

Artefaktkorrektur in der Computerlaminographie durch Nutzung von Vorwissen über die Objektgeometrie

Christian SCHORR *, Michael MAISL *

* Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken
christian.schorr@izfp.fraunhofer.de

Kurzfassung. Die Computerlaminographie (CL) eignet sich sehr gut für die Untersuchung flächiger Prüfobjekte, also von Teilen, bei denen das Verhältnis von Grundfläche zu Höhe sehr groß ist. Die Standard Computertomographie (CT) versagt hingegen bei solchen Problemstellungen.

Bei einer Computerlaminographie kann das Objekt - im Gegensatz zur herkömmlichen Computertomographie - nicht aus allen notwendigen Richtungen durchstrahlt werden, so dass typische Verwischungsartefakte außerhalb der Volumenmitte auftreten. Diese Effekte reduzieren den Kontrast und können vorhandene Defekte und Strukturen überdecken, so dass sie nicht mehr zu detektieren sind. Steht jedoch Vorwissen über die Objektgeometrie zur Verfügung, beispielsweise dessen Oberflächenkonturen, so lässt sich diese a priori Information ausnutzen, um die eingesetzten Rekonstruktionsalgorithmen zu optimieren und dadurch die computerlaminographischen Verwischungsartefakte zu reduzieren. Dazu wird der zu rekonstruierende Bereich auf Stellen beschränkt, die laut Vorwissen im Inneren des Objektes liegen, während die umgebende Luft ignoriert wird. Zusätzliche durchstrahlungslängenbasierte Korrekturen sorgen für eine gleichzeitige Kontrasterhöhung von Strukturen, die infolge von Artefakten nur schwach oder nicht sichtbar sind.

Am Beispiel von Simulationen und Messungen von Prüfobjekten an der Computerlaminographieanlage CLARA werden erreichte Verbesserungen durch die Benutzung der geometrischen a priori Information gezeigt und die entwickelten Algorithmen dargestellt.

1. Einleitung

Die Computertomographie (CT) ist eine weit verbreitete und akzeptierte zerstörungsfreie Prüfmethode, um die innere Struktur von Objekten zu inspizieren. Versucht man herkömmliche Rekonstruktionsverfahren für Kreis- oder Helixabtastung auf die computertomographische Untersuchung planarer Objekte anzuwenden, so trifft man auf zwei Probleme: Undurchstrahlbarkeit in Längsrichtung und Kollisionsgefahr zwischen Prüfobjekt und CT-Anlage. Eine CT erfordert eine Rotation des Objektes um 360°, währenddessen Durchstrahlungsbilder aufgenommen werden. Planare Objekte sind eine Herausforderung, weil sie stark variierende Durchstrahlungslängen aufweisen. Normal zur



Oberfläche ist die Absorption sehr viel geringer als in Längsrichtung. Versucht man dies zu kompensieren, indem man die Energie der Röntgenstrahlen erhöht, um das Objekt aus allen Richtungen durchdringen zu können, so reduziert man gleichzeitig den Kontrast und die geometrische Auflösung, was zu unbrauchbaren Ergebnissen führen kann. Der Öffnungswinkel der Röntgenquelle erlaubt eine Variation der Vergrößerung durch Verändern des Abstandes zwischen Quelle und Objekt. Dadurch können kleine Strukturen hochaufgelöst auf dem Detektor abgebildet werden. Besonders planare Objekte mit sehr feinen Details können eine so hohe Vergrößerung verlangen, dass der Abstand zwischen Quelle und Objekt so gering wird, dass keine 360° Rotation mehr möglich ist, ohne mit der Quelle zusammenzustoßen. Die Computerlaminingraphie (CL) kann diese Probleme lösen. Im Gegensatz zur Standard CT Geometrie, in der Quelle und Detektor senkrecht zueinander und zur Rotationsachse stehen und eine volle 360° Abdeckung notwendig ist, kann die CL lineare und planare Translationsgeometrien (klassische CL) [4] oder gekippte Rotationsgeometrien (CLARA) [5] nutzen. Der Vorteil dieser Trajektorien liegt in der Möglichkeit, das Objekt nahe genug an der Quelle platzieren zu können, um die gewünschte Auflösung zu erhalten und gleichzeitig eine Kollision mit der Quelle zu vermeiden.

