

# Artefaktreduktion in der industriellen Computertomographie mithilfe zusätzlicher Oberflächeninformationen

Michael SCHRAPP\*, Matthias GOLDAMMER\*

\* Siemens AG, Corporate Technology München  
michael.schrapp@siemens.com

**Kurzfassung.** In der industriellen Computertomographie kann es häufig auftreten, dass die Absorption der Röntgenstrahlung im Material zu hoch ist und somit Durchstrahlungsartefakte entstehen. Ähnliche Artefakte treten auf, wenn nur ein begrenzter Winkelbereich eines Objekts aufgenommen werden kann (limited view). Analytische Rekonstruktionsverfahren (gefilterte Rückprojektion, FDK) ergeben bei solchen Situationen mit fehlenden Informationen häufig verwischte Kanten. Dies tritt besonders an Bauteilen mit konkaven Oberflächen auf. Iterative Rekonstruktionsmethoden können mit fehlerhaften Informationen zwar besser umgehen, jedoch können Sie die Artefakte nicht vollständig beseitigen, da die Oberflächeninformationen nicht mehr in den Projektionsdaten enthalten sind. Wir haben nun gezeigt, dass mithilfe komplementärer Daten innerhalb der iterativen Rekonstruktion diese Information ergänzt werden kann und damit die Artefakte drastisch reduziert werden können. Eine Möglichkeit besteht z.B. darin, die Oberfläche unseres Objekts als Zusatzwissen zu verwenden. Dazu haben wir in unserer Computertomographie-Anlage einen optischen Scanner mit einer Auflösung von bis zu 30 µm installiert. Damit ist es möglich, simultan zu der CT Aufnahme die gesamte 3-D-Oberfläche ohne Zeitverlust aufzunehmen. Für die Rekonstruktion verwenden wir neben algebraischen Rekonstruktionsverfahren (ART, SART, SIRT) und statistischen Verfahren (ML) auch das aus dem Bereich des compressed sensing stammende Konzept der Minimierung der Totalen Variation (TV). Die Oberflächendaten werden hierbei nach jedem Iterationsschritt mit einer Optimierungsfunktion eingebunden. Anhand von Simulationen und Messungen an einer Turbinenschaufel konnten wir mit dieser Methode die aufgetretenen Artefakte fast vollständig beseitigen.

## 1. Einführung

Moderne 3-D Röntgen Computertomographie (CT) ist ein wichtiges und wachsendes Feld in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung [1]. Nachdem der Schwerpunkt in den letzten Jahren auf der Inspektion und Visualisierung kleiner Strukturen lag, wie zum Beispiel elektronische Speicherkarten oder Faserverbundwerkstoffe, wird es derzeit immer wichtiger, größere und schwer zugängliche Objekte wie Turbinenschaufeln zu untersuchen. In solchen Fällen ist eine CT-Aufnahme mit einer vollen Winkelabtastung bzw. mit vollständiger Durchdringung oft nicht möglich und notwendige Informationen über das Objekt zur vollständigen Rekonstruktion fehlen. Diese fehlenden Daten können jedoch

