

# Quantitative Untersuchung der Streubeiträge in Hochenergie- Röntgencomputertomographie

Carina STRITT<sup>1</sup>, Philipp SCHUETZ<sup>1</sup>, Mathieu PLAMONDON<sup>1</sup>, Alexander FLISCH<sup>1</sup>,  
Jürgen HOFMANN<sup>1</sup>, Urs SENNHAUSER<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Dübendorf, Schweiz

**Kurzfassung.** Computertomographie (CT) ist eine bewährte Methode in den Bereichen Fehleranalyse und Qualitätskontrolle. Die Energie der hierbei benutzten Röntgenstrahlung bestimmt die Eindringtiefe der Strahlung und schränkt damit die Grösse und das Material des zu untersuchenden Objektes ein. Für grosse, dichte und schwere Objekte sind Photonenenergien von mehr als einem Megaelektronenvolt (MeV) nötig, um nutzbare Transmissionswerte zu erreichen.

Ein wichtiger Faktor für die Qualität hochenergetischer Röntgentomographien ist der Anteil der Streustrahlung auf den CT-Bildern. Röntgenstrahlung kann sowohl im zu untersuchenden Objekt, als auch vom Messinstrument und -umfeld streuen und führt zu einem verfälschten Transmissionsbild. Neben Streu-Effekten kommt für MeV Photonen zusätzlich der physikalische Prozess der Paarbildung ins Spiel.

Die Auswirkung der einzelnen Streu-Prozesse auf das Transmissionsbild soll hier untersucht werden. Dafür wird mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen der Einfluss der verschiedenen Streubeiträge untersucht. Im Gegensatz zu früheren Studien, wird hier nicht nur ein Satz von einfachen geometrischen Objekten aus unterschiedlichen Materialien untersucht, sondern es werden auch vereinfachte Modelle der Komponenten eines CT-Scanners benutzt, um den Beitrag der Streuung verschiedener Systemkomponenten abzuschätzen.

## 1. Einführung

Röntgencomputertomographie (CT) ist eine beliebte Methode im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung. Sie ist in der Fehleranalyse oder Metrologie als bildgebendes Verfahren weit verbreitet [1]. Das Ergebnis und die Qualität einer computertomographischen Messung hängt dabei von vielen verschiedenen Faktoren ab. Nebst Messparametern wie Integrationszeit und der Größe des gewählten Winkelschrittes beeinflussen vor allem gestreute Röntgenstrahlen die Qualität der Messung. Dabei stammt die Streustrahlung nicht nur aus dem zu messenden Objekt selbst, sondern kann vor allem auch in den Komponenten der CT-Anlage entstehen. Insbesondere für CT-Anlagen, welche im Bereich einiger hundert keV betrieben werden, hat sich der Einfluss der Streustrahlung als einer der Hauptfaktoren herausgestellt, welche Auswirkungen auf die Qualität einer CT-Messung haben [2, 3]. Für die Untersuchung von Objekten, welche eine besonders hohe Röntgenabsorption aufweisen, werden aufgrund des Signal zu Rausch Verhältnisses allerdings noch höhere Energien im Bereich mehrerer MeV benötigt. Bei diesen Energien beeinflussen vor allem Photo-Absorption, Compton Streuung, Rayleigh Streuung und die Paar Produktion die Ausbreitung der Röntgenstrahlung. Das heißt für die verlässliche



Untersuchung großer Objekte aus stark absorbierenden Materialien, wie zum Beispiel Stahlgussteilen oder Turbinenschaufeln aus Nickel-Basis-Legierungen, muss der Einfluss der Streustrahlung auf das Transmissionsbild verstanden und vermindert werden.

Um die Beiträge der Streustrahlung auf das Transmissionsbild quantifizieren zu können, wird hier das Monte-Carlo Simulationspaket GEANT4 verwendet [4]. Es erlaubt die Simulation der Propagation der Röntgenstrahlung, sowie die gezielte Untersuchung der Einflüsse der verschiedenen physikalischen Prozesse. Darüber hinaus kann der Einfluss der Komponenten der CT-Anlage auf die Streubeiträge im Detektor untersucht werden. Auf diese Art und Weise kann kostengünstig ein großer Parameterraum zur Optimierung einer CT-Anlage abgetastet werden.

