

Artefaktreduktion mittels Dual Viewing für Röntgencomputertomographie von Multimaterialbauteilen

C. HEINZL*, M. REITER*, M. ALLERSTORFER*, J. KASTNER*, E. GRÖLLER**

* Upper Austrian University of Applied Sciences, Wels Campus
(Stelzhamerstrasse 23, A-4600 Wels)

** Vienna University of Technology, Institute of Computer Graphics and Algorithms
(Favoritenstrasse 9-11 / E186, A-1040 Wien, Austria)

Kurzfassung. In der präsentierten Arbeit wird das Ziel verfolgt, mittels Dual Viewing optimale Röntgencomputertomographiedaten für die weitere Verarbeitung zu erzeugen. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Reduktion von durchstrahlungsrichtungsabhängigen Artefakten im resultierenden Datensatz.

Das vorgestellte Verfahren wird in drei Schritte unterteilt: Der erste Schritt besteht darin, das Messobjekt zweimal mit unterschiedlicher Orientierung im Röntgenstrahl zu tomographieren. Die unterschiedliche Ausrichtung bewirkt eine unterschiedliche Ausprägung der direktionalen Artefakte im Datensatz. Im zweiten Schritt werden die Datensätze mittels einer schnellen Grobregistrierung und einer präzisen Feinregistrierung aufeinander ausgerichtet. Nach der Registrierung werden die beiden Datensätze fusioniert. Dabei werden unter Annahme normalverteilter Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der einzelnen Materialien die Posteriorwahrscheinlichkeiten für jedes Voxel der beiden Datensätze mittels des Bayes Theorems berechnet. Mit Hilfe der Posteriorwahrscheinlichkeiten kann im Schritt der Datenfusion auf das wahrscheinlichste Material in jedem Voxel geschlossen werden. Somit wird ein Großteil der Artefakte entfernt und die Stärken jedes Datensatzes berücksichtigt.

Die Evaluierung der präsentierten Methode wird an ausgewählten Objekten mittels verschiedener Visualisierungsmethoden demonstriert.

1. Einleitung und Motivation

Die industrielle 3D Computertomographie (3DCT) stellt eine neue Methode der Qualitätskontrolle dar, die erfolgreich in den Bereich der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung und der dimensional Messtechnik eingeführt wurde. Das Prinzip der 3DCT beruht auf der Durchstrahlung eines Messobjekts mittels Röntgenstrahlung und kann wie folgt erklärt werden [4]: Röntgencomputertomographie generiert eine Bildserie von Durchstrahlungsbildern. Hierbei wird von jeder Winkelposition eines Messobjekts auf dem Drehtisch ein Durchstrahlungsbild aufgenommen, das die Röntgenabschwächung durch das Objekt darstellt. Die gesamte Bildserie an Durchstrahlungsbildern erlaubt eine vollständige, dreidimensionale Rekonstruktion des Messvolumens.

Bei spezifischen Messaufgaben zeigen sich in der 3DCT Probleme, die die Qualität von 3DCT Messungen verringern bzw. die Auswertung der CT Messungen unmöglich machen. Multimaterial-Bauteile mit großen Unterschieden in Materialdichte bzw. Ordnungszahl und somit der Röntgenabsorption sind aufgrund verschiedener physikalischer Effekte für 3D-CT nur bedingt geeignet. Speziell in den Bereichen, wo Materialien mit hoher Röntgenab-

sorption (z.B. Stahl oder Kupfer) auf Materialien mit geringer Röntgenabsorption (z.B. Kunststoff) treffen, werden im rekonstruierten Datensatz verstärkt künstliche Strukturen in Form von Artefakten [3] integriert, die im realen Bauteil nicht vorhanden sind. Die Charakteristik der Artefakte ist unter anderem durch folgende Faktoren bestimmt: Durchstrahlungslängen, Geometrie des Bauteils, Position und Orientierung im Kegelstrahl, Materialkombination. Artefakte verhindern in vielen Fällen eine robuste Auswertung von CT Messdaten (siehe Abbildung 1).

