

# Macht kV wirklich grau? – Eine Vergleichsstudie zu 600 kV Computertomographiesystemen

Michael KRUMM, Christoph SAUERWEIN, Volker HÄMMERLE, Gunnar KNUPE  
RayScan Technologies GmbH  
Klingelweg 8, 88662 Meersburg  
E-Mail: [info@rayscan.eu](mailto:info@rayscan.eu)  
Tel: +49 7532 4320 10

**Kurzfassung.** In den letzten Jahren hat sich die industrielle Computertomografie (CT) zu einem etablierten Werkzeug in verschiedenen Bereichen von Forschung, Entwicklung, Fertigung und Qualitätswesen entwickelt. Von den Anfängen der CT und der ersten Anwendung im medizinischen Bereich bis zum heutigen Technologiestand sind mehrere Jahrzehnte voller Innovationen und Weiterentwicklungen vergangen. Eine der wichtigsten Entwicklungen waren dabei die Mikrofokusröntgenröhre und der digitale Flachbilddetektor. Gepaart mit den rasanten Entwicklungen der IT-Industrie ermöglichten sie in Kombination den zeit- und kosteneffizienten Einsatz der CT. Ungeachtet dessen existieren eine ganze Reihe von Anwendungen – hauptsächlich aus den Bereichen der Automobil-, Luft- und Raumfahrtindustrie - die gesteigerte Anforderungen an die CT-Systemtechnik stellen. Hauptsächlich aufgrund der schieren Größe der Prüfteile und den damit verbundenen hohen Materialdicken ist die relevanteste Eigenschaft der CT-Systeme die maximal zur Verfügung stehende Röntgenenergie – also die Durchdringungsfähigkeit der verwendeten Röntgenstrahlung. So werden bspw. in der Automobilindustrie Aluminiumussteile mit erheblicher Wandstärke gefertigt, deren zerstörungsfreie Prüfung und vollständige metrologische Erfassung immer höheren Stellenwert erlangen. Einen wesentlichen Beitrag dazu liefert die neueste Generation an CT-Systemen, die mit 600 kV-Röntgenröhren und Zeilendetektoren eine hervorragende Bildqualität liefern. Um die Leistungsfähigkeit solcher CT-Systeme einem objektiven Test zu unterziehen, wurden in dieser Studie die Vor- und Nachteile von 600 kV-CT-Systemen untersucht. Dabei wurden neben unterschiedlichen Parametern wie z. B. Röhrenspannung und Belichtungszeit auch verschiedene Röhren- und Detektortechnologien sowie CT-Messmethoden miteinander verglichen.



## Einführung

„kV macht grau“ – diese Eselsbrücke ist eine Grundregel der zerstörungsfreien Prüfung mit Röntgen. Was hat es mit dieser Behauptung auf sich? Und für welche Fälle trifft sie zu? Antworten auf die Fragen liefert ein kurzer Abstecher in die Röntgenphysik und die Wechselwirkung von Röntgenstrahlung mit Materie. Röntgenstrahlung ist eine elektromagnetische Strahlung die aufgrund des Welle-Teilchen Dualismus auch als Teilchenstrom aus Photonen bzw. Quanten betrachtet werden kann. Sie ist durchdringend und ionisierend. Bei der Interaktion mit Materie treten diverse Effekte auf wie z. B. Absorption, Streuung und ab einer bestimmten Röntgenenergie auch Paarbildung. Der bei den hier betrachteten Energien dominierende Effekt ist die photoelektrische Absorption, bei der Röntgenphotonen mit Elektronen aus der Atomhülle interagieren, diese aus der Bahn herausschlagen und damit absorbiert werden. Je nach Elektronenschale ist dafür eine unterschiedliche Energie notwendig. Die Wahrscheinlichkeit für ein solches Ereignis, fällt - mit Ausnahme beim Erreichen bestimmter Energieniveaus – mit zunehmender Photonenenergie. Das heißt je höher die Energie der Photonen ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit dass ein Photon ein Objekt ohne Interaktion durchdringt. Ist dies der Fall, kann auch keine Information über das Objektinnere gewonnen werden. Die zur Erzeugung von Röntgenstrahlung erforderliche Hochspannung ist direkt proportional zur Maximalenergie der Röntgenstrahlung. Je höher nun die Spannung gewählt wird, desto geringer ist der Unterschied zwischen ungeschwächtem und geschwächtem Röntgenstrahl – oder besser gesagt die Kontrastempfindlichkeit, d. h. „kV“ macht tatsächlich „grau“.

