# Neue Entwicklungen für 3D-CT bei hoher Röntgenenergie

Alexander FLISCH, Raphaël THIERRY, Jürgen HOFMANN, Empa, Dübendorf, Schweiz Christoph SAUERWEIN, RayScan Technologies, Meersburg Martin SIMON, Hans Wälischmiller, Meersburg Franco CASALI, Matteo BETTUZZI, Maria Pia MORIGI, Università di Bologna, Department of Physics, Bologna, Italien Alice MICELI, Empa, Dübendorf, Schweiz und Università di Bologna, Department of Physics, Bologna, Italien

Kurzfassung. Die Nachfrage für industrielle Computertomografie (CT) hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Leistungsfähige Rechner ermöglichen heute die Darstellung und Analyse großer Mengen an Bilddaten und bieten damit der CT viele interessante Anwendungen. Für Gussprodukte, welche in der Regel komplexe Formen mit Hohlräumen aufweisen, ist die CT sowohl für Messaufgaben wie auch für die Detektion von Fehlern hervorragend geeignet. Allerdings weisen die heute auf dem Markt verfügbaren Tomografen für die 3D-Datenerfassung größerer Prüfobjekte noch immer wesentliche Nachteile auf. Im Falle von Zeilendetektorsystemen, die in der Regel mit einer 450 kV Industrie-Röntgenröhre betrieben werden, ist der Scanvorgang schichtweise und daher langsam. Bei Geräten mit Flächendetektoren reicht die Durchstrahlungsleistung der bei diesen Systemen üblicherweise verwendeten 225 kV Mikrofokusröhren nicht aus. Die Mikrofokusröhre kann nicht ohne weiteres durch eine 450 kV Röhre ersetzt werden, da bei hohen Energien im Prüfobjekt ein hoher Anteil an Streustrahlung entsteht, welche die Bildqualität der Tomogramme wesentlich reduziert. Die Empa hat in den vergangenen Jahren im Rahmen von europäischen Forschungsprojekten neue Verfahren zur Beschleunigung der Datenerfassung von Zeilendetektorsystemen und der Korrektur von Streustrahlung für Kegelstrahl-CT mit Flächendetektoren entwickelt. Der Beitrag gibt einen Überblick über den Stand der Technik und zeigt neue Entwicklungen insbesondere zur schnellen 3D-Volumenerfassung mit hoher Röntgenenergie.

# 1. Einführung

Früher kam die industrielle Computertomografie als ergänzendes Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Bauteilen nur selten zur Anwendung. Es handelte sich in der Regel um die Erfassung einzelner Schnittbilder zur genauen Lokalisierung und Charakterisierung von Materialfehlern. Erst die Anwendungen im Bereich der dreidimensionalen Datenerfassung haben der industriellen CT zum Durchbruch verholfen. Für die Erstmusterprüfung (Soll/Ist-Vergleich) von Bauteilen aus Aluminiumguss, insbesondere aus dem Fahrzeugmotorenbau, entwickelt sich die industrielle CT mehr und mehr zu einer Standardmethode für die Volumendigitalisierung. Mit den Volumendaten (Voxeldaten) lassen sich zudem automatisierte Defekt- und Wandstärkenanalysen durchführen. Mit der zunehmenden Verbreitung der CT für die volumetrische Datenerfassung wird auch die Forderung nach kürzeren Messzeiten und damit nach kostengünstigeren Scanverfahren laut.

Um grosse Teile aus Aluminiumguss oder Objekte aus stark absorbierendem Material durchstrahlen zu können, werden in der Regel 450 kV Industrie-Röntgenröhren oder in einigen Fällen Linearbeschleuniger verwendet. Bei diesen hohen Energien hat man allerdings das Problem, dass abhängig vom zu durchdringenden Werkstoff, beim Durchgang der Röntgenstrahlen durch die Materie, ein hoher Anteil an vorwärts gerichteter Streustrahlung entsteht. Verwendet man einen 3D-CT Scanner (Kegelstrahl und Flächendetektor) so fällt diese Streustrahlung auf den Detektor und reduziert somit die Bildqualität der Tomogramme wesentlich. Deshalb werden heute in der Regel bei hohen Röntgen-Energien CT-Systeme mit Zeilendetektoren und Kollimatoren eingesetzt, um die Streustrahlung so gut wie möglich auszublenden. Diese sogenannten 2D-CT Scanner arbeiten schichtweise. Für die Datenerfassung eines ganzen Bauteilvolumens müssen daher eine Vielzahl übereinander liegender Schichten gescannt werden. Dieses Vorgehen ist langsam und dementsprechend teuer.

