



Doctoral Thesis

Computed tomography with a compact fast neutron generator

Author(s):

Adams, Robert

Publication Date:

2015

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010583785> →

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. 22913

Computed tomography with a compact fast neutron generator

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
ROBERT EWING ADAMS

MSc ETH Zürich - EPF Lausanne
born on 27.04.1986
citizen of the United States

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Horst-Michael Prasser, examiner
Prof. Dr. Uwe Hampel, co-examiner
Dr. Volker Dangendorf, co-examiner

2015

Abstract

This thesis outlines the design, construction, and testing of a tomography system based on a compact deuterium-deuterium fast neutron generator and an arc-shaped array of individual neutron detectors. Such a tomography arrangement was developed in order to provide a tool for non-destructive analysis with capabilities complementary to the techniques already available. The context of this novel system and its possible applications are discussed, with emphasis on multi-phase flow studies.

The work is broken up into three main sections. The first is the development and experimental characterization of the fast neutron generator itself, which was purpose-designed for imaging applications. This included using Monte Carlo simulations to relate the response of an LB6411 neutron probe to the neutron generator output. The yield was measured to be up to $\sim 10^7$ neutrons/s. A technique for experimentally determining the neutron emitting spot size, an important parameter for imaging, was developed and applied. Specifically, an aluminum block was moved stepwise between the source and a BC400 plastic scintillator detector in order to measure an edge response. This edge response was related to the neutron emitting spot size using Monte Carlo simulations and a simplified geometry-based model. The experimentally determined spot size of 2.2 mm agreed well with the simulated value of 1.5 mm. The time-dependence of pulsed output for various operating conditions was also measured and discussed. Overall the neutron generator was shown to perform well for its intended use in neutron imaging.

The second section is the conceptual design and optimization of the detector array. The array functions as a position sensitive one-dimensional detector allowing tomographic reconstruction of a two-dimensional cross section of an object. The design optimization was for objects up to 10 cm in diameter, although much larger objects can be imaged at diminishing spatial resolutions. Each individual detector is optically isolated and consists of a plastic scintillator and a Silicon Photomultiplier for measuring light produced by recoil protons. A deterministic geometry-based model and a series of Monte Carlo simulations were used to optimize the design geometry parameters affecting the reconstructed image resolution. From this, it was expected that with an array of 100

detectors a reconstructed image resolution of $\sim 1.5\text{-}2$ mm could be obtained. Other simulations were performed in order to optimize the scintillator depth (length along the neutron path) such that the best ratio of direct to scattered neutron counts is achieved. This resulted in an optimum depth of 6-8 cm and an expected detection efficiency of 33-37%. Based on this optimized design and the previously determined neutron generator performance, the time needed to collect enough data to reconstruct one tomogram was expected to be several hours.

The third section describes the design and testing of the detector electronics and the experimental validation of the complete imaging system. The final array was composed of 88 detectors (instead of 100 due to practical considerations) which each consisted of a plastic scintillator read out by two Silicon photomultipliers and a dedicated pulse-processing board. Data acquisition for all channels was handled by four single-board microcontrollers. Details of the individual detector design and testing are elaborated upon. Using the complete array, several fast neutron images of test phantoms were reconstructed, one of which was compared with results using a Co-60 gamma source. The system was shown to be capable of 2 mm resolution, with exposure times agreeing with the expected several hours. Details about these measurements and the analysis of the reconstructed images are given, along with a discussion of the capabilities of the system and its outlook, including potential for future applications and development.

Kurzfassung

Diese Dissertation beschreibt die Auslegung, Konstruktion und die ausführliche Untersuchung eines Bildgebungssystems, bestehend aus einem kompakten Neutronengenerator für die Erzeugung schneller Neutronen und einem Detektorbogen aus individuellen Neutronenzählern. Das Bildgebungssystem wurde zum Zweck der zerstörungsfreien Analyse entwickelt. Das System weist spezielle Leistungsmerkmale auf, die diejenigen der bestehenden Bildgebungssystemen und Techniken ergänzen. Die potentiellen Anwendungen dieses neuartigen Systems, mit dem Schwerpunkt auf Zweiphasenströmungen, werden besprochen.

