

Semi-automatische Registrierung von a priori Modellen und Messdaten für die Computertomographie und -laminographie

Christian SCHORR¹, Laura DÖRR¹, Michael MAISL¹

¹ Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

Kurzfassung. A priori Information über den Prüfkörper kann zu einer drastischen Qualitätssteigerung von computerlaminographischen Rekonstruktionen führen. Um dieses Vorwissen, das meist in Form von STL oder CAD Daten vorliegt, einfach integrieren zu können, ist eine automatische Registrierung zwischen Modell und Messdaten erforderlich. Die 2D - 3D Registrierung wird durch das Lösen eines mathematischen Optimierungsproblems vollzogen, das speziell auf die Geometrie der benutzten CT / CL Anlage zugeschnitten wird.

Im Beitrag wird das Verfahren anhand von simulierten Messungen der Computerlaminographieanlage CLARA diskutiert und erste Ergebnisse der Registrierung mit Hilfe von STL Daten des Prüfobjektes vorgestellt.

1. Einleitung

1.1. Computerlaminographie

Die Computertomographie (CT) ist eine weit verbreitete und etablierte zerstörungsfreie Prüfmethode, um den inneren Aufbau von Objekten zu untersuchen. Wendet man herkömmliche Rekonstruktionsverfahren für Kreis- oder Helixabtastung auf die computertomographische Untersuchung planarer Objekte an, so stellen sich einem zwei Probleme: Undurchstrahlbarkeit in Längsrichtung und Kollisionsgefahr zwischen Prüfobjekt und CT-Anlage. Eine CT erfordert eine Rotation des Objektes um 360°, während der 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 unverwertbaren 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 benötigen, dass der Abstand zwischen Quelle und Objekt so gering wird, dass keine 360° Rotation mehr möglich ist, ohne mit der Quelle zusammenzustoßen. Die Computerlaminographie (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) oder gekippte Rotationsgeometrien (CLARA) [1] nutzen (Abb. 1). 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.

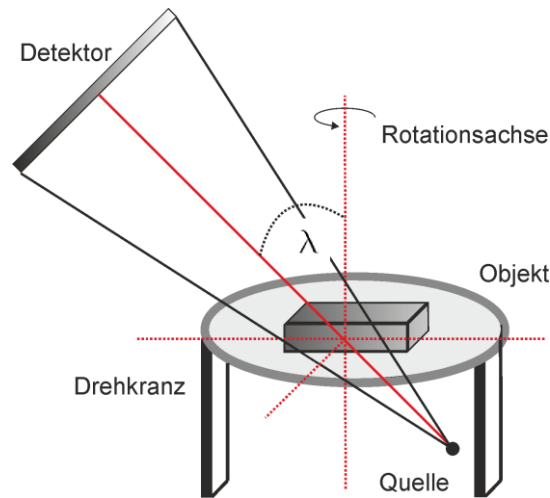


Abb. 1: Prinzip der CLARA Geometrie

1.2. Integration von A priori Information

Zur Rekonstruktion des Prüfkörpers benötigt die Computerlaminographie andere Algorithmen als die Computertomographie, da aufgrund der schrägen Durchstrahlung die mathematischen Voraussetzungen für die üblichen Rekonstruktionsverfahren wie den Feldkampalgorismus nicht erfüllt sind und diese daher nicht anwendbar sind. Statt Verfahren vom Typ der gefilterten Rückprojektion kommen iterative Methoden wie SART (Simultaneous algebraic reconstruction technique) [2] zum Einsatz. Ein Vorteil dieser Algorithmen liegt in der Möglichkeit, Vorwissen über die Objektform in die Rekonstruktion zu integrieren und daher die Qualität des Ergebnisses zu steigern. Die typischen laminographischen Verwischungsartefakte lassen sich dadurch reduzieren und gleichzeitig der Kontrast erhöhen, so dass Fehler besser detektierbar werden [3,4]. Liegen beispielweise CAD Daten des zu untersuchenden Objektes oder geometrische Daten über die Objektform aus anderen zFP Untersuchungen vor, so können diese als Vorwissen oder a priori Information genutzt werden. In der Praxis tritt dabei die Schwierigkeit auf, dass Orientierung und Skalierung des Objektes in a priori Information und Laminographieprojektionen nicht übereinstimmt und das Vorwissen daher nicht direkt nutzbar ist. Vor der Rekonstruktion muß also eine Registrierung erfolgen, welche die a priori Information so transformiert, daß sie der Orientierung des Prüfobjektes während der Messung entspricht. Der direkte Weg, zunächst eine herkömmliche Computerlaminographierekonstruktion zu berechnen und dieses 3D Volumen mit dem a priori Volumen zu registrieren scheitert an den laminographietypischen Verwischungsartefakten, welche eine 3D-3D Registrierung sehr schwierig machen. Ein erfolgversprechenderer Ansatz ist die direkte Registrierung der gemessenen Projektionen mit dem a priori Volumen ohne den Zwischenschritt der Rekonstruktion (Abb. 2). Dies führt zu einem 2D-3D Registrierungsproblem, für dessen Lösung ein neuer 2D-3D Registrierungsalgorithmus entwickelt wurde [5].