Nun trifft diese Aussage nur für die Durchstrahlung eines Objekts zu. Die Auswirkungen auf die Bildqualität einer Computertomographie (CT) Aufnahme sind weitaus vielschichtiger und werden im Hauptteil dieses Manuskripts betrachtet. Letztlich ist aber klar: Es gibt eine optimale Röntgenenergie und damit Spannung mit der eine bestimmte Prüfaufgabe gelöst werden kann. Egal ob Durchstrahlungsprüfung oder CT – man ist immer daran interessiert, den Dynamikumfang des Sensors möglichst optimal auszunutzen.

Betrachtet man für verschiedene Materialien deren Abschwächungsverhalten, stellt man schnell fest, dass der nutzbare Bereich für die Prüfung mittels Röntgenstrahlung relativ begrenzt ist [1]. Auf dem Papier sind aktuelle Röntgensensoren dazu in der Lage, Kontraste  $> 1 : 10000$  darzustellen. In der Realität ist eher mit  $1 : 1000$  zu rechnen. Das heißt, das Verhältnis zwischen geschwächter und ungeschwächter Intensität beträgt 0,001.

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu(E,\rho,Z) \cdot x}$$

Übertragen auf das Schwächungsgesetz bedeutet dies, dass das Produkt aus linearem Schwächungskoeffizient  $\mu(E,\rho,Z)$  und Materialdicke  $x$  den Wert von 4,6 nicht überschreiten sollte. Je nach Material und Energie ist dieser Wert sehr schnell erreicht. Beispielweise beträgt die maximale Schichtdicke Eisen/Stahl bei 200 keV gerade einmal 40 mm. Bei Aluminium sind es ca. 140 mm. Um noch größere Objekte zu durchdringen, ist also eine höhere Röntgenenergie notwendig. Genau dies ist der Hintergrund, warum 600 kV Systeme zunehmend wichtig werden.

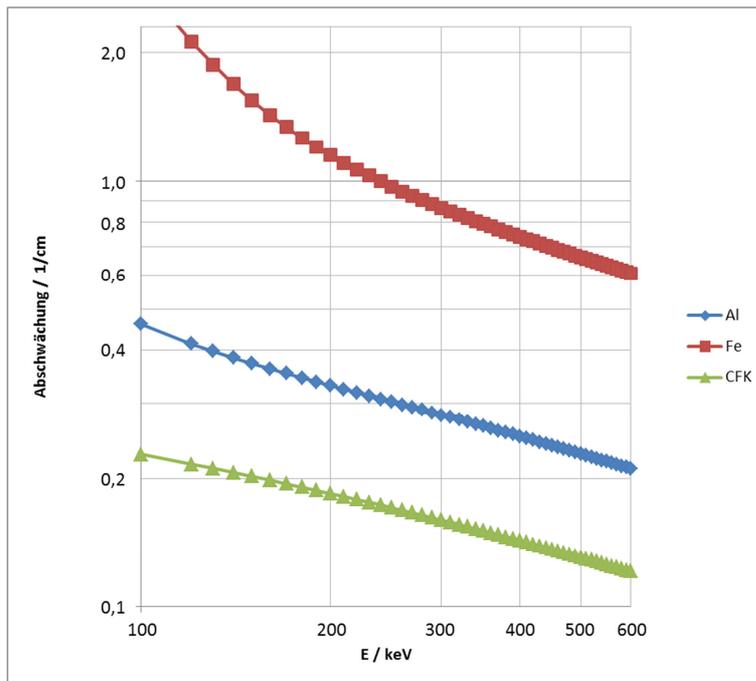


Abbildung 1: links: Abschwächung von Röntgenstrahlung in Abhängigkeit von der Energie für verschiedene Materialien; rechts: RayScan 600 CT-System mit 600 kV Minifokus-Hochleistungsrontgenröhre

