

Aufnahmeplanung in der industriellen Computertomographie

S. KASPERL*, S. REISINGER*, M. FRANZ*

* Fraunhofer Entwicklungszentrum Röntgentechnik EZRT
(Dr.-Mack-Str. 81, 90762 Fürth)

Kurzfassung. Charakteristisch für die industrielle CT ist die große Vielfalt der Mess- und Prüfaufgaben und damit einhergehend die Notwendigkeit stets neue Aufnahmeparameter finden zu müssen. Um den Bedienerinfluss zu minimieren sollte eine Aufnahmeplanung weitgehend automatisiert werden. Mit der Simulationsumgebung Scorpius XLab[®] wird ein Werkzeug vorgestellt, welches für unerfahrene Anwender optimale Parameter für eine CT-Aufnahme ermittelt.

Einführung

Die Detektierbarkeit eines Materialfehlers (POD = Probability of Detection) einerseits, sowie die Zuverlässigkeit dimensioneller Messergebnisse andererseits hängt zum einen von der Wahl der CT-Anlagenkomponenten (Quelle, Detektor, Achsensystem, usw.) und zum anderen von geeigneten Aufnahmeparametern ab. Im Gegensatz zur Medizin ist die Teilevielfalt in der Industrie sehr groß und stellt den Prüfer mit jedem Fertigungsteil vor neue Herausforderungen. Der Mensch als Messobjekt im medizinischen Anwendungsbereich weist meist eine konstante Größe (1,5 – 2,0 m) und Materialzusammensetzung (ca. 63% Wasser, Knochen, Weichteile und ein paar wenig schwere Elemente) auf. Die Bauteile in der Industrie unterscheiden sich sowohl in ihrer Größe als auch ihrer Materialzusammensetzung und reichen von Leiterplatten im Mikrometerbereich bis hin zu Motorblöcken oder Rotorblättern mit mehreren Metern Spannweite. Damit die gewählte Mess- und Prüfaufgabe durchgeführt werden kann, müssen stets neue Aufnahmeparameter gefunden werden. Die Wahl geeigneter Parameter ist heute nur als personengebundenen Erfahrungswissen verfügbar. Der Bediener stellt deshalb eine signifikante Einflussgröße dar. Entsprechende Normen und Richtlinien (DIN EN 16016-1, DIN EN 16016-2, DIN EN 16016-3, DIN EN 16016-4) zur industriellen CT geben nur wenig Auskunft über das konkrete Vorgehen bei der CT-Aufnahme.

Um dem Prüfer seine Aufgabe zu erleichtern und den Bedienerinfluss zu minimieren, werden (Software-) Werkzeuge entwickelt, welche die Aufnahmeplanung weitgehend automatisieren und somit zu objektiven Resultaten führen [1,2].

Lösungsansätze

Abhängig vom vorhandenen Vorwissen über das Prüfobjekt sind verschiedene Lösungsansätze vorstellbar. Liegen Informationen über das Fertigungsteil vor, wird zur Bestimmung der optimalen Aufnahmeparameter für eine gewählte Prüfaufgabe ein simulativer Ansatz genutzt. Dieser vorwissenbasierter Ansatz erfordert zunächst Vorgaben

des Nutzers, wie zum Beispiel die Geometrie und die Materialzusammensetzung des Prüfobjekts, mögliche Verfahrenwege der einzelnen Achsen, mögliche Strom- und Spannungswerte, verfügbare Vorfilter etc. Mittels Simulation werden dann optimale Aufnahmeparameter so bestimmt, dass eine bestmögliche Bildqualität erzielt wird, die es erlaubt, die jeweilige Prüf- bzw. Messaufgabe durchzuführen. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt im Einsparen teurer Messzeit an der CT-Anlage.