## 2. Stand der Technik

Heute gibt es auf dem Markt eine grosse Bandbreite unterschiedlicher CT Systeme. Grosse Scanner sind in der Lage tonnenschwere Objekte zu untersuchen. Auf der anderen Seite gibt es portable Geräte mit einer Auflösung bis zu 1 µm mit denen Teile aus der Mikroelektronik zerstörungsfrei untersucht werden können. Mit Synchrotronstrahlung lässt sich für kleine Objekte sogar eine Auflösung kleiner als 1 µm erzielen.

# 2.1 Zeilendetektor vs. Flächendetektor

Für die Untersuchung grosser Prüfobjekte, wie Gussteile für den Fahrzeugmotorenbau, werden heute in der Regel CT Scanner mit Zeilendetektoren und 450 kV Röntgenröhren eingesetzt. Trotz der langen Messzeiten sind diese Geräte noch immer die erste Wahl, wenn es darum geht, z.B. einen Zylinderkopf eines PKW-Motors aus Aluminium dreidimensional zu erfassen. Sie zeichnen sich durch gute Ortsauflösung und hohe Bildqualität aus. Um die beim Durchgang der Röntgenstrahlung durch die Materie entstehende, nicht bildzeichnende Streustrahlung möglichst auszublenden, werden Detektorkollimatoren verwendet. Die beste Bildqualität lässt sich mit einzeln kollimierten Detektorkanälen erzielen. Die Streustrahlung kann damit fast vollständig ausgeblendet werden. Dafür sind die Messzeiten bei diesen Systemen am längsten. Zeilendetektoren mit einem Schlitzkollimator erlauben schnelleres Scannen. Horizontal gestreute Photonen lassen sich damit allerdings nicht abschirmen. Den schnelleren Scanvorgang erkauft man sich daher mit einer reduzierten Bildqualität.

Für Röntgenstrahler bis etwa 250 kV stehen heute wesentlich schnellere Geräte mit Flächendetektorsystemen, sogenannte 3D-CT Scanner, zur Verfügung. Anstatt einer Zeile besteht der Detektor aus einer Szintillatorplatte. Wie ein Röntgenfilm bildet dieser Flächendetektor, innerhalb gewisser Grenzen, eine Projektion des ganzen durchstrahlten Objektes ab. Mit einer 360° Umdrehung des zu untersuchenden Teils werden im Kegelstrahl der Röntgenröhre einige hundert Projektionen aufgenommen und anschliessend zu einem dreidimensionalen Volumentomogramm rekonstruiert. Die Rekonstruktion der Röntgen-Projektionen wird in der Regel auf mehrere leistungsfähige Prozessoren verteilt. Da die Rekonstruktion parallel zur Datenerfassung erfolgt, liegt damit bereits kurz nach Abschluss der Messung das Resultat vor. Allerdings haben die heute auf dem Markt verfügbaren 3D-CT Scanner den Nachteil, dass sie für höhere Röntgenenergien nicht geeignet sind. Sie sind damit für grössere Prüfobjekte leider nicht verwendbar. Die Gründe dafür werden im folgenden Abschnitt noch näher ausgeführt. Tabelle 1 zeigt Vor- und Nachteile der beiden heute am häufigsten für industrielle Anwendungen eingesetzten Systemtypen.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile von 2D- und 3D-CT Systemen