## **2. Methoden**

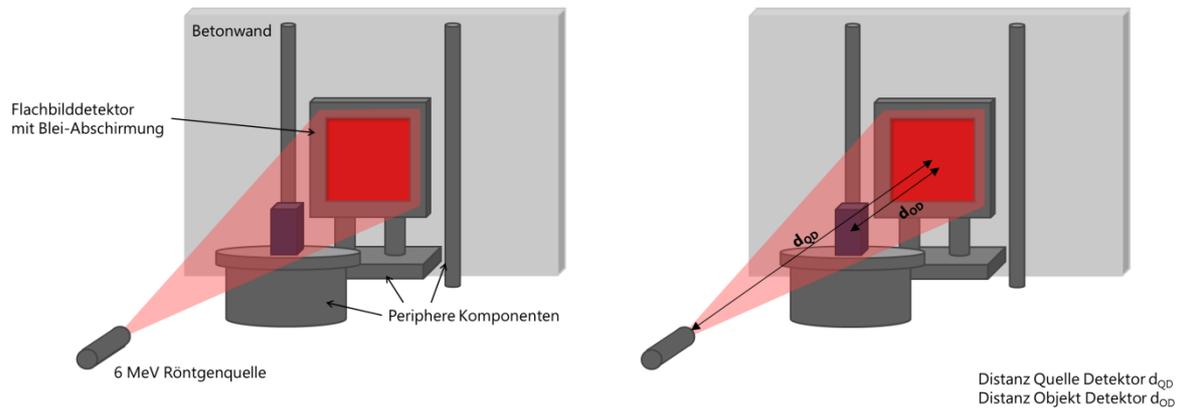
### *2.1 Simulationspaket*

Die Monte-Carlo Simulationen wurden mit dem Simulationspaket GEANT4 (Version 4.9.6) durchgeführt. Als Datenbank der Wirkungsquerschnitte für die physikalischen Prozesse wurde die niederenergetische Erweiterung des Penelope Datensatzes verwendet. Simuliert wurden Photonen, Elektronen und Positronen. Die Photonen werden während der Propagation durch die Materie durch die physikalischen Prozesse der Rayleigh-Streuung, des Compton-Effektes, des Photoelektrischen Effektes und der Paarproduktion beeinflusst. Die Elektronen interagieren durch die Prozesse der Ionisation, Bremsstrahlung und Mehrfachstreuung. Positronen können darüber hinaus an einer Paarvernichtung, auch Annihilation genannt, teilhaben. Alle Komponenten des Systems wurden aus geometrischen Primitiven geformt, welchen die jeweiligen Materialien und Materialeigenschaften zugewiesen wurden.

Insbesondere wurde in den Simulationen Wert darauf gelegt, die wesentlichen Streuzentren in der CT Anlage zu finden und ihren Einfluss auf die Streubeiträge in der Radiographie zu quantifizieren. Darüber hinaus erlauben Simulationen die Überprüfung eines großen Parameterraumes in Bezug auf Form und Größe der Kollimatoren und Objekte. Ziel ist es eine optimale Konfiguration für die Aufnahmegeometrie zu finden.

### *2.2 Simulationsmodell*

Abbildung 1 zeigt eine Skizze des Simulationsaufbaus. Das Simulationsmodell besteht im Kern aus dem Flachbilddetektor mit einer 60mm dicken Blei-Abschirmung. Verschiedene periphere Komponenten des Systems, sowie eine Wand im Hintergrund werden in die Simulation mit einbezogen, um ihre Auswirkung auf die Streustrahlung zu ermitteln. Als periphere Komponenten wurden in diesem Fall ein Manipulator, eine vereinfachte Repräsentation der Detektorhalterung, sowie zwei Säulen eines weiteren CT Detektors im Hintergrund modelliert. Die Wand besteht aus Beton und wurde, da das System zu den Seiten offen gestaltet ist, nur im hinteren Bereich der CT Anlage berücksichtigt. Zu guter Letzt können verschiedene Objekte auf dem Manipulator platziert werden. Hier wurden Boxen verschiedener Grössen, sowie ein Stufenzylinder aus Stahl verwendet. Die Distanz zwischen Quelle und Wand bleibt fixiert bei 6600mm, während die Distanz zwischen Quelle und Detektor sowie die Distanz zwischen Objekt und Detektor verändert werden können. Es wird eine Röntgenquelle mit Kegelstrahl und einem Austrittswinkel von  $5^\circ$  simuliert. Das Röntgenspektrum des 6 MeV Linearbeschleunigers wird in einer separaten Simulation bestimmt und in diesen Simulationen als Eingabe verwendet. Der Brennfleck der Röntgenquelle wird als Kreisfläche mit einem Durchmesser von 2 mm modelliert.