## Methode

### 1.1. Systembeschreibung

Zur Untersuchung wurde das CT System RayScan 600 verwendet. Das System besteht aus einem 6-Achs Manipulator auf Granitbasis mit einer Genauigkeit von  $\pm 2,5 \mu\text{m}$ , einem 16 Bit Zeilendetektor mit  $400 \mu\text{m}$  Pixelgröße und 2048 Pixeln sowie einer 600 kV Minifokus-Hochleistungsrontgenröhre mit verfügbaren Brennflecken von  $0,4 \text{ mm}$  und  $1,0 \text{ mm}$ . Das System ist spezifiziert für Bauteile mit einem maximalen Durchmesser von  $1000 \text{ mm}$  und einer maximalen Höhe von  $2300 \text{ mm}$ . Ergänzend sei erwähnt, dass das System zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Manuskripts noch nicht dem Lieferzustand entsprach, d. h. das System nicht eingemessen war und auch wesentliche Komponenten wie z. B. Kollimatoren fehlten. Somit sind die Ergebnisse nur bedingt aussagekräftig für die Leistungsfähigkeit des Systems.

## Messungen

Als reale Messobjekte dienten ein Zylinderkopf aus Aluminium mit den Außenmaßen  $430 \text{ mm} \times 190 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$  und ein Aluminiumussteil mit den Außenmaßen  $370 \text{ mm} \times 280 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ . Des Weiteren wurde ein Stufenzylinder verwendet – ebenfalls aus Aluminium, um Aussagen über die Ortsauflösung zu treffen.

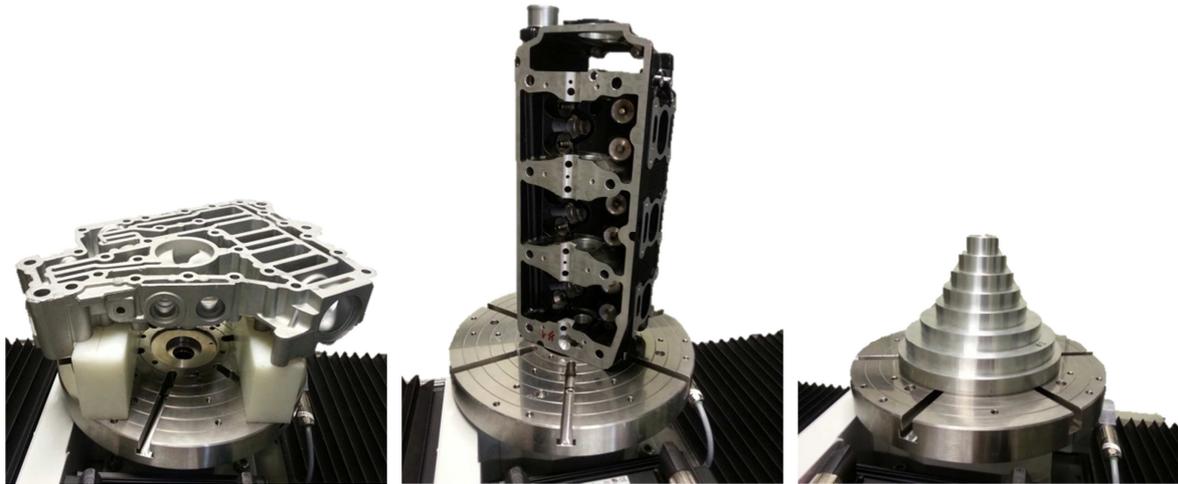


Abbildung 2: links: Testobjekt Aluminiumgussteil; mittig: Testobjekt Aluminium-zylinderkopf; rechts: Testobjekt Stufenzylinder.

