

# Computertomographie an sehr großen Bauteilen aus Luft- und Raumfahrt

Maik LUXA<sup>\*</sup>, Tobias SCHÖN<sup>\*</sup>, Stefan SCHRÖPFER<sup>\*\*</sup>, Steven OECKL<sup>\*</sup>,  
Thomas WENZEL<sup>\*</sup>, Jacques BOUTEYRE<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Fraunhofer IIS, Dr.-Mack-Str. 81, D-90762 Fürth

<sup>\*\*</sup> Fraunhofer EZRT, Dr.-Mack-Str. 81, D-90762 Fürth

<sup>\*\*\*</sup> EADS Astrium Aquitaine, F- 33165 Saint Médard-en-Jalles

**Kurzfassung.** In diesem Beitrag werden zwei unterschiedliche CT-Verfahren für die Untersuchung von sehr großen Bauteilen aus Luft- und Raumfahrt vorgestellt.

## Einführung

Die (Röntgen-)Computertomographie (CT) gewinnt in der zerstörungsfreien Materialprüfung von Objekten aus Luft- und Raumfahrt immer mehr an Bedeutung. Die gewaltigen Ausmaße der zu untersuchenden Bauteile stellen dabei eine besondere Herausforderung für CT-Systeme in diesem Anwendungsfeld dar. Aus den mächtigen Dimensionen der Prüfobjekte resultiert die Notwendigkeit, einen über die lange Messzeit stabilen Akquiseprozess, sowie eine effiziente Verarbeitung der immensen Datenmengen zu realisieren. Des Weiteren sind aufgrund der begrenzten Größe von Röntgendetektoren spezielle Aufnahmegeometrien mit geeigneter Fusionierung der Rohdaten erforderlich, um hinreichend viele Informationen für eine CT-Rekonstruktion bereitstellen zu können.

In diesem Beitrag werden zwei unterschiedliche CT-Verfahren für die Untersuchung von sehr großen Bauteilen aus Luft- und Raumfahrt vorgestellt. Neben den Aufnahmegeometrien werden auch die zugehörigen Algorithmen zur Vorverarbeitung der Rohdaten präsentiert. Die Leistungsfähigkeit der vorgestellten CT-Verfahren wurde zunächst anhand von simulierten Daten geprüft. Die präsentierten Algorithmen wurden in ein CT-System unseres Projektpartners in Bordeaux, Frankreich, integriert, welches speziell für die Untersuchung von Raketenbauteilen (z.B. der Ariane 5) realisiert wurde. Daher stehen auch reale Daten zur Verfügung welche ebenfalls im Rahmen des Beitrags diskutiert werden.

## 1. Grenzen der Computertomographie als Prüfverfahren

Die Computertomographie ist ein seit Jahrzehnten genutztes zerstörungsfreies Prüfverfahren, welches von Beginn an im Fokus von Forschung und Entwicklung stand und dessen Grenzen daher immer wieder neu definiert und ausgedehnt werden. Insbesondere die Weiterentwicklung der zur Erzeugung und Detektion der Röntgenstrahlung genutzten Komponenten hat großen Einfluss auf das derzeit technisch machbare.

Der große Vorteil dieses bildgebenden Verfahrens ist die Möglichkeit, alle inneren Strukturen des Prüfobjekts in einer dreidimensionalen Darstellung abbilden zu können.



Diese Abbildung wird auf vollständig zerstörungsfreie und berührungslose Weise erzeugt und bietet einen immensen Informationsgehalt. Nicht nur Defekte wie Fremdmaterialeinschlüsse oder Gaseinschlüsse können zuverlässig erkannt werden, auch ein präzises berührungsloses Vermessen der inneren Strukturen ist möglich, genauso wie Materialanalysen von Metallen oder Verbundwerkstoffen (Faserausrichtung, -verteilung uvm.). Diese extreme Vielseitigkeit qualifiziert die CT als optimales Prüfverfahren für eine Vielzahl von Einsatzgebieten, insbesondere im Bereich Forschung und Entwicklung von neuen Materialien. Auf diesem Gebiet gehören insbesondere die Unternehmen aus Luft- und Raumfahrten zu den führenden Innovatoren.