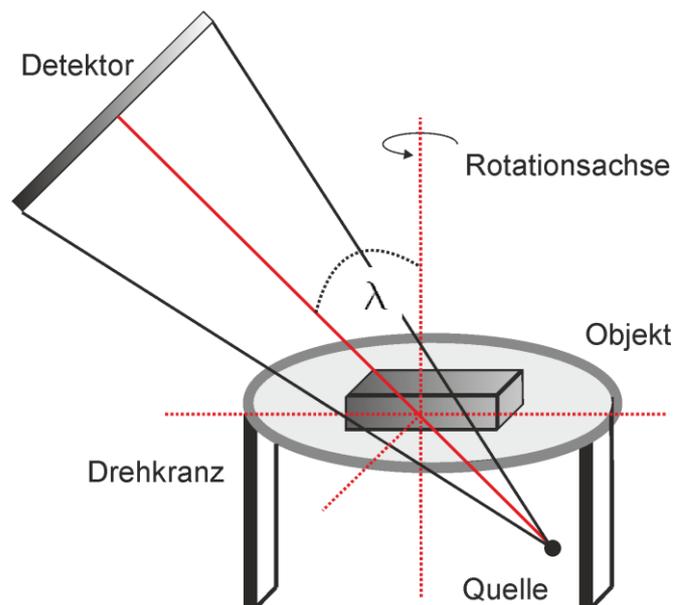


Abb. 1. CLARA Geometrie

2. Integration von a priori Information

Das SART Verfahren [1] eignet sich ideal dazu, geometrisches a priori Wissen zu nutzen, um Artefakte zu kompensieren und die Qualität der Rekonstruktion zu steigern. Andere Ansätze zur Korrektur typischer Laminographieartefakte finden sich auch in [2]. Das SART Verfahren berechnet die Dichteverteilung eines Objektes, indem es ein lineares Gleichungssystem iterativ löst. Der physikalische Prozess der Computertomographie wird dazu als Matrix-Vektor-Gleichung modelliert und anschließend durch iteratives Berechnen

von Vor- und Rückprojektionen gelöst. Der Algorithmus lässt sich wie folgt beschreiben:

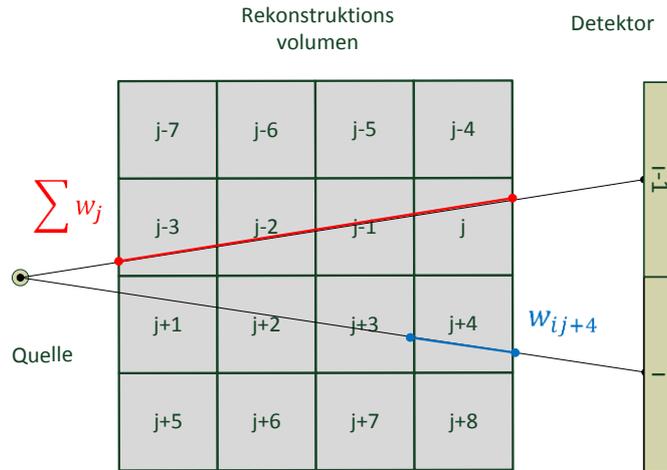


Abb. 2. SART Modellierung

Sei v ein Volumen, das aus N kubischen Voxel j mit jeweils konstanten Werten v_j bestehe. Sei außerdem p der Vektor der gemessenen Röntgenstrahlen der Dimension M und bezeichne p_i die Strahlsumme des Strahls, der vom i -ten Detektorpixel aus durch Voxel v geht. Dann lässt sich die Beziehung zwischen v und p durch folgende Gleichung beschreiben:

$$Wv = p, \sum_{j=1}^N w_{ij}v_j = p_i, i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

mit W einer Matrix der Dimension $M \times N$ mit Einträgen w_{ij} , welche die Gewichtungsfaktoren in Voxel j bei Strahl i repräsentieren. Sei v_j^k der Wert von Voxel j nachdem k Projektionen verarbeitet wurden, λ ein Relaxationsfaktor und P_φ die unter dem Winkel φ aufgenommene Projektion. Damit lässt sich das SART Verfahren definieren:

$$v_j^{(k+1)} = v_j^{(k)} + \lambda \frac{\sum_{p_i \in P_\varphi} \left(\frac{p_i - \sum_{n=1}^N w_{in}v_n^{(k)}}{\sum_{n=1}^N w_{in}} \right) w_{ij}}{\sum_{p_i \in P_\varphi} w_{ij}} \quad (2)$$