Es wurden die Parameter aus Tabelle 1 variiert. Ergänzend sind weitere Messparameter in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 1: Variierte Messparameter

Parameter	Werte
Spannung / kV	300, 450, 600
Belichtungszeit / ms	10, 30, 60
Brennfleckgröße / $\mu\text{m}$	400, 1000

Tabelle 2: Feste Messparameter

Parameter	Werte
Fokus-Detektor-Abstand / mm	1700
Fokus-Objekt-Abstand / mm	1200
Anzahl Projektionen	3000
Röhrenstrom / mA	1,0
Vorfilter Kupfer / mm	4,0

Als Rekonstruktionsverfahren wurde eine gefilterte Rückprojektion verwendet. Ein Rampenfilter diente als Rekonstruktionsfilter. Weitere Rekonstruktionsparameter sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Rekonstruktionsparameter

Parameter	Werte
Verfahren	Gefilterte Rückprojektion; 180° + Öffnungswinkel
Rekonstruktionsfilter	Rampe
Projektionsfilter	Median [1 x 3]

## Ergebnisse

Die aufgezeichneten Projektionsdaten des Testobjekts Aluminiumzylinderkopf wurden zunächst hinsichtlich der ungeschwächten Intensität  $I_0$  und der maximalen Absorption  $P_{\max} = -\ln(I_{\min}/I_0)$  untersucht und in die Ergebnisse in Tabelle 4 zusammengetragen. Wie zu erwarten war zeigt sich, dass die Intensität bei gleichen Messparametern mit zunehmender Spannung und mit steigender Belichtungszeit steigt. Zwischen großem und kleinem Brennfleck können keine größeren Unterschiede festgestellt werden, außer dass die Absorption beim großen Brennfleck höher ausfällt, was darauf zurückzuführen ist, dass aufgrund der unterschiedlichen Brennfleckpositionen im Röhrengehäuse auch unterschiedliche Bereiche des Objekts durchstrahlt wurden.

Tabelle 4: Ermittelte Werte für die ungeschwächte Intensität und die maximale Absorption der Messdaten. Bei dem mit \* markierten Wert war der Detektor bereits gesättigt weshalb der Röhrenstrom halbiert wurde und der Messwert verdoppelt. Aufgrund der Nichtlinearität des Detektors ist der ermittelte Wert nicht verlässlich.

Spannung / kV	Belichtungszeit / ms	Brennfleckgröße/ $\mu\text{m}$	Ungeschwächte Intensität	Maximale Absorption
300	10	1000	4561	5,22
		400	4628	4,46
	30	1000	9768	4,63
		400	9812	4,19
	60	1000	17726	4,52
		400	18089	4,16
450	10	1000	7281	4,25
		400	7383	3,73
	30	1000	18457	4,14
		400	18614	3,75
	60	1000	35192	4,11
		400	35892	3,72
600	10	1000	10484	3,90
		400	10584	3,48
	30	1000	28187	3,89
		400	28538	3,48
	60	1000	55535*	3,87
		400	47834	3,45

Die CT-Schnitte der wurden mit den in Tabelle 3 zusammengefassten Parametern rekonstruiert. Dabei wurde nur ein kleiner Ausschnitt rekonstruiert, der 20 % des Messfeldes entspricht. Dem Ausschnitt wurden 200 Voxel zugeordnet, woraus sich eine Voxelgröße von ca. 560  $\mu\text{m}$  ergibt.

### 1.2. Variation der Spannung

Bei den Ergebnissen zur Variation der Spannung zeigt sich sehr deutlich, dass das Bildpunktrauschen mit zunehmender Spannung abnimmt. Dies lässt dadurch erklären, dass mit zunehmender Durchdringung des Objekts das Messsignal eine bessere Statistik aufweist. Des Weiteren verbessert sich der Kontrast zwischen den Grauwerten des Materials und der umgebenden Luft. Die Kantenschärfe bleibt von der Spannung unabhängig.