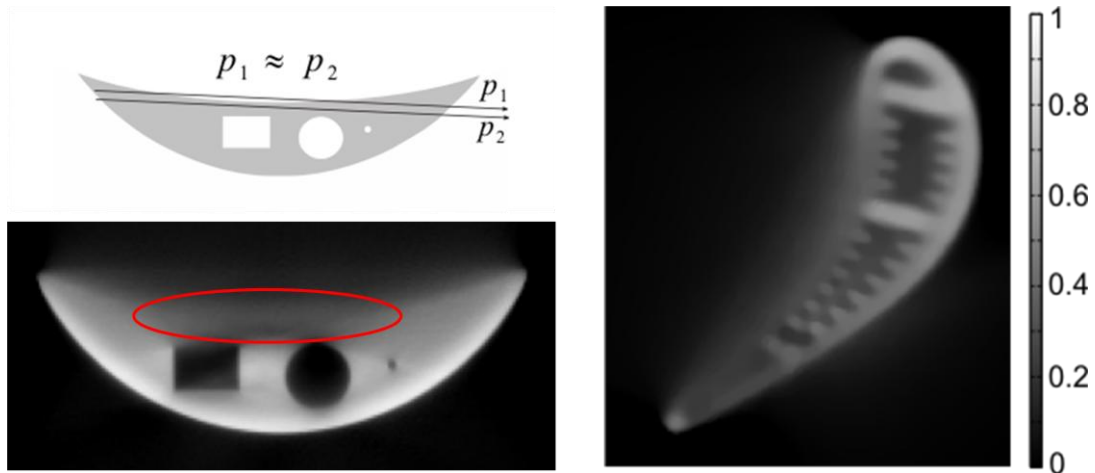


Abbildung 1: Links oben: Schematische Darstellung unseres Probekörpers mit konkaver Kante. Aufgrund von Streustrahlung sind die Projektionen  $p_1$  und  $p_2$  im konkaven Bereich nicht zu unterscheiden. Dies führt zu Verschmierungsartefakten (links unten) in der Rekonstruktion (simulierte Daten). Rechts ist die Rekonstruktion einer Turbinenschaufel aus realen Daten gezeigt.

mithilfe anderen Modalitäten durch Datenfusion ergänzt werden [2]. Insbesondere in der medizinischen Bildgebung ist die Fusion von MRT oder Ultraschall mit CT eine weitverbreitete Technik [3]. Die Fusion erfolgt hier meistens nach der jeweiligen Rekonstruktion. Um jedoch beide Datensätze bestmöglich miteinander zu verbinden, ist es sinnvoller die zusätzlichen Daten direkt während der Rekonstruktion mit einzubeziehen [4]. In diesem Beitrag stellen wir einen neuen, modifizierten Rekonstruktionsalgorithmus vor, um bestehende Artefakte am konkaven Rand von Turbinenschaufeln zu behandeln. Für die Datenfusion verwenden wir dazu einen neu entwickelten Streifenprojektionscanner, der eine vergleichbare Auflösung wie die CT Rekonstruktion hat.

Nachfolgend definieren wir zunächst einen simplen Probekörper und erläutern die Problematik von Nichtdurchstrahlungsartefakten anhand simulierter Daten. Anschließend beschreiben wir die Datenaufnahme an einer Turbinenschaufel via Oberflächenscanner und CT-Anlage und führen dann im Hauptteil beide Modalitäten zusammen.

## 2. Probekörper

Bei der Aufnahme von CT Projektionsdaten an konkaven Kanten in Verbindung mit hohen Durchstrahlungslängen tritt sehr häufig das Problem auf, dass nahe beieinanderliegende Projektionen nicht mehr aufgelöst werden können. Anhand eines einfachen Testkörpers haben wir dazu realitätsnahe Simulationen mit dem Simulationstool „aRTist“ von der Bundesanstalt für Materialforschung und -Prüfung durchgeführt (siehe Abbildung 1, links oben). Die dabei entstehenden Verschmierungsartefakte beruhen auf einem zu geringen Signal-Rausch-Verhältnis und selbst bei idealen Bedingungen, d.h. ohne Streustrahlung, ist ein extrem hoher Dynamikumfang des Detektors notwendig um diese Artefakte zu verringern. Im folgenden werden wir alle weiteren Ergebnisse anhand einer Turbinenschaufel mit gemessenen Daten validieren.

### 3. Oberflächenscanner

#### 3.1 Funktionsweise

Um die Oberfläche unserer Turbinenschaufel mit einer weiteren Modalität zu vermessen, verwenden wir einen kompakten 3-D-Scanner, der im Rahmen einer Doktorarbeit in unserer Abteilung entstanden ist [5]. Es handelt sich dabei um einen frei beweglichen (Handheld) Scanner mit Projektor und Kamera (siehe Abbildung 2), der mit einem Streifenprojektions- und Triangulationsverfahren arbeitet. Ein kodiertes Streifenmuster wird hierbei in rascher Abfolge auf die Oberfläche projiziert und von einer im festen Winkel befindlichen Kamera aufgenommen. Ein neu entwickeltes Phasenshiftverfahren in Kombination mit der Triangulationstechnik liefert schließlich ein vollständiges 3-D-Abbild des zu vermessenden Objekts [6]. Es kann dabei die 3-D-Oberfläche zeitgleich mit den CT-Projektionen aufgenommen werden, sodass kein Zeitverlust durch die Datenfusion entsteht.

