

Bachelor-Thesis an der Hochschule Luzern - Technik & Architektur

Titel **Simulationsgesteuerte Optimierung von Röntgen-
COMputertomographieinstrumenten**

Diplomandin/Diplomand **Blum, Fabian**

Bachelor-Studiengang **Bachelor Medizintechnik**

Semester **FS22**

Dozentin/Dozent **Schütz, Philipp**

Expertin/Experte **Jerjen, Iwan**

Abstract Deutsch

Die Hochschule Luzern Technik und Architektur besitzt seit dem Sommer 2020 ein industrielles Computer Tomographie Gerät namens LuCi (Lucerne Ct Imaging). Bei Messungen mit diesem System entsteht Streustrahlung, welche zu Artefakten führt wie unscharfen und verwaschenen Bildern. Das CT-System LuCi wurde in einer vorangegangenen Bachelorarbeit in der Simulationsumgebung GATE nachgebaut. Dieses Open Source Software basiert auf dem Toolkit GEANT4, welche vom CERN entwickelt wurde und den Durchgang von Teilchen durch Materie simuliert. Dieses bestehende Simulationsmodell von LuCi wurde verwendet und modifiziert, mit dem Ziel, den Streustrahlenanteil zu reduzieren. Dazu wurden zum einen die Innenwände der Kabine in der Simulation mit 1mm dickem Aluminium, 1mm Aluminium und 1mm Zinn oder 1mm Zinn und 2mm Blei verkleidet. Weiter wurde auch der Granitblock entweder mit 1mm Aluminium, 1mm Zinn oder 1mm Blei verkleidet. Als letztes wurde noch eine Blende ins Simulationsmodell eingefügt und simuliert. Ebenfalls wurden Parameter wie SDD, ODD und Öffnungswinkel verändert und mit den Modifikationen simuliert. Die Quelle hat eine Beschleunigungsspannung von 160keV mit einem Target aus 1mm Kupfer und 0.5mm Zinn. Die Ergebnisse aus den Simulationen haben gezeigt, dass die SDD sowie der Öffnungswinkel den grössten Einfluss auf die Reduktion der Streustrahlung haben. Die Reduktion der SDD von 1000mm auf 400mm zeigt eine Reduktion des Streustrahlenanteils um rund 30%. Die Reduktion des Öffnungswinkels von 135 Grad auf 50 Grad zeigt eine Reduktion des Streustrahlenanteils von rund 40%. Auch die eingefügte Blende zeigt eine Reduktion des Streustrahlenanteils von bis zu 30%. Das Ergebnis der Simulation mit der Blende wurde mit einer realen Messung an LuCi mit einem Kollimator verglichen. Der Kollimator reduziert den Streustrahlenanteil an LuCi ebenfalls um rund 30%. Daraufhin wurde empfohlen, die Idee der Blende weiter zu verfolgen.

Abstract Englisch

The Lucerne School of Engineering and Architecture has had an industrial computer tomography device called LuCi (Lucerne Ct Imaging) since summer 2020. Measurements with this system produce scattered radiation, which leads to artefacts such as blurry and washed-out images. The CT system LuCi was recreated in a previous bachelor thesis in the simulation environment GATE. This open source software is based on the toolkit GEANT4, which was developed by CERN and simulates the passage of particles through matter. This existing LuCi

simulation model was used and modified with the aim of reducing the proportion of scattered radiation. For this purpose, the inner walls of the cabin in the simulation were clad with 1mm thick aluminium, 1mm aluminum and 1mm tin or 1mm tin and 2mm lead. The granite block was also covered with either 1mm aluminium, 1mm tin or 1mm lead. Finally, a cover was added to the simulation model and simulated. Parameters such as SDD, ODD and cone angle were also changed and simulated with the modifications. The source has an acceleration voltage of 160keV with a target made of 1mm copper and 0.5mm tin. The results from the simulations have shown that the SDD and the cone angle have the greatest influence on the reduction of the scattered radiation. Reducing the SDD from 1000mm to 400mm shows a reduction in the proportion of scattered radiation by around 30%. The reduction of the cone angle from 135 degrees to 50 degrees shows a reduction in the proportion of scattered radiation by around 40%. The inserted cover also shows a reduction in the proportion of scattered radiation of up to 30%. The result of the simulation with the cover was compared with a real measurement on LuCi with a collimator. The collimator also reduces the proportion of scattered radiation at LuCi by around 30%. It was then recommended that the idea of the cover be pursued further.

Ort, Datum

Stans, 10.06.2022

© **Fabian Blum, Hochschule Luzern – Technik & Architektur**

Bachelorarbeit FS2022
Hochschule Luzern – Technik und Architektur

Simulationsgesteuerte Optimierung von Röntgen- Computertomographieinstrumenten

FABIAN BLUM

DOZIERENDE: PROF. DR. PHILIPP SCHÜTZ, EXPERTE: DR. IWAN JERJEN
Industriepartner: Dr. Jorge Martinez Garcia, CC -TES

Abkürzungen:

CT	Computed Tomography
LuCi	LUcerne Ct Imaging
SDD	Source detector distance
ODD	Object detector distance
GEANT4	Geometry and Tracking Software
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
ESA	European Space Agency

Inhalt

1.1.	Erkenntnisinteresse.....	3
1.2.	Ausgangslage.....	3
1.3.	Fragestellung	4
1.4.	Zielsetzung	4
1.5.	Methodenwahl.....	4
1.6.	Streustrahlung als Problem.....	4
1.7.	Einsatz von Röntgenstrahlung in der Medizintechnik.....	7
1.8.	GATE und Monte-Carlo-Verfahren	8
2.1.	Aufbau der Simulationen.....	9
2.1.1.	Simulationssetup	9
2.1.2.	Konfigurationen.....	10
2.1.2.1.	Standard.....	10
2.1.2.2.	1mm Aluminium Wand.....	10
2.1.2.3.	1mm Aluminium und 1mm Zinn Wand	10
2.1.2.4.	1mm Zinn und 2mm Blei Wand	11
2.1.2.5.	Granitblock.....	11
2.1.2.6.	Blende.....	12
2.2.	Aufbau der realen Messung an LuCi.....	12
2.3.	Vorgehensweise.....	13
3.1.	Vergleich der Simulationen mit unterschiedlichen Konfigurationen	14
3.1.1.	Aktuelle Konfiguration (Standard).....	14
3.1.2.	1mm Aluminiumverkleidung an den Wänden.....	15
3.1.3.	1mm Aluminium und 1mm Zinn Verkleidung an den Wänden	16
3.1.4.	1mm Zinn und 2mm Blei Verkleidung.....	17
3.1.5.	Verkleidungen am Granitblock	18
3.1.6.	Blende.....	19
3.1.7.	Übersicht über die unterschiedlichen Verkleidungen.....	20
3.2.	Resultate der unterschiedlichen Simulationssetups	22
3.2.1.	Einfluss der Quellen Detektor Distanz (SDD)	22
3.2.2.	Einfluss Abstand Phantom zu Detektor (ODD)	23
3.2.3.	Einfluss des Öffnungswinkels	24
3.3.	Ergebnisse aus der realen Messung an LuCi.....	25
4.1.	Diskussion der Resultate	27
4.2.	Handlungsempfehlung.....	28
	Tabellenverzeichnis.....	28
	Abbildungsverzeichnis	28
	Quellen	29

1. Einleitung

Das Thema der vorliegenden Bachelorarbeit ist die simulationsgesteuerte Optimierung von Röntgen-Computertomographieinstrumenten. Dabei spielt die Streustrahlung eine zentrale Rolle, welche in dieser Arbeit mit Hilfe von Simulationen reduziert werden soll. Basierend auf bereits bestehenden Simulationsmodellen sollen nun neue Systeme in silicio untersucht werden. Das bestehende System wurde in der vorangegangenen Bachelorarbeit (Dirnberger, 2021) entworfen und stellt das CT-System LuCi der Hochschule Luzern nach. In den neuen Systemen werden zum Beispiel die Wände verkleidet oder andere Instrumente angepasst. Diese neuen Systeme sollen dann simuliert werden und es soll gezeigt werden, welche Systeme weniger Streustrahlung im Röntgenbild erzeugen. Die Streustrahlung entsteht bei der Ablenkung von Photonen von ihrer Flugbahn an Elektronen und führt zu einem verschwommenen und verwaschenen Bild. Durch die Reduktion der Streustrahlung können schärfere Aufnahmen erstellt werden.

1.1. Erkenntnisinteresse

Die Streustrahlung führt bei einer CT-Aufnahme zu verschiedenen Bildartefakten, sie führt zu einer Kontrastminderung und zu Unschärfe. Die Artefakte sind als verwaschene Bilder zu erkennen und ähneln den Beamhardening-Artefakten. Durch die Kontrastminderung wird die Dichteauflösung vermindert. Die Streustrahlung soll reduziert werden, damit weniger Bildartefakte entstehen und damit so Bilder in besserer Auflösung aufgenommen werden können. In der Medizin ist es wichtig, die Streustrahlung zu reduzieren, damit die gestreute Strahlung nicht zusätzlich vom Patienten absorbiert wird und dieser somit eine höhere Dosis erfährt. Es ist wichtig, eine für die Diagnose ausreichende Bildqualität mit möglichst niedriger Dosis für den Patienten zu erreichen.

1.2. Ausgangslage

Die Hochschule Luzern Technik und Architektur besitzt seit dem Januar 2020 ein CT-System (diondo d2, Diondo, Hattingen, Deutschland) namens LuCi. Damit können Objekte zerstörungsfrei aussen als auch innen untersucht werden. So kann zum einen die Materialcharakterisierung mit Hilfe der Fluoreszenzeigenschaften der verschiedenen Materialien ermittelt werden. Weiter können Objekte auf Fehlstellen wie Materialeinschlüsse und Risse im Inneren überprüft werden. Man kann die komplette Aussen- und Innengeometrie sowie Wandstärken und Porositäten ermitteln. In der Medizin kann mit Röntgenstrahlung sehr schnell eine Aufnahme vom Inneren eines Patienten gemacht werden, ohne dass dabei eine Operation notwendig ist. In einer vorangegangenen Bachelorarbeit wurde ein Simulationsmodell entwickelt, welches die Bildgebung von LuCi nachstellt und Streustrahlung simuliert und misst. Die Simulation wird mit der Monte Carlo Methode durchgeführt, dazu wird die Open Source Software GATE verwendet, welche auf GEANT4 basiert. GEANT4 als Simulationswerkzeug wird für die Simulation der Interaktion zwischen Teilchen und Materie verwendet. Die Software wurde am CERN entwickelt und wird weltweit von Wissenschaftlern unterhalten und weiterentwickelt. Die Software wird in weiten Bereichen angewendet, wie zum Beispiel in der Hochenergiephysik, in der Raumfahrt von der ESA oder auch für den medizinischen Bereich. Die Simulation von LuCi wurde entwickelt, um die Einflussfaktoren auf die Bildgebung von LuCi besser zu verstehen und den Streustrahlungsanteil zu quantifizieren und analysieren. Damit sollen Bildartefakte bei Objekten von allen Grössen besser verstanden werden.

1.3. Fragestellung

Wie muss das bestehende System angepasst werden, sodass die Streustrahlung reduziert werden kann und dementsprechend weniger Bildartefakte entstehen?

1.4. Zielsetzung

Das Ziel der Arbeit ist die Reduktion von Streustrahlung an LuCi. Dazu wird das bestehende Simulationsmodell verwendet und angepasst. Mit den verschiedenen Anpassungen in der Simulation soll die Streustrahlung reduziert werden. Aufgrund der Ergebnisse aus den Simulationen wird dann eine Handlungsempfehlung formuliert.

1.5. Methodenwahl

Bei dieser experimentellen Arbeit wird mit Hilfe von Simulationen vorgegangen. Dabei wird die bereits bestehende Simulationsumgebung von der vorangegangenen Bachelorarbeit verwendet. Die Simulationsumgebung wird auf unterschiedliche Weise modifiziert. Durch Simulationen dieser unterschiedlichen Konfigurationen soll herausgefunden werden, welche Anpassungen der Simulationsumgebung die Streustrahlung um welchen Anteil reduzieren. Dabei werden die unterschiedlichen Konfigurationen jeweils mit der Standardkonfiguration verglichen und der Effekt der geänderten Simulationsumgebung wird analysiert. Aufgrund der Ergebnisse aus den Simulationen soll eine Handlungsempfehlung formuliert werden.

1.6. Streustrahlung als Problem

In der Medizin ist das CT als bildgebendes Verfahren kaum wegzudenken. Innert kürzester Zeit können Aufnahmen von Knochenbrüchen oder Tumoren aufgenommen werden. Die von der Quelle ausgesendete Strahlung geht durch das Objekt oder das Lebewesen hindurch oder sie interagiert mit dem Objekt oder Lebewesen. Die übrige Intensität der passierten Strahlung wird dann auf der anderen Seite des Objekts oder des Lebewesens mit dem Detektor gemessen. Daraus wird dann ein Bild errechnet. Jedoch geht bei Menschen und Tieren eine Gefahr von der Wirkung der ionisierender Strahlung aus, welche im nächsten Kapitel erläutert wird. Die Computertomographie ist ebenfalls eine beliebte Methode in der Industrie, um Materialien und verarbeitete Teile zerstörungsfrei zu überprüfen. So kann die Zusammensetzung sowie das Innenleben von Materialien organischer oder anorganischer Natur untersucht werden, ohne dass dabei das zu untersuchende Objekt geöffnet, abgetragen oder auf eine andere Weise beschädigt oder zerstört wird. Es können Materialien von beinahe allen Grössen untersucht werden.

Trifft die Strahlung auf ein Objekt oder wie auf Abbildung 1 zu sehen auf einen Patienten, so wird sie teils absorbiert, teils gestreut und zu einem Teil transmittiert die Strahlung durch das Objekt. Erforderlich für eine qualitativ gute Aufnahme sind jedoch nur die Transmission und die Absorption, die Streustrahlung führt zu Artefakten und zu einer erhöhten Strahlendosis am Patienten.