**Abbildung 1:** Das Simulationsmodell besteht aus dem Flachbilddetektor mit einer 60mm dicken Blei-Abschirmung. Verschiedene periphere Komponenten des Systems sowie eine Wand im Hintergrund werden in die Simulation mit einbezogen um ihre Auswirkung auf die Streustrahlung zu ermitteln.

### 2.3 Simulation und Analyse

Pro Konfiguration wurden 10 Durchläufe mit jeweils  $10^7$  Photonentrajektorien und Unterschiedlichen seeds (Anfangswerten) für den Zufallsgenerator simuliert. Zur Berechnung der Fehlerwerte der gemessenen Größen wurde die Standardabweichung der 10 unabhängigen Ergebnisse ermittelt. Während der Propagation der Teilchen durch die Simulation werden jeweils diejenigen physikalischen Interaktionen aufgezeichnet, an denen sie teilhaben. Darüber hinaus wurde ein Prinzip der Vererbung implementiert, welches Sekundärteilchen die Information über die Prozesse ihrer Elternteilchen übermittelt. Schliesslich wird registriert, in welchen Komponenten des Systems die Prozesse stattgefunden haben. Dieser Vorgang wird, mit Ausnahme des Szintillators, in der ganzen Simulation durchgeführt. Prozesse, die im Szintillator stattfinden, werden nicht ausgewertet. Der Detektor selber besteht aus einem Aluminiumgehäuse mit 0.75 mm dicken Eintrittsfenster und einer 0.208 mm dicken Gadox Schicht als Szintillator. Das Signal im Detektor entsteht durch Energiedepositionen der Teilchen in der Szintillationsschicht.

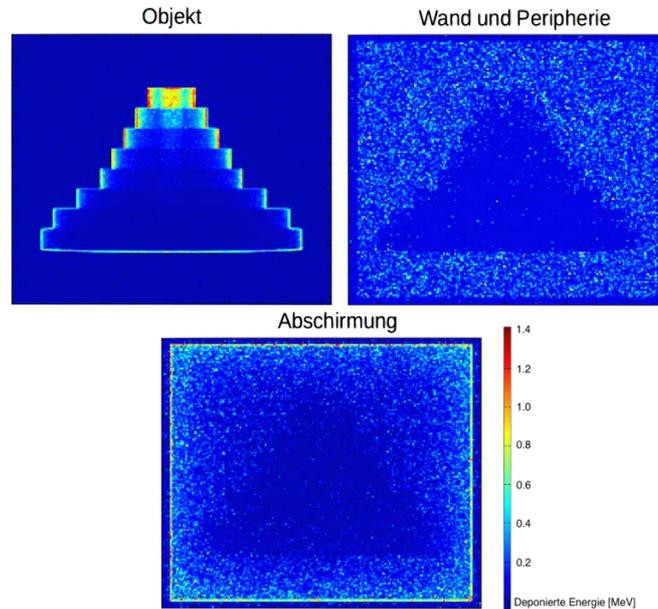
## 3. Ergebnisse

### 3.1 Streustrahlungszusammensetzung des nicht-optimierten Detektoraufbaus

Unsere Simulationen zeigen, dass im Fall eines Stufenzylinders  $16.5 \pm 0.6$  % der gesamten im Detektor deponierten Energie durch Photonen erzeugt wird, welche bereits ein oder mehr Streuprozesse durchlaufen haben. Der Hauptanteil der Streueignisse wird dabei durch das Eintrittsfenster des Detektors hervorgerufen. Da dieser Anteil der Streueignisse nur zu einer leichten Verbreiterung des Signals führt, kann er durch die Integration des Eintrittsfensters in die Punktantwort des Detektors mit der Detektionsgeometrie entfaltet werden.