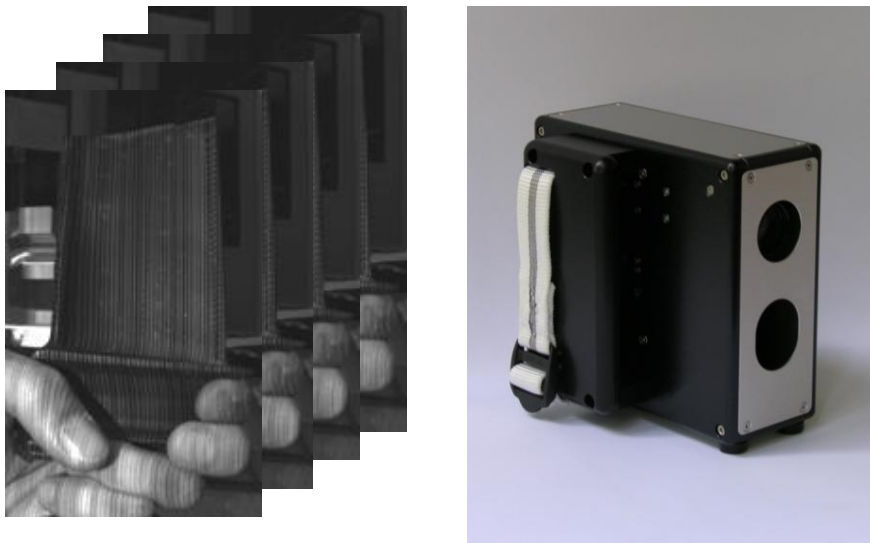


Abbildung 2: Links: Ein Phasenkodiertes Streifenmuster wird mithilfe eines Projektors auf die zu vermessende Oberfläche projiziert. Über ein Triangulationsverfahren wird daraus die Oberfläche bestimmt. Rechts: Bild des verwendeten Handheld-Scanners.

#### 3.2 Messergebnisse

Abbildung 3 zeigt das aufgenommene, vollständige 3-D-Abbild unserer Turbinenschaufel. Zur besseren Veranschaulichung wurde der obere Teil der Schaufel nicht dargestellt. Ein Querschnitt dieses 3-D-Objekts wird im nachfolgenden Kapitel als Zusatzwissen in die CT-Rekonstruktion mit einfließen.

### 4. Röntgen CT

#### 4.1 Datenaufnahme

Die CT Messungen wurden mit einer Anlage in Kegelstrahlgeometrie, bestehend aus einer Röntgenröhre (Viscom AG, XT9225-TED) und eines 16 bit Flachdetektors (PerkinElmer, XRD1621AN14), aufgenommen (siehe Abbildung 4). Der Detektor erlaubt eine Auflösung von 2048 x 2048 Pixel bei einer Pixelgröße von 200  $\mu\text{m}$ . Die Beschleunigungsspannung betrug 220 kV bei einer elektrischen Leistung von 100 W. Nach der Aufnahme wurde eine

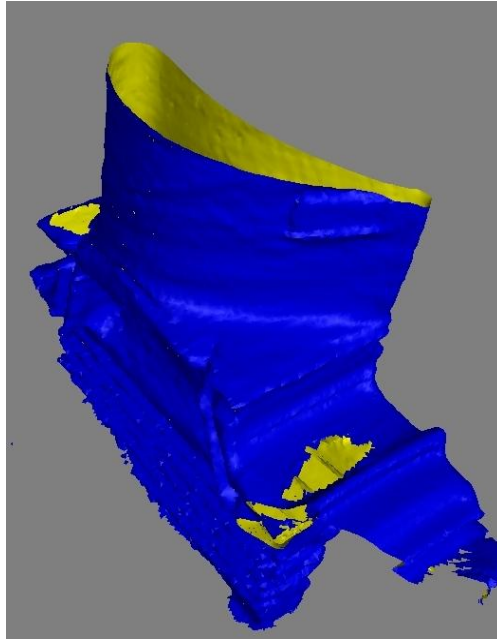


Abbildung 3: Mit dem 3-D Scanner aufgenommene Turbinenschaufel (unterer Teil der Schaufel).

