliche Verteilung spielen eine Rolle für die erwarteten Fehler. Und auch die Eigenschaften des Detektorsystems müssen bekannt sein. Je nach Fragestellung des Experiments muss der geeignete Detektor gewählt werden. Die hauptsächlichen Kriterien sind die räumlichen resp. zeitlichen Auflösungsvermögen, zwischen denen ein Kompromiss gefunden werden muss. Für die Quantifizierung der Radiographien ist vor allem die energieabhängige Absorptionsrate und auch das Signal-Rausch-Verhältnis wichtig.

Die Verfälschung der reinen Transmissionswerte durch die Streuung wird korrigiert, indem der Streuanteil berechnet und von der Radiographie subtrahiert wird. Dazu muss die Streuung nach dem Entstehungsort in Hintergrund- und Probenstreuung unterteilt werden. Die Hintergrundstreuung umfasst diejenigen Neutronen, die an der Probe vorbeifliegen oder sie ungestört durchdringen und von der Umgebung der Probe (z.B. Kamerabox) oder der Abschirmung auf den Detektor gestreut werden. Die Probenstreuung besteht aus den Neutronen, die in der Probe selbst gestreut werden und auf den Detektor treffen.

Die Hintergrundstreuung kann zu einem grossen Teil durch einen geeigneten experimentellen Aufbau vermieden werden. Um den verbleibenden Teil abschätzen zu können, wird in einer Zusatzmessung die Probe durch einen Körper ersetzt, der für Neutronen undurchdringlich ist. Der hinter diesem schwarzen Körper gemessene Neutronenfluss wird der Hintergrundstreuung zugeschrieben. Er wird auf die Intensität der Probenradiographie skaliert und von dieser subtrahiert.

Für die Korrektur der Probenstreuung werden "Point Scattered Functions" (PScF) mit Monte-Carlo-Simulationen berechnet. Diese beschreiben die Streuverteilung, die ein Neutronenstrahl aus einer Punktquelle beim Durchdringen einer Materialschicht verursacht. Sie sind vom Neutronenspektrum, dem Probenmaterial, der Schichtdicke, dem Detektortyp und dem Proben-Detektor-Abstand abhängig. Die PScF werden anhand der Massendichte von der Auswertung der unkorrigierten Radiographie gewählt, zur gesamten Probenstreuung hinter allen Bildpunkten der Radiographie überlagert und von der ursprünglichen Radiographie

subtrahiert. So wird die Probenstreuung in einem iterativen Prozess mehrmals aus der immer genauer korrigierten Radiographie berechnet und subtrahiert.

Für die Korrektur der spektralen Effekte können ebenfalls die oben erwähnten Simulationen für die PScF verwendet werden. Sie liefern als Ergebnis auch die erwarteten Transmissionswerte für die Schichtdicken. Mit diesen Dicke-Transmission-Paaren als Referenzwerten wird auf die durchstrahlte Massendichte geschlossen, nachdem die Streuanteile von der Radiographie abgezogen worden sind.

Der Korrekturalgorithmus ist in Versuchen mit bekannten Proben getestet worden und erbringt Resultate, die auf ca. $\pm 5\%$ genau sind. Auch bei relevanten wissenschaftlichen und industriellen Experimenten ist der Algorithmus angewendet worden und hat verlässliche quantitative Materialgehalte geliefert. Die Korrekturmethode ist auch an weiteren Anlagen in München, Pretoria und Berlin erfolgreich getestet worden. Wenn die Anlageeigenschaften bekannt sind und dem Simulationsprogramm für die PScF und Transmissionswerte genaue Querschnittsdaten zugrunde liegen, können die Radiographien mit derselben Genauigkeit quantifiziert werden wie an NEUTRA, wo der Algorithmus entwickelt worden ist.

Der Aufwand, den Algorithmus anzuwenden, hält sich in Grenzen, da einmal berechnete PScF für spätere Messungen immer wieder verwendet werden können. Auch die Rechenzeit von ca. 5 bis 30s für die Korrektur einer Radiographie ist etwa gleich wie deren Aufnahmezeit. Damit steht ein Werkzeug zur Verfügung, das die quantitative Auswertung von Neutronenradiographien und -tomographien nach Materialgehalten erlaubt und somit ein grosses Bedürfnis der Anwender befriedigt.