Absorption und Streuung im Patienten

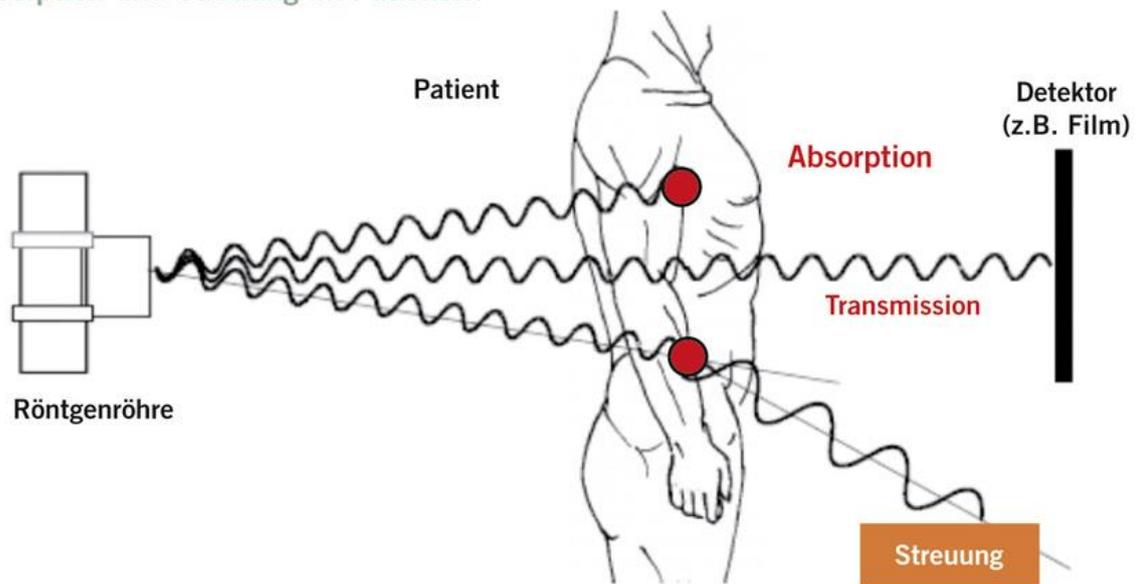


Abbildung 1: Absorption und Streuung im Patienten

Bei der Absorption wird die Energie des Photons von den Elektronen des Objekts aufgenommen, welches zur Ionisierung eines Atoms führen kann. Bei der Streuung ändert sich die Richtung des Photons, wobei ein Teil der Energie auf das Elektron übertragen werden kann. Vier Effekte können dabei beobachtet werden. Bei der Thomson Streuung ändert sich die Richtung, ohne dass Energie vom Photon ändert. Dieser Effekt tritt bis zu einer Röntgen Beschleunigungsspannung von ungefähr bis zu 20keV stark auf. Bei höheren Energien ist der Anteil von diesem Effekt deutlich geringer. Für die Bildgebung an Patienten ist diese Streustrahlung kaum von Bedeutung, da in der Radiologie sehr selten mit so tiefen Beschleunigungsspannung gemessen wird. Zu tiefe Beschleunigungsspannungen führen dazu, dass ein Grossteil der Strahlung vom Gewebe absorbiert wird und dementsprechend der Patient eine sehr hohe Dosis erfährt. Zudem ist der Anteil an dieser Streuungsart nur ca. 5% (*Vetsuisse.com*, o. J.).

Weiter gibt es noch den Photo-Effekt (Abbildung 2), bei dem die gesamte Energie eines Röntgenphotons auf die Elektronen übertragen wird, also absorbiert wird. Dieses Elektron kann, wenn die Energie des Photons grösser ist als die Bindungsenergie, frei werden und das Atom wird positiv geladen. Typische Bindungsenergien reichen von wenigen eV bei den Valenzelektronen bis hin zu über 100keV für die am stärksten gebundenen Rumpfelektronen (*Bindungsenergie*, o. J.). Der Photoeffekt findet typischerweise unterhalb von 100keV statt. In der Radiologie wird durch den Photoeffekt der Knochenkontrast im Röntgenbild sichtbar (*Vetsuisse.com*, o. J.).

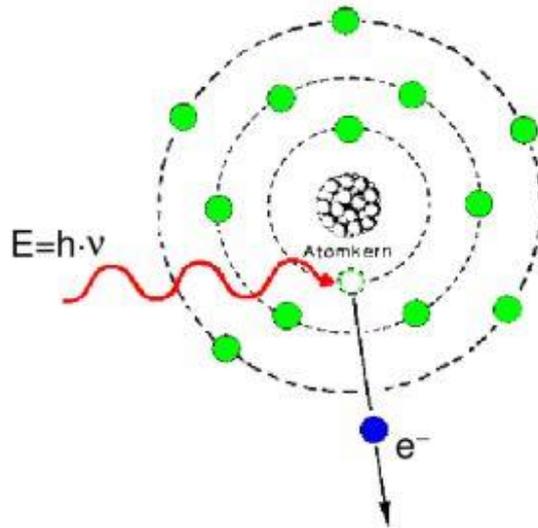


Abbildung 2: Photo-Effekt

Ein dritter Effekt ist der sogenannte Compton-Effekt, bei dem ein Photon an einem schwächer gebundenen Elektron in der äusseren Hülle eines Atoms streuen kann (Abbildung 3). Die übertragene Energie des Photons ist dabei grösser als die Bindungsenergie des Elektrons, es entsteht ebenfalls ein ionisiertes Atom und ein freies Elektron. Bei Energien unterhalb 100keV ist der Anteil an Rückstreuung sehr gross, bei sehr grossen Energien über 1MeV ist der Anteil der Vorwärtsstreuung sehr dominant. Diese Art der Streustrahlung verringert den Bildkontrast, da sie im Gegensatz zur Quellenstrahlung ein ungerichtetes Ausbreitungsmuster aufweist. Trifft ein gestreutes Photon dann auf den Detektor, so verfälscht es den auf dem Detektor gemessenen Grauwert. Bei der Rekonstruktion wird dadurch die tatsächliche Absorption im Gewebe unterschätzt (Semper, 2016). Weiter führt sie während einer Röntgenaufnahme zu einer zusätzlichen Strahlenbelastung, da diese in der Umgebung streut und zusätzlich auf den Patienten trifft und dort teils absorbiert wird.

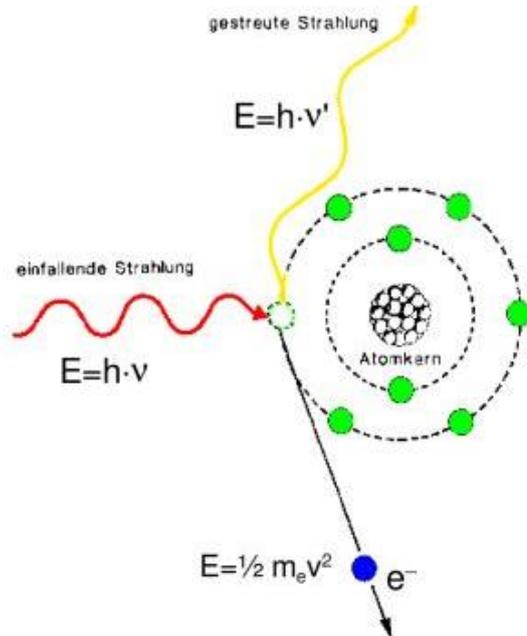


Abbildung 3: Compton-Effekt

Als letzten grossen Effekt gibt es noch die sogenannte Paarbildung, bei dem ein Elektron und ein Positron bei oder nach der Absorption des Photons erzeugt werden. Dieser Effekt tritt erst bei Photonenenergien ab 1024 keV auf. Dadurch ist dieser Effekt in dieser Arbeit nicht relevant. Die Messungen in dieser Arbeit wurden mit 160keV und einem 1mm Kupfer und 0.5mm Zinn dicken Filter simuliert. Somit dominiert der Compton-Effekt bei der Streuung. Die Form des Röntgenquellenspektrums ist auf der Abbildung 4 zu sehen. Dabei ist 160keV das Maximum an kinetischer Energie, das ein Elektron beim Auftreffen auf die Anode abgibt. Viel wahrscheinlicher ist es, dass das Elektron über mehrere Kollisionen die kinetische Energie abgibt. Die meisten Photonen besitzen deswegen eine geringere Energie. Tieferenergetische Strahlung wird jedoch in der Anode stark absorbiert. Die Abbildung 5 zeigt die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten verschiedener Streustrahlungseffekte.

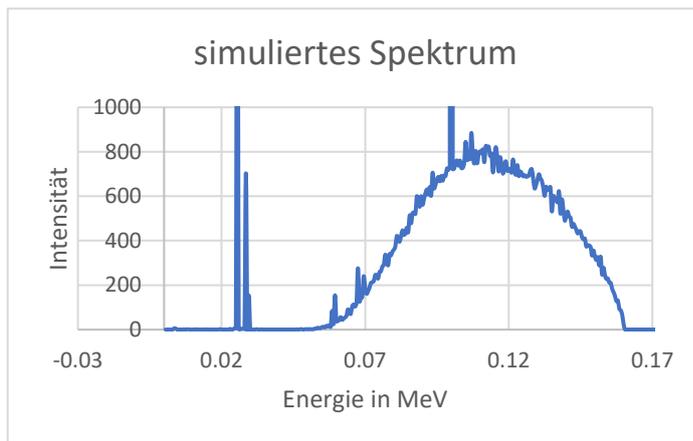


Abbildung 4: simuliertes Spektrum

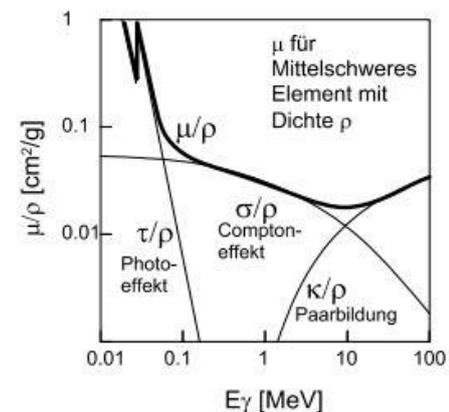


Abbildung 5: Wahrscheinlichkeit der Effekte

1.7. Einsatz von Röntgenstrahlung in der Medizintechnik

Röntgenstrahlung ist als ionisierende Strahlung für Menschen gefährlich und kann krebserregend wirken (*Strahlenwirkungen*, o. J.). Dabei kann die hochenergetische Strahlung die DNA schädigen. Der grösste Teil der Schäden kann durch körpereigenen Reparaturmechanismen wieder behoben werden. Abhängig von der Stelle der Schädigung des Erbguts kann sich ein erhöhtes Risiko für eine Krebserkrankung entwickeln. Ebenfalls entstehen Sauerstoffradiale, welche gesundheitsschädlich sind. Durch natürliche Strahlung erfährt ein Mensch in der Schweiz eine Jahresdosis von rund 6 Millisievert (*Radioaktivität – Was ist das?*, o. J.) Eine Röntgenaufnahme von einem Schädel bringt eine Dosis von 2 Millisievert, eine Aufnahme von Abdomen im Bauchraum mit mehreren Phasen bis zu 20 Millisievert («Ist eine CT-Untersuchung unbedenklich?», o. J.). Deswegen ist für eine Untersuchung mit Röntgenstrahlung stets eine zuvor rechtfertigte Indikation notwendig. Dabei muss der gesundheitliche Nutzen zwingend das Risiko überwiegen. Bei einer Untersuchung wird abhängig von Untersuchungsbereich harte oder weiche Strahlung verwendet. Die energieärmere weiche Strahlung bis zu 100keV wird für Knochenaufnahmen oder Mammografie verwendet. Die weichere Strahlung sorgt dafür, dass kleinste Gewebeunterschiede sichtbar werden, was zum Beispiel bei der Mammographie wichtig ist. Jedoch wird bei sehr weicher Strahlung auch mehr Strahlung vom Gewebe absorbiert, sodass die Strahlenbelastung relativ hoch ist. Die energiereiche harte Strahlung von 100 bis 1000keV wird für inhomogene Strukturen wie zum Beispiel Weichteil Thoraxaufnahmen verwendet. Dabei will man den Knochenkontrast gering halten und die Rippen nur leicht abgebildet sehen, die Lunge jedoch kontraststark. Die härtere Strahlung durchdringt das Gewebe deutlich leichter, es entstehen aber auch kleinere Kontrastunterschiede (Trüeb, 2002).

Beim Röntgen entsteht Streustrahlung, welche die Bildqualität beeinflusst und zusätzlich beim Patienten für eine erhöhte Dosis sorgt. Deswegen werden verschiedene Schutzmassnahmen angewendet, um die Dosis durch Primär-, aber auch durch Streustrahlung klein zu halten. So sollte nur der notwendige Bereich eines Patienten bestrahlt werden. Mit einer erhöhten Röntgenspannung und geeigneten Filtern kann die mittlere Energie der Strahlung effizient verwendet werden. Diese durchdringt den Körper sehr gut und wird wenig vom Körper absorbiert. Jedoch kann somit auch mehr Streustrahlung entstehen, was den Patienten zusätzlich belastet und den Bildkontrast verschlechtert. Um die Bildqualität zu verbessern, können Streustrahlgitter eingesetzt werden, diese können aber unter Umständen nochmals eine zusätzliche Belastung für einen Patienten darstellen. Wird ein Streustrahlenraster verwendet, so muss die Belichtungszeit erhöht werden, um die gleiche Schwärzung zu erzielen. Dies führt zu einer erhöhten Dosis von Faktor 3 bis 5 (*Alles über das Streustrahlenraster*, o. J.). Weiter kann die Dosis durch eine sehr kurze Durchleuchtungszeit verringert werden. Je kürzer die Exposition bei derselben Röntgenleistung, desto geringer ist die Dosis.

Durch die nichtinvasive, schmerzfreie und sehr schnelle Anwendung einer Röntgenaufnahme ist diese Technologie trotz den Risiken sehr wichtig. So kann zum Beispiel im Spital im Notfall mit Hilfe einer Röntgenaufnahme sehr schnell eine Diagnose erfolgen und ein Patient behandelt werden.