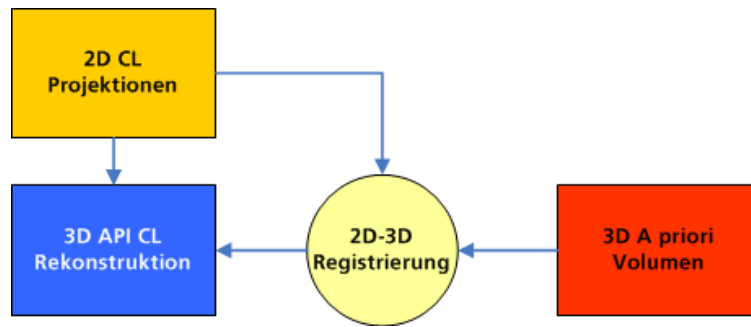


Abb. 2: Prinzip der registrierungsgestützten a priori Rekonstruktion

2. Algorithmus

Die Transformation, welche die Orientierung der a priori Information in die der CL Projektionen überführt setzt sich aus den drei Komponenten Rotation, Translation und Skalierung zusammen. Die Betrachtung der jeweiligen Komponenten erfolgt aus Übersichtlichkeitsgründen getrennt voneinander, die einzelnen Berechnungen sind jedoch voneinander abhängig. Auf die Beschreibung der Berechnung der Skalierung wird an dieser Stelle verzichtet, da sich dieses Problem durch geeignete Vorverarbeitung bei der Erstellung des a priori Volumens lösen lässt.

2.1 Rotationsberechnung

Die Berechnung der Rotation erfolgt durch eine heuristische Strategie, ähnlich der von Franz [6] gewählten Vorgehensweise. Der dreidimensionale Parameterraum der Rotationen im euklidischen Raum

$$D_R = \{ (\theta, \varphi, \alpha) \mid \theta \in [0, \pi), \varphi \in [0, \pi), \alpha \in [0, 2\pi) \}$$

wird dazu zunächst äquidistant abgetastet und evaluiert. Dabei entsprechen θ und φ den Kugelkoordinaten der Rotationsachse, α gibt den Rotationswinkel an. Die Erstellung eines äquidistanten Abtastgitters auf diesem Parameterraum ist dabei nicht trivial, da die äquidistante Wahl von θ und φ zu unterschiedlichen Abständen der abgetasteten Rotationsachsen führt.

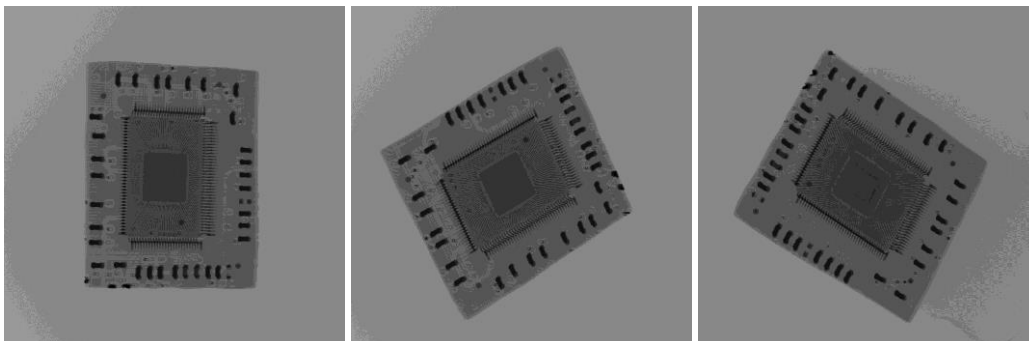


Abb. 3: Referenzprojektionen bei 0°, 120° und 240° Rotationswinkel

Ist ein äquidistantes Gitter festgelegt, so werden die abzutastenden Rotationen auf die vorliegenden Geometriedaten von drei gemessenen Referenzprojektionen angewendet und die so modifizierte Geometrie wird zur Simulation von Projektionen aus dem a priori Volumen herangezogen. Diese drei Projektionen werden nun mit den gemessenen CL-