Abstract

Thermal neutron radiography and tomography has proved itself as a method for non-destructive testing of materials in the last years. Even the purely qualitative inspection has provided valuable results, particularly because it is possible to penetrate materials (e.g. metals), that are opaque for X-rays. On the other hand, the sensitivity for certain light elements (e.g. hydrogen) is very high, while they are almost invisible for X-rays. Often the users are not only interested in qualitative but also in quantitative statements. For example in the soil physics, it is decisive to know the water content within the soil structure with a high spatial resolution for the investigation of the solute transport. Due to the digital detector systems used nowadays, such evaluations are basically possible, since the radiographs are presented as grayscale pictures, where the gray value is proportional to the incident neutron flux.

Nevertheless, exact statements about the material content of a sample are not easily done, since the exponential law of attenuation is valid only in first order. There are some effects disturbing this simple law or superposed to it.

The main reason for these deviations is that the neutrons are not only absorbed or undisturbed passed by the samples atoms, but they can be scattered. Many relevant materials (e.g. water) have even a much higher probability for scattering than for absorption. The scattered neutrons can hit the detector, where they provide a too high measured value. This pretended high transmission is misunderstood as a too small thickness or density of the measured sample.

A further reason for the deviation from the exponential law of attenuation is the polyenergetic spectrum of the neutron beam. Since most of the cross sections increase for lower energies in the thermal region, it is not possible to give a general value for them. Also the cross sections of the detector materials are dependent on the energy. These spectral effects affect the effective cross section, used for the evaluation of the quantitative mass thickness from the measured neutron flux.

In order to correct these disturbing effects, it is necessary to know the properties of the experimental arrangement. For the characterization of the neutron beam particularly the energy spectrum is important, but also the beam intensity and its spatial distribution play a role for the expected errors. Also the properties of the detector systems must be known. Depending on the experimental problem, the appropriate detector has to be chosen. The main criteria are the spatial or time resolution respectively, where a compromise must be found. Particularly the energy dependent absorption rate, but also the signal-to-noise ratio are important for the quantification of the radiographs.

The corruption of the pure transmission values by the scattering is corrected by calculating the scattering contribution and subtracting it from the radiograph. For this it is necessary to distinguish between background and sample scattering, according to the origin. The background scattering contains those neutrons, that pass the sample or transmit it undisturbed and are scattered to the detector by the surroundings of the sample (e.g. camera box) or the shielding. The sample scattering consists of the neutrons, that are scattered in the sample itself and hit the detector.

Large parts of the background scattering can be avoided by an appropriate experimental setup. In order to estimate the remaining part, the sample is replaced in an additional measurement by a body, that is opaque for neutrons. The measured neutron flux behind that black body is interpreted as background scattering. It is scaled to the intensity of the sample radiograph and subtracted from it.

For the correction of the sample scattering, Point Scattered Functions (PScF) are calculated by Monte-Carlo simulations. They describe the scattering distribution caused by a neutron beam from a point source penetrating a material layer. They depend on the neutron energy spectrum, the sample material, the thickness of the layer, the detector type and the sample-detector distance. The PScF are chosen according to the mass thicknesses obtained by the evaluation of the uncorrected radiograph, superposed to the total sample scattering behind all pixels of the radiograph, and subtracted from the original radiograph. The sample scattering is calculated several times in an iterative process from a more and more accurately corrected radiograph and subtracted from it.

The results of the simulations mentioned above can be used also for the correction of the spectral effects. They provide as a result also the expected transmission values for the layer thicknesses. The transmitted sample thickness is evaluated with these thickness-transmission pairs as reference values, after subtracting the

scattering contributions from the radiograph.

The correction algorithm has been tested by measurements of well known samples and yields results, that are accurate within about $\pm 5\%$. It has been used for relevant scientific and industrial experiments, and provided reliable quantitative material contents. The correction method has been tested successfully also at the facilities in Munich, Pretoria and Berlin. If the facility properties are known and the accurate cross section data are available for the calculation of the PScF and the transmission values, the radiographes recorded there are quantified as exactly as at NEUTRA, where the algorithm has been developed.

The effort needed for the application of the algorithm is reasonable, since the once calculated PScF are reusable for later measurements. The computing time of about 5 to 30 s for the correction of a radiograph is about the same as its recording time. With that, a tool is available, that allows the quantitative evaluation of neutron radiographs and tomograms for materials, and satisfies a large need of the users.