

Andrea Steuwe

Dr. sc. hum.

Spatially resolved quantification of radiation exposure associated with computed tomography examinations – Towards the development of virtual dosimetry

Fach/Einrichtung: Radiologie

Doktorvater: Prof. Dr. Hans-Ulrich Kauczor

In den letzten Jahrzehnten sind die Anzahl von Computertomographieaufnahmen und die damit einhergehende Strahlenbelastung für Patienten durch die größere Anzahl von Indikationen und die leichte Verfügbarkeit dieser Aufnahmen deutlich gestiegen. Ein gründliches Verständnis der Strahleneffekte der genutzten ionisierenden Röntgenstrahlung ist daher notwendig, um den Nutzen und die Risiken der Untersuchungen abschätzen und einordnen zu können. Röntgenstrahlung ist insbesondere bei hohen Strahlendosen (>100 mSv) krebserregend. Die gesundheitlichen Langzeiteffekte von niedrigen Dosen sind jedoch noch unbekannt. Um Computertomographieaufnahmen mit potenziellen Nebenwirkungen der Röntgenstrahlung zu korrelieren, sind Studien notwendig, bei denen die resultierende, räumlich aufgelöste Strahlendosis in großen Patientenkohorten über Jahrzehnte hinweg bestimmt werden muss. Die genaueste Möglichkeit, die effektive Dosis von Computertomographieaufnahmen zu untersuchen, um eine räumlich aufgelöste Verteilung der Dosis im Patienten oder in Prüfkörpern (Phantomen) zu erhalten, ohne Patienten oder Personal Röntgenstrahlung auszusetzen, bieten Monte Carlo Methoden. Es gibt bereits mehrere kommerzielle Monte Carlo Programme zur Dosisberechnung in der Computertomographie, allerdings schränken diese häufig den Nutzer durch vorgegebene Scanner- oder Phantomgeometrien, Röntgenspektren oder in der Datenauslese ein.

Ziel dieser Arbeit war daher die Entwicklung einer Monte Carlo Software, die eine flexible Integration von Röntgenspektren, Scannergeometrien, und selbst gestalteten, geometrischen Abdomen- und digitalen Patientenphantomen ermöglicht, und gleichzeitig eine differenzierte Datenauswertung bereithält. Für die Simulation der physikalischen Prozesse in Phantomen bei Computertomographieaufnahmen wurde das Open-Source Toolkit Geant4 genutzt. Nach Anpassung und Weiterentwicklung des Toolkits war es möglich, Informationen (z.B. Position, Interaktionstypen) über die Energiedeposition von Röntgenstrahlung im Phantom zu erhalten und Expositionskarten zu erstellen. Das in dieser Arbeit entwickelte Computertomographiemodell verfügt über die Emission von Röntgenstrahlung mit optionaler Strahlformung, experimentellen und anthropomorphen Phantomen unterschiedlicher Komplexität sowie einem Photonendetektor. Unterschiedliche Aufnahmemöglichkeiten und Röhrenstrommodulation wurden zusätzlich implementiert. Digitalisierte Patientenphantome wurden aus Bilddatensätzen von Computertomographieaufnahmen erstellt, wofür die Datensätze schwellwertbasiert und manuell segmentiert wurden.

Im ersten Schritt wurde die grundlegende Funktionalität des Monte Carlo Modells bezüglich der Strahlformungsmethoden und den spektralen Eigenschaften von 120 kV_p-Photonenverteilungen evaluiert. Dieser Schritt war erforderlich, da Röntgenspektren von Computertomographen nur schwierig messbar und häufig proprietär sind, und daher oft simuliert oder aus mathematischen Modellen oder Computerprogrammen generiert werden müssen. Computertomographieaufnahmen werden auch oft bei anderen Röhrenspannungen und unter Zugabe von Kontrastmitteln akquiriert. Da Kontrastmittel Strahlenschäden verstärken können, sind fundierte Studien der Effekte von Kontrastmitteln auf die Energiedeposition von Röntgenstrahlung wichtig, insbesondere bei Materialübergängen von