Systemtyp	2D-Tomograph (Fächerstrahl)	3D-Tomograph (Kegelstrahl)
	Quelle Objekt Kollimator Zeilendetektor Manipulator	Quelle Objekt Flächendetektor Manipulator
Detektor	Zeilendetektor	Flächendetektor
Röntgenquelle	450 kV Röntgenröhre oder Linearbeschleuniger	üblicherweise 225 kV Mikrofokus- Röntgenröhre
Vorteile	hohe Durchstrahlungskapazität	schnell (direkter Volumenscan)
	(250 mm Aluminium, 80 mm Stahl)	echte Voxel
	hohe Bildqualität (Röhren- und Detektorkollimator)	
Nachteile	langsam (schichtweises Scannen)	niedrige Durchstrahlungskapazität
	gestapelte Pixel (keine isotrope Raumauflösung)	
Anwendung	grosse Teile, bzw. Materialien mit starker	kleine Teile, bzw. Materialien mit niedriger
	Röntgenabsorption	Röntgenabsorption

Für die Prüfung grosser Objekte kommt an der EMPA zur Zeit noch üblicherweise eine 2D-CT Anlage mit Zeilendetektor zur Anwendung. Es können damit Objekte bis zu einem Durchmesser von 400 mm, einer Höhe von 600 mm und einem Gewicht von maximal 25 kg gescannt werden. Der Zeilendetektor hat eine Breite von 300 mm und besteht aus 125 einzeln kollimierten CdWO<sub>4</sub> Szintillatoren. Objekte mit einem Durchmesser von bis zu 250 mm lassen sich damit im Rotationsmodus tomografieren. Typische Scanzeiten in diesem Modus liegen zwischen 2 und 3 Minuten pro Schicht. Objekte, deren Durchmesser die Breite des Detektors übersteigen, müssen im Translationsmodus tomografiert werden, was üblicherweise etwa 3 mal längere Scanzeiten zur Folge hat.

# 2.2 Streustrahlung bei hoher Röntgenenergie

Eines der größten Probleme bei der Verwendung von hoher Röntgenenergie ist der große Anteil an Streustrahlung, welche beim Durchgang der Röntgenstrahlung durch das Prüfobjekt entsteht. Während bei Zeilendetektorsystemen die vorwärts gerichtete Streustrahlung durch die Verwendung geeigneter Kollimatoren möglichst ausgeblendet wird, trifft sie bei Flächendetektoren größtenteils auf den Szintillator (vgl. Bild 1a). Die Streustrahlung ist diffus und reduziert daher die Bildqualität der Röntgenprojektionen erheblich. Bei zunehmender Röntgenenergie wird der Anteil der Streuung an der Schwächung im Vergleich zur Photoabsorption immer größer. Für Aluminium sind die beiden Anteile bei 60 keV etwa gleich groß (vgl. Bild 1b). Das Bremsspektrum einer 450 kV Industrie-Röntgenröhre hat ihre größte Intensität nun aber bei wesentlich höheren Energien, nämlich etwa zwischen 150 und 350 keV. Erschwerend kommt noch hinzu, daß bei hohen Energien der Anteil an vorwärts (zum Detektor hin) gerichteter Streustrahlung gemessen an der Gesamtstreuung zunimmt. Dies hat zur Folge, daß ein großer Anteil der auf den Detektor auftreffenden Photonenenergie aus Streustrahlung besteht.

# Detektor Objekt Strahlung Absorption Primärstrahlung Streustrahlung

# Rayleigh Scattering Compton Scattering Photoelectric Total

Wirkungsquerschnitt für Aluminum

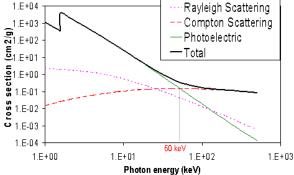


Bild 1a: Röntgenstrahlung wird im Objekt durch Absorption und Streuung geschwächt

Bild 1b: Wirkungsquerschnitt der Röntgenstrahlung für Aluminium in Abhängigkeit der Photonenenergie