Liegen die benötigten Eingangsparameter für die Simulation nicht vor, bzw. werden vom Hersteller des Bauteils bewusst geheim gehalten, muss die Bestimmung der optimalen Aufnahmeparameter durch geführte Benutzerinteraktion an der CT-Anlage ermittelt werden. Der Bediener wird hierbei interaktiv über wenige Schritte und nötige Eingriffe in das System (z. B. neue Aufspannung des Bauteils auf dem Drehtisch) zu einer Wahl optimaler Parameter geführt. Der Vorteil dieser Herangehensweise liegt darin begründet, dass kein Vorwissen in das System gesteckt werden muss und Bildanalysen und Berechnungen direkt auf Daten der jeweilig verwendeten Anlage angewandt werden. Somit werden auch eventuelle Einflussfaktoren der Anlage (z. B. Ausfall einzelner Detektorpixel oder -zeilen) berücksichtigt.

Ziel einer automatisierten Aufnahmeplanung sollte es ein, die Einflussgröße Bediener zu minimieren. Dadurch ist ein schneller und effektiver Einstieg in die CT-Technologie möglich, da eine Einlernphase für den Bediener unnötig wird und sofort bei der ersten Aufnahme qualitativ hochwertige und vergleichbare Ergebnisse produziert werden.

Deterministische Simulation

Das am EZRT entwickelte Softwarepaket Scorpius XLab[®] [3] basiert auf einer sogenannten Strahlverfolgungsmethode (Raytracing). Hierbei werden die Durchstrahlungslängen entlang des Strahls durch ein virtuelles Messobjekt ermittelt und die Abschwächung analytisch nach dem Gesetz von Lambert-Beer berechnet. Abbildung 1 zeigt das Prinzip eines deterministischen Simulators.

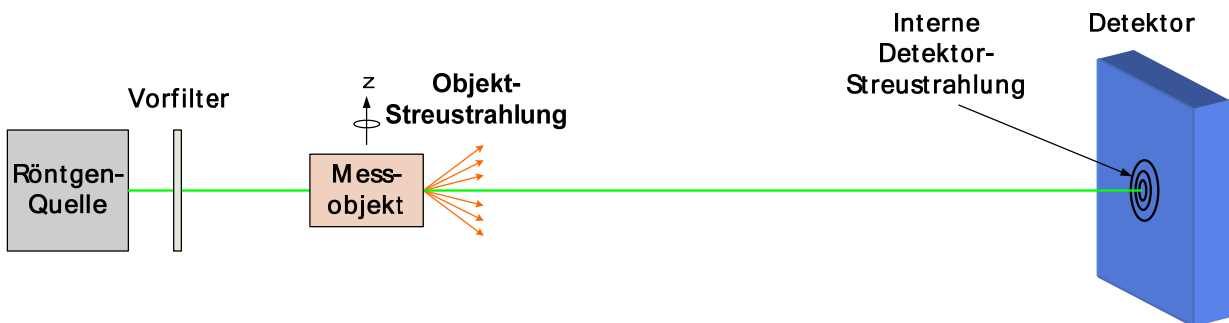


Abbildung 1. Prinzip eines deterministischen Simulators.

Als besondere Eigenschaften deterministischer Simulatoren sind zu nennen:

- Sie basieren meist auf einem Strahlverfolgungsansatz.
- Eine exakte Reproduzierbarkeit von Bedingungen und Ergebnissen ist gegeben.
- Die Rechenzeiten sind im Bereich von Sekunden bis einigen Minuten.

Eine graphische Benutzeroberfläche (GUI) erleichtert die Bedienung des Programms. Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt der GUI im Editor-Modus mit einem modellierten virtuellen Prüfkörper in mehreren Ansichten.

Scorpius XLab[®] ist in der Lage, Röntgenprojektionen bzw. eine komplette CT zu simulieren. Die dazu nötigen Einstellungen für Quelle, Detektor, Drehachse und virtuellem Objekt werden durch den Anwender mittels der Benutzeroberfläche vorgegeben.