Diese investieren eine große Menge von Ressourcen in die Entwicklung von sehr leichten und gleichzeitig extrem widerstandsfähigen Materialien. Dabei entstehen dann häufig in den späteren Entwicklungszyklen sehr große Bauteile, die in der Regel aus Faserverbundwerkstoffen bestehen, nicht selten in Kombination mit Metallkomponenten. Diese Komponenten werden meist in verhältnismäßig kleiner Stückzahl gefertigt und es muss sichergestellt werden, dass diese Bauteile den sehr hohen Anforderungen an ihre Verlässlichkeit gerecht werden.

Die CT kann hier als Prüfwerkzeug sehr gute Dienste leisten, jedoch müssen dabei einige Randbedingung für den Einsatz des Verfahrens beachtet werden. Bauteile die entsprechend große Abmessungen besitzen, können nur dann geprüft werden, wenn ein anspruchsvolles mechanisches System zum Handling des Prüfobjekts oder der Anlagenkomponenten vorhanden ist. Dieses System muss einerseits für große Lasten und lange Wege ausgelegt sein und gleichzeitig eine hohe Präzision (wenige  $\mu\text{m}$  Positioniergenauigkeit) und Geschwindigkeit bieten, um ein praktikables Arbeiten zu ermöglichen. Systeme die alle diese Eigenschaften in sich vereinen sind kostspielig und müssen in der Regel für diesen Einsatzzweck beschafft werden.

Mit den großen Abmessung des Prüfobjekts entsteht ein weiteres Problem: Die Strahlung muss lange Wege durch stark absorbierende Materialien zurücklegen. Dafür sind hochenergetische Strahlenquellen nötig, wie beispielsweise eine konventionelle Röntgenröhre mit sehr hoher Leistung oder alternative Strahlenquellen wie ein Linearbeschleuniger.

Diese Abschwächung der Strahlung muss dabei auch vollständig erfasst werden um eine 3D-Rekonstruktion zu ermöglichen. Dafür sind entweder sehr große Detektoren nötig oder es muss alternativ auf speziell angepasste Aufnahmeverfahren zurückgegriffen werden. Einige dieser speziellen Aufnahmeverfahren werden im nächsten Abschnitt vorgestellt.

Doch nicht nur an die Komponenten des datenerzeugenden Systems werden hohe Anforderungen gestellt, auch für die Verarbeitung dieser Daten wird viel Leistung benötigt. Diese Art von Messungen erzeugt große Datenmengen, welche in annehmbarer Zeit verarbeitet werden müssen. Für die Speicherung, Rekonstruktion und Visualisierung der Daten wird eine zuverlässige und leistungsfähige IT-Infrastruktur benötigt. Die langen Messzeiten, insbesondere bei hochauflösenden Messungen, fordern eine ausreichende Stabilität und Zuverlässigkeit aller im System vorhandenen Komponenten.

## **2. Lösungen für den praktischen Einsatz**

Wie eine Prüfanlage aussehen kann, welche all die zuvor genannten Erfordernisse erfüllt, zeigt das System für CT- Prüfung von sehr großen Bauteilen für die Raumfahrt der Abteilung „Côntrôle non destructif“ von EADS Astrium Aquitaine am Standort Saint-Médard-en-Jalles in Frankreich. Dabei handelt es sich um eine schon einige Jahrzehnte bestehende Großanlage welche im letzten Jahr vom Fraunhofer IIS auf neue Messverfahren umgerüstet wurde (siehe Abbildung 1 & 2).