Projektionen verglichen und so wird der entsprechenden Rotation ein Evaluationswert zugeordnet. Sind die Objekte in allen drei Projektionspaaren dabei identisch orientiert, so entspricht die Rotation der gesuchten Rotation, die bei Anwendung auf die CL-Daten die Orientierung der Objekte zur Übereinstimmung bringt.

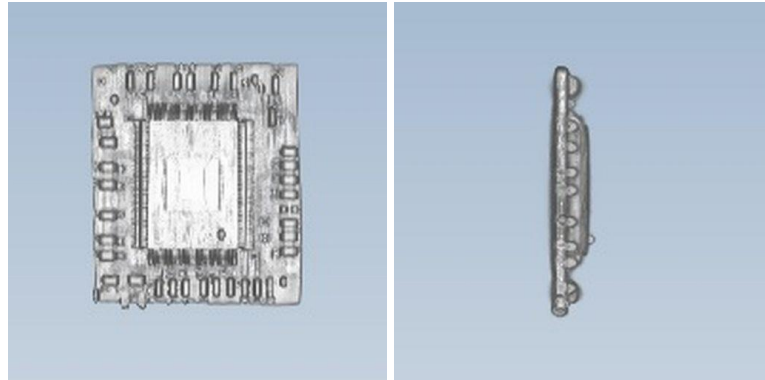


Abb. 4: A priori Volumen aus zwei Ansichten

Da ein direkter Grauwertvergleich der Projektionenpaare jedoch aufgrund der unterschiedlichen bildgebenden Verfahren nicht möglich ist, wird zur Evaluation zunächst eine Bi- bzw. Trinarisierung (Segmentierung der Projektionen in 2 bzw. 3 Bereiche) der Projektionen durchgeführt.

Ein Schwellwert zur Unterteilung der Projektionen in 'Luft'- und 'Material'-Bereiche erfolgt dabei durch eine leicht angepasste Variante des Verfahrens von Otsu [7]. Um eine Trinarisierung der Projektionen zu erreichen, wird der Materialbereich wiederum binarisiert, sodass nun mehr auch Bereiche sehr großer Abschwächung unterschieden werden.

Nach erfolgter Segmentierung der Projektionen muss die bis dahin unbekannte Translation ausgeglichen werden, indem ein Bildschwerpunkt (als Mittelpunkt aller Randpixel der Materialklasse) berechnet und ins Projektionszentrum verschoben wird. Anschließend kann dann die Evaluation der Rotation erfolgen. Dazu wird ein Abweichungswert wie folgt berechnet:

$$\Delta(d) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{1000}{n^2} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n ((p_i^R)_{(j,k)} - (p_i^E(d))_{(j,k)})^2$$

Dabei bezeichnen p^R die zentrierten CL-Projektionen und $p^E(d)$ die zentrierten, zur Rotation $d \in D_R$ erstellten Projektionen des a priori Volumens.

Bei der Rotationsbestimmung wird iterativ vorgegangen: Nachdem alle Elemente des ersten äquidistanten Abtastgitters evaluiert sind, werden die am besten evaluierten Rotationen ausgewählt und in deren Umgebungen jeweils ein neues, feineres Gitter bestimmt, das anschließend ebenso evaluiert werden soll. Dabei werden nur solche Rotationen als Kandidaten ausgewählt, die ein lokales Minimum des Evaluationswertes auf dem Abtastgitter darstellen. Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis der Gitterabstand einen gewissen Schwellwert unterschreitet und die lokalen Minima somit bis auf diese vorgegebene Genauigkeit bestimmt sind. Da die Evaluationsfunktion eine Vielzahl lokaler Minima besitzen kann, lässt sich das globale Minimum durch diese Vorgehensweise nur dann finden, wenn das initiale Abtastgitter hinreichen fein gewählt wurde. Im Falle extrem vieler lokaler Minima oder binärer a priori Daten ist eine Konvergenz gegen das globale Minimum mit Hilfe des Algorithmus' nur möglich, wenn ein geeigneter Startwert $d_0 \in D_R$ vorgegeben wird.