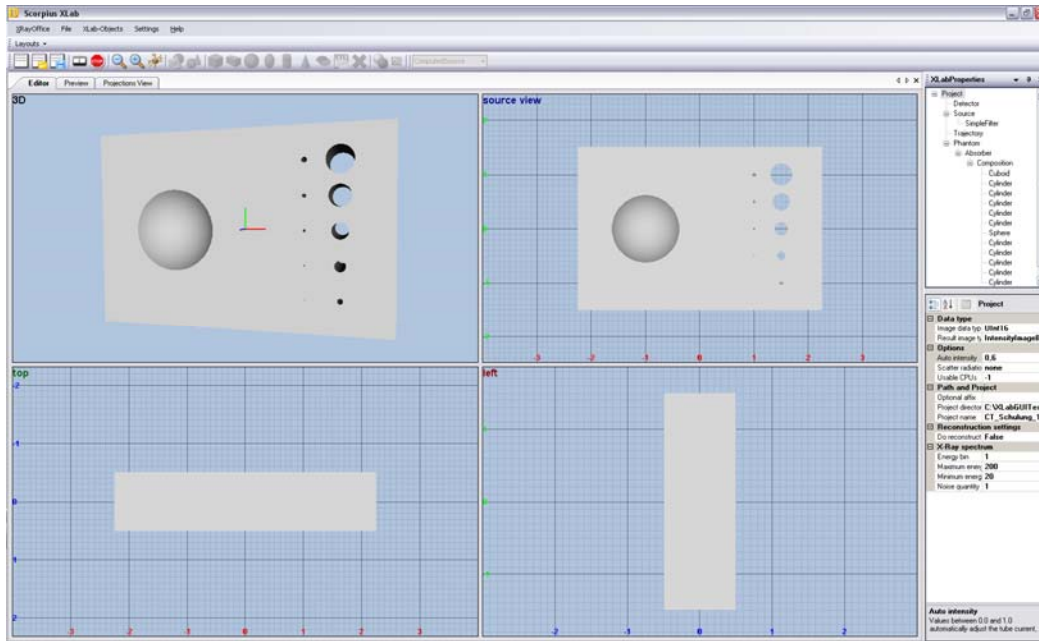


Abbildung 2. Graphische Benutzeroberfläche (GUI) von Scorpius XLab[®].

Abbildung 3 zeigt links eine simulierte Röntgenprojektion eines Prüfobjekts und rechts den entsprechenden Volumendatensatz, der im Anschluss aus simulierten Projektionen rekonstruiert wurde.

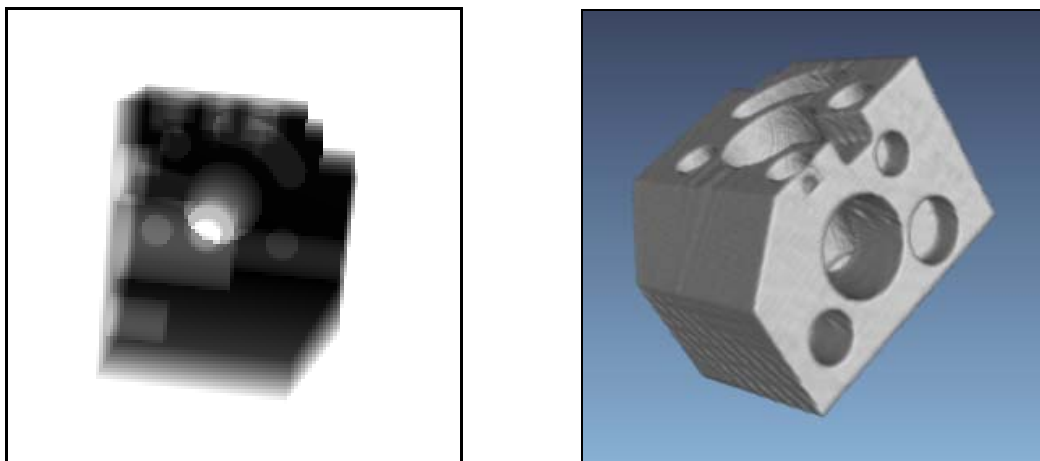


Abbildung 3. Links: Simulierte Projektion, rechts: 3D-Visualisierung des rekonstruierten CT-Bildes