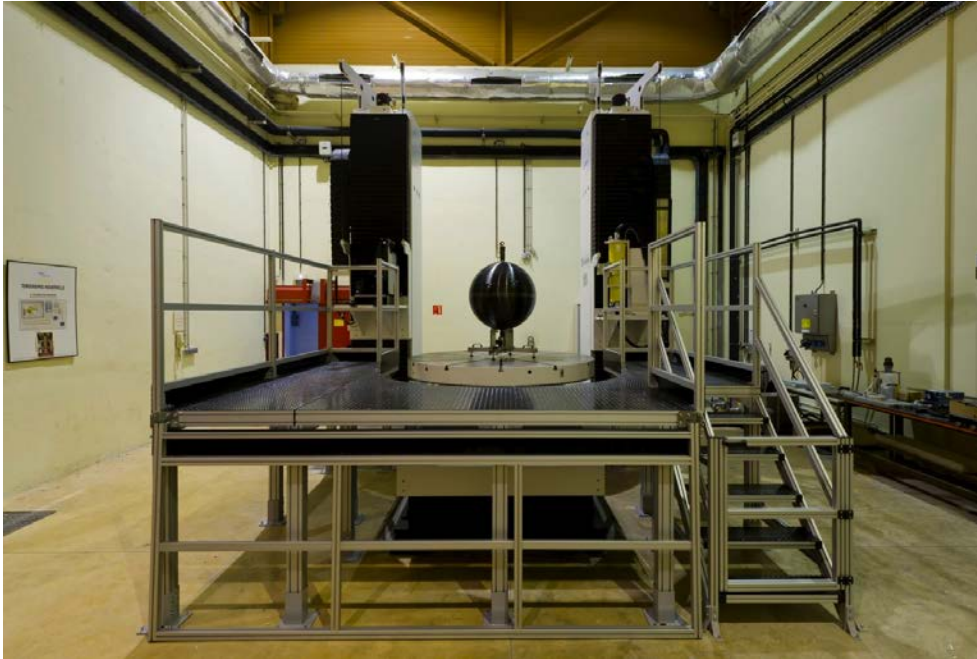
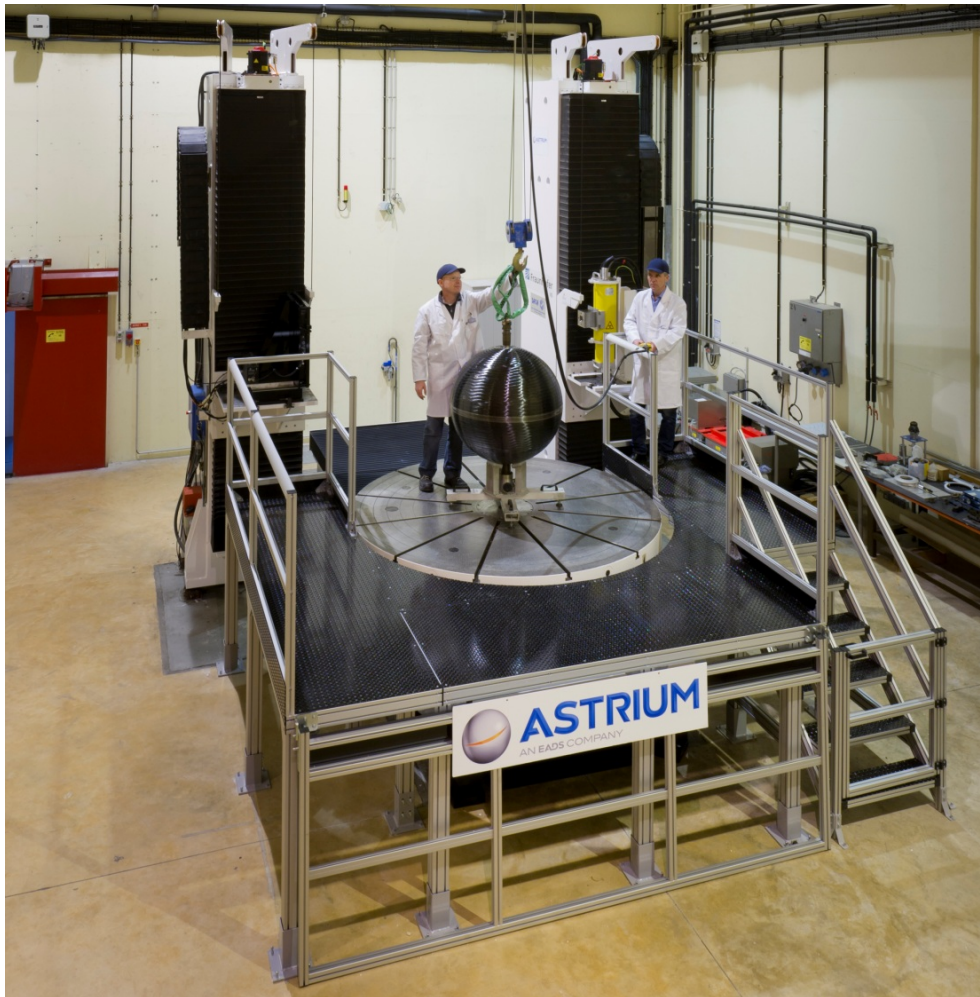