2.2 Translationsberechnung

Die Berechnung der Translation erfolgt erst, nachdem Rotation und Skalierung bestimmt worden sind. Es wird nun also davon ausgegangen, dass drei Projektionen aus dem a priori Volumen vorhanden sind, deren Größe und Orientierung mit den Referenzprojektionen übereinstimmen.

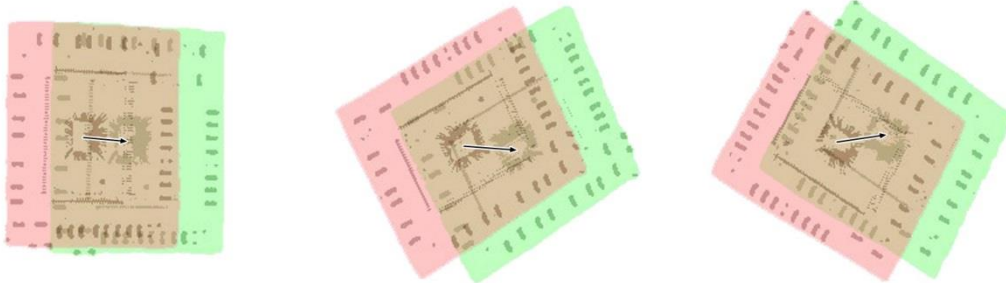


Abb. 5: Projektionenpaare, rot gemessene Daten, grün simulierte Daten

Für jede dieser Projektionen wird zunächst, ebenso wie bei der Rotationsberechnung, ein Bildschwerpunkt bestimmt. Mit Hilfe der vorhandenen Geometriedaten kann aus jeweils zwei Schwerpunkten zusammengehöriger Projektionen eine zweidimensionale Translation auf dem Detektor und daraus jeweils eine dreidimensionale Translation t_i , $i=1,2,3$, im Raum bestimmt werden. Diese 3-D Vektoren entsprechen jeweils der Projektion des tatsächlichen, unbekanntes Translationsvektors auf den Detektor. Bezeichnet man diesen unbekanntes Vektor mit x , die Positionen von Quelle und Detektor zu den drei Projektionenpaaren mit q_i , d_i , $i=1,2,3$, und die Bildschwerpunkte der Projektionen im Raum mit $s_i^{(j)}$, $i=1,2,3$, $j = 1,2$ so gilt also

$$x = \left(\frac{1}{f} \cdot t_i + \lambda_i \cdot \left(s_i^{(2)} - q_i \right) \right), \quad \lambda_i \in \mathbb{R}, i = 1,2,3$$

Dabei bezeichnet $f \in \mathbb{R}$ den für die vorliegende Messung charakteristischen Vergrößerungsfaktor. Die angegebene Formel ist hierbei, durch leichte Schwankungen dieses Vergrößerungsfaktors je nach genauer Objektposition im Raum, nicht exakt. Um die Translation x zu bestimmen muss also das folgende Optimierungsproblem gelöst werden:

$$x = \underset{x}{\operatorname{argmin}} \min_{\lambda \in \mathbb{R}^3} \left(\sum_{i=1}^3 \left\| \left(\frac{1}{f} t_i + \lambda_i \left(s_i^{(2)} - q_i \right) \right) - x \right\|^2 \right) =: \nabla \Phi(x, \lambda)$$

Dieses konvexe Problem läßt sich mit Hilfe der Optimalitätsbedingung lösen:

$$\nabla \Phi(x, \lambda) = 0$$

3. Experimentelle Überprüfung

Zur Überprüfung des Algorithmus wurden zunächst simulierte Daten eines Platinephantoms mit Riss benutzt. Die Projektionen wurden in CLARA Geometrie berechnet, das zugrunde liegende Phantom ohne den Defekt direkt von der Simulationssoftware als Voxelvolumen ausgegeben und in ein STL Volumen konvertiert.

Anschließend wurde das so erhaltene a priori Volumen um 36° um die x-Achse, 70° um die y-Achse und -20° um die z-Achse rotiert. Zusätzlich erfolgte eine Translation um den Vektor $[1.5, 0.5, -1.0]$. Damit läßt sich die Genauigkeit des Algorithmus einfach kontrollieren.