1.8. GATE und Monte-Carlo-Verfahren

Bei einer realen Messung von Strahlung werden unzählige Photonen aus der Quelle ausgestrahlt. Einige davon treffen auf den Detektor, andere wiederum werden gestreut und absorbiert. Mit Hilfe einer Simulation können kaum alle Möglichkeiten der Wege der Photonen simuliert werden, die Anzahl ist viel zu gross. Deswegen wird die Monte-Carlo Methode verwendet. Dabei wird eine repräsentative Gruppe an Photonen per Zufall simuliert. Das bedeutet, dass deren Wege von der Quelle bis zur Absorption oder bis zum Detektor per Zufall simuliert werden. Die Methode generiert eine Verteilung von möglichen Ergebniswerten. Wird eine sehr grosse Anzahl von Photonen simuliert, dann ist davon auszugehen, dass die beobachtete relative Häufigkeit nicht mehr stark von der wahren Wahrscheinlichkeit abweicht. Dabei gibt es verschiedene Simulationsprogramme, welche die Monte-Carlo Simulation ermöglichen. In der vorangegangenen Bachelorarbeit (Dirnberger, 2021) wurde GATE als open source Software verwendet. Diese Software basiert auf der GEANT4 (Geometry and Tracking) Software, welche die Simulation von Partikeln, welche Materie durchdringen, ermöglicht. Dieses Toolkit wurde am CERN entwickelt und wird dort auch verwendet. Mit dieser Software konnte LuCi nachgebildet werden und es können so Messungen simuliert werden.

2. Material und Methoden

In diesem Kapitel werden die verwendeten Materialien aufgezeigt und die Vorgehensweise erläutert. Für die Simulationen wurden zwei Rechner mit einem Ubuntu 20.04, welche GATE 9.0 installiert haben, verwendet. Die Ausgangslage für die durchgeführten Simulationen ist der in der vorangegangenen Bachelorarbeit (Dirnberger, 2021) erstellte virtuelle Aufbau von LuCi. Dieser virtuelle Aufbau ist in Abbildung 6 ersichtlich. Darin stellt das weisse Rechteck die aufgebaute Welt dar. Darin ist das grosse grüne Rechteck die Kabine der Simulation. Weiter ist in Gelb der Objekthalter zu erkennen, in Blau der Detektorhalter. Die rote Fläche stellt den Detektor dar, die blauen Punkte davor bilden das verwendete Streugitter. Der grüne Block in der Kabine stellt den Granit dar, auf dem der Objekthalter und der Detektorhalter sich bewegen. Weiter sind 5 simulierte Photonen aus der Quelle als grüne Linien sichtbar. Für die Simulationen wurden deutlich mehr Photonen verwendet, wie es im nächsten Abschnitt erläutert wird.

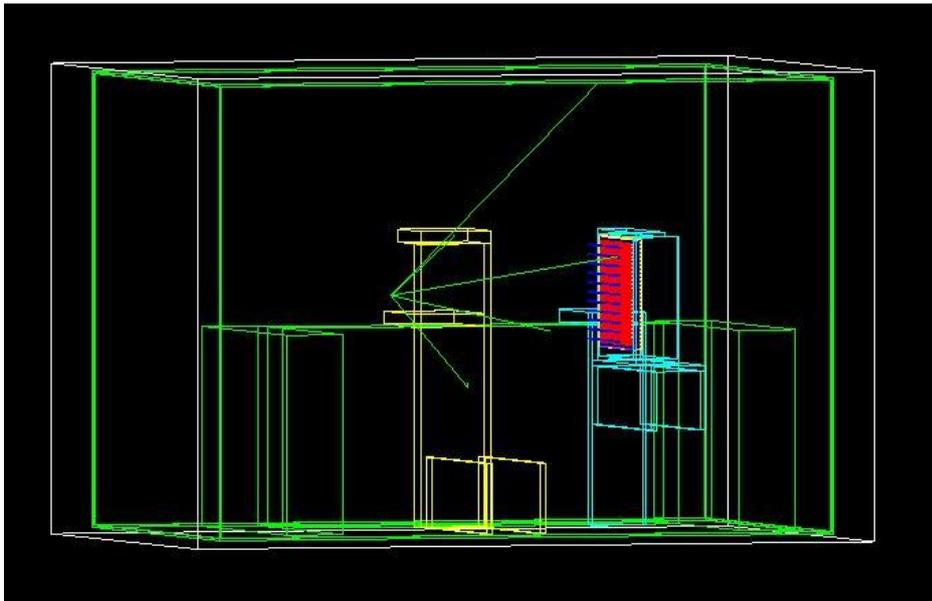


Abbildung 6: Ausgangs-Simulationsumgebung

Dieser allgemeine Simulationsaufbau ist die Grundlage für die angewendeten Simulationen mit veränderten Geometrien und Umgebungsbedingungen. Im folgenden Kapitel werden die veränderten Simulationsumgebungen erläutert.

2.1. Aufbau der Simulationen

Für die Simulationen wurde zum einen verschiedene Simulationssetups verwendet. Dabei wurde mit den Werten von der Quellen-Detektor-Distanz (nachfolgend SDD), Objekt-Detektor-Distanz (nachfolgend ODD) und dem Öffnungswinkel der Quelle experimentiert. Zum anderen wurden diverse Konfigurationen der Instrumente in der Simulation verwendet. Für jede Simulation wurden 50 parallel laufende Simulationen jeweils mit $2 \cdot 10^7$ Photonen simuliert. Bei der Quelle wurde für die Simulationen nur der Öffnungswinkel verändert, ansonsten wurde jede Simulation mit einer Spannung von 160keV und einem 1mm Kupfer und 0.5mm Zinn Filter durchgeführt.

2.1.1. Simulationssetup

Für die Simulationen wurden SDDs von 400mm und 1000mm verwendet. Diese wurden mit ODDs von 0mm, 50mm und 250mm kombiniert. Weiter wurden die Kombinationen mit vollem Öffnungswinkel der Quelle von 50 Grad und 135 Grad simuliert. Die daraus entstandenen Simulationssetups sind in der Tabelle 1 abgebildet.

Tabelle 1: Übersicht der Simulationssetups

Simulationssetup	SDD in mm	ODD in mm	Öffnungswinkel
1	400	50	50
2	400	50	135
3	1000	0	50
4	1000	0	135
5	1000	50	50
6	1000	50	135
7	1000	250	50
8	1000	250	135

2.1.2. Konfigurationen

Im folgenden Kapitel werden die verschiedenen Konfigurationen der Instrumente in der Simulation erläutert. Dabei wird deren Aufbau und Änderungen zur Ausgangsumgebung aufgezeigt. Diese Konfigurationen wurden mit den verschiedenen Simulationssetups aus dem vorherigen Kapitel simuliert.

2.1.2.1. Standard

In der Standardkonfiguration, siehe Abbildung 6, wurden keine Änderungen an der Umgebung vorgenommen. Diese Konfiguration wurde verwendet, um den Einfluss der verschiedenen Simulationssetups und Konfigurationen mit der aktuellen Standardkonfiguration zu vergleichen.

2.1.2.2. 1mm Aluminium Wand

In dieser Konfiguration wurde die Kabine mit einer 1mm dicken Aluminiumwand verkleidet. In der Abbildung 7 kann man erkennen, dass die grüne Kabine mit einer rot eingefärbten Aluminiumwand verkleidet ist. Die Aluminiumwand ist 1mm dick. In dieser Konfiguration wurden vier unterschiedliche Varianten erstellt. In der ersten Variante ist die gesamte Kabine mit einer 1mm dicken Aluminiumschicht verkleidet. In einer zweiten Variante wurde nur die Front, auf Abbildung 7 die rechte Seite hinter dem Detektor, verkleidet. In einer dritten Variante wurde nur die Rückseite, auf Abbildung 7 links hinter der Quelle, mit einer 1mm dicken Aluminiumschicht verkleidet. In einer vierten Variante wurden nur die Wände links und rechts gleichzeitig mit einer 1mm dicken Aluminiumschicht bestückt.

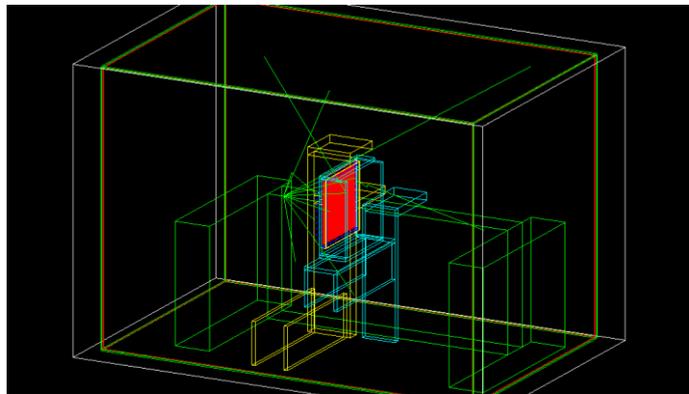


Abbildung 7: Kabine mit Aluminiumverkleidung

2.1.2.3. 1mm Aluminium und 1mm Zinn Wand

In dieser Konfiguration wurde die Kabine mit einer 1mm dicken Aluminium Schicht verkleidet. Auf diese Schicht wurde zusätzlich eine 1mm dicke Schicht aus Zinn gelegt. In der Abbildung 8 erkennt man, dass die grüne Kabine von einer roten 1mm dicken Aluminiumwand und einer cyanblauen 1mm dicken Zinnschicht umgeben ist. Auch in dieser Konfiguration wurden vier verschiedene Varianten erstellt. In der ersten Variante wurde die gesamte Kabine mit einer 1mm dicken Aluminium und 1mm dicken Zinnschicht umgeben. In einer zweiten

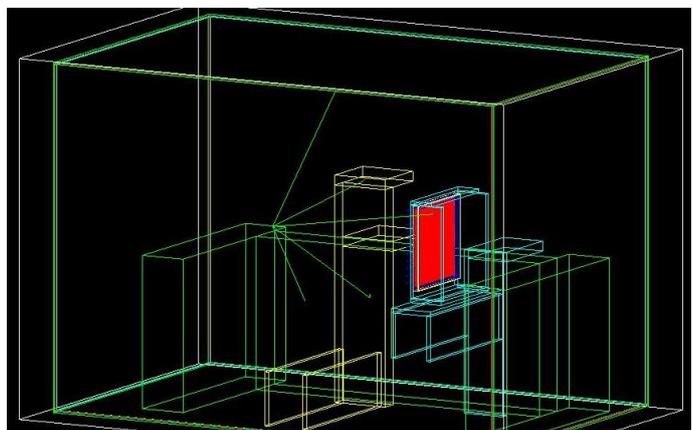


Abbildung 8: 1mm Aluminium und 1mm Zinn Wand

Variante wurde nur die Front mit der Sandwichschicht von 1mm Aluminium und 1mm Zinn verkleidet. In der dritten Variante wurde nur die Rückseite mit der Sandwichschicht verkleidet. Die vierte Variante hat nur die linke und die rechte Wand gleichzeitig mit der Sandwichschicht verkleidet.

2.1.2.4. 1mm Zinn und 2mm Blei Wand

In dieser Konfiguration wurde die Kabine mit einer Sandwichschicht aus einer 1mm dicken Zinn und 2mm dicken Bleischicht verkleidet. In der Abbildung 9 erkennt man, dass die grüne Kabine mit einer roten Schicht aus 1mm dickem Zinn und einer cyanblauen Schicht aus 2mm dickem Blei verkleidet ist. Es wurden vier verschiedene Varianten erstellt. In der ersten Variante wurde die gesamte Kabine mit dem Sandwich aus 1mm Zinn und 2mm Blei verkleidet. In einer zweiten Variante wurde nur die Front mit der Sandwichschicht verkleidet. In der dritten Variante wurde nur die Rückseite mit der Sandwichschicht versehen. In der vierten Variante wurden nur die linke und die rechte Wand gleichzeitig verkleidet.

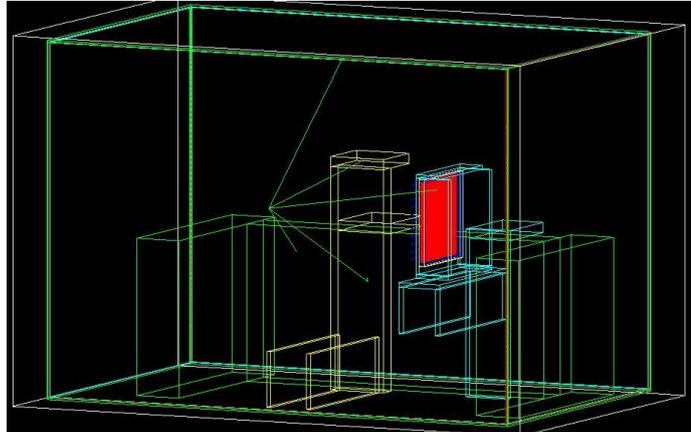


Abbildung 9: 1mm Zinn und 2mm Blei Wand

2.1.2.5. Granitblock

In dieser Konfiguration wurde der Granit mit 1mm dicken Schicht umgeben. Dabei wurden drei verschiedene Varianten simuliert. In der ersten Variante wurde der Granit von einer 1mm dicken Aluminiumschicht umgeben. In einer zweiten Variante wurde der Granit von einer 1mm dicken Zinnschicht umfasst. In der dritten Variante wurde der Granit mit einer 1mm dicken Schicht aus Blei umhüllt. Die Abbildung 10 zeigt, wie der zuvor grün dargestellte Granitblock nun von einer cyanblauen Schicht umhüllt ist.

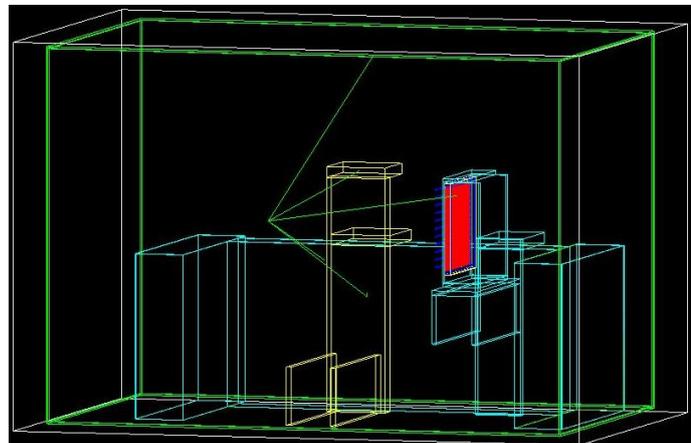


Abbildung 10: Granit verkleidet

2.1.2.6. Blende

In dieser letzten Konfiguration wurde eine Blende aus 4 Quadern erstellt. Diese wurde mit einem Abstand von 10mm vor die Quelle gesetzt und besitzt in der Mitte ein quadratisches Loch von $10 \times 10 \text{ mm}^2$. Die Wandstärke der Blende beträgt 10mm. Die Abbildung 11 zeigt die rot eingefärbte Blende aus Wolfram direkt nach der Quelle, die Abbildung 12 zeigt die Blende vergrößert.