Abbildung 1: CT-System EADS Astrium Aquitaine[1]

Einige Eckdaten des Systems:

- Objekt- Rotationsachse
  - Eigengewicht: 1,5 t
  - Tragkraft: 3 t
  - Durchmesser: 2,6 m
- Linearachsen
  - Positioniergenauigkeit  $< 10 \mu\text{m}$
  - bis zu 100 mm/s Geschwindigkeit
  - Objektachse:
    - orthogonal zur Strahlrichtung
    - Wegstrecke  $> 3 \text{ m}$
  - Hubachsen Röhre und Detektor
    - Wegstrecke 2,5 m
- Komponenten
  - PerkinElmer XRD 1621 Detektor
    - 2048 x 2048 Pixel (200  $\mu\text{m}$  Auflösung)
  - Yxlon Y.TU 450-D09 Röhre
    - bis zu 450 kV / 1500 W
- Systemparameter:
  - Fokus-Detektor-Abstand: 2,85 m
  - Vergrößerungsfaktor große Rotationsachse ist  $\approx 2$



**Abbildung 2:** Beladung des Drehtellers. Im Hintergrund sichtbar: Türme des Manipulationssystems für Detektor (links) und Röhre (rechts) [1]

Die Anlage wurde dabei für ein möglichst hohes Auflösungsvermögen optimiert und gleichzeitig wurde die Flexibilität des Gesamtsystems erhöht. Durch den Einsatz eines Flächendetektors mit  $200\mu\text{m}$  Pixelgröße können beliebige Objekte bis zu 2,6 m Durchmesser bei konstanter Vergrößerung (ca. 2) und bis zu  $100\mu\text{m}$  Voxelgröße gemessen werden. Zusätzlich wurde ein beweglicher zweiter Drehtisch eingeführt, welcher völlig frei auf dem großen Drehteller positioniert werden kann und das System um die Möglichkeit erweitert, Messungen bei beliebig wählbaren Vergrößerungen durchführen zu können.

Bei einer CT-Messung wird eine große Zahl von Durchstrahlungsaufnahmen des gleichmäßig rotierenden Prüfobjektes erzeugt. Um ein Objekt mit guter Qualität, d.h. möglichst ohne Artefakte, rekonstruieren zu können, ist es erforderlich, dass das Objekt auf jeder der zur Rekonstruktion verwendeten Durchstrahlungsaufnahmen vollständig abgebildet ist. Ist es nicht möglich das Objekt vollständig abzubilden oder wandert das Objekt während der Aufnahme über den rechten oder linken Rand des Messfeldes hinaus, kann das Objekt nicht korrekt aus diesen unvollständigen Daten rekonstruiert werden.

Da der Detektor durch seine verhältnismäßig geringe sensitive Fläche ( $40 \times 40\text{ cm}$ ) nur einen sehr begrenzten Teil des für eine artefaktfreie Rekonstruktion größerer Objekte erforderlichen Messfeldes abdecken kann, wurde nach Möglichkeiten gesucht, wie dieser Bereich erweitert werden kann. Artefakte entstehen, wenn das Objekt nicht vollständig horizontal erfasst wird.

Zwei Möglichkeiten werden im folgenden Abschnitt vorgestellt.