Tabelle 5: Nicht variierte Größen bei Variation der Spannung

Parameter	Werte
Brennfleck / $\mu\text{m}$	400
Belichtungszeit / ms	60

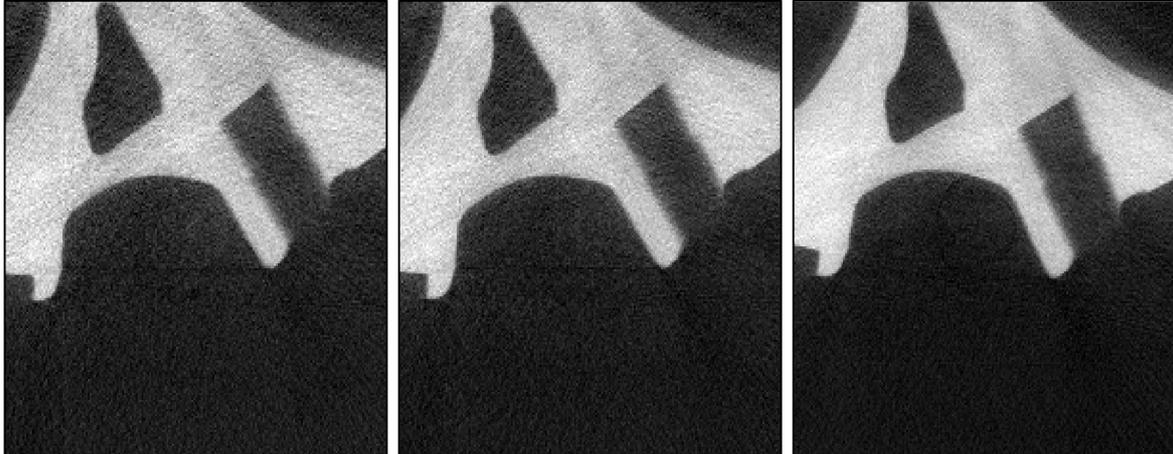


Abbildung 3: Rekonstruierte Ausschnitte von Testobjekt Aluminiumzylinderkopf bei unterschiedlichen Spannungen

### 1.3. Variation der Belichtungszeit

Wie zu erwarten war, verbessert sich die Bildqualität mit zunehmender Belichtungszeit deutlich, was zum Einen der Detailerkennbar zu Gute kommt und zum Anderen für klarere Objektkanten sorgt. Für den Anwender geht es letztlich darum herauszufinden, welches Niveau an Bildqualität benötigt wird, um eine bestimmte Prüfaufgabe zu lösen. Besteht diese bspw. darin Fehler mit Durchmesser  $> 5$  Voxel zu finden, ist dies in diesem Beispiel auch mit der kurzen Belichtungszeit (links) oder gar noch weniger möglich.