Die vorliegende Arbeit verfolgt primär das Ziel, mittels Dual Viewing durchstrahlungsrichtungsabhängige, sogenannte *direktionale Artefakte* zu reduzieren, indem CT Scans mit unterschiedlicher Orientierung im Röntgenstrahl fusioniert werden.

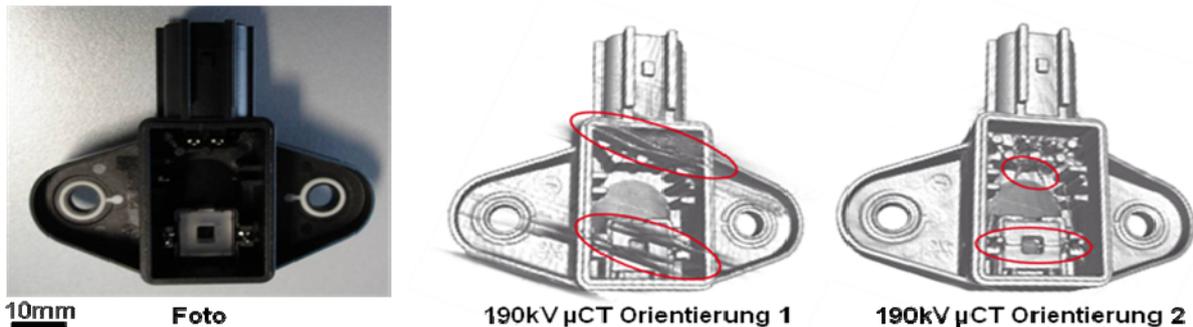


Abbildung 1. Multimaterial-Komponente. Foto sowie 3D Renderings von CT Scans mit unterschiedlichen Orientierungen. Aus den 3D Renderings ist klar eine unterschiedliche Ausprägung der durchstrahlungsrichtungsabhängigen Artefakte im Datensatz ersichtlich.

2. Pipeline zur Artefaktreduktion in der Röntgencomputertomographie mittels Dual Viewing und statistischer Analyse

Die Basis der vorliegenden Arbeit bildet der Dual Viewing Ansatz kombiniert mit einer statistischen Analyse beider Einzelmessungen. Im Folgenden sind die einzelnen Schritte der Pipeline dargestellt (Abbildung 2).

2.1. Dual Viewing

Bei der Dual Viewing Technik wird das Messobjekt zweimal tomographiert, wobei die Orientierung des Messobjekts im Kegelstrahl zwischen den beiden Messungen verändert wird. Dadurch werden bei dieser Methode zwei Datensätze mit unterschiedlicher Ausprägung der *direktionalen Artefakte* generiert. Bei der Auswahl der Orientierungen im Kegelstrahl wurde vornehmlich darauf geachtet, eine möglichst unterschiedliche Artefaktausprägung zu erzielen.

2.2. Registrierung

Die Registrierungskomponente der präsentierten Pipeline besteht aus zwei Schritten. Im ersten Schritt wird eine manuelle Grobregistrierung durchgeführt. Dieser Schritt dient in erster Linie dazu, die Datensätze grob aufeinander auszurichten, um den Zeitbedarf der Registrierung gering zu halten. Im zweiten Schritt wird die automatische Feinregistrierung durchgeführt. Für die Feinregistrierung wurde eine rigide Registrierungsmethode