Weitere Systemkomponenten, welche einen Einfluss auf die Streustrahlung im Detektor haben, sind die Abschirmung, das Messobjekt, das Detektor Gehäuse und die Wand hinter dem Detektor. Diese vier Komponenten liefern unterschiedliche Beiträge in Bezug auf die Verteilung im Flachbilddetektor. Während die vom Objekt ausgehende Streustrahlung vor allem von Durchmesser und Form des Objektes beeinflusst wird, sind die Signale der Streustrahlung von Wand und Gehäuse eher isotrop und können als Offset behandelt werden, wie es in Abbildung 2 visualisiert wurde. Die Abschirmung spielt, gegeben durch ihre Form, vor allem am Rand des Detektors eine Rolle. Untersucht man

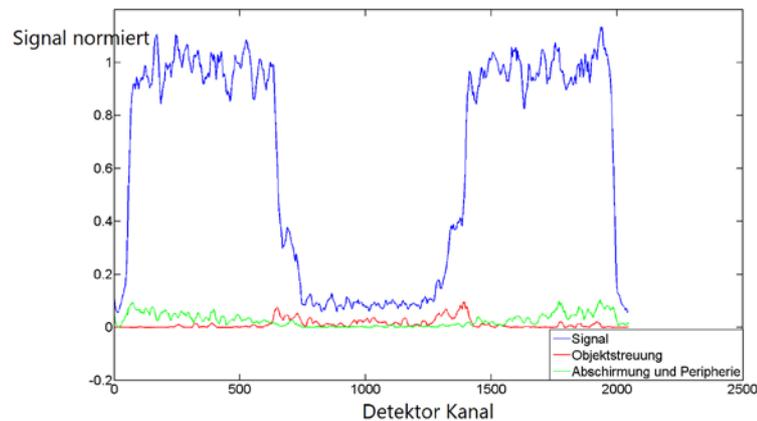
daher ein Objekt wie hier abgebildet, welches in der Radiographie nicht bis an den Rand des Detektors heranreicht, spielt die Streustrahlung welche von der Abschirmung verursacht wird, nur eine nebensächliche Rolle.



**Abbildung 2: Verteilung der Streustrahlung im Detektor hervorgerufen durch die verschiedenen Komponenten des Systems. Die Farbskala beschreibt die deponierte Energie in MeV.**

Die unterschiedlichen Anteile der Streustrahlung der Komponenten kann vor allem auch im Profil beobachtet werden. Abbildung 3 zeigt exemplarisch ein Profil des Röntgenbildes mit der Objektstreuung und der Streuung der Abschirmung. Es ist deutlich zu sehen, dass sich die Objektstreuung vor allem am Rand des Objektes abzeichnet, während die Streuung der Abschirmung vom Rand aus abfallend ausfällt.

Abgesehen von der Untersuchung der Anteile, welche die Systemkomponenten an der Streustrahlung haben, ist es insbesondere interessant, die physikalischen Effekte sämtlicher Teilchen zu analysieren, welche den Detektor erreichen. Hier ist es vor allem von Interesse, den Einfluss der Paarproduktion und Annihilation auf das Röntgenbild zu quantifizieren. Da diese Effekte erst ab einer Energie von über 1.024 MeV vorkommen, wurde dieser Effekt für Anlagen mit niedrigerer Energie nicht berücksichtigt. Abbildung 4 zeigt, dass unter den Streuprozessen die inkohärente Compton Streuung dominiert und formgebend ist im Gegensatz zu den anderen physikalischen Prozessen Rayleigh Streuung und Paarproduktion.



**Abbildung 3: Graustufenprofile gemittelt über 10 Pixel durch die Mitte des Stufenzylinders mit Objektstreuung und der Streuung der Abschirmung**