Tabelle 6: Nicht variierte Größen bei Variation der Belichtungszeit

Parameter	Werte
Brennfleck / $\mu\text{m}$	400
Spannung / kV	600

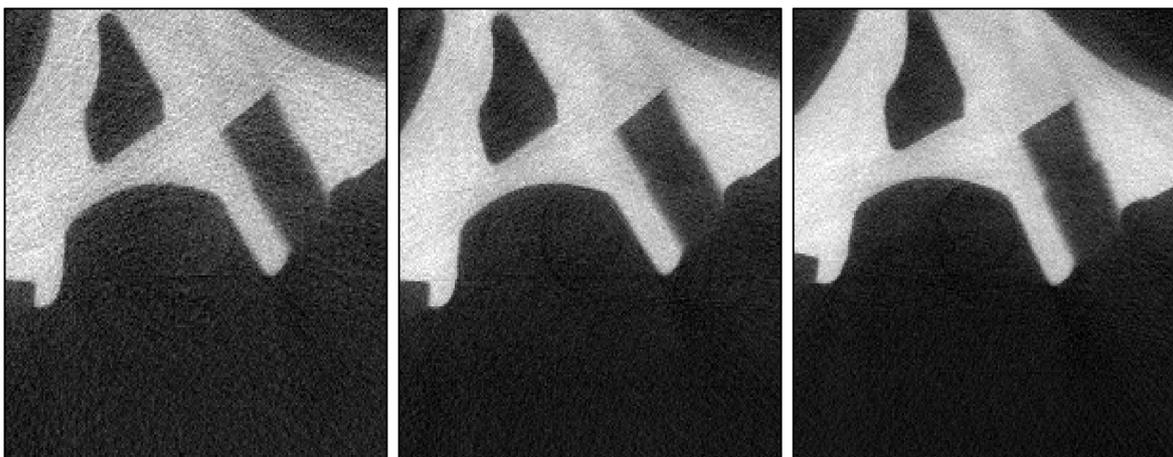


Abbildung 4: Rekonstruierte Ausschnitte von Testobjekt Aluminiumzylinderkopf bei unterschiedlichen Belichtungszeiten

#### 1.4. Variation der Brennfleckgröße

Bei der Variation der Brennfleckgröße und die Auswirkung auf die Bildqualität gilt es generell zu berücksichtigen, dass die geometrische Unschärfe des Brennflecks sich über die Vergrößerung auf das Detektorbild überträgt. Bei der Messung betrug die Vergrößerung ca.  $M = 1,4$ , was über den Zusammenhang  $U_D = U_S \cdot (M - 1)$  zu Unschärfen von 0,4 mm beim großen bzw. 0,16 mm beim kleinen Brennfleck führt. Beide Werte liegen im Bereich der Pixelgröße, weshalb zu erwarten ist, dass es keinen signifikanten Unterschied in den Messergebnissen gibt. Die Ergebnisse bestätigen dies. Aufgrund der unterschiedlichen Position der Brennflecke im Röhrengehäuse sind auch unterschiedliche Schnittebenen erzeugt worden. Dennoch ist zu erkennen, dass beim kleinen Brennfleck (Bild links) die Kantenschärfe geringfügig besser ist.

Tabelle 7: Nicht variierte Größen bei Variation der Brennfleckgröße

Parameter	Werte
Belichtungszeit / ms	60
Spannung / kV	450

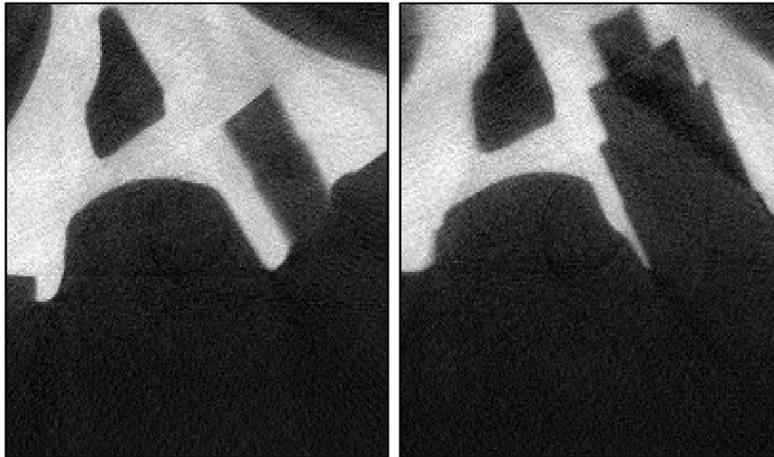


Abbildung 5: Rekonstruierte Ausschnitte von Testobjekt Aluminiumzylinderkopf bei unterschiedlichen Brennfleckgrößen

#### 1.5. Bestimmung von Ortsauflösung und CNR

Zur Bestimmung der Ortsauflösung wurde ein Stufenzylinder verwendet, der sich zur Messung zentral auf dem Drehtisch befand. Das rekonstruierte Bild wurde auf Basis der ASTM E1695 ausgewertet. In die Auswertung eingeflossen sind drei verschiedene Parametersätze mit variierender Spannung (300 kV, 450 kV, 600 kV) bei 30 ms Belichtungszeit und dem kleinen Brennfleck von 400  $\mu\text{m}$ .