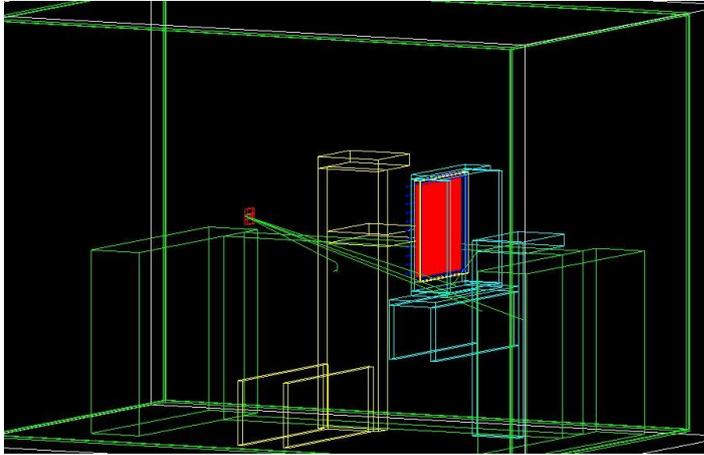


Abbildung 11: Blende in Simulationsumgebung

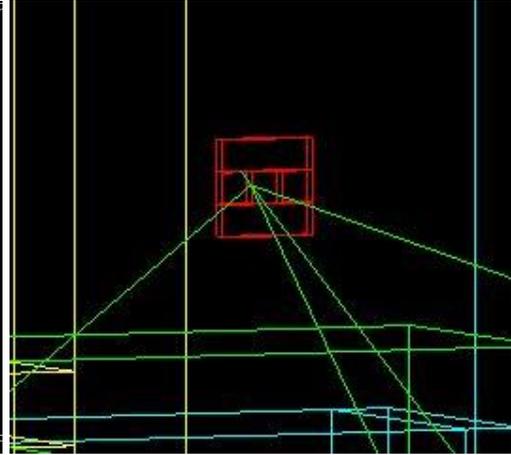


Abbildung 12: Zoom auf Blende

2.2. Aufbau der realen Messung an LuCi

Für die reale Messung an LuCi wurde ein Kollimator aus Wolfram an die Quelle gesetzt. Dieser Kollimator hat ein kegelstumpffartiges Loch, wobei der Durchmesser auf der einen Seite 1mm und auf der anderen Seite 2mm beträgt. Die Seite mit dem Loch mit 1mm Durchmesser wurde an der Quelle platziert. Die Strahlung wurde ebenfalls mit einer 1mm dicken Kupfer und 0.5mm dicken Zinnplatte gefiltert. Bei der Messung mit SDD1000 wurde der Filter bei einer Messung an der Blende montiert, bei der zweiten Messung direkt an der Quelle. Ebenfalls wurde, wie in Abbildung 13 zu sehen, das Streugitter am Detektor befestigt. Die ODD betrug bei den Messungen 50mm, die SDD wurde bei ersten Messung auf 400mm gesetzt und bei der zweiten Messung auf 1000m.



Abbildung 13: Detektor mit Streugitter

Die Abbildung 14 zeigt den Aufbau an der Quelle, wobei in dieser Konfiguration der Filter an den Kollimator geklebt wurde. Der Kollimator wurde an einer Metallstütze befestigt, welche auf dem Objekthalter steht. Mit dem Objekthalter konnte dann der Kollimator so bewegt werden, dass die Quellenöffnung direkt durch die Öffnung im Kollimator strahlt.

Kollimator

Filter aus 1mm Kupfer und 0.5mm Zinn



Abbildung 14: Quelle mit Kollimator und Filter

2.3. Vorgehensweise

Als Erstes wurde der Umgang mit dem Ubuntu Betriebssystem sowie der Simulationsoberfläche GATE erlernt. Daraufhin wurden verschiedene Modifikationen der Simulationsinstrumente vorgenommen und als separate Konfigurationen abgespeichert. Diese Konfigurationen wurden dann mit verschiedenen Simulationssetups simuliert, wobei die SDD, die ODD und der Öffnungswinkel verändert wurden. Anschliessend wurde das Prüfobjekt bei unterschiedlichem Messaufbau und unterschiedlichen Messparametern simuliert. Durch Testen dieser unterschiedlichen Konfigurationen (z. B. Auskleiden mit Metallplatten etc.) wird der Einfluss auf den Anteil an Streustrahlung untersucht. Das Prüfobjekt in der Simulation besteht dabei aus 11x11 Zylindern aus Blei. Weiter wurden die Simulationsergebnisse ausgewertet. Dabei wurde die Auswertungsmethode aus der vorangegangenen Bachelorarbeit (Komathinathan, 2022) verwendet. Es wurde das Verhältnis aus Dunkelwert in jedem Streuzentrum und den Weisswert, wobei die dunklen Werte ausgeschlossen wurden. Aufgrund dieser Auswertungen wurde dann eine Empfehlungen für die Optimierung der Messeinrichtung entwickelt. Zusätzlich wurde eine Messung an LuCi mit einem Kollimator aus Wolfram durchgeführt und mit den Werten der Blende aus der Simulation verglichen. Als letztes wurden die Resultate dokumentiert.

3. Resultate

In diesem Kapitel werden die Resultate der durchgeführten Simulationen mit den unterschiedlichen Konfigurationen und Simulationssetups aufgezeigt. Dabei werden im ersten Unterkapitel die Resultate der unterschiedlichen Konfigurationen aufgezeigt. Im zweiten Unterkapitel werden die Ergebnisse bezüglich der Simulationssetups beschrieben. Im dritten Unterkapitel werden die Ergebnisse aus der realen Messung an LuCi aufgezeigt.

3.1. Vergleich der Simulationen mit unterschiedlichen Konfigurationen

In diesem Kapitel werden die Resultate der unterschiedlichen Konfigurationen aufgezeigt. Dabei werden die Verkleidungsvarianten der Wände, des Granitblocks oder die eingefügte Blende mit der aktuellen Standardkonfiguration von der Simulation verglichen.

3.1.1. Aktuelle Konfiguration (Standard)

In dieser Konfiguration wurden keine Veränderungen an den Instrumenten vorgenommen. Die Resultate aus der Auswertung sind in der unten aufgeführten Abbildung 15 aufgeführt.

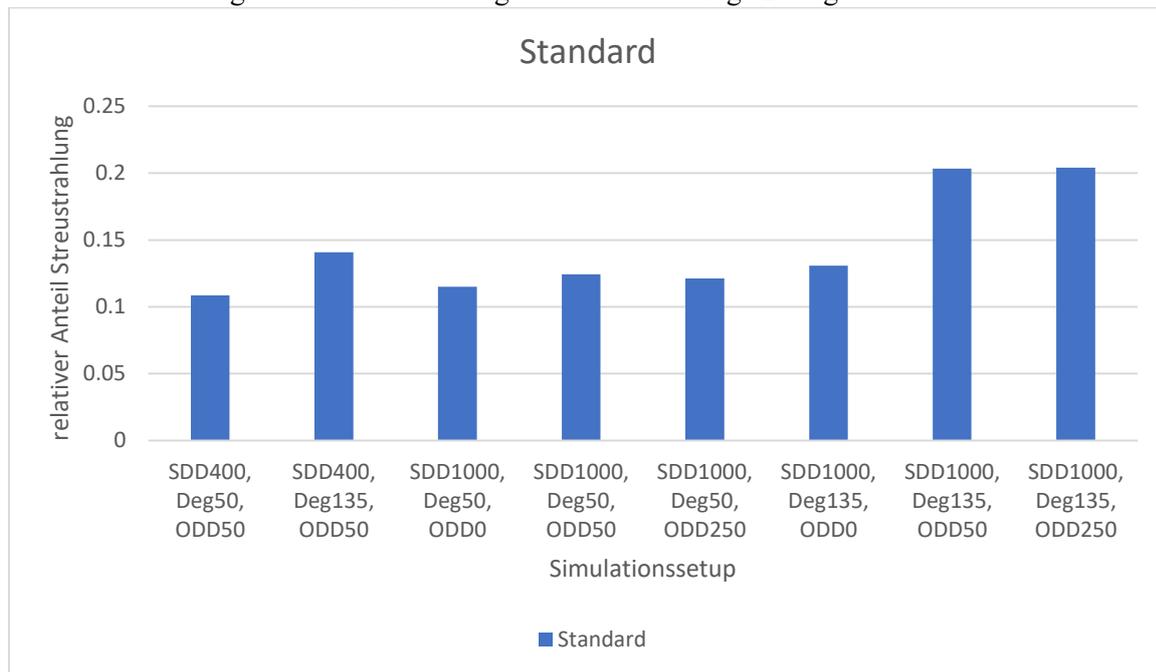


Abbildung 15: Vergleich Ergebnisse Standard Konfiguration

Aus den Resultaten ist ersichtlich, dass sich der Anteil der Streustrahlung bei der Standardkonfiguration zwischen 12% und 21% bewegt. Es zeigt sich, dass bei grossem Öffnungswinkel, grosser SDD und wenn das Objekt nicht direkt am Detektor platziert ist, der Anteil an Streustrahlung grösser ist. Vergleicht man die Ergebnisse bei gleicher SDD miteinander, so ist ersichtlich, dass ein grösserer Öffnungswinkel zu mehr Streustrahlung führt. Die Erhöhung der SDD führt ebenfalls zu einem höheren Anteil an Streustrahlung. Wird das Streugitter nicht direkt am Detektor platziert, so wird bei einem grossen Öffnungswinkel der Anteil an Streustrahlung deutlich erhöht. Es wurde erwartet, dass eine höhere SDD zu mehr Streustrahlung führt, da dabei der Detektor näher an der Rückwand ist und dadurch mehr zusätzliche Streustrahlung erfährt. Der Anteil an Strahlung, die zurück gestreut wird, ist dabei beim Energiebereich von 160keV gross (Trüeb, 2002). Weiter wurde erwartet, dass ein grösserer Öffnungswinkel zu mehr Streustrahlung führt, da die Strahlung dadurch auch die Wände und umliegende Objekte und Instrumente trifft und daran zusätzlich noch gestreut werden kann.

3.1.2. 1mm Aluminiumverkleidung an den Wänden

In dieser Konfiguration wurden die Wände teils oder ganz mit einer 1mm dicken Aluminiumschicht versehen. Diese Konfiguration wurde gewählt, um ein erstes Resultat über den Einfluss einer Verkleidung auf die Reduktion der Streustrahlung zu erhalten. Die Resultate aus der Auswertung sind in der untenstehenden Abbildung 16 ersichtlich. Die unterschiedlichen Farben stehen für die unterschiedlichen Konfigurationen der Innenwände der Kabine in der Simulation.

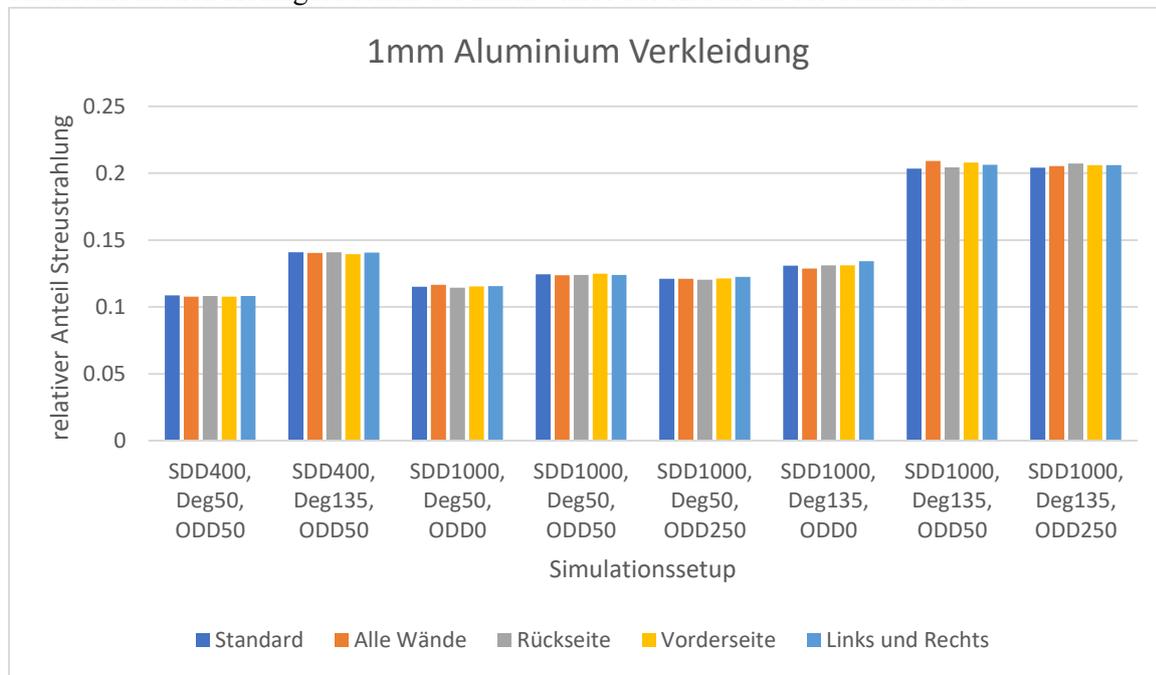


Abbildung 16: Ergebnisse 1mm Aluminiumverkleidung an den Wänden

Der Anteil der Streustrahlung bewegt sich zwischen 12% und 21% bei den unterschiedlichen Simulationssetups. Keines der unterschiedlichen Konfigurationen zeigt bei jedem Simulationssetup einen kleineren Anteil an Streustrahlung gegenüber den anderen Konfigurationen auf. Erwartet wurde, dass es stärkere Unterschiede gibt, wenn nur ein Teil der Wände oder alle Wände verkleidet werden. Erwartet wurde vor allem, dass die Verkleidungen bei einem grossen Öffnungswinkel eine Wirkung entfalten, da dann mehr Strahlung die Wände erreicht. Weiter wurde erwartet, dass vor allem die Verkleidung der Front (die Wand hinter dem Detektor) bei einer grossen SDD einen Einfluss auf das Ergebnis hat, da dann der Detektor nahe an der Rückwand ist und somit mehr Streustrahlung erfährt. Jedoch ist kaum ein Unterschied erkennbar. Aluminium hat bei 150keV einen Massenschwächungskoeffizienten von $1.378E-01 \text{ cm}^2/\text{g}$ (NIST: X-Ray Mass Attenuation Coefficients - Table 3, o. J.), welcher im Vergleich zu den anderen verwendeten Metallen deutlich kleiner ist. Somit war ein geringer Einfluss durch die Aluminiumschicht zu erwarten.