Oft liegt bereits vor der Messung des Objektes Vorwissen über das Objekt selbst vor. Diese a priori Information bezieht sich üblicherweise auf die geometrische Form des Objektes und seiner Abmessungen. Das Ausnutzen dieses Vorwissens kann dabei helfen, die Qualität und die Konvergenzgeschwindigkeit der Rekonstruktion zu erhöhen [3]. Geometrische a priori Information über die Objektkontur lässt sich in Form einer Zusatzgewichtung in das SART Verfahren integrieren. Dazu wird ein zusätzliches Volumen implementiert, das die gleiche Größe hat, wie das zu rekonstruierende Volumen. Dieses Gewichtungsvolumen G enthält Voxel der Werte $g_j \in \{0; 1\}$, welche die Wahrscheinlichkeit angeben, ob der betreffende Voxel im Objekt Material enthält oder nicht. Für einen Materialvoxel wird $g_j = 1$ gesetzt, andernfalls gilt $g_j = 0$.

Ein direkter Ansatz wäre dann, diese g_j als Zusatzgewichtung im Rückprojektionsschritt des SART Verfahrens zu benutzen, was zum API-SART (A priori SART) Algorithmus führt :

$$v_j^{(k+1)} = v_j^{(k)} + \lambda \frac{\sum_{p_i \in P\varphi} \left(\frac{p_i - \sum_{n=1}^N w_{in} v_n^{(k)}}{\sum_{n=1}^N w_{in}} \right) w_{ij} g_j}{\sum_{p_i \in P\varphi_i} w_{ij}} \quad (3)$$

Ein Nachteil dieser Methode ist der "Verlust" von Material, da die additiven Korrekturwerte, welche den a priori Voxeln des Gewichtes 0 zugeordnet werden, bei der Rückprojektion verloren gehen.

Benutzt man das folgende strahlängenbasierte Korrekturverfahren [6,7], so lässt sich dieses Problem lösen. Nach Berechnung der Voxel j , in die zurückprojiziert werden soll und deren Strahlängen w_{ij} , werden die korrespondierenden Gewichtungsvoxel g_j , welche die Bedingung $g_j = 0$ erfüllen bestimmt. Die korrigierte Gesamtstrahlänge berücksichtigt nun nur die Voxel j , für deren entsprechende Gewichtungsvoxel $g_j \neq 0$ gilt. Mit dieser angepassten Gesamtstrahlänge ändern sich die Gewichte der einzelnen Voxel in der Rückprojektion, da die Gesamtstrahlänge durch Ausklammern der $g_j = 0$ verringert wurde. Dies führt auf der anderen Seite zu einer Erhöhung der verbleibenden Gewichte w_{ij} , wodurch der Materialverlust kompensiert wird. Dieses Konzept führt zu einer strahlängenkorrigierten Gewichtung g_j^{SLK} der Rückprojektion:

$$g_j^{\text{SLK}} = \left(\frac{\sum_{n=1}^N w_{in}}{w_{in \neq 0}} \right) g_j, \quad w_{in}, g_j \in \mathbb{R} \quad (4)$$

Ersetzt man die g_j des direkten API-SART Verfahrens (3) durch die g_j^{SLK} aus (4) so ergibt sich das strahlängenkorrigierte API-SART Verfahren:

$$v_j^{(k+1)} = v_j^{(k)} + \lambda \frac{\sum_{p_i \in P\varphi} \left(\frac{p_i - \sum_{n=1}^N w_{in} v_n^{(k)}}{\sum_{n=1}^N w_{in}} \right) w_{ij} \left(\frac{\sum_{n=1}^N w_{in}}{w_{in \neq 0}} \right) g_j}{\sum_{p_i \in P\varphi} w_{ij}} \quad (5)$$

3. Experimentelle Überprüfung

Der vorgeschlagene API-SART Algorithmus wurde sowohl an simulierten, als auch echten Daten getestet. Für die CLARA Geometrie wurde ein Platinephantom mit Riss simuliert. Um die Leistungsfähigkeit des Verfahrens an Messdaten zu untersuchen, wurde eine Skischuhschnalle aus einer Magnesiumlegierung mit Poren gewählt.