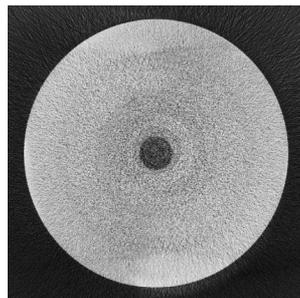


Abbildung 6: Rekonstruierte Schicht des Testobjekts Stufenzylinder bei 300 kV, 60 ms Belichtungszeit und 400  $\mu\text{m}$  Brennfleck.

Die Analyse basiert auf der Auswertung der Kante am Zylinderrand. Dabei wird zunächst der Kantenübergang extrahiert, anschließend differenziert und letztlich über eine Fouriertransformation eine Übertragungsfunktion bestimmt. Dieser auch als Modulations-Transfer-Funktion (MTF) bezeichnete Verlauf gibt Auskunft darüber mit welcher Amplitude bestimmte Ortsfrequenzen durch das bildgebende System übertragen werden. Idealerweise entspricht dieser Verlauf einer Sinc-Funktion. Kurvenverläufe realer Systeme liegen immer unterhalb dieser Kurve. Als ausschlaggebendes Kriterium zur Bewertung der Ortsauflösung wird dann jener Wert ermittelt, bei dem die Amplitude auf ein bestimmtes Niveau abgefallen ist. Standardmäßig sind dies 10% - in der Praxis ist es gegebenenfalls sinnvoll auf höhere Werte (bspw. 30%) auszuweichen, da diese stabiler bestimmt werden können. Die Werte in Tabelle 8 zeigen das Ergebnis der Untersuchung. Es zeigt sich, dass der Wert schwankt, aber kein signifikantes Maximum vorhanden ist. Diese Beobachtung stimmt mit den Angaben des Herstellers einer weitestgehend leistungsunabhängigen Brennfleckgröße überein.

Tabelle 8: Ergebnisse des Ortsauflösungstests

Parameter	300 kV	450 kV	600 kV
MTF @ 30% / lp/mm	0,56	0,58	0,54

Das Kontrast-Rausch-Verhältnis (CNR) gibt an, wie sich der Bildkontrast bezogen auf das Rauschniveau im Bild verhält. Es ist wie folgt definiert:

$$CNR = \frac{|\overline{ROI}_{Signal} - \overline{ROI}_{Rauschen}|}{\sigma_{Rauschen}}$$

Zur Bestimmung des CNR wurde eine region of interest (ROI) in das Zentrum gesetzt und eine weitere in den Bereich des Materials unterhalb des Zentrums. Eine ROI am Bildrand diente als Referenz für das Bildrauschen. Tabelle 9 fasst die ermittelten Werte zusammen. Es ist ersichtlich, dass der CNR mit zunehmender Spannung steigt. Dies ist zum Einen auf ein reduziertes Bildrauschen zurückzuführen und zum Anderen dem Umstand geschuldet, dass mit zunehmender Spannung Strahlaufhärtung weniger zum Tragen kommt.

Tabelle 9: Ergebnisse des CNR-Tests

Parameter	300 kV	450 kV	600 kV
CNR	3,57	6,36	7,85

## 1.6. Bildqualität

Abschließend wurde anhand eines Aluminiumgussteils untersucht welche Bildqualität auch bei hohen Durchstrahlungswegen zu erwarten ist. Dazu wurde das in Abbildung 2 vorgestellte Objekt liegend mit 600 kV, 30 ms Belichtungszeit und dem kleinen Brennfleck von 400 µm gemessen. Die restlichen Parameter entsprechen jenen in Tabelle 2. Da der Objektdurchmesser größer als das Messfeld war, wurde als Rekonstruktionsverfahren eine Teil-CT verwendet, die für solche Messszenarien konzipiert ist. Rekonstruiert wurde das gesamte Messfeld mit 512 x 512 Voxeln, was einer Voxelgröße von ca. 1,1 mm entspricht. Die Daten wurden zusätzlich mit Hilfe einer Strahlaufhärtungskorrektur verbessert. Abbildung 7 zeigt die rekonstruierten Bilder.