kontrastierten zu nichtkontrastierten Geweben. Daher wurde in einem zweiten Schritt der Einfluss der Röhrenspannung (80, 100, 120 kV_p) und die Zugabe von jodhaltigen Kontrastmitteln auf die Gesamtenergiedeposition (E_{total}) und deren räumlichen Verteilung (E_{spatial}) in einem Boxphantom bei verschiedenen Jodkonzentrationen (1-15 mg/ml) untersucht. Die Auswertung des Boxphantoms war Grundlage weiterer Simulationen von Computertomographieaufnahmen eines geometrischen Abdomenphantoms und sechs digitalisierter Patientenphantomen mit unterschiedlicher Morphologie und Body-Mass-Index. Der Einfluss von Röhrenspannung und Kontrastmittel auf E_{total} und E_{spatial} wurde auch für die anthropomorphen Phantome (Abdomen- und Patientenphantome) bestimmt. Kontrastmittelverstärkte Gewebe waren dabei die Aorta, Nieren, Leber, Milz und Pankreas mit einer Jodkonzentration von 5 mg/ml. Die Energiedeposition wurde des Weiteren noch detaillierter an Gewebeübergängen analysiert.

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass ein Monte Carlo Modell eines Computertomographen den Effekt des Strahlenformfilters korrekt darstellen muss und dass Röntgenspektren zwischen Geräteherstellern und -modellen austauschbar sind, solange die durchschnittliche Energie und die maximale Röhrenspannung übereinstimmen. Obwohl E_{total} für die verschiedenen Röntgenspannungen im Boxphantom ähnlich war, so variierte E_{spatial} erheblich, was die Notwendigkeit der räumlich aufgelösten Dosimetrie verdeutlicht. Für anthropomorphe Phantome mit einer abdominellen Scanabdeckung nahm die Energiedeposition der exponierten Gewebe (mit Ausnahme der Haut) mit geringerer Röhrenspannung ab. In der Haut nahm die Energiedeposition bei Senkung der Röhrenspannung von 120 auf 80 kV_p um ~4% zu. Der Anstieg der Hautexposition ist im Vergleich zur generellen Abnahme der Gesamtenergiedeposition von ~9% vernachlässigbar, insbesondere wenn die geringe Strahlenempfindlichkeit der Haut mit einbezogen wird. Zugabe von Jod in Geweben erhöhte die Energiedeposition für kontrastverstärkte Gewebe in allen Phantomen (bis zu +50% bei einer Jodkonzentration von 5 mg/ml). Der relative Unterschied in der Energiedeposition zwischen kontrastverstärkten und nicht-kontrastierten Aufnahmen nahm mit zunehmender Jodkonzentration und Röhrenspannung zu. In den umliegenden nicht-kontrastierten Geweben nahm die Energiedeposition leicht ab. Ein Energieaufbaueffekt war bereits für nicht-kontrastierte Materialübergänge aufgrund von Unterschieden der physikalischen Dichten sichtbar. Bei Zugabe von Jod hat sich dieser Aufbaueffekt jedoch noch verstärkt. Im Gegensatz zu den relativen Unterschieden zwischen nicht-kontrastierten und kontrastierten Aufnahmen nahm der Aufbaueffekt mit abnehmender Röhrenspannung zu. Für geringere Röhrenspannungen (z.B. 80 kV_p) werden größere Unterschiede in der Energiedeposition zwischen Organen und dem umliegenden Gewebe gemessen als für höhere Röhrenspannungen.

Zusammenfassend ergibt sich, dass die entwickelte Software den Weg in Richtung individualisierter virtueller Dosimetrie für Patienten ebnet. Da die Verteilung der Energiedeposition von der Röhrenspannung, Kontrastmitteldosis und von Materialübergängen abhängt, ist die räumlich aufgelöste Dosimetrie für die korrekte Bestimmung der Strahlenbelastung notwendig. Individualisierte Dosimetrie ist erforderlich, um Unterschiede der Strahlenbelastung bei unterschiedlichen Patientenmorphologien zu verstehen, und um Abschätzungen der Strahlenschäden für häufig untersuchte Patienten zu ermöglichen. Ein tieferes Verständnis der Dosisdeposition im Körper wird dazu beitragen, technische Fortschritte in der Niedrig-Dosis-Computertomographie zu erreichen.