Das Verhältnis von Primärstrahlung zu Streustrahlung wird zudem vom Material des zu untersuchenden Objekts und der durchstrahlten Wandstärke beeinflußt. Bild 2 zeigt diese beiden Einflußgrößen anhand einer Monte Carlo Simulation mit Geant4. Im Histogramm ist jeweils der Anteil der im Detektor deponierten Energie der Primärstrahlung und der Streuung erster, zweiter und höherer Ordnung aufgetragen. Als Streukörper wurden Holzylinder aus verschiedenen Materialien und Abmessungen verwendet. Bild 2a stellt die Abhängigkeit des Materials auf die Streuung dar. Das Streuverhältnis, d.h. der Quotient aus Streustrahlung und Primärstrahlung, wird mit einem Material höherer Ordnungszahl zunehmend größer. Bild 2b zeigt den Einfluß der durchstrahlten Wandstärke. Der Anteil der Streuung ist beim großen Hohlzylinder deutlich größer als beim kleinen. Ausserdem sind beim großen Zylinder die Anteile an Mehrfachstreuung wesentlich höher.

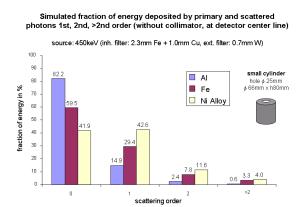


Bild 2a: Einfluss des Materials auf die Streuung

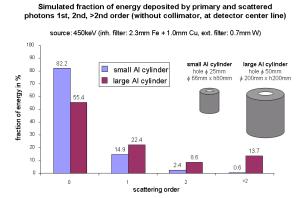
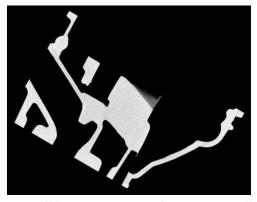


Bild 2b: Einfluss der durchstrahlten Wandstärke

Aus obigem Sachverhalt wird deutlich, daß es ohne entsprechende Maßnahmen keinen Sinn macht, ein Flächendetektor-System mit einer 450 kV Industrie-Röntgenröhre zu betreiben. Bild 3 zeigt einen Vergleich von Tomogrammen eines großen Zylinderkopfs Aluminium, welcher mit einem Zeilendetektor (Fächerstrahl) und einem Flächendetektor (Kegelstrahl) gescannt wurde. Die Streustrahlung hat zur Folge, daß im Fall der Kegelstrahlgeometrie die Objektkonturen unscharf abgebildet werden. Das Resultat ist für Meßaufgaben, aber auch für die Detektion kleiner Fehler unbrauchbar.



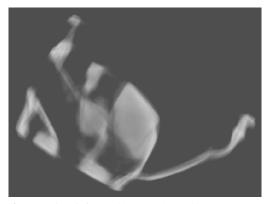


Bild 3: Tomogramme eines grossen Zylinderkopfs aus Aluminium (400 x 250 x 140 mm); Röhrenparameter: 450 kV, 2mA, Brennfleck 2.5 mm; links mit Zeilendetektor (125 einzeln kollimierte CdWO<sub>4</sub> Szintillatoren), rechts mit 30 x 40 cm Flächendetektor aus CsI (unkollimiert)

# 3. Neue Entwicklungen

Um der Forderung nach kürzeren Meßzeiten bei gleichbleibender Bildqualität nachzukommen, entwickelt die Empa im Rahmen von Forschungsprojekten Methoden und Werkzeuge sowohl für CT-Systeme mit Zeilendetektor als auch für Kegelstrahl-CT mit Flächendetektor. Adaptive Verfahren für 2D-CT basieren dabei auf der Optimierung der Scanparameter aufgrund der Objektgeometrie. Die Messzeiten lassen sich damit um bis zu 50% reduzieren. Die Entwicklungen für adaptives Scannen sind in entsprechenden Publikationen hinreichend beschrieben [1-4].