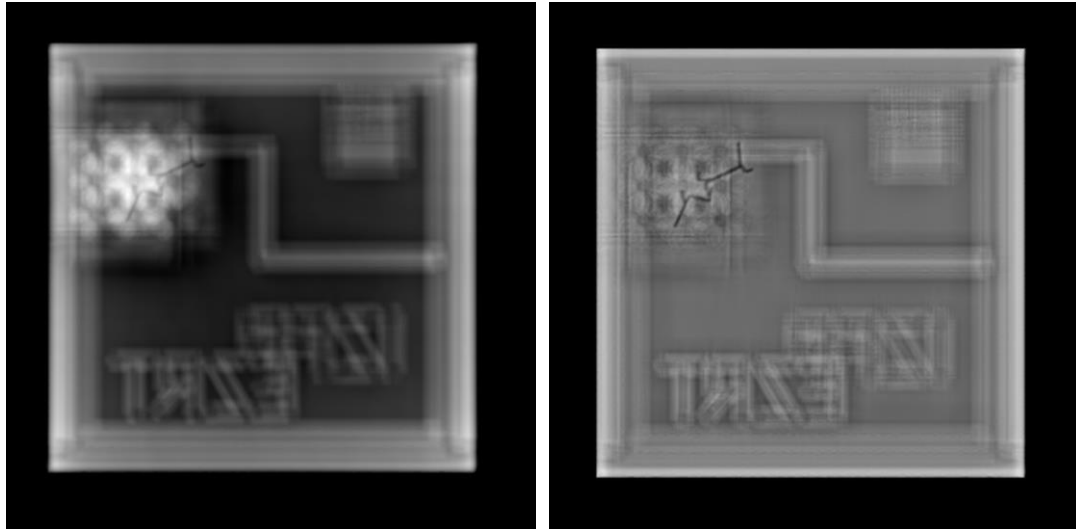


Abb. 6: Platinephantom, frontale Ansicht, links SART, rechts AP-SART mit registriertem a priori Volumen

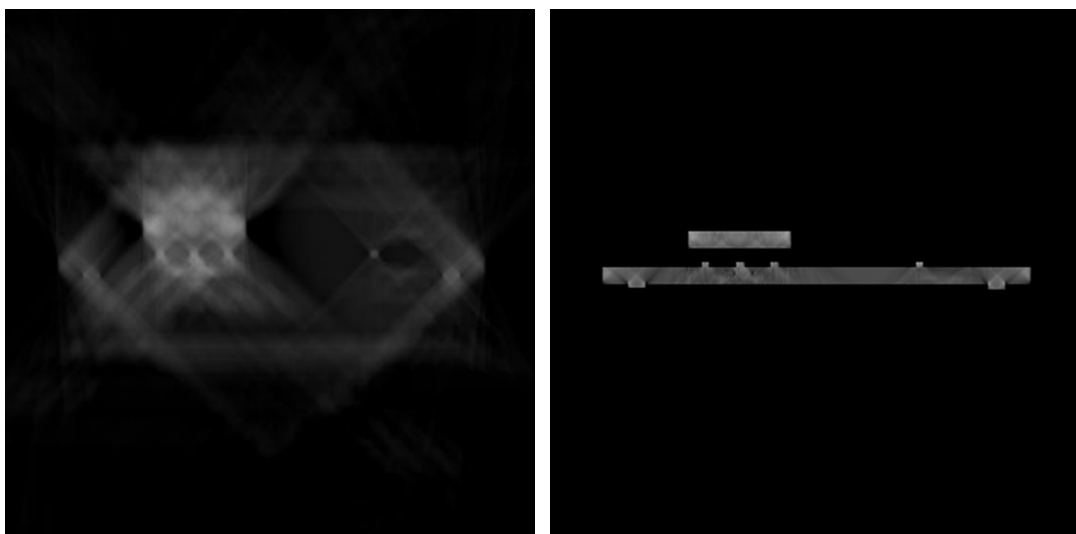


Abb. 7: Platinephantom, seitliche Ansicht, links SART, rechts AP-SART mit registriertem a priori Volumen