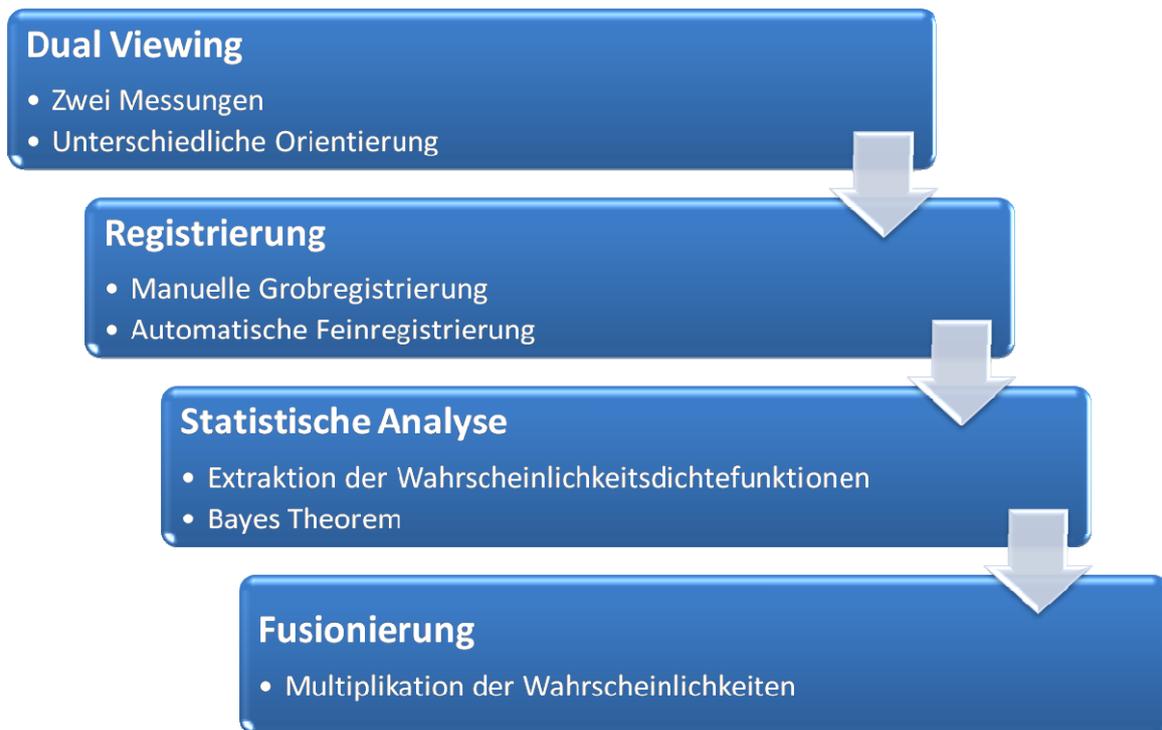


Abbildung 2. Pipeline zur Reduktion von direktionalen Artefakten in der Röntgencomputertomographie mittels Dual Viewing und statistischer Analyse

angewendet, die als Metrik den mittleren quadratischen Fehler zwischen den Grauwerten in den Einzelmessungen minimiert. Um die Performance der Registrierung weiter zu verbessern, kann die Feinregistrierung auf einen speziellen, artefaktfreien Bereich fokussiert werden, der vom Benutzer definiert werden kann.

2.3. Wahrscheinlichkeitsberechnung

Nachdem die Datensätze aufeinander registriert sind, wird in der statistischen Analyse für jedes Voxel die Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zu einem betrachteten Material berechnet. Basierend auf dem Bayes Theorem [1] wird hierfür ein mehrdimensionales Wahrscheinlichkeitsvolumen errechnet, das an jeder räumlichen Position einen Wahrscheinlichkeitsvektor enthält [2]. Jedes Element des Wahrscheinlichkeitsvektors beschreibt die Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit eines betrachteten Voxels zu einem im Datensatz vorhandenen Material (z.B. Luft, Kunststoff, Metall). Das Bayes Theorem ermöglicht somit eine Klassifikation der CT Daten bezüglich aller im Messobjekt vorkommenden Materialien (Formel 1).

Formel 1: Bayes Theorem

$$p(\omega_j | \mathbf{x}) = \frac{p(\mathbf{x} | \omega_j) P(\omega_j)}{p(\mathbf{x})}$$

, wobei

$$p(\mathbf{x}) = \sum_{j=0}^{c-1} p(\mathbf{x} | \omega_j) P(\omega_j)$$

j	... Materialindex
c	... Anzahl der Materialien
ω	... Kategorie
\mathbf{x}	... Merkmalsvektor
$p(\mathbf{x} \omega_j)$... Likelihood
$p(\mathbf{x})$... Evidence
$P(\omega_j)$... Prior Wahrscheinlichkeit
$p(\omega_j \mathbf{x})$... Posterior