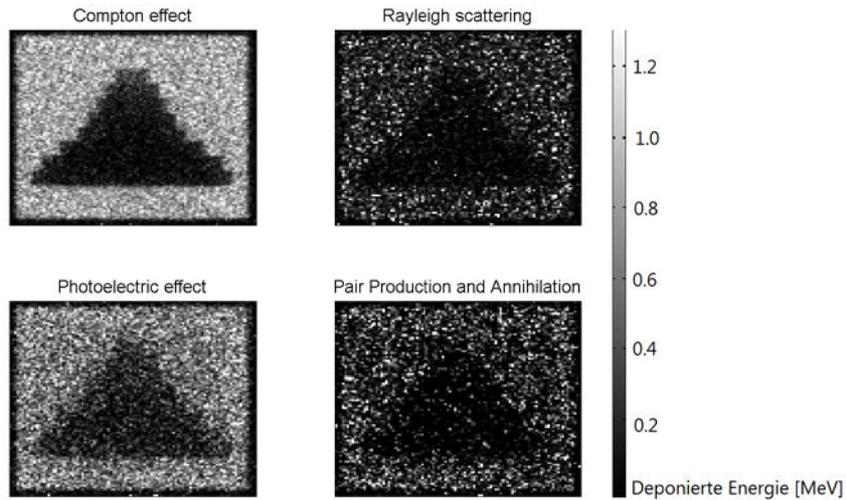


Abbildung 4: Anteile der verschiedenen physikalischen Prozesse an der Streustrahlung.

Tabelle 1: Prozentualer Vergleich der Gesamtanteile der physikalischen Prozesse an der Streustrahlung.

Streustrahlung total: 16.49 ± 0.57 %	Compton	Rayleigh	Photoel. Absorption	Paarproduktion und Annihilation
Prozent in Bezug auf Signal	11.9%	0.2%	3.9%	0.5%
Prozent in Bezug auf das reine Streusignal	72.1%	1.2%	23.5%	3.1%

Vergleicht man den Anteil der gestreuten Prozessen erster Ordnung und den Mehrfachstreu Prozessen sieht man, dass sich die Mehrfachstreuung zwar weniger dominant als die Einfachstreuung auf das Ergebnis auswirkt, sie jedoch immerhin einen Anteil von etwa 38 % an der gesamt gestreuten Strahlung ausmacht.

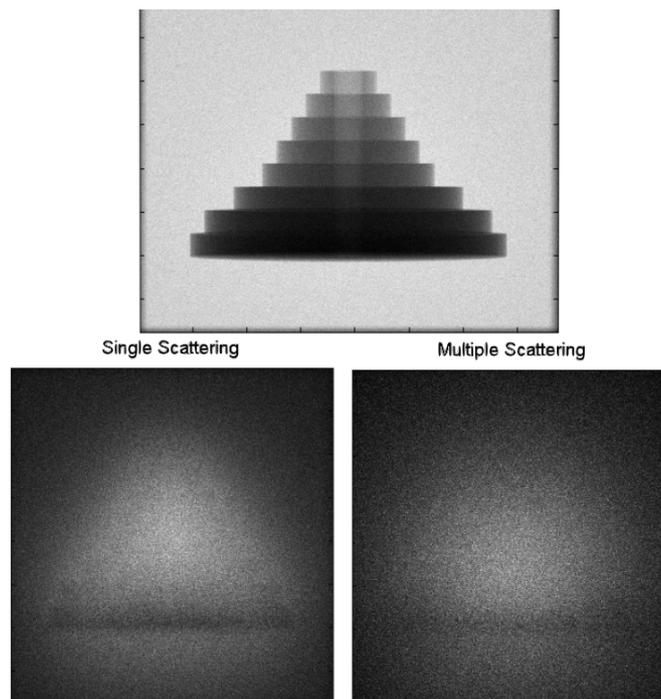


Abbildung 5: Vergleich von Einfach und Mehrfachstreuung.

Tabelle 2: Prozentualer Vergleich von Einfach- und Mehrfachstreuung.

	Primärstrahlung	Einfach gestreute Photonen	Mehrfach gestreute Photonen
Prozent in Bezug auf Signal	83%	10.4%	6.6%
Prozent in Bezug auf das reine Streusignal	-	61.2%	38.8%