Die wichtigsten Eigenschaften von Scorpius XLab[®] sind:

- Verwendung von Multi-Material-Objekten
- STL-Format Unterstützung
- Simulation von Quantenrauschen
- Berücksichtigung von Streustrahlung

- Einsatz von Vorfiltern
- Simulation der Brennfleck- und Detektorunschärfe
- Mono- und polychromatische Röntgenspektrensimulation

Prinzipielle Vorgehensweise

Basierend auf der im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Simulationsumgebung Scorpius XLab[®] werden optimale Aufnahmeparameter berechnet. Hierzu sind Bedienvorgaben nötig:

- Geometrie und die Materialzusammensetzung des Prüfobjekts
- Oberflächenmodell (z. B. STL-Modell) des Prüfobjekts
- mögliche Verfahrenswege der einzelnen Achsen,
- mögliche Spannungswerte,
- verfügbare Vorfilter (Material, Dicke)

Unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen werden als nächstes optimale Bedingungen für Objektpositionierung, -lage, Spannung und Vorfilter ermittelt.

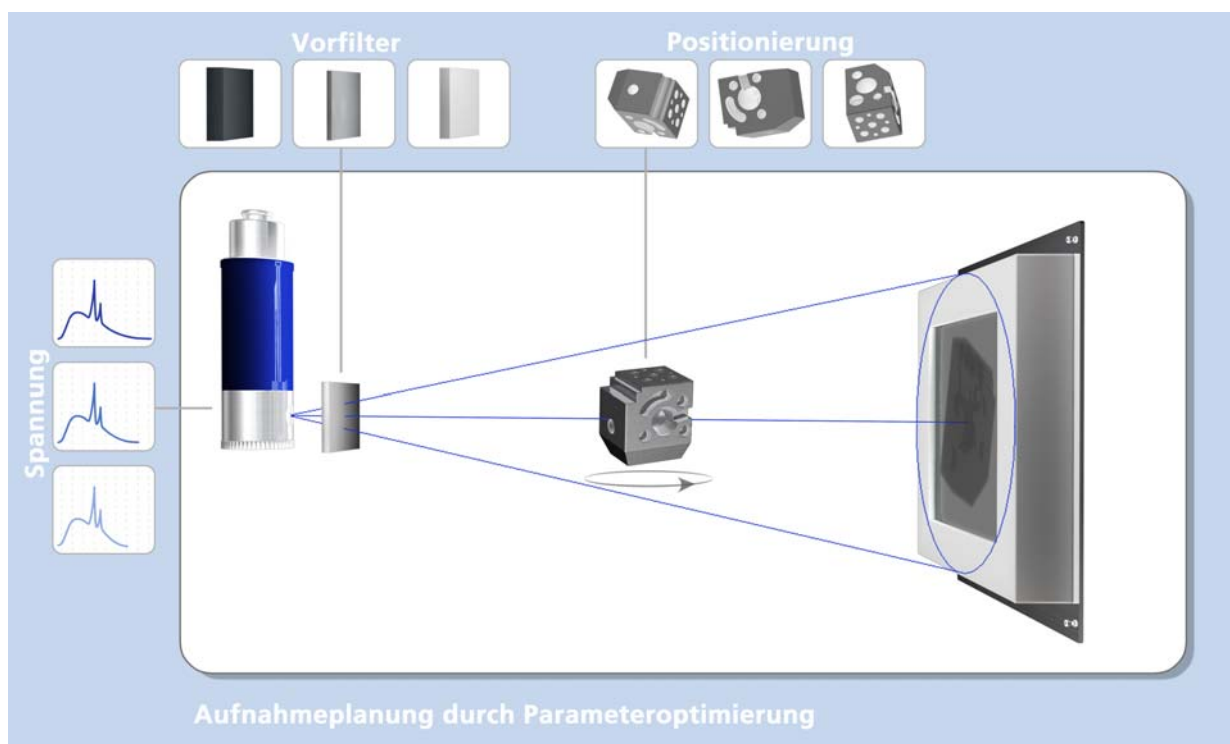


Abbildung 4. Optimierung durch Variation von Objektpositionierung, -lage, Spannung und Vorfilter