3.1.3. 1mm Aluminium und 1mm Zinn Verkleidung an den Wänden

In dieser Konfiguration wurden die Wände teils oder ganz mit einer Verkleidung aus 1mm Aluminium und 1mm Zinn verkleidet. Die Aluminiumschicht wurde dabei auf die Wand der Kabine gelegt und dann wurde die Zinnverkleidung auf die Aluminiumschicht gelegt. Diese Konfiguration wurde gewählt, um den Einfluss einer Sandwichstruktur auf die Reduktion der Streustrahlung zu analysieren. Die Resultate der Auswertung sind in Abbildung 17 ersichtlich. Die unterschiedlichen Farben stehen für die unterschiedlichen Konfigurationen der Innenwände der Kabine in der Simulation.

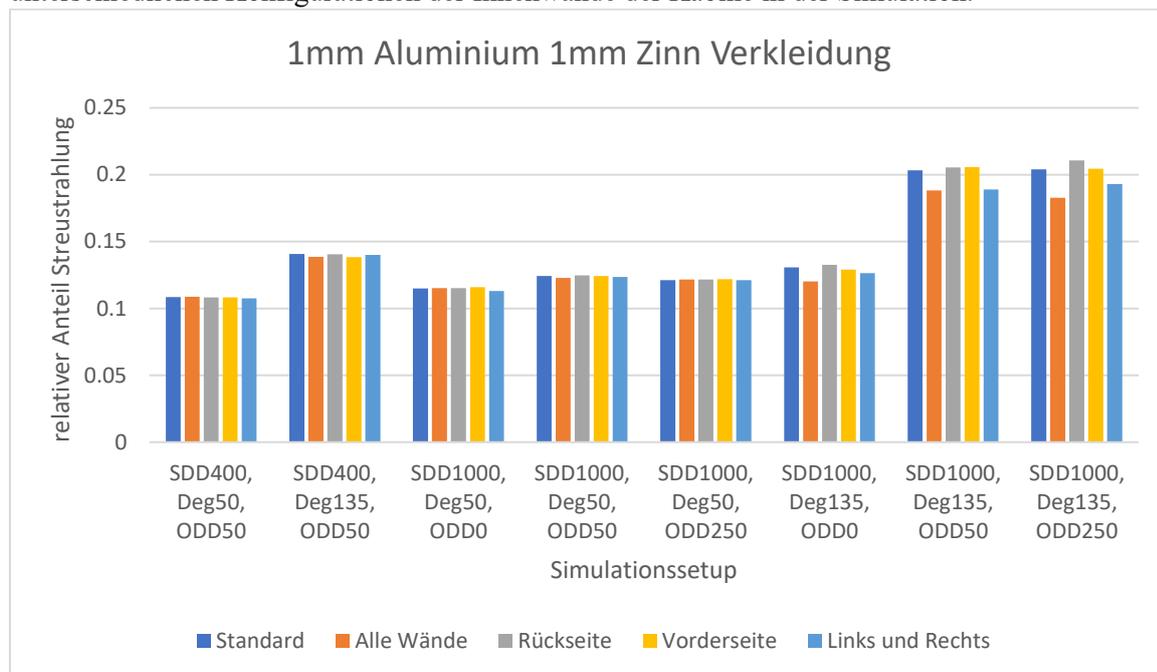


Abbildung 17: Ergebnisse 1mm Aluminium und 1mm Zinn Verkleidung an den Wänden

Aus der Abbildung 17 ist ersichtlich, dass die Konfiguration «Alle Wände» bei beinahe allen Simulationssetups einen niedrigeren Anteil an Streustrahlung aufweist gegenüber den anderen Konfigurationen im selben Simulationssetup. Auch die Konfiguration «Links und Rechts» zeigt ein ähnliches Verhalten. Auffallend ist, dass die Verkleidungen «Alle Wände» und «Links und Rechts» den grössten Einfluss auf die Reduktion der Streustrahlung haben, wenn die SDD und der Öffnungswinkel gross sind. Wird das Streugitter direkt vor den Detektor gesetzt bei einer SDD von 1000 und einem Öffnungswinkel von 135 Grad, dann ist der Anteil an Streustrahlung geringer. Auch bei diesem Simulationssetup reduziert die Konfiguration «Alle Wände» den Anteil an Streustrahlung. Erwartet wurde, dass die Verkleidungen eine Reduktion des Streustrahlenanteils bewirkt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Verkleidung aller Wände sowie der Verkleidung der rechten und linken Wand dazu führen, dass mehr Strahlung absorbiert wird und weniger Streustrahlung entsteht. Zinn hat einen Massenschwächungskoeffizienten von $6.091E-01 \text{ cm}^2/\text{g}$ und absorbiert Strahlung besser als wenn nur eine Aluminiumschicht verwendet wird.

3.1.4. 1mm Zinn und 2mm Blei Verkleidung

In dieser Konfiguration wurden die Wände teils oder ganz mit einer Verkleidung aus 1mm Zinn und 2mm Blei verkleidet. Die Zinnschicht wurde dabei direkt auf die Kabinenwand gelegt. Auf diese Zinnschicht wurde dann die 2mm dicke Schicht aus Blei gegeben. Diese Konfiguration wurde aufgrund des guten Ergebnisses aus der Recherche (Schuetz et al., 2013) gewählt. Die Resultate der Auswertung sind in Abbildung 18 ersichtlich. Die unterschiedlichen Farben stehen für die unterschiedlichen Konfigurationen der Innenwände der Kabine in der Simulation.

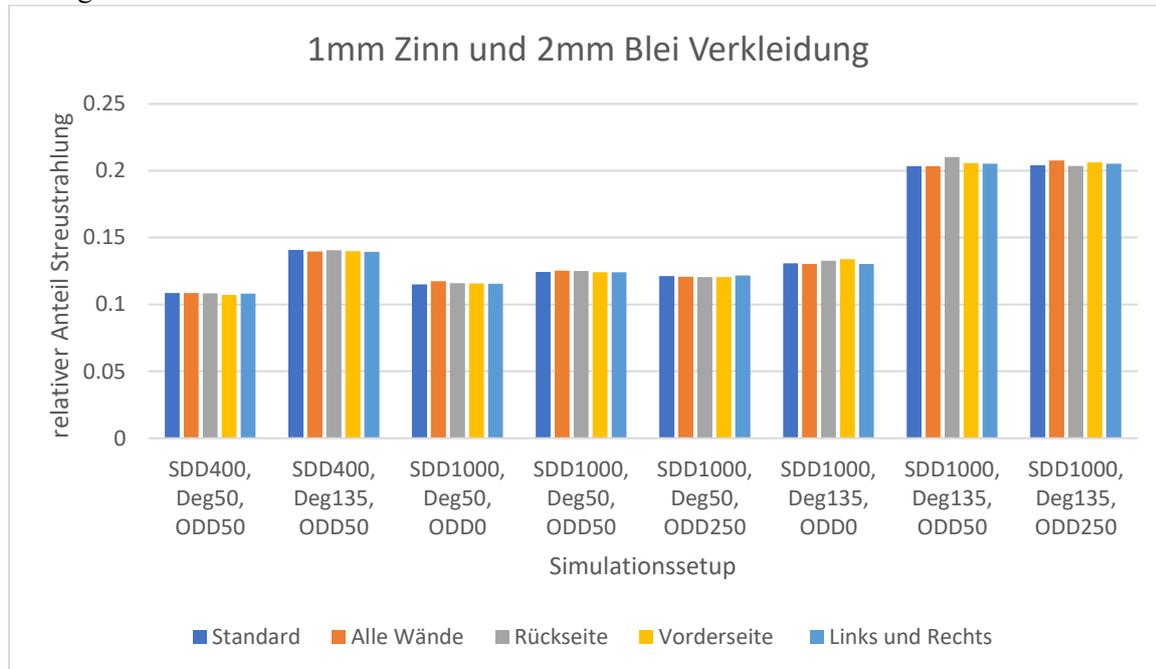


Abbildung 18: Ergebnisse 1mm Zinn und 2mm Blei Verkleidung an den Wänden

Die Werte des relativen Streustrahlungsanteil bewegen sich zwischen 12% und 21%. Aus der Abbildung 18 ist ersichtlich, dass keine Konfiguration bei allen Simulationssetup einen deutlich geringeren Anteil an Streustrahlung aufweist. Teils wurde sogar der Anteil an Streustrahlung gegenüber der Standardkonfiguration erhöht. Erwartet wurde, dass diese Verkleidung den Anteil an Streustrahlung reduziert. In der als Quelle beigefügten Arbeit (Schuetz et al., 2013) wurde diese Verkleidung gewählt, denn sie konnte gegenüber anderen Verkleidungskonfigurationen den Streustrahlenanteil am besten reduzieren. Diese Erwartung deckt sich jedoch nicht mit den Ergebnissen aus den durchgeführten Simulationen. Interessant ist, dass die Verkleidung der Rückwand bei geringer ODD von entweder 0mm oder 50mm zu mehr Streustrahlung führt. Ist das Streugitter weiter weg vom Detektor und weiter weg von der Rückwand, ist der Anteil an Streustrahlung geringer.

3.1.5. Verkleidungen am Granitblock

In dieser Konfiguration wurde der Granitblock jeweils entweder mit 1mm Aluminium, 1mm Zinn oder 1mm Blei verkleidet. Die Abbildung 19 zeigt die Resultate der Auswertung auf. Die Farben stehen dabei für die unterschiedlichen Materialien, mit dem der Granitblock eingekleidet wurde.

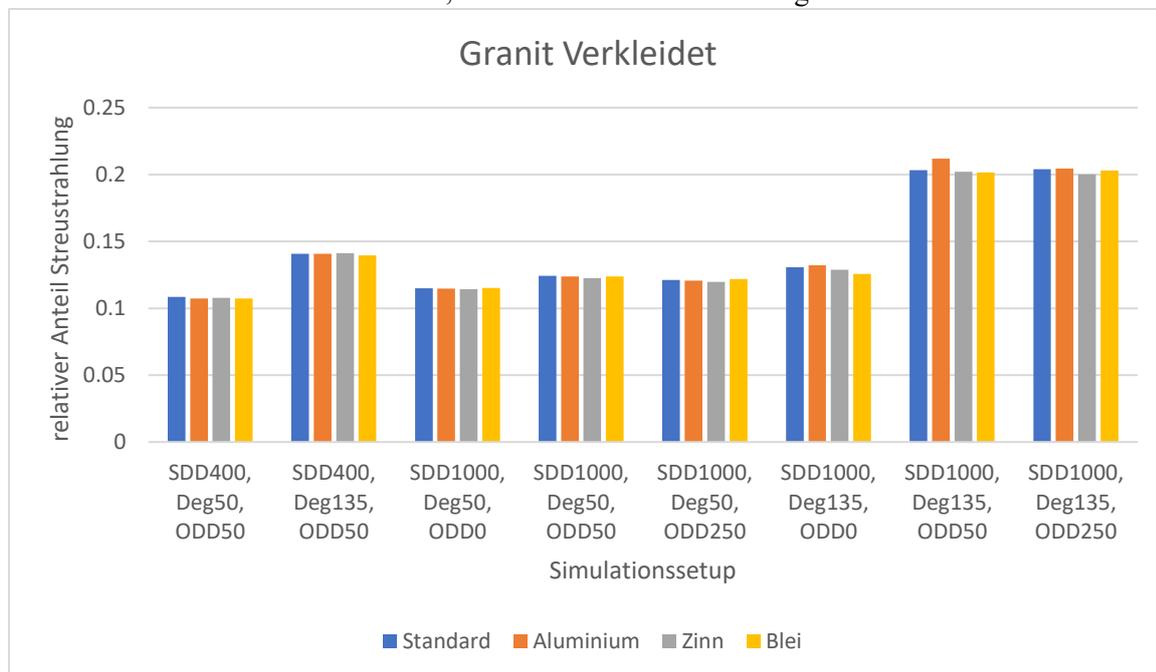


Abbildung 19: Ergebnisse Granitblock verkleidet

In der Abbildung 19 zeigt sich, dass ein Einfluss der Verkleidung des Granitblocks auf den Anteil der Streustrahlung vor allem bei einer grossen SDD und dem grossen Öffnungswinkel von 135 Grad zeigt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der grossen SDD und dem grossen Öffnungswinkel ein grösserer Teil des Granits mit der Strahlung aus der Quelle interagieren kann. Bei einem kleinen Öffnungswinkel wird der Granit kaum vom direkten Primärstrahl getroffen. Auch bei kleiner SDD kann nur ein kleiner Teil des Granits mit dem Primärstrahl interagieren. Bei grosser SDD und einem grossen Öffnungswinkel führt die Verkleidung aus Aluminium zu einer Zunahme der Streustrahlung. Dieses Ergebnis war ebenfalls bei den mit Aluminium verkleideten Wänden zu beobachten. Erwartet wurde aus den Beobachtungen der mit Aluminium verkleideten Wand, dass es keine Reduktion der Streustrahlung gibt, sondern dass sie sogar ansteigen könnte. Weiter wurde aus den Simulationen mit der aus Zinn verkleideten Wand erwartet, dass die Granitverkleidung aus Zinn einen reduzierenden Einfluss auf den Streustrahlenanteil hat. Der Effekt zeigt sich aber als sehr gering.

3.1.6. Blende

In dieser Konfiguration wurde eine 10mm dicke Blende mit einer 10mm² grossen quadratischen Öffnung verwendet. Diese wurde in einem Abstand von 10mm von der Quelle platziert. Die Resultate der Auswertung aus den Simulationen sind in der Abbildung 20 ersichtlich.