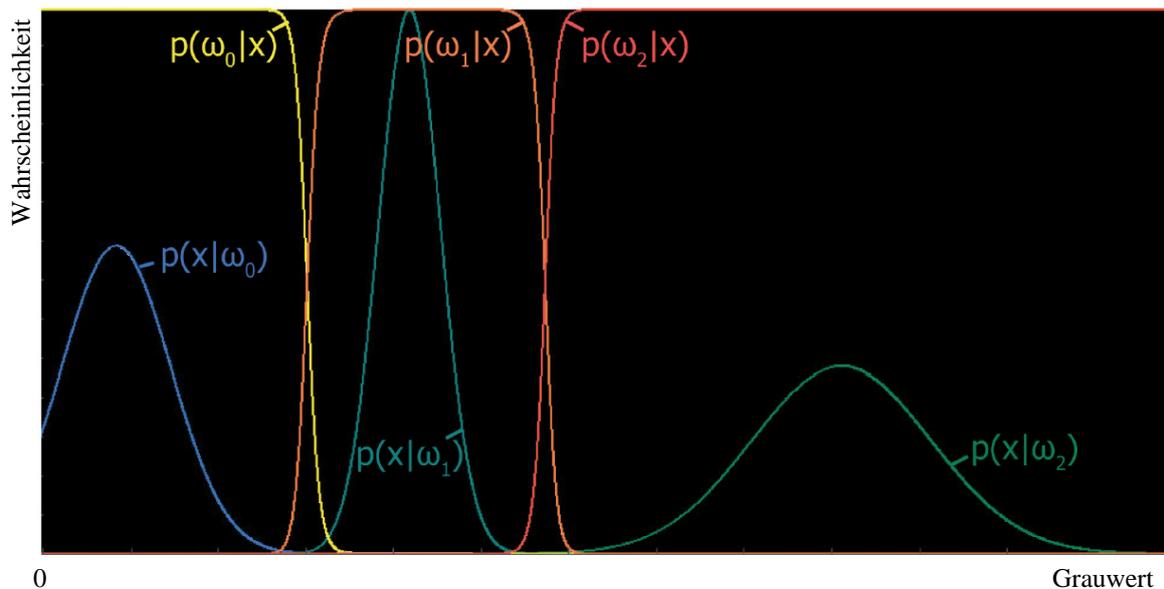


Abbildung 3. Bayes Theorem am Beispiel einer Multimaterialkomponente mit 3 Einzelmaterialien, \mathbf{x} ... Merkmalsvektor; ω ... Kategorie; $p(\mathbf{x}|\omega_j)$... Likelihood; $p(\omega_j|\mathbf{x})$... Posterior

Eine Klassifikation mit Hilfe des Bayes Theorems beruht auf drei Schritten.

- (1) Merkmalsauswahl und Definition der Klassen
- (2) Auswahl und Schätzung des Klassifikators
- (3) Schätzung der Likelihood (konditionale Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion) der einzelnen Klassen sowie die eigentliche Klassifikation

Für den Merkmalsvektor \mathbf{x} wurden die Grauwerte der CT Datensätze herangezogen. Der Merkmalsvektor könnte darüber hinaus noch die Gradientensteigung oder ähnliche Eigenschaften enthalten. Aus Effizienzgründen wurde in der präsentierten Arbeit aber davon abgesehen. Zum Aufsetzen der Likelihood wurde der K-Means Clustering Algorithmus verwendet, der den Mittelwert μ sowie die Standardabweichung σ der einzelnen Klassen bestimmt. Die Likelihood selbst wurde als Gauss Verteilung angenommen und mit den extrahierten μ und σ aufgesetzt. Nachdem die Likelihood Funktionen der einzelnen Klassen extrahiert wurden, kann auch das Posterior Wahrscheinlichkeitsvolumen mit den Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Klassen berechnet werden. Dieses Wahrscheinlichkeitsvolumen wird für alle weiteren Evaluierungen verwendet.

2.4. Datenfusion

Die statistische Analyse generiert Datensätze, die anstelle eines Grauwerts an jeder räumlichen Position einen Wahrscheinlichkeitsvektor enthalten. Dieser Wahrscheinlichkeitsvektor beschreibt die Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zu allen im Datensatz vorhandenen Materialien. Die Komponenten der Wahrscheinlichkeitsvektor sind als Wahrscheinlichkeiten bereits normiert und liegen daher in Werten von 0 – 1 vor. Um nun die Daten unter Berücksichtigung der Charakteristik jedes einzelnen Datensatzes zu fusionieren, werden die entsprechenden Wahrscheinlichkeitsvektoren jeder räumlichen Position im Datensatz multipliziert. Dadurch werden hohe Wahrscheinlichkeiten in beiden Datensätzen nur gering beeinflusst, bei stark unterschiedlichen Werten (z.B. 0,2 und 0,8) hingegen können die resultierenden Wahrscheinlichkeitswerte stark reduziert werden.