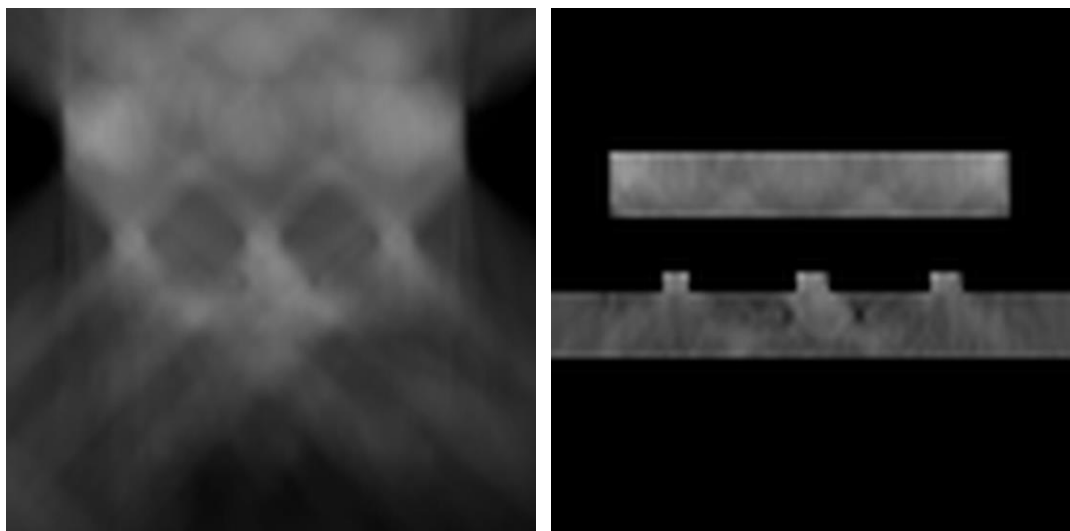


Abb. 8: Platinephantom, seitliche Ansicht, vergrößerter Defektbereich, links SART, rechts AP-SART mit registriertem a priori Volumen

Die resultierende Rekonstruktionen zeigen deutlich den Qualitätsgewinn: in Abb. 6 läßt sich der Riß durch die Kontraststeigerung bei der Verwendung von a priori Information gut erkennen. In der Seitenansicht in Abb. 8 wird dies noch deutlicher. Hier ist der Defekt in der normalen SART Rekonstruktion nicht zu sehen, während die optimierte Rekonstruktion die beiden Rißäste unter den BGAs klar wiedergibt.

Tab. A: Abweichung zwischen berechneten und tatsächlichen Parametern

Achse	Translation berechnet [cm]	Translation [cm]	Rotation berechnet [°]	Rotation [°]
x	1.4697	1.5	36.09	36.0
y	0.5337	0.5	70.38	70.0
z	-1.003	-1.0	-20.34	-20.0

Tab. A gibt die berechneten Rotationswinkel und den Translationvektor wieder. Die Abweichungen bei der Rotation liegt im Schnitt bei circa einem Prozent. Die Berechnung des Translationvektors führt zu einer maximalen Abweichung von 6.7 % für die y-Achse, 2 % für die x-Achse und 0.3 % für die z-Achse. Die Genauigkeit ist abhängig von der Wahl des Schwellwertes, der zur Binarisierung der Projektionen benutzt wird. Gleichzeitig führen höher aufgelöste Projektionen durch die größere Pixelzahl zu präziseren Ergebnissen.

4. Zusammenfassung

Die Verwendung von Vorwissen über das zu untersuchende Objekt erlaubt die Detektion von Fehlern, welche in einer herkömmlichen Rekonstruktion nicht zu erkennen sind. Mit Hilfe des neu entwickelten Algorithmus, der 2D Projektionen mit 3D Volumina registriert, wird die praktische Anwendung des a priori optimierten SART Verfahrens ermöglicht. Das Registrierungsverfahren lässt sich unverändert auch für computertomographische Messungen einsetzen um durch die nun möglich gemachte Verwendung von Vorwissen beispielsweise die Reduzierung der Projektionszahl und damit der Messzeit zu erlauben.

Referenzen

- [1] 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)
- [2] Andersen, A.; Kak, A., Simultaneous algebraic reconstruction technique (SART): a superior implementation of the art algorithm. *Ultrason Imaging*, 6(1):81–94, 1984
- [3] 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.
- [4] Schorr, C., Maisl, M., A ray-length-based ROI-correction for computed laminography, *Proceedings of 5th Conference on Industrial Computed Tomography 2014*, pp. 253 - 258, 2014, ISBN: 978-3-8440-2557-6.
- [5] Dörr, L. Registrierung von a priori Volumina in der Computerlaminographie, Masterthesis, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2015.
- [6] M. Franz. EAR - Einsatzsynchrone Artefakt Reduktion, PhD thesis, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2009.
- [7] Nobuyuki Otsu. A threshold selection method from gray-level histograms. *Automatica*, 11(285-296):23-27, 1975.