Objektpositionierung

Die Bestimmung des Vergrößerungsfaktors m wird durch die Positionierung des Prüflings im Strahlengang zwischen Quelle und Detektor bestimmt (Abbildung 5). Er ergibt sich aus dem Verhältnis FDA/FOA , wobei FDA den Abstand zwischen Röntgenquelle (Fokus) und Detektor sowie FOA den Abstand zwischen Fokus und Prüfling (Objekt) bezeichnet.

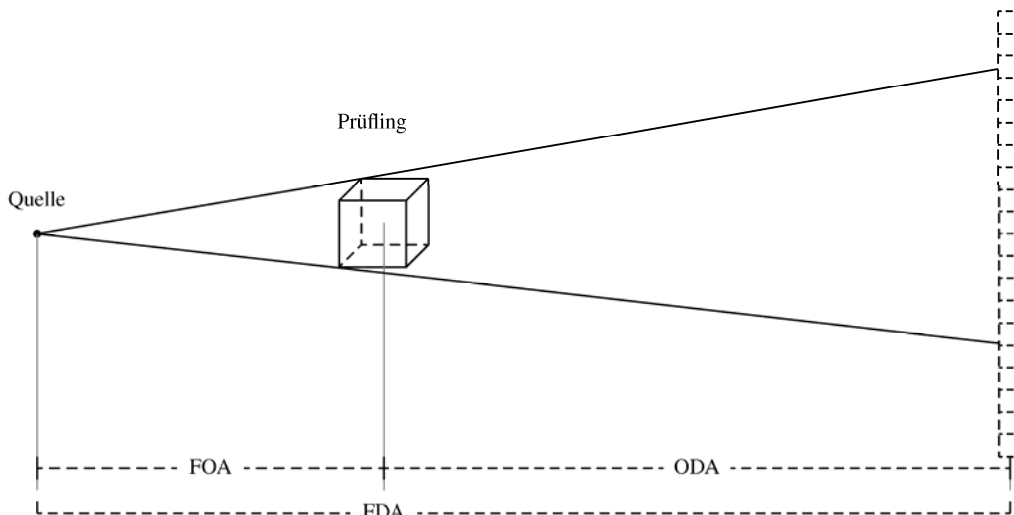


Abbildung 5. Schema der optimalen Vergrößerung.

Ziel ist es hierbei, die sensitive Fläche des Detektors möglichst optimal auszunutzen. Das bedeutet, den Schatten des Prüflings für jede Projektion auf ca. 90% der Detektorfläche abzubilden, um noch eine genügend große Fläche zur Bestimmung der I_0 Intensität bereitzustellen. Dieser Wert wird häufig für spätere Korrekturen (Bildnachverarbeitung) verwendet.

Objektlage

Der für eine Optimierung wohl bedeutendste Einflussfaktor ist die Lage des Prüflings auf dem Drehteller. Die längste Durchstrahlungslänge limitiert die Prüfaufgabe bzw. legt Randbedingungen für weitere Parameter wie z.B. die Spannung fest. Nach dem Lambert-Beerschen Absorptionsgesetz resultieren längere Durchstrahlungslängen in exponentiell steigender Abschwächung. Folglich besteht die Optimierung darin, die Lage des Prüflings auf dem Drehteller zu berechnen, bei der die Durchstrahlungslängen für eine gesamte Rotation, d.h. für jede einzelne Projektion, minimiert werden.