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1. Multimaterialkomponente aus der Automobilindustrie

Testteil 1 (Abbildung 1) ist eine Multimaterialkomponente aus der Automobilindustrie. Speziell im Bereich der Metallpins treten verstärkt Artefakte in den Datensätzen auf. Testteil 1 wurde mit den folgenden Parametern tomographiert: Beschleunigungsspannung 190 kV, Strom 350 μ A, Vorfilter 0,5 mm Kupfer, Integrationszeit 1000 ms, 990 Projektionen. Die resultierenden 16 bit Datensätze weisen eine Ausdehnung von $936 \times 936 \times 576$ Voxel auf, bei einer Voxelgröße von 70 μ m.

Anhand des Testteils 1 werden die generierten Wahrscheinlichkeitsvolumina dargestellt. Die Wahrscheinlichkeitsvolumina enthalten an jeder räumlichen Position im Datensatz einen Wahrscheinlichkeitsvektor mit den Einzelmaterialwahrscheinlichkeiten. In Abbildung 4 sind Schnittbilder der Kunststoff Wahrscheinlichkeiten dargestellt, wobei hohe Wahrscheinlichkeiten der Zugehörigkeit zum betrachteten Material hell bis weiß, niedrige Wahrscheinlichkeiten dunkel bis schwarz farbcodiert sind. Analog dazu können die Wahrscheinlichkeiten für Luft bzw. Metall dargestellt werden. Die ursprünglichen Orientierungen des Testteils 1 im Kegelstrahl ist im entsprechenden miniaturisierten Rendering dargestellt. Die Ausprägung der directionalen Artefakte vor der Datenfusion ist klar ersichtlich und entspricht der jeweiligen Orientierung. Direktionale Artefakte in den Einzelmessungen sind in rot markiert. Beim Fusionieren der beiden Datensätze reduzieren sich die Wahrscheinlichkeitswerte in unsicheren Bereichen, d.h. Artefakte werden bei der Fusion in den resultierenden Datensatz unterdrückt. Bereiche mit hohen Wahrscheinlichkeiten in beiden Einzelmessungen werden auch im fusionierten Datensatz beibehalten.