Offset und Gain-Korrektur auf allen Projektionen durchgeführt. Die Offset-Korrektur entfernt dabei den Einfluss von intrinsischem elektronischen Rauschen durch eine Dunkelbildaufnahme und die Gain-Korrektur korrigiert die Helligkeitsempfindlichkeit jedes einzelnen Pixels. Wir haben 720 Projektionen bei einem Winkelinkrement von  $0.5^\circ$  aufgenommen.

Die aufgenommenen Daten sind noch durch diverse physikalische Effekte wie Streuung, Strahlaufhärtung sowie geringem Signal-Rausch-Verhältnis beeinflusst, was zu starken Artefakten im rekonstruierten Bild führt. Eine softwarebasierte Strahlaufhärtungskorrektur sowie eine Vorfilterung mit 0.7 mm Kupfer reduzieren die Strahlaufhärtungsartefakte fast vollständig. In der Literatur existieren auch verschiedene Verfahren zur Streustrahlenkorrektur [7]. Im folgenden konzentrieren wir uns jedoch ausschließlich auf die Korrektur von Nichtdurchstrahlungsartefakten (geringes Signal-Rausch-Verhältnis).

#### 4.2 Rekonstruktion

Für die Rekonstruktion in der CT (Kegelstrahlgeometrie) wird heutzutage typischerweise der analytische Algorithmus von Feldkamp, Davis und Kress (FDK) [8] verwendet. Dieser basiert auf der gefilterten Rückprojektion (FBP) und ist schnell, stabil und exakt, vorausgesetzt alle Projektionen wurden vollständig aufgenommen. In unserem Fall haben wir es jedoch mit fehlenden bzw. fehlerhaften Projektionen zu tun, die im FDK-Algorithmus zu starken Artefakten führen. In solchen Fällen eignen sich Iterative Verfahren, wie z.B. die Algebraische Rekonstruktion (ART) [9], wesentlich besser um mit fehlerhaften Daten umzugehen. Wir verwenden hier ein spezielles Verfahren, die Simultane Iterative Rekonstruktionstechnik (SIRT).

Wie bei allen iterativen Verfahren, besteht der SIRT Algorithmus aus einer Diskretisierung der Radon-Transformation  $p_i = \int_i f(x,y)ds$ , wobei  $p_i$  der  $i$ -ten gemessenen Projektion

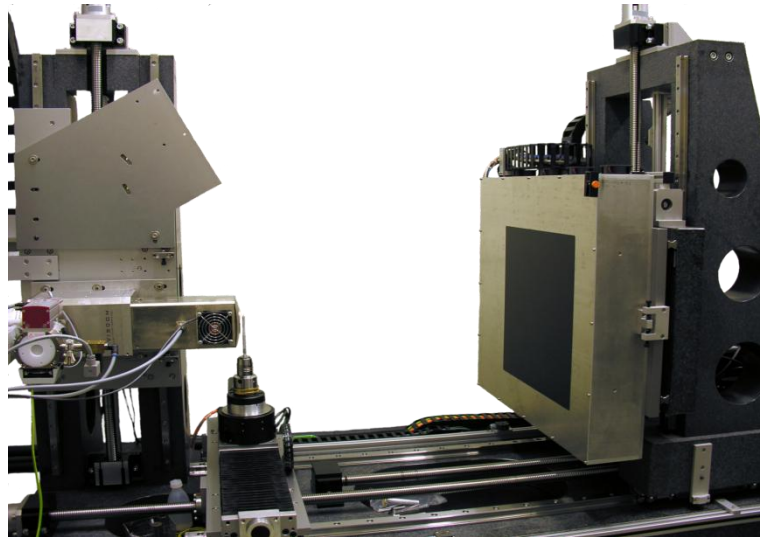


Abbildung 4: Röntgen CT-Anlage mit maximaler Energie von 225 keV und Flachdetektor mit 2048 x 2048 Pixel.

entspricht und  $f(x, y)$  das zu rekonstruierende Volumen darstellt. Die Diskretisierung ergibt das lineare Gleichungssystem  $Af = p$ , wobei die System Matrix  $A$  eingeführt wurde. Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 5 gegeben. Der SIRT Algorithmus [7] liefert nun die folgende Aufdatierungsformel zur Lösung von  $Af = p$ :

$$f^{(k)} = f^{(k-1)} + \frac{f^{(k-1)}}{\sum_{i=1}^M a_{ir}} \sum_{i=1}^M a_{ir} \frac{p_i - \sum_{r=1}^N a_{ir} f^{(k-1)}}{\sum_{r=1}^N a_{ir}} \quad (1)$$

wobei  $k$  der  $k$ -ten Iteration entspricht und  $N$  der Gesamtzahl an Bildpixeln und  $M$  dem Produkt aus Anzahl der Projektionen und Detektorpixelanzahl.