Hierfür wurde ein mehrstufiges Verfahren implementiert, welches auf der Generierung und Auswertung von Längenbildern basiert. Ein Längenbild kodiert Durchstrahlungslängen im Objekt, in dem die Strecke zwischen Eintritt und Verlassen des Objekts für alle Strahlwege von der Quelle zu den Detektorpixeln bestimmt wird.

Nicht immer kann die berechnete optimale Objektlage tatsächlich realisiert werden, weil beispielsweise der Prüfling nicht stabil fixiert werden kann. Deshalb wird dem Anwender eine Liste verschiedener Objektlagen bereitgestellt.

Röhrenspannung

Mit der Röhrenspannung wird die Energie der Röntgenquanten und damit auch das Durchdringungsvermögen festgelegt. Wird der Wert zu niedrig eingestellt, sind verrauschte Projektionen die Folge. Eine zu hoch eingestellte Röhrenspannung vermindert den Kontrast. Wenn I_{min} die Intensität des Detektorpixels mit der längsten Durchstrahlungslänge x_{max} ist, dann ergibt sich für das auf [0;1] normierte Kontrastverhältnis K :

$$K = I_{min} / I_0$$

K beschreibt das Verhältnis der minimalen Intensität I_{min} zur Intensität I_0 bei einer Durchstrahlungslänge von 0. Nach Norm [4] sollte $K \approx 0.1$ gewählt werden. Die längste

Durchstrahlungslänge x_{max} hängt natürlich von der im vorangegangenen Schritt optimierten Objektlage ab. Abbildung 6 zeigt den Einfluss der Röhrenspannung auf den Kontrast K für 1 cm bzw. 3 cm durchstrahltes Aluminium.

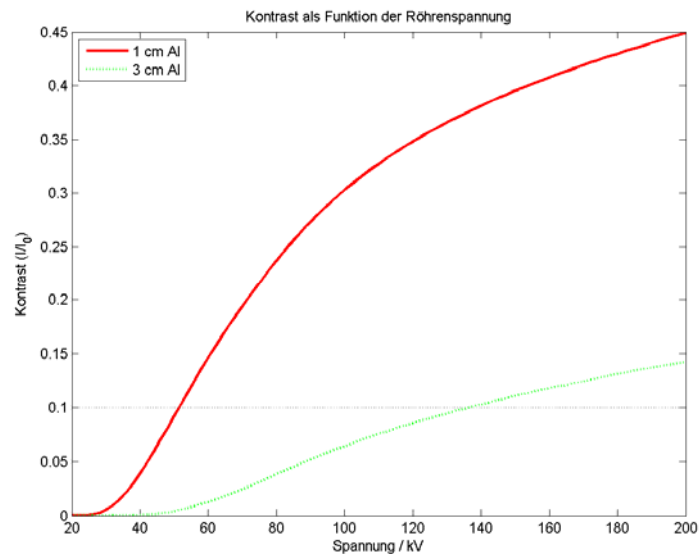


Abbildung 6. Kontrast als Funktion der Röhrenspannung. Nach Norm sollte $K \approx 0.1$ erreicht werden.

Vorfilter

Wenn die maximal verfügbare Röhrenspannung nicht ausreicht, um ein ausreichendes Kontrastverhältnis K zu erzielen, sollte ein Vorfilter zum Einsatz kommen.

Da ein Vorfilter überwiegend niederenergetische Röntgenquanten absorbiert beeinflusst er das Kontrastverhältnis K .

Abbildung 7 zeigt den Einfluss eines Vorfilters auf den Kontrast K .