Eine CLARA Messung mit 40 Projektionen und einem Laminographiewinkel von 45° mit Riss wurde mit Hilfe der Software Scorpius XLab simuliert. Eine simulierte 360° CT Rekonstruktion ohne Riss aus 400 Projektionen fungierte dabei als Ausgangspunkt für die Berechnung eines a priori Volumens, das in die Rekonstruktion der CLARA Daten mit API-SART einging.

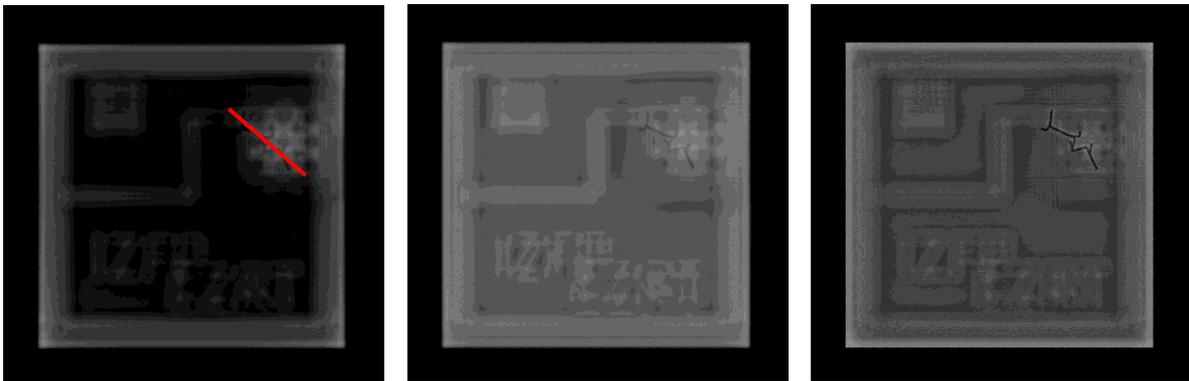


Abb. 3. Platinephantom, Frontalansicht, von links nach rechts: SART Rekonstruktion ohne a priori Information, AP-SART Rekonstruktion mit a priori Information, AP-SART Rekonstruktion mit a priori Information und Strahllängenkorrektur

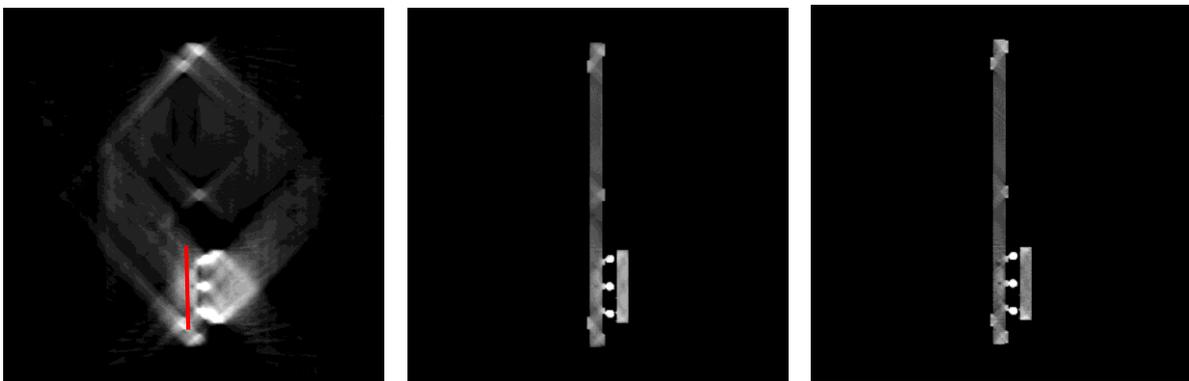


Abb. 4. Platinephantom, Seitenansicht, von links nach rechts: SART Rekonstruktion ohne a priori Information, AP-SART Rekonstruktion mit a priori Information, AP-SART Rekonstruktion mit a priori Information und Strahllängenkorrektur

Vergleicht man die Rekonstruktionen des Platinephantoms, so wird der Effekt der zusätzlichen a priori Gewichtung offensichtlich. Die frontale Ansicht zeigt klar, dass der Riss sichtbar wird, wenn man Vorwissen einsetzt, besonders, wenn zugleich eine Strahllängenkorrektur durchgeführt wird. Eine normale SART Rekonstruktion leidet hingegen unter schlechtem Kontrast, der den Riss nur sehr schwer erkennbar macht.