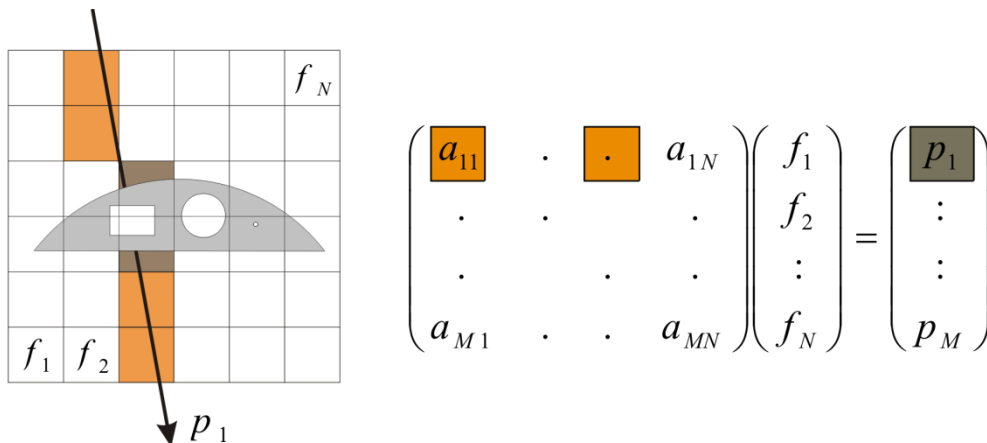
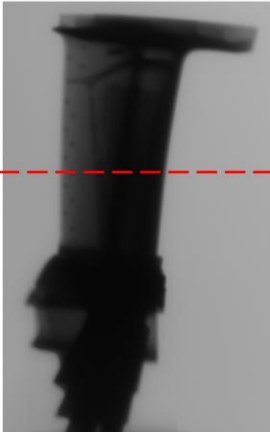


Abbildung 5: Schematische Darstellung zur Motivation der algebraischen Rekonstruktion (ART). Zuerst wird das zu rekonstruierende Volumen in Bildpixel unterteilt,  $f_1 \dots f_N$ . Betrachtet man nun einen konkreten Projektionsstrahl  $p_1$ , so stellt die System-Matrix einen Zusammenhang zwischen Strahl und durchstrahlten Bild-Voxeln her. Das daraus resultierende Gleichungssystem ist rechts dargestellt.

Projektion 180/720



Grauwertprofil

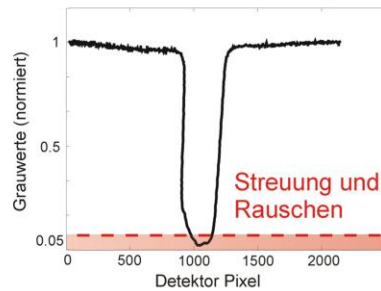
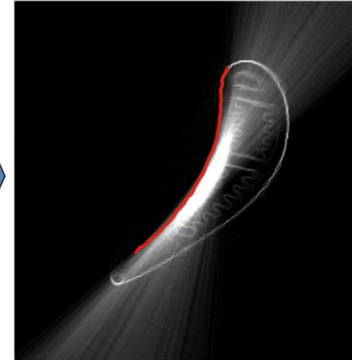
Nichtvertrauenswürdiger  
Bildbereich

Abbildung 6: Prinzip der Datenfusion. Aus der CT-Projektion des linken Bildes wird an der gestrichelten Linie ein Grauwertprofil extrahiert (mittleres Bild). Die Pixel im Grauwertprofil innerhalb des schattierten Bereichs sind nicht mehr vertrauenswürdig und entsprechen der weißen Region im rechten Bild. Die rote Linie stammt aus dem Zusatzwissen durch die Oberflächendaten.