Im Rahmen des kürzlich beendeten europäischen Forschungsprojekts DETECT haben die Firma Hans Wälischmiller GmbH (HWM), die Universität Bologna und die Empa einen Prototypen entwickelt, der die Vorteile von 2D- und 3D-CT Systemen in sich vereint (vgl. Bild 4a). Die Datenerfassung ist damit bei vergleichbarer Genauigkeit rund 10 mal schneller als mit einem Zeilendetektor. Die Anlage verfügt über einen grossen Flächendetektor (280 x 428 mm) aus CsI. Die Streustrahlung wird mit Kollimatoren und Filtern so gut wie möglich ausgeblendet.

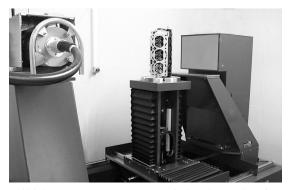


Bild 4a: DETECT Prototyp mit 450 kV Industrie-Röntgenröhre, CsI Flächendetektor 280 x 428 mm

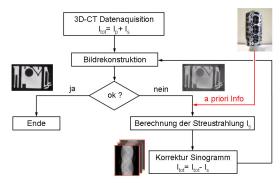
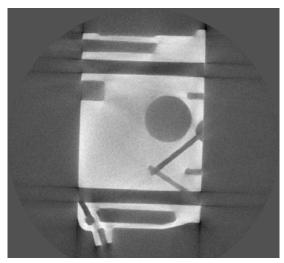


Bild 4b: Prinzip der Korrektur der Streustrahlung

Eine wichtige Innovation des Prototyps sind neue Rekonstruktions- und Datenkorrekturalgorithmen. Der Anteil der Streustrahlung wird in einem schnellen Verfahren simuliert und anschliessend von den Röntgenprojektionen abgezogen. Die Rekonstruktion der korrigierten Projektionen führt zu wesentlich besseren Resultaten. Bild 4b zeigt das Prinzip des Verfahrens. Sind CAD Daten vorhanden, können diese als a priori Information zur Berechnung der Streustrahlung herangezogen werden.

Bild 5 zeigt je eine einzelne Schicht aus einem 3D-Tomogramm, welches mit der neuen Anlage gescannt und mit dem klassischen Feldkamp-David-Kreiss (FDK) Algorithmus bzw. mit dem von der Empa entwickelten statistischen Verfahren mit Streustrahlkorrektur rekonstruiert wurde (ohne a priori Information). Das mit dem neuen Verfahren rekonstruierte Tomogramm weist im Vergleich zum Ergebnis mit dem FDK Algorithmus deutlich weniger Streustrahlartefakte auf.



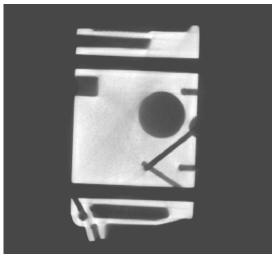


Bild 5: Einzelne Schicht aus 3D-Tomogramm eines Zylinderkopfs aus Aluminium (430 x 190 x 105 mm); Röhrenparameter: 450 kV, 3.3 mA, Brennfleck 1.0 mm; 280 x 428 mm Flächendetektor aus CsI (unkollimiert), links rekonstruiert mit FDK, rechts mit statistischer Rekonstruktion und Streustrahlkorrektur

Zur Optimierung der einzelnen Komponenten der Messkette (Röhren- und Detektorkollimator, Röhren- und Detektorfilter, Szintillator, etc.) wurden umfangreiche Monte Carlo Simulationen durchgeführt. Um möglichst wenig Streustrahlung im Prüfobjekt und aus der Umgebung der Anlage zu verursachen, wird der Kegelstrahl röhrenseitig so weit ausgeblendet, dass nur das zu untersuchende Objektvolumen bestrahlt wird. Detektorseitig kann ein lamellenförmiger Schlitzkollimator montiert werden. Dieser reduziert den Anteil der Streustrahlung im Fall des grossen Hohlzylinders aus Aluminium (Da = 200 mm, Di = 50 mm) um ca. Faktor 3 (vgl. Bild 6). Allerdings verdoppelt sich dadurch die Scanzeit, da die vom Kollimator abgeschirmten Volumenelemente in einem zweiten Durchgang erfasst werden müssen.