### 3.2 Variation der Distanzen im System

In einem ersten Optimierungsversuch wird die Distanz zwischen Quelle und Detektor verändert. In Abbildung 6 fällt zuerst auf, dass die deponierte Energie durch gestreute Photonen mit verringernder Distanz zwischen Quelle und Detektor abnimmt. Ausserdem ist zu sehen, dass sich vor allem der Anteil der total gestreuten Strahlung der Abschirmung verändert. Dies liegt vor allem daran, dass mit der geringeren Distanz ein geringerer Anteil der Abschirmung vom Primärstrahl getroffen wird. Dieser Effekt ist in Abbildung 7 illustriert. Darüber hinaus landet auch weniger Streustrahlung aus dem Objekt in der Abschirmung. Allerdings schlägt sich dieser Effekt nicht merkbar positiv im Gesamtanteil der Objektstreuung nieder. Dies rührt vor allem daher, dass die Position des Objektes fix gehalten wurde und daher mit abnehmender Distanz das Objekt näher an den Detektor rückt. Das heisst, dass ein grösserer Teil der Streustrahlung des Objektes direkt in den Detektor gelangt. Der Anteil der Streustrahlung ausgehend von Gehäuse und Peripherie

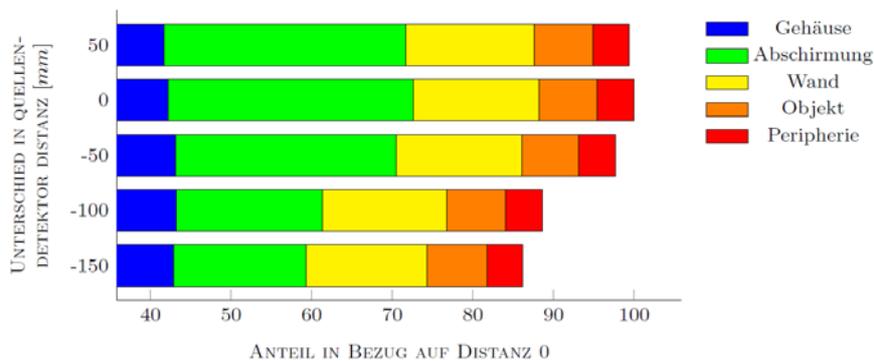


Abbildung 6: Einfluss der Variation der Distanz zwischen Quelle und Detektor auf die Streustrahlung.

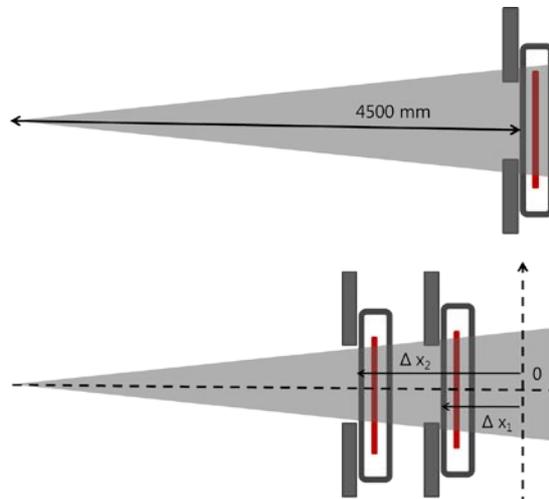


Abbildung 7: Skizze der Abstandsänderung zwischen Quelle und Detektor.

ändert sich mit der Veränderung der Distanz zwischen Quelle und Detektor ebenfalls nicht merklich. Dies unterstützt die Annahme, dass diese Komponenten als konstanter Offset zur Streustrahlung beitragen und von verschiedenen Aufnahmegeometrien nicht signifikant verändert werden. Das heisst, in diesem Fall ist hauptsächlich der Anteil der Abschirmung an der Streustrahlung optimiert worden. Denselben Effekt kann man durch eine genauere Kollimation an der Quelle erreichen. Insgesamt führt eine Änderung der Distanz um 150 mm in diesem Fall zu einer Verringerung der total deponierten Energie der Streustrahlung von 13.5 %.

Ein zweites Optimierungsverfahren konzentriert sich nun vor allem auf die Objektstreuung. Dazu wird das Objekt zuerst in einer geringen Distanz von 100 mm vor dem Detektor platziert. Dann wird die Distanz zwischen Objekt und Detektor vergrössert und die Auswirkung auf die im Detektor deponierte Energie der Objektstreuung beobachtet. Die Distanz zwischen Quelle und Detektor wird währenddessen konstant gehalten. In Abbildung 8 ist zu sehen, dass zuerst keine grosse Veränderung der gesamt deponierten Energie der Objektstreuung erkennbar ist. Erst ab einer Distanzänderung von über 700 mm, also einer Gesamtdistanz zwischen Detektor und Objekt von 800 mm nimmt die aufgenommene Objektstreuung deutlich ab. Das liegt vor allem daran, dass die Comptonstreuung in diesem Energiebereich sehr nach vorne gerichtet ausfällt. Bei einer Distanz von über einem Meter zwischen Detektor und Objekt lässt sich eine Reduktion der total deponierten Energie durch Streustrahlung von 37 % feststellen. Allerdings erlauben die Grösse des Objektes und auch die Grösse des Detektors oftmals keine Objekt Detektor Distanzen dieser Grössenordnung.