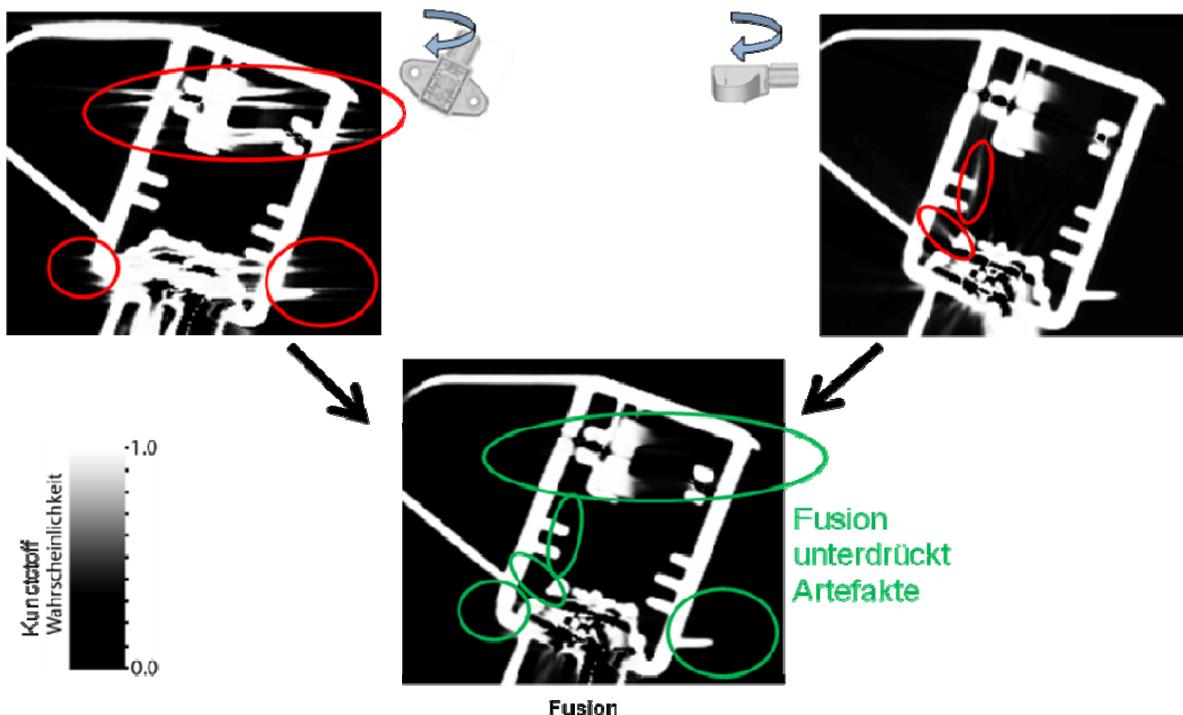


Abbildung 4. Schnittbilder der Wahrscheinlichkeitsvolumina. Betrachtetes Material: Kunststoff. Dargestellt sind sowohl die Einzelmessungen als auch der fusionierte Datensatz. Durch die Datenfusion werden artefaktbehaftete Bereiche unterdrückt und nur Bereiche mit hohen Wahrscheinlichkeiten integriert.

Eine weitere Möglichkeit zur Verifikation der Dual Viewing Methode ist die Visualisierung mittels Isolinien. Eine Isoline wird hierbei entlang konstanter Wahrscheinlichkeitswerte interpoliert. Durch die Interpolation mehrerer Isolinien mit unterschiedlicher Isowahrscheinlichkeit wird deutlich, in welchen Bereichen die Linien stark fluktuieren. Stark fluktuierende Isolinien deuten auf Unregelmäßigkeiten (z.B. Artefakte im Datensatz), überlagerte Isolinien deuten auf starke, artefaktfreie Kanten.

Angewendet auf einen Teilbereich des Testteils 1 ist klar zu erkennen, dass in Orientierung 1 Artefakte im Datensatz vorhanden sind, im Datensatz mit der Orientierung 2 hin gegen nicht. Beim fusionierten Ergebnis wird erfolgreich vermieden, dass Artefakte in den resultierenden Datensatz integriert werden (siehe Abbildung 5).