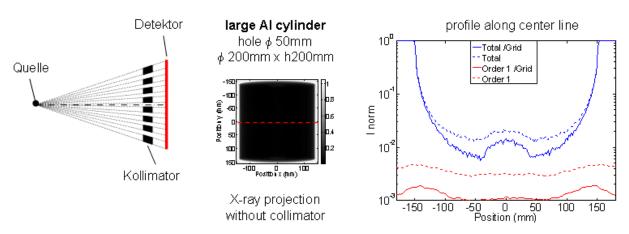


Bild 6: Einfluss des Detektorkollimators auf die Streustrahlung, links: Prinzipskizze, rechts: Profil durch simulierte Röntgenprojektion der Primär- und Streustrahlung (Total) und Streustrahlung 1. Ordnung

# 4. Zusammenfassung

Für die Prüfung großer Objekte oder Teile aus stark absorbierendem Material wir eine hohe Durchstrahlungsleistung benötigt. Auf dem Markt verfügbare CT-Systeme haben entweder den Nachteil, daß sie für eine vollständige 3D-Datenerfassung langsam (2D-CT) oder für die hohen Röntgenenergien nicht geeignet sind (3D-CT). Der DETECT Prototyp ermöglicht die Vorteile beider Systemtypen in sich zu vereinen. Erste Resultate zeigen, daß um Faktor 10 schnellere Meßzeiten bei hoher räumlicher Auflösung und guter Bildqualität realisierbar sind. Wichtige Komponenten (Röhre, Kollimatoren, Filter, Szintillator) können mit wenig Aufwand ausgetauscht werden.

Die Möglichkeit, die ganze Meßkette mit Monte Carlo Simulationen abzubilden, ist eine wichtige Voraussetzung, um Systemkomponenten optimieren zu können. Die neu entwickelten Rekonstruktionsverfahren und Algorithmen zur Korrektur von Streustrahlung und Randaufhärtung (letzteres im Beitrag nicht erwähnt) sind noch nicht in die Systemumgebung integriert. Schnittstellen zur Datenaquisitions-Software sind aber vorhanden. Der Prototyp bietet eine hervorragende Plattform für weitere Forschungsarbeiten. Der von HWM entwickelte Manipulator mit einem innovativen Sockelmaterial aus Mineralguss und die Software zur Datenaquisition haben bereits Marktreife erlangt.

### Dank

Die Forschungsarbeiten wurden unterstützt vom Schweizerischen Staatssekretariat für Bildung und Forschung SBF und der Europäischen Kommission im Rahmen des FP6 Projekts DETECT (New product design and engineering technologies based on next generation computed tomography.

#### Referenzen

- [1] A. Flisch, J. Hofmann, A. Obrist, 'Efficient Volume Digitizing with Adaptive Computed Tomography', DGZfP-Proceedings BB 84-CD, Paper 17, 2003 (ISBN 3-931381-48-X).
- [2] J. Hofmann, A. Flisch, A. Obrist, 'Adaptive CT scanning Mesh based optimisation methods for industrial X-ray computed tomography applications, 'NDT&E International 37 (2004), pp 271-278.
- [3] A. Obrist, A. Flisch, J. Hofmann, 'Pointcloud reconstruction with sub-pixel accuracy by slice-adaptive thresholding of X-ray computed tomography images', NDT&E International 37 (2004), pp 373-380.
- [4] J. Hofmann, A. Flisch, 'A wall-thickness-based method of adaptive integration time determination for X-ray computed tomography', NDT&E International 39 (2006), pp 668-674.
- [5] A. Miceli, R. Thierry, A. Flisch, U. Sennhauser, F. Casali, M. Simon, 'Monte Carlo simulations of a high-resolution X-ray CT system for industrial applications', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol 583/2-3, pp 313-323, September 2007.
- [6] R. Thierry, A. Miceli, J. Hofmann, A. Flisch, U. Sennhauser, 'Hybrid Simulation of Scatter Intensity in Industrial Cone Beam Computed Tomography', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, in correction.