Die Arbeit ist in drei Abschnitte aufgeteilt. Im ersten Abschnitt werden die Entwicklung und die experimentelle Charakterisierung des Neutronengenerators beschrieben. Im speziell für Bildgebungsverfahren entwickelten Neutronengenerator werden Deuterium-Ionen mit ca. 120 keV auf einen möglichst kleinen Brennfleck an einem Titan-Target fokussiert, wo sie mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit einen Fusionsprozess durchlaufen und schnellen Neutronen abgeben. Basierend auf Monte Carlo Simulationen und Messungen mit einer LB6411 Neutronensonde wurde eine maximale Ausbeute von $\sim 10^7$ Neutronen pro Sekunde bestimmt. Ein anderer wichtiger Designparameter des Generators, die Grösse des Brennflecks, wurde durch ein speziell dafür entwickeltes Verfahren ermittelt. Dabei wurde ein Aluminiumblock schrittweise zwischen den Brennfleck und den fernplatzierten BC400 Plastik-Szintillationsdetektor geschoben und die entsprechende Antwortfunktion („edge response“) gemessen. Aus der Antwortfunktion wurde die Grösse des neutronenemittierenden Brennflecks mit Hilfe von Monte Carlo Simulationen und geometrischen Überlegungen bestimmt. Der so ermittelte Wert von 2.2 mm stimmt gut mit dem von 1.5 mm aus Simulationen überein. Darüber hinaus wurde der zeitliche Ablauf der Neutronenemission bei gepulstem Betrieb unter verschiedenen Bedingungen experimentell ermittelt und analysiert. Die Ergebnisse der obengenannten Untersuchungen zeigen, dass die Leistungsmerkmale des Neutronengenerators den Anforderungen des angestrebten Bildgebungsverfahrens genügen.

Der zweite Abschnitt behandelt den Entwurf und die Optimierung des Detektorbogens. Dieser besteht aus einer eindimensionalen Anordnung von 88 Detektoren, welche die tomographische Rekonstruktion des zweidimensionalen Querschnitts eines Prüflings ermöglichen. Die Auslegung des Detektors ist für Prüflinge bis 10 cm Durchmesser optimiert worden. Zwar ist die Bildgebung von wesentlich grösseren Objekten möglich, jedoch mit abnehmenden räumlicher Auflösung. Jedes Detektorelement ist von den anderen optisch isoliert und besteht aus einem Szintillator zum Nachweis von Rückstossprotonen und zwei Silicon photomultiplier (SiPM) welche das durch Rückstossprotonen erzeugte Licht messen. Die Auslegungsparameter des Detektorbogens, die die höchstmögliche Bildauflösung ergeben, wurden durch eine Reihe von Monte Carlo Simulationen und einem deterministischen geometrischen Model ermittelt. Es wurde gezeigt, dass die Verwendung von ca. 100 Detektorelementen eine Auflösung von etwa 1.5 mm ergibt. Weitere Simulationen sind zur Bestimmung der optimalen Tiefe der Szintillatoren in Strahlrichtung durchgeführt worden, um den Streubeitrag in den Zählraten, bei Erhalt einer maximalen Detektionseffizienz, zu minimieren. Die optimale Tiefe von 6-8 cm soll eine Detektionseffizienz von 33-37% ergeben. Aufgrund der Auslegungsdaten des Detektorbogens und des Neutronengenerators ist für die Rekonstruktion eines Tomogrammes eine totale Expositionszeit von einigen Stunden erforderlich.

Der dritte Abschnitt beschreibt die Detektorelektronik sowie die Überprüfung und Validierung des gesamten Bildgebungssystems. Jedes Detektorelement ist mit einer speziell für diesen Zweck entwickelte Leiterplatine verbunden, welche die Signale der beiden Photomultiplier weiterverarbeitet. Für alle Detektorelemente ist die Datenerfassung durch vier Mikrokontroller realisiert worden. Der Aufbau und die Prüfung der individuellen Detektorelemente sind im Detail beschrieben. Zunächst wurden mit dem vollen Detektorbogen und einer Co-60 Gammaquelle tomographische Bilder von verschiedenen Objekten erzeugt. Anschliessend das Gleiche mit dem Neutronengenerator wiederholt und die Ergebnisse verglichen. Es wurde gezeigt, dass das Bildgebungssystem in der Lage ist, tomographische Bilder mit einer Auflösung von 2 mm innerhalb der erwarteten einigen Stunden Belichtungszeit zu erzeugen. Am Ende dieses Abschnitts wird über diese Experimente und die Analyse der rekonstruierten Bilder zusammen mit Weiterentwicklungsmöglichkeiten und potentieller Anwendungen ausführlich berichtet.