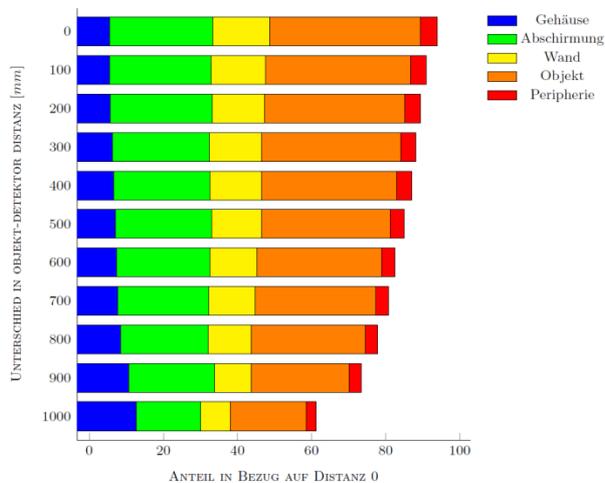


Abbildung 8: Einfluss der Variation der Distanz zwischen Objekt und Detektor auf die Streustrahlung.

#### 4. Schlussfolgerung

Mit dem MC-Simulationsprogram GEANT4 wurde die Auswirkung der Streuung in einer CT-Anlage mit MeV Röntgenquelle und einem Flachbilddetektor untersucht. Vor allem wurde Wert darauf gelegt, die Systemkomponenten und ihre Auswirkung auf die durch Streustrahlung deponierte Energie im Detektor zu untersuchen. Es wurde gezeigt, dass sich die verschiedenen Komponenten des Systems auf ganz unterschiedliche Weise im Streusignal zeigen. Eine optimale Wahl der Distanzen zwischen Detektor, Objekt und Quelle kann zu einer Reduktion der Streustrahlung von bis zu 37 % erreichen. Darüber hinaus wurde der Einfluss der verschiedenen physikalischen Prozesse quantifiziert und der Anteil an Einfachstreuereignissen an der Streustrahlung untersucht. Obwohl die Einfachstreuung den Hauptanteil an der Streustrahlung ausmacht, so ist doch der Anteil der

Mehrfachstreuung mit etwa 38 % signifikant genug, sodass einfache analytische Modelle der Streustrahlung diese nicht mehr adäquat modellieren können. Unter den physikalischen Prozessen ist, wie bereits aus den Wirkungsquerschnitten vorauszusehen war, der Effekt der Compton Streuung der dominante Anteil. Der neu hinzugekommene Effekt der Paarproduktion macht mit 3.1 % des Streusignales einen vernachlässigbaren Anteil der Streustrahlung aus.

### **Danksagung**

Diese Arbeit ist Teil des Projektes “X-ray 3D Computed Tomography with Mega Electronvolt Source” (CTOMES). Die Autoren danken dem Schweizerischen Nationalfonds (SNF) und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Finanzierung.

### **Referenzen**

- [1] Bartscher M et al ‘Enhancement and Proof of Accuracy of Industrial Computed Tomography (CT) Measurements’, CIRP Annals . Manufacturing Technology 56 (2007) 495 - 498.
- [2] Miceli A. et al. ‘Monte Carlo simulations of a high-resolution X-ray CT system for industrial applications’, Nucl Instrum Methods Phys Res A 2007;583:313-23.
- [3] P. Schuetz et al. ‘Reducing environmental scattering in industrial computed tomography by system redesign’, NDT&E International 58 (2013) 36-42.
- [4] Geant4: A toolkit for the simulation of the passage of particles through matter, Geant4 Collaboration, ‘<http://geant4.cern.ch>’, October 2013.