### 3. Messverfahren

#### 3.1. Messfelderweiterung durch Objektverschiebung

Das Verfahren welches insbesondere für Messungen von kleineren Objekten und dem kleinen frei beweglichen Drehtisch zur Anwendung kommt ist eine Prozedur welche die Erweiterung des Messfelds durch eine Verschiebung des Objekts erreicht (siehe Abbildung 3). Durch eine geschickte Verschiebung können zusätzliche Durchstrahlungsaufnahmen gemacht werden, die sich außerhalb des zum Messfeld gehörenden Strahlenkegels befinden (siehe Abbildung 3 II & III). Diese zusätzlichen Aufnahmen können dann in einem Nachbearbeitungsschritt transformiert und so an die zentrale Durchstrahlungsaufnahme angefügt werden, dass eine Projektion entsteht, auf welcher das Objekt vollständig abgebildet wird. Dadurch ist eine artefaktfreie Rekonstruktion möglich (siehe Abbildung 3 IV).

In Abbildung 3 ist das Funktionsprinzip dieser Prozedur schematisch für eine 3-fache Vergrößerung des Messfelds dargestellt.

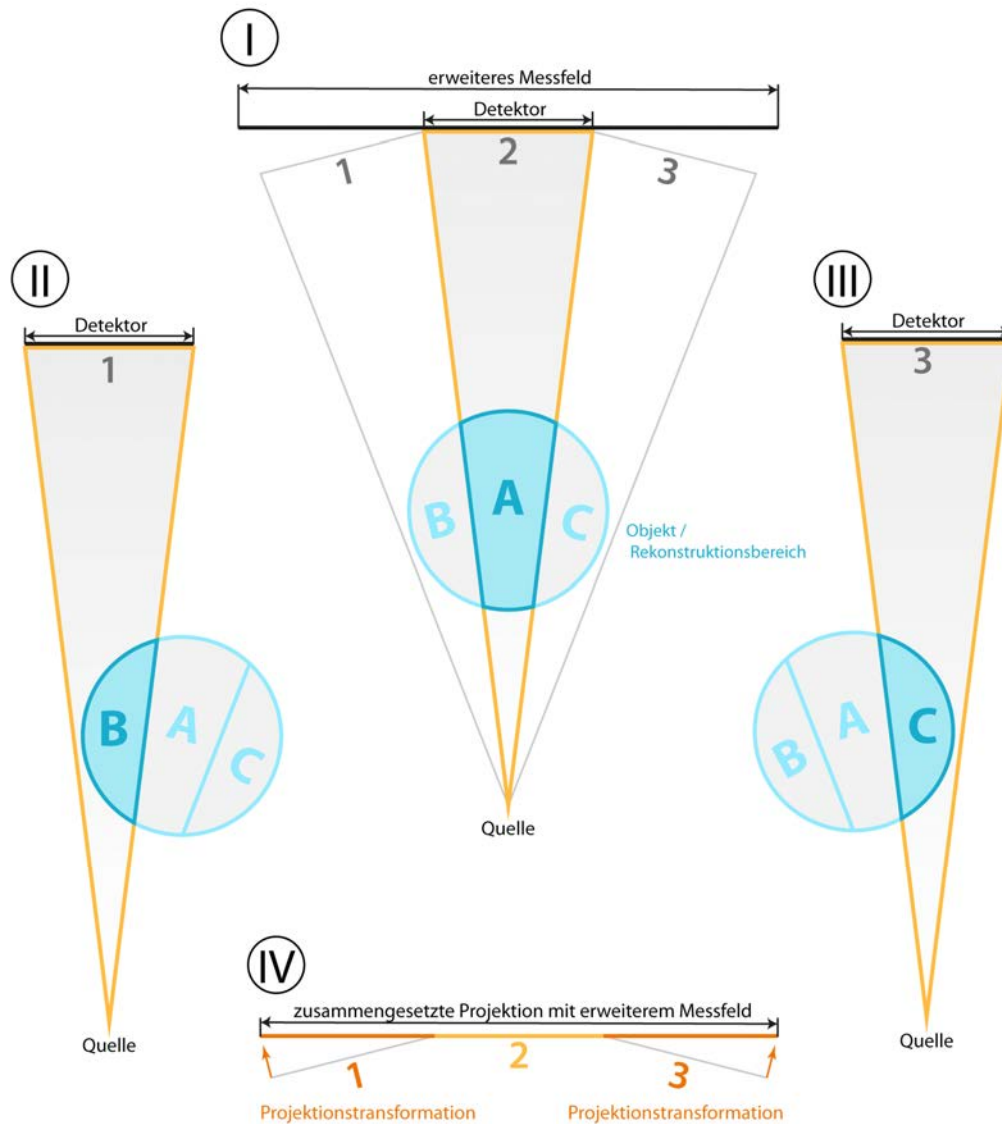


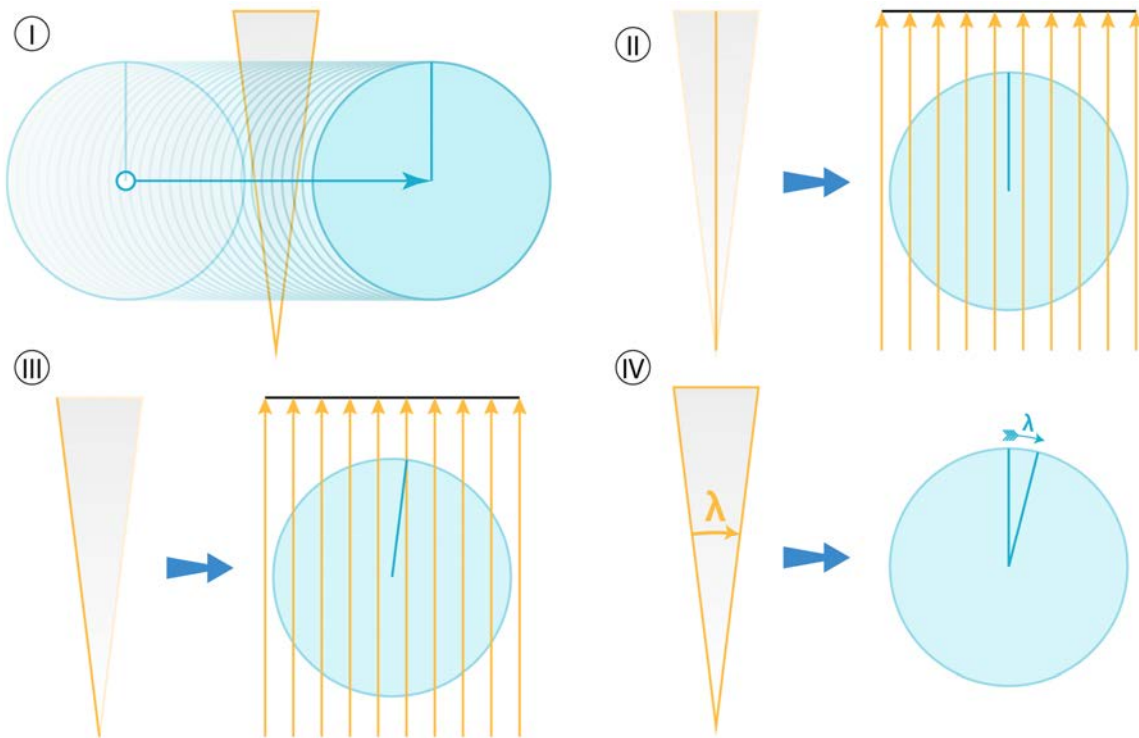
Abbildung 3: Messfelderweiterung durch Objektverschiebung

Eine zusätzliche Herausforderung bei der Anwendbarkeit dieses Verfahrens ist die fehlende Möglichkeit die Achse in Richtung der Röhre verfahren zu können. Um das Objekt korrekt im Strahlengang positionieren zu können ist es erforderlich das Drehzentrum auf einer Kreisbahn zu bewegen. Diese fehlende Bewegung kann durch eine approximative Transformation der Projektion kompensiert werden. Jedoch führt diese Einschränkung dazu, dass dieses Verfahren nur zu einer begrenzten Erweiterung des Messfelds eingesetzt werden kann. Für besonders große Objekte muss daher ein weiteres Verfahren eingesetzt werden.