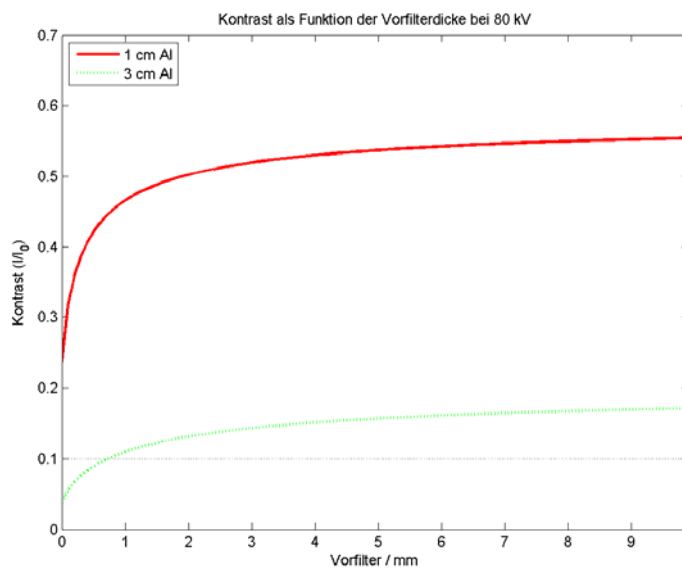


Abbildung 7. Kontrast als Funktion der (Kupfer-)Vorfilterdicke bei 80 kV

Ergebnisse

Als Prüfkörper für einen ersten Test kam ein Aluminium-Würfel zum Einsatz, dessen Geometrie und Gestalt typisch für viele CT-Anwendungen ist, siehe Abbildung 8. Die maximale Röhrenspannung wurde mit 225 kV vorgegeben.

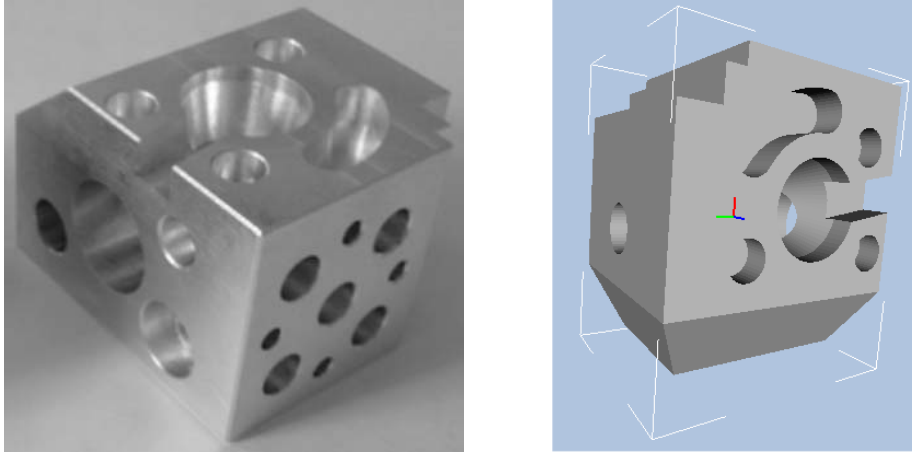


Abbildung 8. Aluminium-Würfel. Maße: $46 \times 39 \times 31 \text{ mm}^3$. Rechts nach Optimierung der Lage.

Die Berechnung der oben geschilderten Aufnahmeparameter ergab eine Röhrenspannung von 225 kV bei einer Vorfilterung mit 0,8 mm Kupfer. Die optimale Lage auf dem Drehteller zeigt Abbildung 8 rechts. Zusätzlich wurden zum Vergleich Aufnahmen mit geringerer Spannung oder dickerem Vorfilter gerechnet (Abbildung 9). Die simulierten Vorgaben konnten anhand einer realen CT des Würfels bestätigt werden. Allerdings erscheint eine Anpassung des in der Norm [4] genannten festen Wertes $K \approx 0.1$ an die jeweilige Prüf- bzw. Messaufgabe sinnvoll.