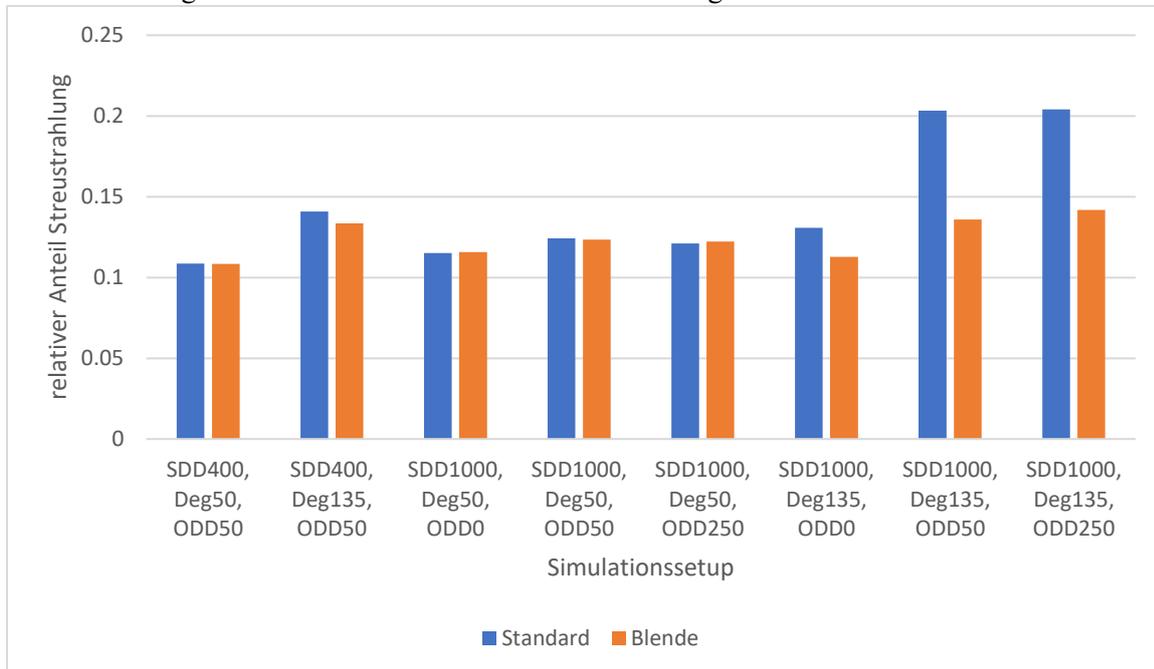


Abbildung 20: Ergebnisse mit und ohne Blende

Die Werte in der oben gezeigten Grafik schwanken bei den Simulationen mit der Blende zwischen rund 11% und 14% Anteil an Streustrahlung. Es ist eine deutliche Reduzierung der Streustrahlung bei den Simulationen mit grosser SDD und grossem Öffnungswinkel zu erkennen. Auch bei der Simulation mit einer SDD von 400 und dem grossen Öffnungswinkel von 135 Grad findet eine Reduktion der Streustrahlung statt, jedoch ist die Reduktion deutlich geringer als bei den Simulationen mit grosser SDD. Bei Simulationen mit einem Öffnungswinkel von 50 Grad zeigt die eingebaute Blende keine Wirkung. Dieses Ergebnis war auch zu erwarten, da die Blende durch ihr geometrisches Design einen minimalen Öffnungswinkel von 62 Grad und einen maximalen Öffnungswinkel in den Ecken der quadratischen Öffnung von 70.5 Grad hat. Somit wird die Blende nicht von dem Primärstrahl getroffen, wenn der kleine Öffnungswinkel von 50 Grad eingestellt ist. Bei den Simulationen mit einer SDD von 1000 und dem grossen Öffnungswinkel war eine Reduktion des Streustrahlenanteils zu erwarten, da die Blende aus Wolfram den Öffnungswinkel verkleinert. Dadurch werden die Kabinenwand, der Granitblock und die weiteren Instrumente weniger vom Primärstrahl getroffen und die Photonen streuen weniger an diesen Objekten. Diese Erwartung wurde durch die Ergebnisse bestätigt.

3.1.7. Übersicht über die unterschiedlichen Verkleidungen

In der untenstehenden Tabelle 2 wird gezeigt, um wieviel Prozent sich die Streustrahlung pro Simulationssetup durch die unterschiedliche Verkleidung der Instrumente reduziert werden kann. Dabei werden die Werte dieser unterschiedlichen Konfigurationen stets auf den Wert der Standardkonfiguration bei entsprechendem Simulationssetup bezogen und dementsprechend damit verglichen. Negative Werte deuten auf eine Reduktion der Streustrahlung gegenüber der Standard Konfiguration. Positive Werte deuten auf eine Erhöhung der Streustrahlung gegenüber der Standard Konfiguration. Werte, die mehr als +-6% aufweisen wurden eingefärbt, ab +6% mit Grün, ab -6% mit Orange.

Tabelle 2: Vergleich Ergebnisse aller Modifikationen

SDD in mm	400		1000					
Öffnungswinkel in Grad	50	135	50	135	50	135	50	135
ODD in mm	50		250		0			
1mm Aluminium	-1%	0%	-1%	3%	0%	1%	1%	-2%
Rückseite	0%	0%	0%	0%	-1%	2%	-1%	0%
Vorderseite	-1%	-1%	0%	2%	0%	1%	0%	2%
Links und Rechts	0%	0%	0%	1%	1%	1%	0%	2%
1mm Aluminium und 1mm Zinn	0%	-2%	-1%	-7%	0%	-10%	0%	-9%
Rückseite	0%	0%	0%	1%	0%	3%	0%	10%
Vorderseite	0%	-2%	0%	1%	1%	0%	1%	-3%
Links und Rechts	-1%	-1%	-1%	-7%	0%	-5%	-2%	-2%
1mm Zinn und 2mm Blei	0%	-1%	1%	0%	0%	2%	2%	3%
Rückseite	0%	0%	1%	3%	-1%	0%	1%	2%
Vorderseite	-1%	-1%	0%	1%	-1%	1%	1%	1%
Links und Rechts	0%	-1%	0%	1%	0%	1%	0%	-3%
Granit mit 1mm Aluminium	-1%	0%	0%	4%	0%	0%	0%	-1%
Granit mit 1mm Blei	-1%	-1%	0%	-1%	1%	-1%	0%	-4%
Granit mit 1mm Zinn	-1%	0%	-1%	-1%	-1%	-2%	-1%	2%
Blende	0%	-5%	-1%	-33%	1%	-30%	1%	-12%

Unter den verschiedenen Konfigurationen zeigt die 1mm dicke Aluminiumverkleidung in der Tabelle 2 Werte auf, bei der die Streustrahlung um maximal zwei Prozent reduziert werden konnte, jedoch auch maximal um drei Prozent zugenommen hat. Keine Konfiguration weist eine konstante Reduzierung der Streustrahlung über alle Simulationssetups auf. Die 1mm Aluminiumverkleidung in der Konfiguration «Links und Rechts» weist jedoch keine Reduktion oder sogar eine Zunahme der Streustrahlung auf. Die Verkleidung aus 1mm Aluminium und 1mm Zinn weist je nach Simulation und Konfiguration eine Reduktion der Streustrahlung um maximal 10% auf, jedoch auch eine maximale Zunahme der Streustrahlung um 10%. Dabei ist ersichtlich, dass die Verkleidung des gesamten Raumes die grösste Reduktion der Streustrahlung bei allen Simulationssetups zeigt. Eine Verkleidung in der Konfiguration «Links und Rechts» weist ebenfalls nur eine Reduktion und keine Zunahme der Streustrahlung auf. In der Konfiguration «Rückseite» wurde eine deutliche Zunahme der Streustrahlung festgestellt. Die Verkleidungen der Vorderseite, also der Seite hinter dem Detektor, weisen bei der grossen SDD eine Zunahme des Streustrahlenanteils auf. Dies liegt daran, dass der Detektor bei dieser SDD näher an der Wand ist und somit stärker von gestreuten Photonen durch diese Wand beeinträchtigt wird. Die

Konfiguration «Rückseite» bei der 1mm dicken Aluminium und 1mm dicken Zinnverkleidung weist den höchsten Wert der Zunahme von 10% auf.

Die Verkleidung aus 1mm Zinn und 2mm Blei weist je nach Simulation und Konfiguration eine Reduktion sowie auch Zunahme der Streustrahlung von drei Prozent auf. Keine Konfiguration dieser Verkleidung weist nur reduzierende oder nur zunehmende Streustrahlung über die verschiedenen Simulationssetups auf.

Die verschiedenen Verkleidungen des Granits reduzieren teils die Streustrahlung bis maximal vier Prozent. Jedoch sorgen die Verkleidungen je nach Simulationssetup auch für eine Zunahme der Streustrahlung. Den höchsten Wert erzielt dabei die Aluminiumverkleidung am Granit. Die Zinnverkleidung reduziert die Streustrahlung um maximal zwei Prozent, erhöht die Streustrahlung jedoch beim Simulationssetup von SDD1000, 135 Grad Öffnungswinkel und ODD0 um zwei Prozent. Die Granitverkleidung aus Blei reduziert die Streustrahlung etwas besser als die anderen beiden Verkleidungen. Sie erreicht eine maximale Reduktion von vier Prozent und sorgt nur bei einem Simulationssetup für eine um ein Prozent erhöhte Streustrahlung.

Die Konfiguration mit der Blende sorgt für eine maximale Reduktion von 33 Prozent und eine maximale Erhöhung der Streustrahlung von einem Prozent. Auffällig ist, dass die grossen Streustrahlungsreduktionswerte nur bei Simulationssetups mit einem Öffnungswinkel von 135 Grad zu finden sind. In den Simulationssetups mit einem Öffnungswinkel von 50 Grad die maximale Reduktion oder Erhöhung bei einem Prozent liegen. Die Blende reduziert den Öffnungswinkel der Quelle auf maximal 70.5 Grad. Somit reduziert die Blende den Strahlwinkel, wenn die Quelle eine Öffnung von 135 Grad besitzt. Hat die Quelle den kleinen Öffnungswinkel von 50 Grad, dann wird die Blende nicht vom Primärstrahl getroffen und sie hat somit keinen Einfluss.

3.2. Resultate der unterschiedlichen Simulationssetups

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse verglichen, wenn bei gleicher Konfiguration Parameter wie SDD, ODD oder Öffnungswinkel verändert werden. Die Tabellen zeigen jeweils die Zunahme oder Abnahme des Streustrahlenanteils auf.

3.2.1. Einfluss der Quellen Detektor Distanz (SDD)

Die untenstehende Tabelle 3 zeigt auf, wie sich der Anteil der Streustrahlung verändert wenn pro Simulationssetup und Konfiguration nur die SDD von 400mm auf 1000mm erhöht wird. Dabei können die unterschiedlichen Konfigurationen und Simulationssetups miteinander verglichen werden. Positive Werte zeigen eine Erhöhung der Streustrahlung auf.

Tabelle 3: Ergebnisse bei Veränderung der SDD

SDD in mm	Von 400 auf 1000	Von 400 auf 1000
Öffnungswinkel in Grad	50	135
ODD in mm	50	
Standard	14%	44%
1mm Aluminium	15%	49%
Rückseite	15%	45%
Vorderseite	16%	49%
Links und Rechts	15%	47%
1mm Aluminium und 1mm Zinn	13%	36%
Rückseite	15%	46%
Vorderseite	15%	49%
Links und Rechts	15%	35%
1mm Zinn und 2mm Blei	15%	46%
Rückseite	15%	49%
Vorderseite	16%	47%
Links und Rechts	15%	47%
Granit mit 1mm Aluminium	15%	51%
Granit mit 1mm Blei	15%	45%
Granit mit 1mm Zinn	14%	43%
Blende	14%	2%

Aus der Tabelle 3 ist ersichtlich, dass eine Erhöhung der SDD in allen Konfigurationen zu einem erhöhten Anteil an Streustrahlung kommt. Die Zunahme der Streustrahlung bei Erhöhung der SDD ist bei dem Öffnungswinkel von 50 Grad deutlich geringer als bei den Simulationen mit einem Öffnungswinkel von 135 Grad. Nur die Konfiguration mit der Blende weist beim grossen Öffnungswinkel und Erhöhung der SDD einen sehr kleinen Unterschied in der Zunahme auf. Im Gegensatz zu allen anderen Konfigurationen ist bei der Blende die Zunahme der Streustrahlung bei dem Öffnungswinkel von 50 Grad grösser als die Zunahme der Streustrahlung bei einem Öffnungswinkel von 135 Grad. Die 1mm Aluminium und 1mm Zinn Verkleidung in der Konfiguration «Links und Rechts» hat den zweitkleinsten Sprung von 15 Prozent auf 35 Prozent bei verändertem Öffnungswinkel. Ist die gesamte Wand verkleidet, dann nimmt die Streustrahlung von einer Zunahme von 13 Prozent auf eine Zunahme von 36 Prozent. Die Standard Konfiguration weist bei der Erhöhung der SDD bei einem

Öffnungswinkel eine kleinere Zunahme der Streustrahlung auf, ausser es wird mit der Blende oder der 1mm Zinn und 2mm Blei Verkleidung verglichen. Erwartet wurde, dass eine erhöhte SDD zu mehr Streustrahlung führt, da dabei der Detektor näher an der Rückwand ist. Somit wird der Detektor stärker von den an der Rückwand gestreuten Photonen beeinflusst. Weiter haben bei der grossen SDD der Granitblock sowie die Kabine einen grösseren Einfluss auf den Streustrahlenanteil. Erwartet wurde ebenfalls, dass die Blende bei dem Simulationssetup von 135 Grad Öffnungswinkel bei der Erhöhung der SDD von 400mm auf 1000mm den Anteil an zusätzlicher Streustrahlung stark reduziert. Die Blende reduziert durch ihr geometrisches Design den Öffnungswinkel des Primärstrahls auf rund 70 Grad, wodurch die Kabinenwände, Instrumente und der Granitblock zu weniger Streustrahlung führen.

3.2.2. Einfluss Abstand Phantom zu Detektor (ODD)

Die untenstehende Tabelle 4 zeigt auf, wie sich der Anteil der Streustrahlung verändert, wenn pro Simulationssetup und Konfiguration nur die ODD verändert wird. Dabei können die unterschiedlichen Konfigurationen und Simulationssetups miteinander verglichen werden. Positive Werte zeigen eine Erhöhung der Streustrahlung auf.