Die Seitenansicht der SART Rekonstruktion zeigt die typischen Verschmierungsartefakte wie sie bei einer Laminographie mit 45° auftreten. Nur ein Ast des Risses unter der mittleren Kugel ist zu erkennen. Fügt man a priori Information hinzu, so werden die Konturen deutlich schärfer. Nur mit der Anwendung der Strahllängenkorrektur lässt sich jedoch der zweite Ast des Risses detektieren. Ohne Strahllängenkorrektur sind unter der oberen und unteren Kugel nur schwache Strukturen zu erahnen, ohne dass die obere als Artefakt und die untere als wirklicher Rissast unterscheidbar sind.

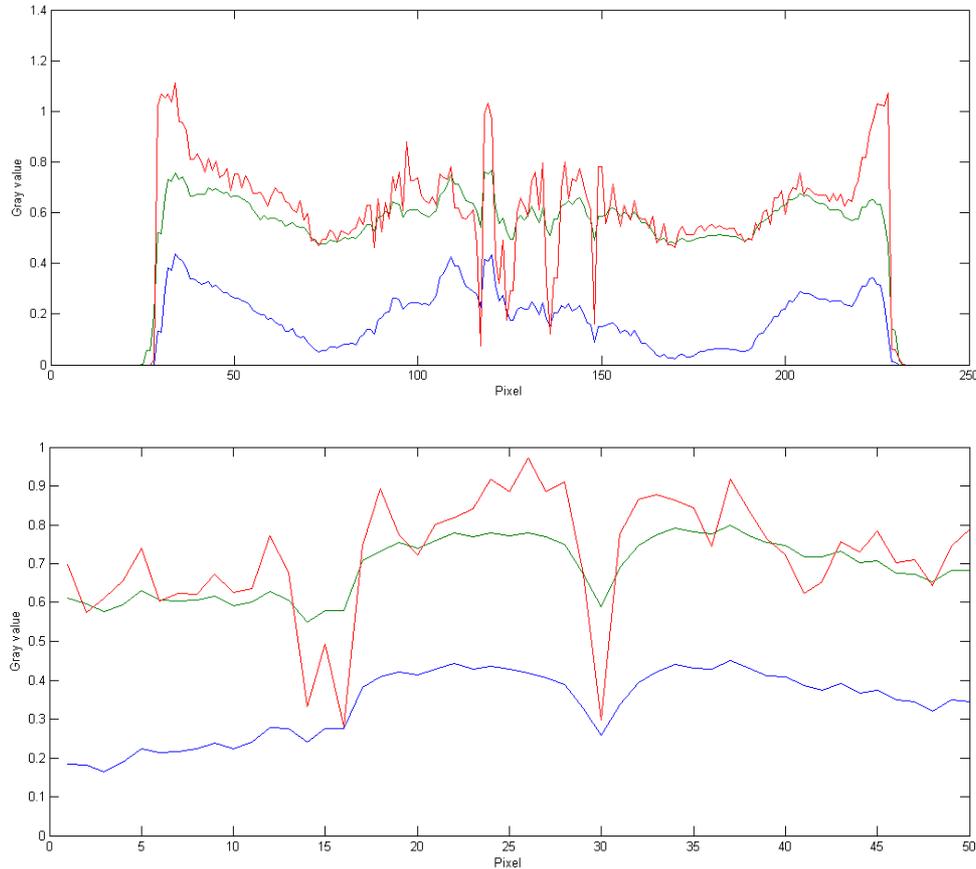


Abb. 5. Platinephantom, oben - Grauwertprofil entlang der roten Linie in Abb. 2, unten - Grauwertprofil entlang der roten Linie in Abb. 3, SART Rekonstruktion ohne a priori Information (blau), SART Rekonstruktion mit a priori Information (grün), SART Rekonstruktion mit a priori Information und Strahllängenkorrektur (rot)

Abbildung 5 oben zeigt die Grauwertverläufe in der Frontalansicht entlang der roten Linien in Abb. 4. Das API-SART Verfahren mit Strahllängenkorrektur zeigt eine signifikante Steigerung des Kontrastes verglichen mit einer Standard SART und einer unkorrigierten API-SART Rekonstruktion. Der linke Defekt bei Pixel 15 ist in der SART Rekonstruktion nicht erkennbar und mit API-SART allenfalls zu erahnen, zeichnet sich dagegen mit strahllängenkorrigiertem API-SART sehr deutlich ab. Der rechte Defekt bei Pixel 30 ist mit allen Verfahren detektierbar, hier zeigt sich zwischen SART und API-SART kein Unterschied. Die zusätzliche Anwendung der Strahllängenkorrektur erhöht den Kontrast jedoch stark.