## 5. Datenfusion

Um die Informationen aus dem Oberflächendatensatz in der CT-Rekonstruktion verwenden zu können, muss eine Kalibrierung durchgeführt werden bzw. eine Registrierung beider Daten erfolgen. Bei der hier benutzten Registrierung wird nach Filterung der ursprünglichen Rohdatensätze ein *iterative closest point* Algorithmus (ICP) angewendet[3]. Die Filterung ist notwendig, um die Konvergenz des Verfahrens zu gewährleisten. Für die daran anschließende Datenfusion wird nun der SIRT Algorithmus aus 3.2 abgeändert. Zunächst identifizieren wir hierzu diejenigen Bereiche in den Projektionsdaten, an denen Nichtdurchstrahlung vorliegt. Unterhalb eines gewissen Grauwerts in den Projektionsbildern (hier: 5% des Freistrahls) können wir annehmen, dass am Detektor Sekundärstrahlung sowie Rauschen gegenüber der Primärstrahlung überwiegen und die somit erhaltenen Daten die Realität nicht mehr widerspiegeln. Diese fehlerhaften Bereiche in allen Projektionen werden anschließend auf den rekonstruierten Bildbereich abgebildet. In die somit ermittelten fehlerhaften Bildbereiche werden nun die aus dem Oberflächenscan bekannten Kanten eingefügt (siehe Abbildung 6). Es sei hier darauf hingewiesen, dass die Grenze von 5% für unzuverlässige Grauwerte in den Projektionen ein heuristischer Wert ist und geringe Änderungen die daraus folgende Rekonstruktion nicht nennenswert verändert. Formel 1 zur Aufdatierung der Bildpixel verändert sich nun zu:

$$f^{(k)} = f^{(k-1)} + \frac{f^{(k-1)}}{\sum_{i=1}^M a_{ir}} \sum_{i=1}^M a_{ir} \frac{p_i - \sum_{r=1}^N a_{ir} f^{(k-1)}}{\sum_{r=1}^N a_{ir}} + F(f^{(k-1)}, p, s). \quad (2)$$

Die Funktion  $F(f^{(k-1)}, p, s)$  entspricht einer Art Regularisierung, in der die Oberflächendaten mit einfließen. Nach jedem Iterationsschritt wird außerdem die totale Variation mit einem Gradientenabstiegsverfahren minimiert [10]. Dieses, aus dem compressed sensing stammende, Konzept führt zu deutlich besseren Rekonstruktionen bei unvollständigen Daten und reduziert das Bildrauschen bei gleichzeitigem Erhalt der Kantenschärfe.



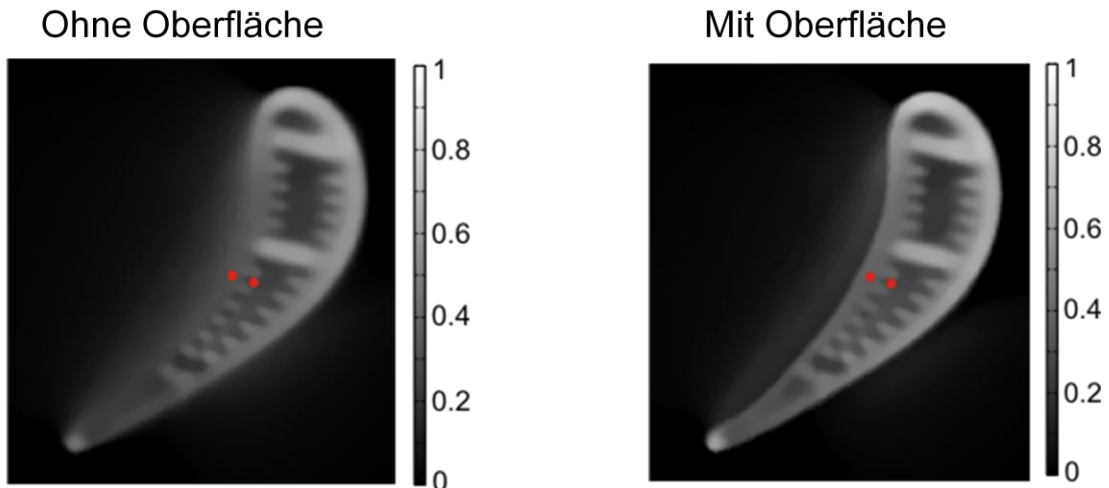


Abbildung 7: Messergebnisse der Datenfusion an Turbinenschaufeln. Zusätzlich zur konkaven Kante wird auch der sich anschließende Innenbereich besser rekonstruiert. An den zwei roten Punkten wurde jeweils der Kontrast errechnet (siehe Text). Durch die Fusion verbessert sich der Kontrast von 25% (linkes Bild) auf 35% (rechtes Bild).