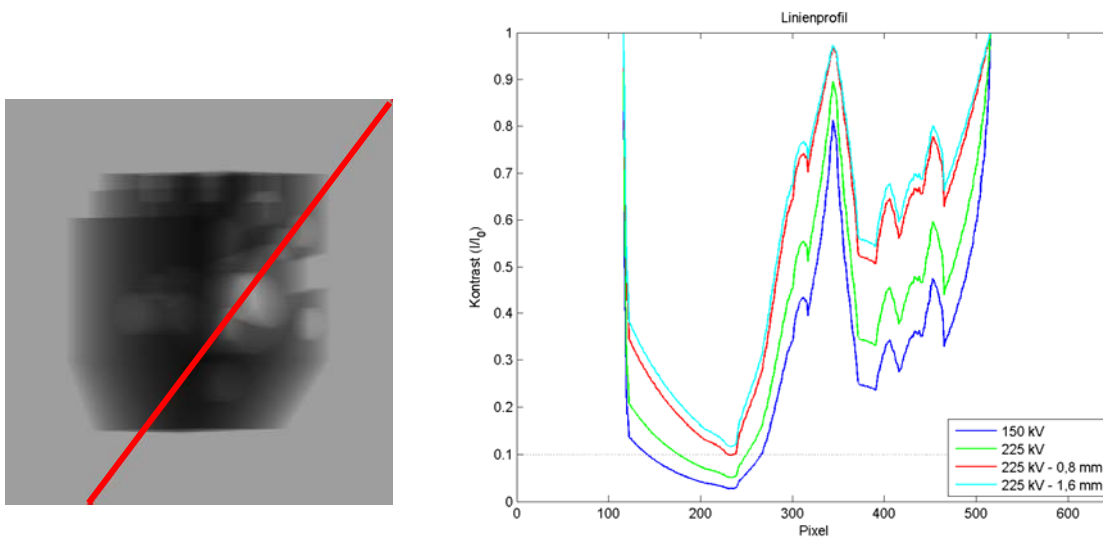


Abbildung 9. Kontrastprofile für unterschiedliche Röhrenspannungen/Vorfilter entlang der roten Linie in der Projektion links. $K \approx 0.1$ wird bei 225 kV und 0,8 mm Kupfer-Vorfilter erreicht.

Zusammenfassung und Ausblick

In dem Beitrag wurde eine neue Methode zur Optimierung von Aufnahmeparametern in der industriellen CT vorgestellt. Die Optimierung basiert auf einem analytischen Simulationswerkzeug. Eine kostenlose Demoversion von Scorpius XLab® kann unter <http://www.iis.fraunhofer.de/bf/xrt/ctundmess/xlab/> heruntergeladen werden.

Die wesentlichen Vorteile einer solchen Implementierung sind

- kurze Rechenzeiten von einigen Sekunden bis wenigen Minuten.
- Verkürzung der Einlernphase für den Bediener
- Qualitativ hochwertige und objektiv vergleichbare Ergebnisse ab der ersten Aufnahme
- Bauteilfreie Planung
- Einsparung teurer Messzeit durch effizientere Anlagennutzung
- Realitätsnahe Kostenkalkulation

Zukünftige Weiterentwicklungen werden weitere Aufnahmeparameter wie beispielsweise Röhrenstrom, Detektorparameter, Belichtungszeit und Winkelschritte berücksichtigen. Auch eine Adaption an spezielle Anlagenkonfiguration ist angedacht.

Referenzen

- [1] M. Mangard, P. Hammersberg, Optimal conditions for x-ray imaging by mathematical simulation, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 2000, 665-672.
- [2] A. F. J. Hofmann, A wall-thickness-based method of adaptive integration time determination for x-ray computed tomography, NDT& E International 39 (2006) 668-674
- [3] Wenig P., Kasperl S., Examination of the Measurement Uncertainty on Dimensional Measurements by X-ray Computed Tomography, In Proc: 9th ECNDT, Berlin, Germany, 2006
- [4] DIN, Deutsches Institut für Normierung e.v., Zerstörungsfreie Prüfung- durchstrahlungsverfahren - Computertomographie (Entwurf), DIN EN 16016-1, DIN EN 16016-2, DIN EN 16016-3, DIN EN 16016-4.