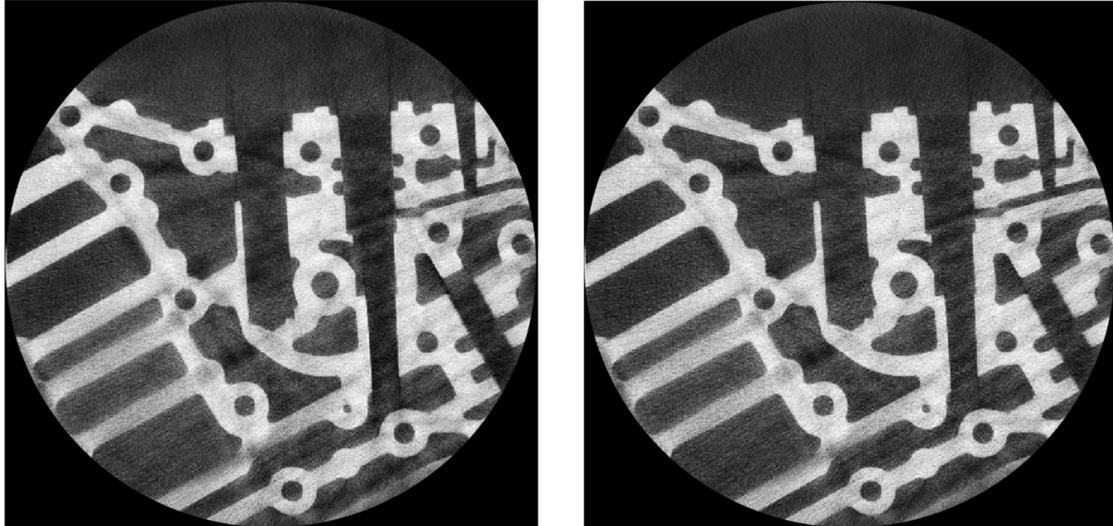


Abbildung 7: links: rekonstruierte Schicht des Testobjekts Aluminiumgussteil ohne Strahlauhärtungskorrektur; rechts: mit Strahlauhärtungskorrektur

Trotz der hohen Weglängen von bis zu 300 mm Aluminium konnte ein adäquates Bild erzeugt werden. Der Umstand, dass die maximale Absorption bei  $\sim 6,2$  lag zeigt, dass der verwendete Detektor über einen real sehr großen Dynamikumfang verfügt. Die durchgeführte Strahlauhärtungskorrektur zeigt eine zusätzliche – wenn auch kleine – Verbesserung der Daten.

### **Zusammenfassung**

Die hier gezeigten Ergebnisse geben einen kleinen Vorgeschmack auf die Leistungsfähigkeit des neuen CT-Systems RayScan 600. Die Erweiterung auf 600 kV ist ein sinnvoller Schritt, um die Einsatzmöglichkeiten und Flexibilität der CT weiter zu vergrößern. Die damit verbundenen Vorteile liegen auf der Hand: höhere Durchdringung und damit verbunden ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis. Um die eingangs gestellte Frage zu beantworten: Ja, „kv“ macht „grau“ – aber in der CT-Welt ist dies nicht zum Nachteil der Bildqualität, da andere Effekte vorrangiger sind.

### **Ausblick**

Im Zuge der Weiterentwicklung wird die Leistungsfähigkeit des Systems in weiteren Tests untersucht. Ergebnisse dazu werden in naher Zukunft veröffentlicht.

### **Referenzen**

- [1] NIST Standard Reference Database 8, URL: <http://www.nist.gov/pml/data/xcom/index.cfm>, Stand: 03.05.2013