Tabelle 4: Ergebnisse bei Veränderung der ODD

SDD in mm	1000					
	50			135		
Öffnungswinkel in Grad						
ODD in mm	250 auf 50	50 auf 0	250 auf 0	250 auf 50	50 auf 0	250 auf 0
Standard	3%	-7%	-5%	0%	-36%	-36%
1mm Aluminium	2%	-6%	-4%	2%	-38%	-37%
Rückseite	3%	-8%	-5%	-1%	-36%	-37%
Vorderseite	3%	-8%	-5%	1%	-37%	-36%
Links und Rechts	1%	-7%	-6%	0%	-35%	-35%
1mm Aluminium und 1mm Zinn	1%	-6%	-5%	3%	-36%	-34%
Rückseite	3%	-8%	-5%	-2%	-35%	-37%
Vorderseite	2%	-7%	-5%	1%	-37%	-37%
Links und Rechts	2%	-8%	-7%	-2%	-33%	-34%
1mm Zinn und 2mm Blei	4%	-6%	-3%	-2%	-36%	-37%
Rückseite	4%	-7%	-4%	3%	-37%	-35%
Vorderseite	3%	-7%	-4%	0%	-35%	-35%
Links und Rechts	2%	-7%	-5%	0%	-36%	-37%
Granit mit 1mm Aluminium	3%	-7%	-5%	4%	-38%	-35%
Granit mit 1mm Blei	1%	-7%	-6%	-1%	-38%	-38%
Granit mit 1mm Zinn	2%	-7%	-5%	1%	-36%	-36%
Blende	1%	-6%	-5%	-4%	-17%	-20%

Aus der obenstehenden Tabelle kann herausgelesen werden, dass eine Reduktion der ODD von 250mm auf 50mm bei einem Öffnungswinkel von 50 Grad zu einer erhöhten Streustrahlung kommt. Photonen, welche am Streugitter streuen, erreichen mit grösserer Wahrscheinlichkeit den Detektor bei einer ODD von 50mm als bei einer ODD von 250mm. Wird die ODD im gleichen Masse bei einem Öffnungswinkel von 135 Grad verringert, so ist keine klare Richtung mehr zu erkennen. Beim Öffnungswinkel von 135 Grad werden mehr Photonen an der Kabine und an dem Granitblock gestreut. Dabei haben die unterschiedlichen Verkleidungen einen Einfluss auf den Streustrahlenanteil. Somit lassen sich die

positiven wie auch negativen Vorzeichen erklären. Wird die ODD von 250mm oder von 50mm auf 0mm reduziert, findet stets eine Reduktion des Streustrahlenanteils statt. Das Streugitter deckt einen Teil des Detektors ab und absorbiert einen Teil der einfallenden, gestreuten Photonen. Auffallend ist, dass die Reduktion deutlich stärker ist bei dem grösseren Öffnungswinkel. Vergleicht man die verschiedenen Konfigurationen, also die vertikalen Werte, mit der Standard Konfiguration bei der Reduktion der ODD, so kann man erkennen, dass die Streustrahlenreduktion der Konfigurationen nur um plus minus drei Prozent von der Streustrahlenreduktion der Standard Konfiguration abweicht. Die Konfiguration mit der Blende weist eine deutlich kleinere Reduktion der Streustrahlung bei verringerter ODD auf. Die Blende selbst reduziert den Anteil an Streustrahlung wie in Kapitel 3.1.6. beschrieben bereits. Deswegen findet mit der Blende bei einer Veränderung der ODD von 250mm oder 50mm auf 0mm eine kleinere Reduktion des Streustrahlenanteils statt als bei anderen Konfigurationen wie zum Beispiel bei Verkleidungen der Wände oder des Granits.

3.2.3. Einfluss des Öffnungswinkels

Die untenstehende Tabelle 5 zeigt auf, wie sich der Anteil der Streustrahlung verändert, wenn pro Simulationssetup und Konfiguration nur der Öffnungswinkel verändert wird. Dabei können die unterschiedlichen Konfigurationen und Simulationssetups miteinander verglichen werden. Positive Werte zeigen eine Erhöhung der Streustrahlung auf.

Tabelle 5: Ergebnisse bei Veränderung des Öffnungswinkels

SDD in mm	400	1000		
Öffnungswinkel in Grad	135 auf 50			
ODD in mm	50	0	50	250
Standard	-23%	-12%	-39%	-41%
1mm Aluminium	-23%	-9%	-41%	-41%
Rückseite	-23%	-13%	-39%	-42%
Vorderseite	-23%	-12%	-40%	-41%
Links und Rechts	-23%	-14%	-40%	-41%
1mm Aluminium und 1mm Zinn	-22%	-4%	-35%	-34%
Rückseite	-23%	-13%	-39%	-42%
Vorderseite	-22%	-10%	-40%	-40%
Links und Rechts	-23%	-11%	-35%	-37%
1mm Zinn und 2mm Blei	-22%	-10%	-38%	-42%
Rückseite	-23%	-13%	-40%	-41%
Vorderseite	-23%	-14%	-40%	-42%
Links und Rechts	-22%	-11%	-40%	-41%
Granit mit 1mm Aluminium	-24%	-13%	-42%	-41%
Granit mit 1mm Blei	-23%	-8%	-39%	-40%
Granit mit 1mm Zinn	-24%	-11%	-39%	-40%
Blende	-19%	3%	-9%	-14%

Die Tabelle oben zeigt, dass bei jeder Konfiguration und bei jedem Simulationssetup der Anteil der Streustrahlung reduziert wird, wenn der Öffnungswinkel reduziert wird. Nur bei der Blende wird bei einer SDD von 1000mm und einer ODD von 0m der Streustrahlenanteil erhöht. Vergleicht man die Werte bezüglich den Verkleidungen, dann fällt auf, dass vor allem die 1mm Aluminium und 1mm Zinn

Verkleidung den Anteil an Streustrahlung weniger stark reduziert bei einer Veränderung des Öffnungswinkels. Auch bei der Konfiguration «Links und Rechts» bei der 1mm Aluminium und 1mm Zinnverkleidung beobachtet man ebenfalls eine verkleinerte Reduzierung der Streustrahlung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die beiden Konfigurationen den Streustrahlenanteil beim grossen Öffnungswinkel von 135 Grad bereits reduzieren. Die anderen Verkleidungskonfigurationen unterscheiden sich weniger von der Standard Konfiguration. Ebenfalls unterscheidet sich der Anteil der Streustrahlenreduktion bei der ODD von 50mm und der ODD von 250mm nur um drei bis vier Prozent. Auch bei der Konfiguration mit der Blende wird der Anteil an Streustrahlung weniger stark reduziert, wenn der Öffnungswinkel verkleinert wird. Dies liegt daran, dass die Blende durch ihr geometrisches Design den Öffnungswinkel bereits auf 70.5 Grad reduziert. Somit ist der Streustrahlenanteil vor dem verkleinern des Öffnungswinkels bereits kleiner und wird deswegen beim Verändern des Öffnungswinkels weniger stark reduziert.

3.3. Ergebnisse aus der realen Messung an LuCi

Die folgende Abbildung 21 zeigt die Auswertung aus dem realen Experiment an LuCi. Die Bilder wurden mit derselben Methode ausgewertet, wie die Bilder aus den Simulationen. Der blaue Balken repräsentiert die Messung in der Standardkonfiguration. Nach dieser Konfiguration wurde die Simulation aufgebaut. Der orange Balken repräsentiert die Messung mit dem eingefügten Blende (Kollimator). Die Messungen wurden mit dem Öffnungswinkel der Quelle von 135 Grad und einer ODD von 50mm durchgeführt.

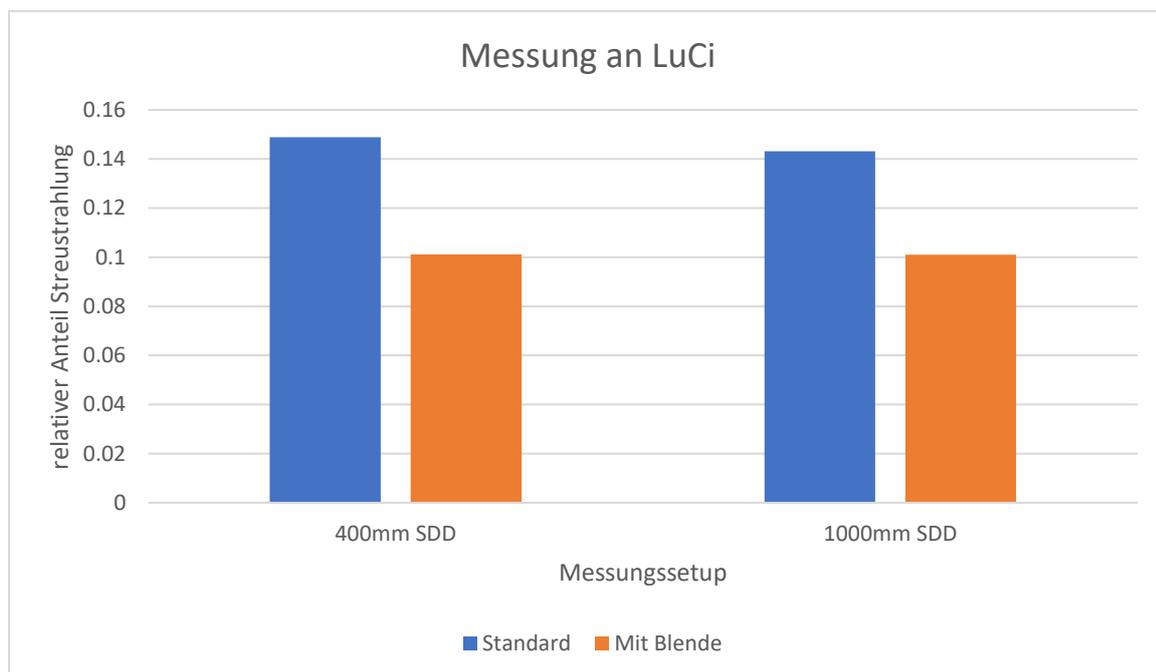


Abbildung 21: Ergebnisse Messung mit und ohne Blende

Aus der Grafik zeigt sich, dass die eingefügte Blende die Streustrahlung reduzieren konnte. Bei einer SDD von 400mm konnte mit der Blende der Anteil an Streustrahlung gegenüber der Messung ohne Blende um 32% reduziert werden. Bei einer SDD von 1000mm konnte mit der Blende der Anteil an Streustrahlung gegenüber der Messung ohne Blende um 29.5% reduziert werden. Aus den Ergebnissen der Simulation wurde erwartet, dass die Blende bei einer SDD von 1000mm den Anteil an Streustrahlung deutlich reduzieren wird. Nicht erwartet wurde jedoch, dass der Anteil an Streustrahlung durch die Blende bei einer SDD von 400mm ebenfalls um die 30% reduziert wird. Die Simulation hat

gezeigt, dass die Blende bei der SDD von 400mm den Streustrahlenanteil nur um 5% reduziert. Ebenfalls wurde nicht erwartet, dass der Streustrahlenanteil bei dem Standard Messungssetup bei einer SDD von 1000mm nur etwa 14% beträgt. Aus den Ergebnissen der Simulationen der Standardkonfigurationen wurden Werte um die 20% berechnet. Dieser Vergleich ist in der Abbildung 22 ersichtlich dargestellt. Ein Grund für die Abweichung zwischen der Messung und der Simulation ist der unterschiedliche Aufbau des CT-Geräts in Realität und in der Simulation, die Simulation bildet LuCi nicht mit allen Details nach. Des weiteren Fehlen einige Angaben zu der Materialzusammensetzung bei

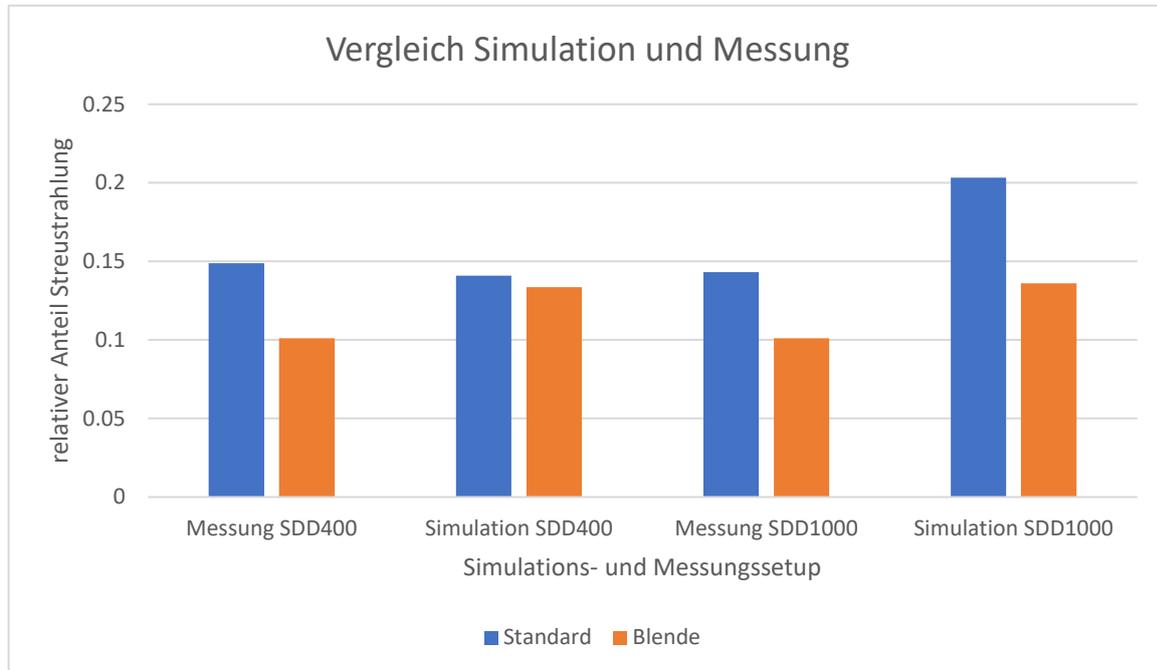


Abbildung 22: Ergebnisse Vergleich Simulation und Messung mit oder ohne Blende

LuCi, wie das in der vorangegangenen Bachelorarbeit (Dirnberger, 2021) beschrieben wurde. Weiter entspricht der bei der Messung verwendete Kollimator nicht genau dem Aufbau der Blende in der Simulation. In der Simulation wurde die Blende sehr einfach aus Quadern erstellt, ein Nachbau für die Messung wäre zu aufwendig gewesen. Deswegen wurde der in Kapitel 2.2. beschriebene Kollimator verwendet. Ebenfalls ist die Blende in der Simulation freischwebend, in der Messung wurde der Objekthalter dazu nahe an die Quelle bewegt. Weiter entspricht das Streugitter in der Simulation nicht exakt dem Streugitter aus der Messung. In der Simulation sind die Streuzentren freischwebend, in der Messung wurden die Streuzentren durch ein Plastikgehäuse zusammengehalten.