Abbildung 5 unten zeigt den entsprechenden Grauwertverlauf in der Sagittalansicht entlang der roten Linie in Abb. 4. Auch hier erkennt man im Bereich zwischen den Pixeln 120 und 150, dass die Rekonstruktion mit strahllängenkorrigiertem API-SART deutlich höheren Kontrast aufweist, als mit den beiden anderen Verfahren.

Zusätzlich wurde das API-SART Verfahren mit Strahllängenkorrektur anhand einer Platte aus faserverstärktem Kunststoff überprüft. Die entsprechende a priori Information wurde durch den Nachbau der Platte in einem CAD Programm und dessen Transformation in ein Voxelvolumen erzeugt. Die Messung erfolgte in CLARA Geometrie mit einem Laminographiewinkel von 45° .

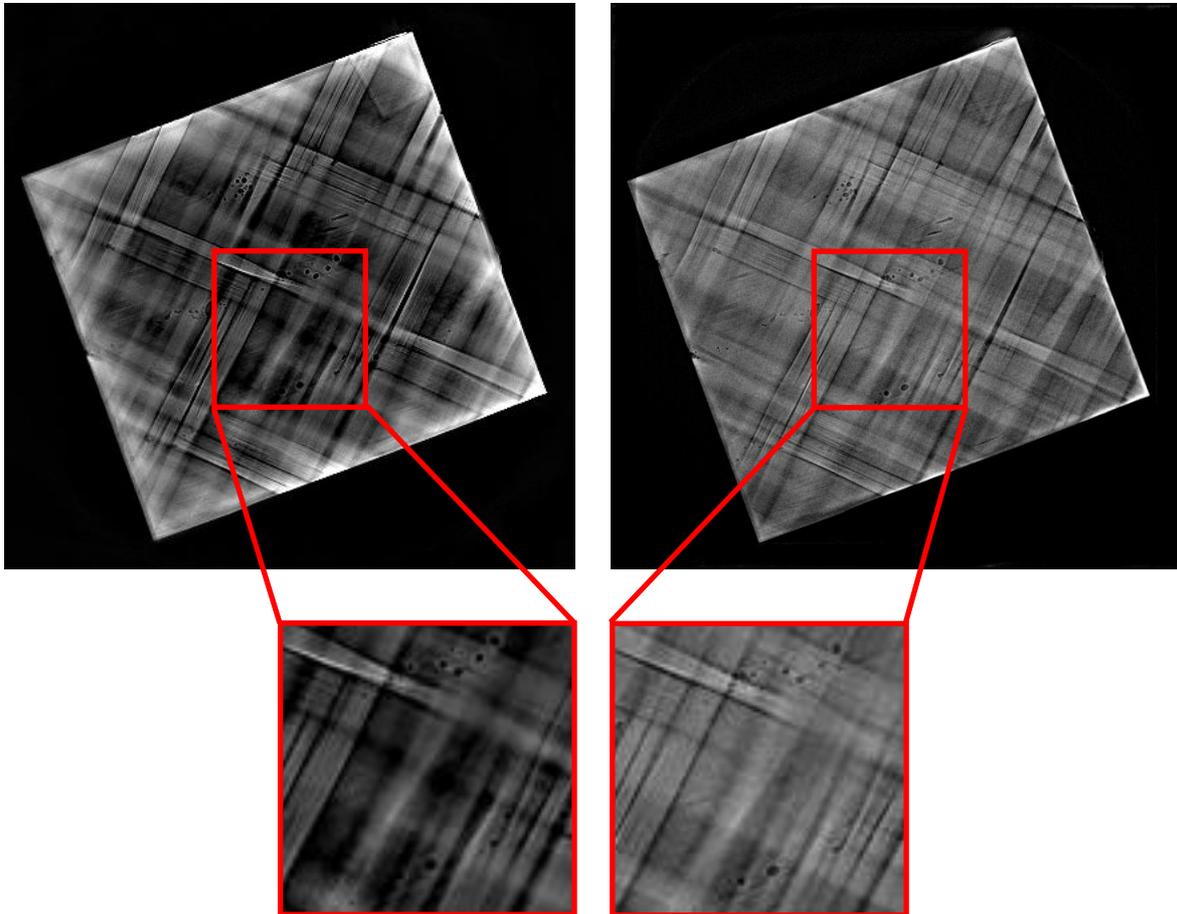


Abb. 6. oben links: SART Rekonstruktion ohne a priori Information, oben rechts: SART Rekonstruktion mit a priori Information, unten links: vergrößerter Ausschnitt aus der SART Rekonstruktion ohne a priori Information, unten rechts: vergrößerter Ausschnitt aus der SART Rekonstruktion mit a priori Information

Wie sich in der Rekonstruktion in Abb. 6. oben rechts erkennen lässt, führt die Benutzung des strahllängenkorigierten SART Verfahrens zu einer gleichmäßigeren Dichte innerhalb des Objektes. Die normale SART Rekonstruktion in Abb. 6 oben links weist hohe Werte an den Objektkanten auf und gleichzeitig niedrige Werte im Innern des Objektes. Dadurch lassen sich die Poren wie in den vergrößerten Ausschnitten in Abb. 6 unten nur sehr schwer detektieren. Das optimierte Verfahren erreicht hier eine deutlich homogenere Rekonstruktion und dadurch einen besseren Kontrast zwischen Material und Defekt; dies führt zu einer besseren Detektion von Fehlstellen.

4. Zusammenfassung & Ausblick

Das vorgeschlagene a priori Verfahren kann die Rekonstruktion der Objektkonturen signifikant verbessern. Fügt man zusätzlich eine Strahllängenkorrektur hinzu, so lässt sich der Kontrast verglichen mit dem Standard SART Verfahren beträchtlich steigern, da alle Artefakte außerhalb des Objektes in den durch die