### 3.2 Translation-Rotation Messverfahren

Dieses Verfahren ermöglicht es dem Anwender nahezu unbegrenzt große Objekt zu tomographieren. Einzig beschränkende Faktoren sind der verfügbare Platz zwischen Röhre und Detektor und der nötige Verfahrensweg der Objektachse welche orthogonal zur Strahlrichtung liegt. Dieser Weg muss größer als die Summe von Objektdurchmesser und Detektorbreite sein.

Für das beschriebene System liegt dieser maximale Objektdurchmesser bei 2,6 m.



**Abbildung 4:** Schematische Darstellung des Messablaufs einer Translation-Rotation Messung

Bei dieser Aufnahme-prozedur wird das Objekt zu Beginn aus dem Messbereich gefahren und dann vollständig durch den Strahlenkegel geschoben und im Abstand der gewünschten Voxelgröße Projektionen aufgenommen (siehe Abbildung 4 I). Dann wird das Objekt um den Öffnungswinkel des Strahlenkegels gedreht und wieder durch den Strahlenkegel geschoben, bis  $180^\circ$  erreicht sind. Auf diese Art und Weise werden Projektionen erzeugt, welche als Ausgangsdaten für einen Nachverarbeitungsschritt dienen, in dessen Folge Projektionen entstehen, welche für eine artefaktfreie Rekonstruktion geeignet sind (siehe Abbildung 4I V).

Dieser Vorgang ist in Abbildung 4 illustriert. Die berechneten Projektionen sind sogenannte „Parallel-Kegelstrahl“-Projektionen, da durch die Nachverarbeitung die Strahlen in der horizontalen Ebene nicht mehr kegelförmig durch das Objekt laufen, sondern parallel. In der vertikalen Ebene ist aber weiterhin eine fächerförmige Ausbreitung der Strahlen gegeben. Dieses Verfahren ist den sogenannten „CT-Scannern der 2. Generation“ aus der Medizin sehr ähnlich [2].

#### **4. Weitere Entwicklungen im Bereich CT an großen Bauteilen**

Das Fraunhofer IIS arbeitet daran, die hier beschriebenen Verfahren weiter zu optimieren und die Messdauer bei gleich bleibender Qualität drastisch zu verkürzen. Insbesondere im Bereich Computertomographie mit hochenergetischen Strahlenquellen ist ein aktiver Forschungsbereich. Am Standort Atzenhof bei Fürth wurde eine Testhalle in Betrieb genommen, in welcher Messungen mit einem Linearbeschleuniger als Strahlenquelle durchgeführt werden können, wobei Energien im Bereich mehrerer MeV erreicht werden. Mithilfe solcher Hochenergiequellen werden längere Durchstrahlungswege möglich, was speziell für große Objekte aus stark absorbierenden Materialien von Wichtigkeit ist.[3]

Insbesondere im Bereich der Luft- und Raumfahrt gibt es häufig Bauteile die nicht transportiert oder bewegt werden können und somit die Messung in einem herkömmlichen CT-System ausgeschlossen ist. Daher erforscht das Fraunhofer IIS auch die Möglichkeiten der Durchführung von Vor-Ort-Messungen. Möglich wird dies durch Systeme wie die „Roboter-CT“. Bei diesem System werden die zur Messung benötigten Komponenten Röntgenquelle und Detektor auf beliebigen Bahnen um das zu messende Objekt bewegt und so können auch feststehende Objekte mithilfe der Computertomographie geprüft werden.[4]

#### **Referenzen**

[1] Quelle: EADS Astrium Aquitaine

[2] Kalender, Willi A. Computertomographie Grundlagen, Gerätetechnologie, Bildqualität, Anwendungen, Publicis Publishing 2006

[3] P.-M. Keßling, T. Fuchs, U. Haßler, F. Sukowski, N. Uhlmann, M. Maisl. Simulationsstudie zur Hochenergie-Röntgen-Laminographie an großen Objekten, DGzFP Jahrestagung 2011

[4] J. Hess, M. Eberhorn, M. Hofmann, M. Luxa, Advanced Reconstruction Techniques Applied to an On-Site CT System, NDT in Aerospace 2010.