4. Diskussion

Im ersten Unterkapitel wird über die erhaltenen Resultate reflektiert und gewonnene Erkenntnisse aus den Simulationen und der Messung festgehalten. Im zweiten Kapitel wird die Handlungsempfehlung für den Industriepartner formuliert und begründet.

4.1. Diskussion der Resultate

Aus den Simulationen hat sich gezeigt, dass die Verkleidung der Wände mit 1mm Aluminium und 1mm Zinn den Anteil an Streustrahlung im Vergleich zu den anderen Verkleidungen der Wände am besten reduzieren kann. Die anderen Verkleidungsvarianten haben einen sehr geringen Einfluss auf die Reduktion des Streustrahlenanteils. Die Verkleidung aller Wände mit der 1mm dicken Aluminium und 1mm dicken Zinnschicht hat sich dabei als beste Variante gezeigt, dicht gefolgt von der Variante, wo nur die Wände links und rechts verkleidet werden. Die Verkleidung des Granitblocks hat keine Wirkung auf die Reduktion des Streustrahlenanteils gezeigt. Einige Verkleidungsvarianten führten sogar dazu, dass der Anteil an Streustrahlung zugenommen hat. Die Ergebnisse aus diesen Simulationen scheinen plausibel, gestützt dadurch, dass die Ergebnisse der verschiedenen Konfigurationen in etwa im gleichen Rahmen erfolgten.

Die Blende zeigt sehr gute Resultate bezüglich der Streustrahlenreduktion. Diese Variante schlägt auch die Verkleidung aller Wände mit 1mm Aluminium und 1mm Zinn. Die Verkleidung der Wand mit 1mm Aluminium und 1mm Zinn konnte im besten Fall die Streustrahlung um 10% reduzieren, die Blende erreichte eine maximale Reduktion der Streustrahlung von 33%. Die Resultate aus den Simulationen mit der Blende zeigen sich als plausibel, wenn man sie mit den Resultaten der Simulationen vergleicht, bei denen der Öffnungswinkel reduziert wurde. Die Blende reduziert den Öffnungswinkel ebenfalls. Weiter ist die Plausibilität der Ergebnisse der Simulation mit der Blende durch die Messung an LuCi gestützt. Obwohl ein unterschiedliches Design für eine Blende bei der Messung verwendet wurde, lag die Reduktion des Streustrahlenanteils bei der Messung ebenfalls bei 32%

Deutlich effektiver als die Verkleidung der Wände oder des Granitblocks zeigte sich die Veränderung der SDD oder die Veränderung des Öffnungswinkels der Quelle. Wird die SDD erhöht, dann zeigt sich aus den Simulationen, dass sich auch der Anteil an Streustrahlung erhöht. Ebenfalls führt eine Vergrößerung des Öffnungswinkels zu einem deutlich grösseren Anteil an Streustrahlung. Auch die Reduktion der ODD auf 0mm zeigte sich als wirkungsvoll, um den Anteil an Streustrahlung zu reduzieren. Bei den Ergebnissen bei einer SDD von 1000mm, einer ODD von 50mm und einem Öffnungswinkel von 135 Grad zeigen sich Unterschiede zwischen der Simulation und der Messung. In der Simulation zeigte sich ein Streustrahlenanteil von rund 20% bei der Standardkonfiguration, bei der Messung nur rund 14% Streustrahlenanteil. Diese Unterschiede könnten zu einem Teil davon kommen, dass die Simulation das CT-Gerät nur zu einem gewissen Detailierungsgrad nachstellen kann. Weiter könnten auch Unterschiede des Streugitters in der Simulation und bei der Messung zu diesem Ergebnisunterschied beigetragen haben.

Zusammenfassend kann aus den Ergebnissen geschlossen werden, dass die in den Simulationen gewählten Verkleidungen keinen nennenswerten Beitrag zur Reduktion der Streustrahlung leisten. Andere, nicht in dieser Arbeit simulierte Verkleidungen könnten einen unterschiedlichen Einfluss auf die Reduktion der Streustrahlung haben. Jedoch hat sich aus den Simulationen gezeigt, dass die Veränderung der SDD oder des Öffnungswinkels viel effektiver ist. Für die Reduktion des Öffnungswinkels hat sich die Blende in der Simulation wie auch in der Messung als Hilfsmittel erwiesen, welches den Streustrahlenanteil in beiden Fällen um rund 30% reduzieren konnte. Die zu

Beginn in Kapitel 1.3. gestellte Frage, wie das System angepasst werden muss, um den Streustrahlenanteil zu reduzieren, kann mit folgender Aussage beantwortet werden. Das System sollte so angepasst werden, dass die SDD sowie auch der Öffnungswinkel reduziert werden. Diese Antwort ist im folgenden Kapitel als Handlungsempfehlung ausformuliert.

4.2. Handlungsempfehlung

Aufgrund der Ergebnisse aus den Simulationen und aus der Messung wird empfohlen, die Kontrolle des Öffnungswinkels in Angriff zu nehmen. Dazu eignet sich die Idee der Blende sehr gut. Die Blende hat sich in der Simulation wie auch in der Messung als effektiv gezeigt. Sie reduziert in beiden Fällen den Streustrahlenanteil um rund 30%. Weiter wird durch die Blende der Einfluss auf den Streustrahlenanteil durch veränderte SDDs und ODDs geringer. Zudem ist die Blende ohne allzu grossen Aufwand schnell hergestellt, es können verschieden grosse Kegelstümpfe für die wichtigsten SDDs gebohrt werden, welche am meisten für Messungen verwendet werden. Verschiedene Materialien und verschiedene Dicken sollten dabei in Betracht gezogen werden. Weiter sollte versucht werden, die SDD bei den Messungen möglichst gering zu halten, da auch sie den Anteil an Streustrahlung stärker beeinflusst.

5. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlichst bei meinem betreuenden Dozenten Philipp Schütz für seine Unterstützung während des gesamten Semesters bedanken. Trotz seines sehr vollen Terminkalenders hat er stets Zeit für mich gefunden und meine Fragen beantwortet. Weiter bin ich ihm sehr dankbar, dass er mir beim Programmieren und dem schwierigen Thema der Physik unter die Arme gegriffen hat. Ein weitere Dank geht an Jorge, der mich ebenfalls während dem ganzen Semester begleitet hat und mir mit seiner Erfahrung weiterhelfen konnte. Des Weiteren möchte ich mich bei David und Damian für ihre wertvollen Inputs bedanken. Auch danke ich Damian für die Möglichkeit, mit ihm die Messung an LuCi gemacht zu haben. Ich empfand das Zusammenarbeiten mit allen von euch super angenehm und bedanke mich herzlichst für dieses tolle und spannende Semester.

6. Diverse Verzeichnisse

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Simulationssetups	9
Tabelle 2: Vergleich Ergebnisse aller Modifikationen.....	20
Tabelle 3: Ergebnisse bei Veränderung der SDD.....	22
Tabelle 4: Ergebnisse bei Veränderung der ODD	23
Tabelle 5: Ergebnisse bei Veränderung des Öffnungswinkels.....	24

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Absorption und Streuung im Patienten	5
Abbildung 2: Photo-Effekt	6
Abbildung 3: Compton-Effekt.....	6
Abbildung 4: simuliertes Spektrum.....	7

Abbildung 5:Wahrscheinlichkeit der Effekte.....	7
Abbildung 6:Ausgangs-Simulationsumgebung.....	9
Abbildung 7: Kabine mit Aluminiumverkleidung.....	10
Abbildung 8: 1mm Aluminium und 1mm Zinn Wand.....	10
Abbildung 9: 1mm Zinn und 2mm Blei Wand.....	11
Abbildung 10: Granit verkleidet.....	11
Abbildung 11: Blende in Simulationsumgebung	12
Abbildung 12: Zoom auf Blende.....	12
Abbildung 13: Detektor mit Streugitter.....	12
Abbildung 14: Quelle mit Kollimator und Filter.....	13
Abbildung 15: Vergleich Ergebnisse Standard Konfiguration.....	14
Abbildung 16: Ergebnisse 1mm Aluminiumverkleidung an den Wänden.....	15
Abbildung 17: Ergebnisse 1mm Aluminium und 1mm Zinn Verkleidung an den Wänden	16
Abbildung 18: Ergebnisse 1mm Zinn und 2mm Blei Verkleidung an den Wänden	17
Abbildung 19: Ergebnisse Granitblock verkleidet	18
Abbildung 20: Ergebnisse mit und ohne Blende	19
Abbildung 21: Ergebnisse Messung mit und ohne Blende.....	25
Abbildung 22: Ergebnisse Vergleich Simulation und Messung mit oder ohne Blende	26

Quellen

Abbildung 1: (*Strahlenschutz in der Röntgenunterstützten interventionellen Therapie - ASU, 2019*)

Abbildung 2: (*Röntgenstrahlung (Mediziner), o. J.*)

Abbildung 3: (*Röntgenstrahlung (Mediziner), o. J.*)

Abbildung 5: (Trüeb, 2002)

Alles über das Streustrahlenraster. (o. J.). MTA-R.de. Abgerufen 8. Juni 2022, von <https://www.mta-r.de/blog/streustrahlenraster/>

Bindungsenergie. (o. J.). Abgerufen 8. Juni 2022, von <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/bindungsenergie/1606>

Brigadoi, S., & Cooper, R. J. (2015). How short is short? Optimum source–detector distance for short-separation channels in functional near-infrared spectroscopy. *Neurophotonics*, 2(2), 025005. <https://doi.org/10.1117/1.NPh.2.2.025005>

COMPTON-Effekt | LEIFiPhysik. (o. J.). Abgerufen 8. Juni 2022, von <https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/grundwissen/compton-effekt>

Dirnberger, D. (2021). *Simulation and Measurement of Scattered Radiation in X-Ray Computed Tomography.*

Ist eine CT-Untersuchung unbedenklich? Chancen und Risiken einer CT. (o. J.). *Vorsorge-Prävention.* Abgerufen 8. Juni 2022, von <https://www.xn--vorsorge-prvention-vtb.de/ist-eine-ct-untersuchung-computertomografie-unbedenklich/>

Kawamata, Y., Ejiri, A., Matsuzaki, K., Takase, Y., Tsujii, N., Onchi, T., & Nagashima, Y. (2019). Improvement of Aperture Configuration to Reduce the Stray Light for Thomson Scattering

- Measurement Using a Peripheral Beam Profile Monitor. *Plasma and Fusion Research*, 14(0), 1402072–1402072. <https://doi.org/10.1585/pfr.14.1402072>
- Komathinathan, N. (2022). *Estimation of scattered radiation for X-ray computed tomography*.
- Kuger, L., & Rigaud, G. (2022). *On multiple scattering in Compton scattering tomography and its impact on fan-beam CT* (arXiv:2008.06699). arXiv. <http://arxiv.org/abs/2008.06699>
- NIST: X-Ray Mass Attenuation Coefficients—Table 3. (o. J.). Abgerufen 8. Juni 2022, von <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html>
- Radioaktivität – Was ist das? (o. J.). Nagra. Abgerufen 8. Juni 2022, von <https://www.nagra.ch/de/radioaktivitaet-was-ist-das>
- Röntgenstrahlung (Mediziner). (o. J.). <https://www.physik.nat.fau.de/files/2018/06/R%C3%B6ntgenstrahlung-Mediziner.pdf>
- Schörner, K. (o. J.). *Development of Methods for Scatter Artifact Correction in Industrial X-ray Cone-beam Computed Tomography*. 145.
- Schuetz, P., Miceli, A., Flisch, A., Jerjen, I., Hofmann, J., & Sennhauser, U. (o. J.). *Strategies for the reduction of environmental scattering in X-ray Computed Tomography*. 8.
- Schuetz, P., Miceli, A., Jerjen, I., Flisch, A., Hofmann, J., Broennimann, R., & Sennhauser, U. (2013). Reducing environmental scattering in industrial computed tomography by system redesign. *NDT & E International*, 58, 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.04.005>
- Semper, M. I. (2016, September 27). Bildqualität – Streustrahlung I [Image Quality – Scatter I]. *Voxeltalk*. <https://voxeltalk.wordpress.com/2016/09/27/bildqualitat-streustrahlung-i-image-quality-scatter-i/>
- Strahlenschutz in der Röntgenunterstützten interventionellen Therapie—ASU. (2019, Oktober 31). <https://www.asu-arbeitsmedizin.com/praxis/strahlenschutz-der-roentgenunterstuetzten-interventionellen-therapie>
- Strahlenwirkungen. (o. J.). Bundesamt für Strahlenschutz. Abgerufen 8. Juni 2022, von https://www.bfs.de/DE/themen/ion/wirkung/wirkung_node.html
- Thanasupsombat, C., Thongvigitmanee, S. S., Aootaphao, S., & Thajchayapong, P. (2018). A Simple Scatter Reduction Method in Cone-Beam Computed Tomography for Dental and Maxillofacial Applications Based on Monte Carlo Simulation. *BioMed Research International*, 2018, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2018/5748281>
- Trüeb, P. (2002). *Kompendium für ärztliche Strahlenschutzsachverständige*. Paul Haupt.
- Vetsuisse.com. (o. J.). Abgerufen 8. Juni 2022, von https://vetsuisse.com/vet-imi/lernmodule/htmls/print_all.html?radiosurfvet|radgeneral|physics|interactionmaterial
- Was ist Rayleigh-Streuung—Thomson-Streuung—Definition. (2019, Dezember 28). Radiation Dosimetry. <https://www.radiation-dosimetry.org/de/was-ist-rayleigh-streuung-thomson-streuung-definition/>