a priori Information definierten Bereich der Rekonstruktion gezwungen werden, in dem sich Material befindet. Bei computerlaminographischen Geometrien, bei denen nur eine Schrägdurchstrahlung möglich ist und für CT mit eingeschränktem Winkelbereich ist diese Ausnutzung von Vorwissen ein vielversprechender Ansatz, um die Fehlerdetektierbarkeit trotz der Artefakte, welche aus den unvollständigen Daten herrühren, zu erhöhen.

Teile der vorliegenden Arbeit wurden durch das DFG Projekt "Parallel Iterative Methods with A Priori Information for Robust Computed Laminography of Low Contrast, Difficult-To-Measure Objects (www.imcl-sb.de)" finanziert.

Referenzen

- [1] Andersen, A.; Kak, A., Simultaneous algebraic reconstruction technique (SART): a superior implementation of the art algorithm. *Ultrason Imaging*, 6(1):81–94, 1984
- [2] Ewert, U.; Redmer, B.; Thiessenhusen, K.-U., Reduktion von Kreuzartefakten in der Laminographie, DGZfP Jahrestagung 2013
- [3] Gondrom, S., Rekonstruktion von Objektebenen aus Röntgendurchstrahlungsaufnahmen bei unvollständigen Daten unter Verwendung von a priori Information., Universität des Saarlandes, Dissertation 2001
- [4] Gondrom, S.; Zhou J.; Maisl, M.;Reiter, H.; Kröning, M.; Arnold, W., X-ray computed laminography: an approach of computed tomography for applications with limited access. *Nuclear Engineering and Design*. 190, pages 141–147, 1999
- [5] Maisl, M.; Porsch, F.; Schorr, C., Computed Laminography for X-ray Inspection of Lightweight Constructions, International Symposium on NDT in Aerospace. Berlin : Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2010 (DGZfP-Berichtsbände 124)
- [6] Schorr, C.; Maisl, M., Exploitation of geometric a priori knowledge for limited data reconstruction in non-destructive testing, *Proceedings of the Fully3D Conference 2013*, pp 114--117, 2013.
- [7] Schorr, C., Optimierung iterativer Rekonstruktionsverfahren bei unvollständigen Daten zur Anwendung in der Computerlaminographie, Universität des Saarlandes, Dissertation, 2013.