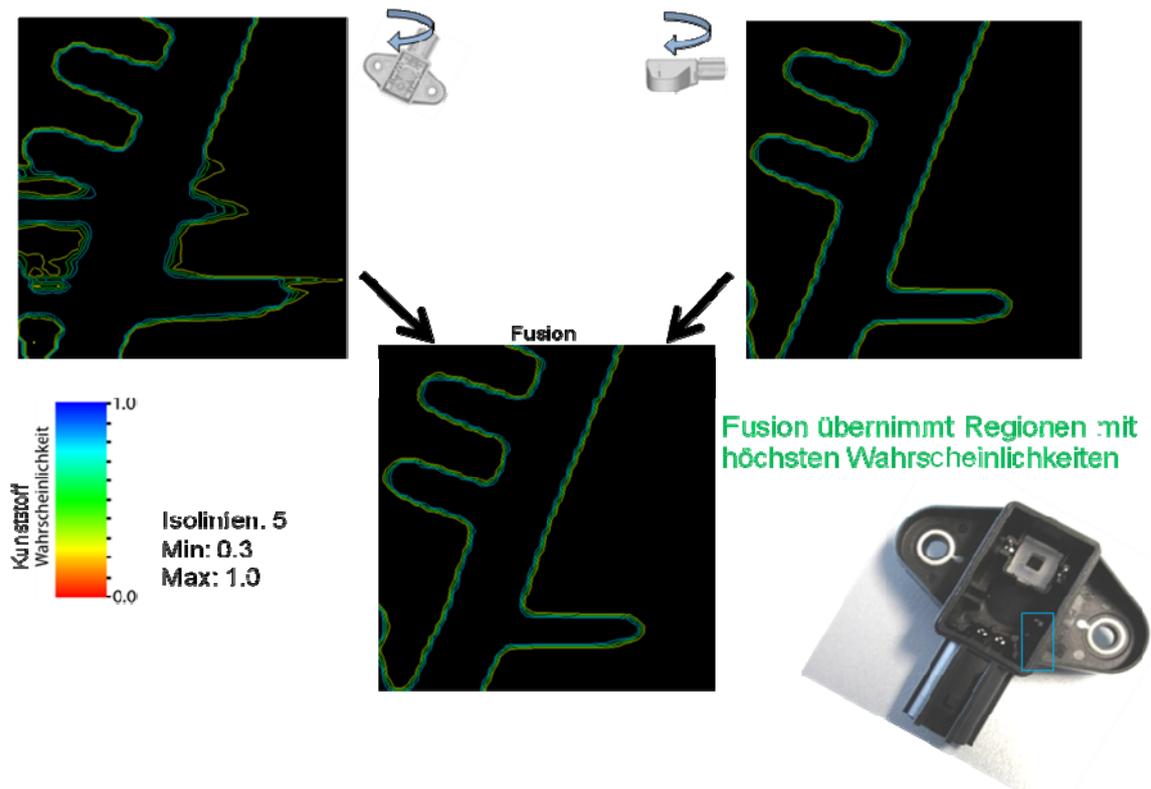


Abbildung 5. Isolinien extrahiert aus den generierten Wahrscheinlichkeitsvolumina. Betrachtetes Material: Kunststoff. Dargestellt: 5 Isolinien zwischen 0,3 und 1,0; jeweils entlang konstanter Wahrscheinlichkeiten interpoliert. Durch die Datenfusion werden nur die Bereiche mit hohen Wahrscheinlichkeiten übernommen.

3.2. Glühlampenfassung

Testteil 2 ist eine Glühlampenfassung, erhältlich in jedem Baumarkt. Testteil 2 wurde mit Beschleunigungsspannung 190 kV Beschleunigungsspannung, Strom 350 μ A, 0,5mm Cu Vorfilter, sowie einer Integrationszeit von 1000ms und 900 Projektionen gescannt. Die resultierenden Datensätze sind 333*333*293 Voxel groß, mit einer Voxelgröße von 82 μ m. Die Grauwerte wurden wiederum in 16 bit repräsentiert.

An Testteil 2 wird eine weitere Technik demonstriert, um die Posterior Wahrscheinlichkeiten sowie das Dual Viewing Ergebnis zu visualisieren: Direct Volume Rendering (DVR siehe Abbildung 6). Mittels DVR werden Renderings generiert, die neben

5. Danksagung

Die präsentierte Arbeit entstand im Rahmen des Bridge-Projekts "SmartCT-Genauere Geometriebestimmung und Interfacecharakterisierung von Multi-Materialbauteilen mittels Kegelstrahl-CT" sowie des K-Projekts für Zerstörungsfreie Prüfung und Tomographie der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft mbH FFG (Projektdetails unter <http://www.3dct.at>). Die Multimaterialkomponente aus der Automobilindustrie wurde von der Firma FCI Austria zur Verfügung gestellt.

Referenzen

- [1] R. O. Duda, P. E. Hart, D. G. Stork. Pattern Classification (2nd Edition). Wiley-Interscience, 2000.
- [2] C. Heinzl, J. Kastner, T. Möller, E. Gröller, Statistical analysis of multi-material components using dual energy CT. In Proceedings of the 13th International Fall Workshop Vision, Modeling, and Visualization 2008 (2008), pp. 179–188.
- [3] J. Hsieh. Computed Tomography: Principles, Design, Artifacts and Recent Advances. SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2003.
- [4] J. Kastner, E. Schlotthauer, P. Burgholzer, D. Stifter. Comparison of x-ray computed tomography and optical coherence tomography for characterisation of glass-fibre polymer matrix composites. In Proceedings of World Conference on Non Destructive Testing 2004, pages 71–79, 2004.