Die Ergebnisse der Datenfusion sind in Abbildung 7 für die Turbinenschaufel dargestellt. Die zusätzlich eingefügte konkave Kante aus dem Oberflächenscan ist deutlich zu erkennen. Zusätzlich wird auch das Innere der Schaufel besser dargestellt. Um dies zu quantifizieren, berechnen wir den Kontrast indem wir die Grauwerte im Material und im freien Zwischenraum vergleichen (siehe rote Punkte in Abbildung 6). Im rekonstruierten Bild ohne Oberflächendaten erhalten wir den Kontrast  $C = \frac{\text{Grauwert}_{\max}}{\text{Grauwert}_{\min}} - 1 = 25\%$  und für das Bild mit Oberflächendaten den Wert  $C = \frac{\text{Grauwert}_{\max}}{\text{Grauwert}_{\min}} - 1 = 35\%$ . Dies zeigt, dass die Datenfusion eine erhebliche Kontrastzunahme bewirkt.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Wir haben in diesem Beitrag gezeigt, dass die CT-Rekonstruktion in Kombination mit 3-D-Oberflächendaten zu einer deutlichen Reduktion von Nichtdurchstrahlungsartefakten und zu einer Erhöhung des Bildkontrastes führt. Die Oberflächenerfassung geschieht dabei zeitgleich mit der Aufnahme der Projektionen und es entsteht somit kein Zeitverlust. Diese Datenfusion hat das Potential um in Zukunft große Messobjekte bei geringeren keV Zahlen, und damit bei geringeren Kosten, zu untersuchen und die daraus resultierenden Artefakte mit den Oberflächendaten größtenteils zu beheben. Insbesondere in der dimensionellen Messtechnik kann dies von großer Bedeutung sein.

## Danksagung

Wir bedanken uns bei Prof. Böni von der Technischen Universität München für seine hilfreichen Beiträge und dauerhafte Unterstützung. Zudem bedanken wir uns beim *Austrian Center of Competence in Mechatronics* (ACCM) für die finanzielle Unterstützung sowie den Projektpartnern an der Universität Erlangen-Nürnberg.

## Referenzen

- [1] Chaves H, Bauer D and Arcoumanis C. Measurements of void fraction distribution in cavitating Pipe using x-ray CT. *Measurement Science and Technology*, 23, 2012.
- [2] Weckenmann A, Jiang X, Sommer K D, Neuschaefer-Rube U, Seewig J, Shaw L, and Estler T. Multisensor data fusion in dimensional metrology. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(2):701, 2009.
- [3] Harada K, Hyoungseop Kim, Joo Kooi Tan, Ishikawa S, and Yamamoto A. Optimal registration method based on ICP algorithm from head CT and MRT image sets. *International Conference on Control, Automation and Systems*, 2008.
- [4] Mohammad-Djafari A. Probabilistic methods for data fusion. *Maximum Entropy and Bayesian Methods*, pages 57-69, 1997.
- [5] Wissmann P, Schmitt R and Frank Forster. Fast and accurate 3D scanning using coded phase shifting and high speed pattern projection. *International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission*, pages 108–115, 2011.
- [6] Wissmann P, Forster F and Schmitt R. Fast and low-cost structured light pattern sequence projection. *Optics Express*, 0,389–396, 2011.
- [7] Buzug T M. Computed Tomography: From Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT. *Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg*, 2008.
- [8] Feldkamp L A, Davis L C, and Kress J W. Practical cone-beam algorithm. *Journal of the Optical Society of America A*, 1(6) 1984.
- [9] Gordon R, Bender R, and Herman G T. Algebraic Reconstruction Techniques (ART) for Three-Dimensional Electron Microscopy and X-ray Photography. *Journal of Theoretical Biology*, 29 (3), 1970.
- [10] Laroque S, Sidky E, and Pan X. "accurate image reconstruction from few-view and limited-angle data in diffraction tomography". *Journal of the Optical Society of America A*, 25, 2008.