

Computertomographie in der Materialprüfung

Stand der Technik und aktuelle Entwicklungen

Randolf HANKE *

* Fraunhofer-Entwicklungszentrum Röntgentechnik EZRT (Dr.-Mack-Str. 81, 90762 Fürth,
Tel.: +49 911 58061-7510, Mail: randolf.hanke@iis.fraunhofer.de)

Kurzfassung. Röntgen-Computertomographie (CT) etabliert sich zunehmend in den verschiedensten Bereichen der industriellen Produktion als volumenbildgebendes Verfahren für unterschiedlichste Mess- und Prüfaufgaben.

Viele neue Methoden und Verfahren wurden entwickelt, um neue und produktspezifische Aufgaben und Anforderungen zu erfüllen. Kenngrößen wie Scan- und Auswertegeschwindigkeit, Mobilität, Prozessintegrationsfähigkeit und Automatisierung wurden von verschiedenen Entwicklungslabors weiterentwickelt und verbessert.

Dieser Beitrag behandelt Anwendungen der CT für verschiedene zerstörungsfreie Prüfzenarien, sowie die Herausforderungen, die bei weiteren Verbesserungen zu erwarten sind. Auch die möglichen Trends in der Weiterentwicklung werden angesprochen.

Einführung

Die Röntgen-Computertomographie (X-CT) ist in der Industrie, ebenso wie im Medizinsektor, mittlerweile zu einem Standardverfahren für die zerstörungsfreie Bauteilprüfung geworden. Jedoch ist das Aufgaben- und Anwendungsspektrum im Vergleich zur medizinischen Diagnose, in der die CT bereits seit Jahrzehnten etabliert ist, ungleich vielfältiger.

Unterschiedliche Materialien, Verbundwerkstoffe, Legierungen, Bauteilgrößen und Detailerkennbarkeiten über viele Skalen hinweg sowie Einsatzgebiete wie Messtechnik, Qualitätssicherung und Materialcharakterisierung vermitteln einen kleinen Eindruck über das große Spektrum des Entwicklungspotenzials für die industrielle CT in der Zukunft. Eine der großen Herausforderungen ist beispielsweise der Zusammenhang zwischen Objektgröße und -auflösung. Dies sind für die CT zwei prinzipiell gegensätzliche Anforderungen. Ebenso wichtig ist auch die Etablierung der CT als Messmethode, die zukünftig von einem Untersuchungsobjekt nicht nur qualitative Volumenbilder, sondern quantitativ verwertbare Daten wie metrologische (Geometriedaten) [1] oder physikalische (Materialkennwerte, Dichte, Ordnungszahl etc.) [2][3] Informationen generiert.

Wesentliche Treiber für die Weiterentwicklungen auf den genannten CT-Feldern sind einerseits die enormen Fortschritte in der Entwicklung neuer Werkstoffe, andererseits erfordern aber auch die immer schnelleren und komplexeren Fertigungsprozesse ein Schritthalten der begleitenden Prüftechnologie!

Einordnung und Klassifikation der Computertomographie

Prinzipiell lassen sich die oben genannten Aufgabenfelder auf einige Anwendungsbereiche zusammenfassen, in denen die CT zukünftig vorrangig weiterentwickelt werden muss:

- Der Übergang vom Mikro- in den Nano-Bereich für Laborgeräte z.B. zur Materialcharakterisierung.
- Die Integration in den Produktionsprozess zur prozessintegrierten Bauteilprüfung.
- Die Entwicklung flexibler und mobiler CT-Anlagen (Off-shore-Prüfung).
- Quantitative Computertomographie für die geometrische Messtechnik (Metrologie) und energieselektive Materialtrennung und -sortierung (Rohstoff-Rückgewinnung).
- CT an großen Objekten mit hohen Auflösungen.
- CT im Sicherheitsbereich zur Detektion gefährlicher Objekte (Homeland-Security)

Der zukünftige Erfolg hierfür wird im Wesentlichen auch davon mit abhängen, wie gut es gelingen wird, die verschiedenen Wissensbereiche Rekonstruktion (Mathematik), Röntgentechnik (Physik), Volumendatenauswertung (Informatik) und Material- und Prozesseigenschaften (Werkstoffwissenschaften) interdisziplinär miteinander zu verbinden.

Abbildung 1 zeigt die Funktionsprinzipien der beiden häufigsten Verfahren der CT.

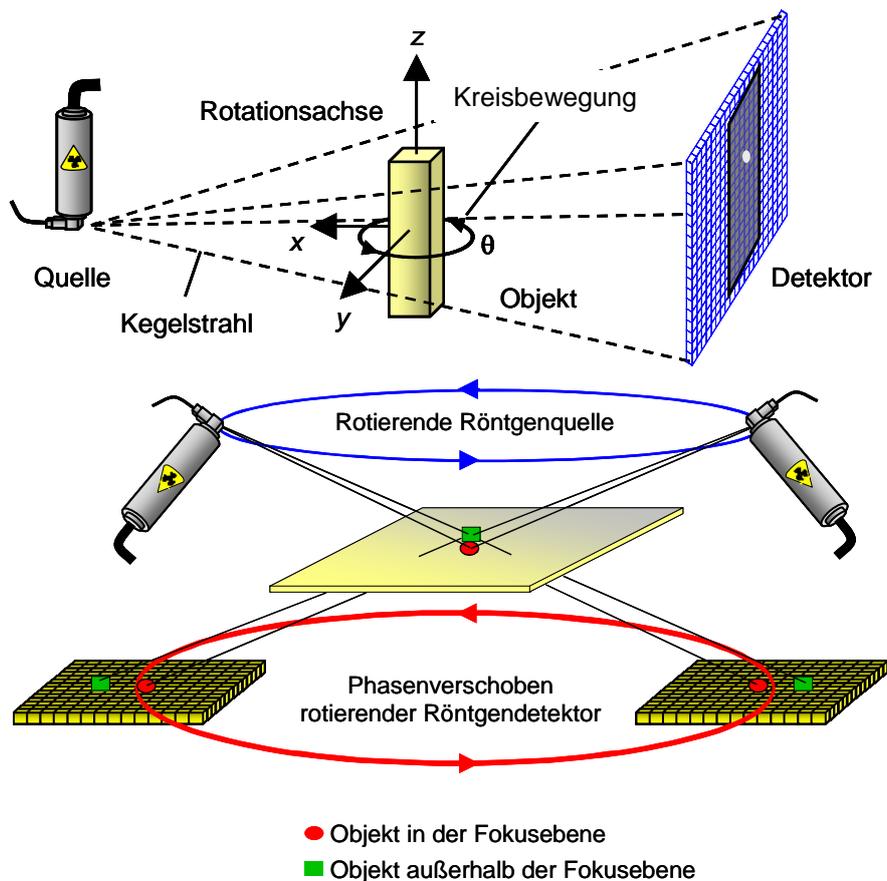


Abb. 1: Funktionsweise der axialen CT (Standard, oben) und der digitalen Tomosynthese (unten).

Ganz generell kann die industrielle CT entsprechend der nachfolgenden fünf Kriterien klassifiziert werden, die sich natürlich im jeweiligen Einzelfall auch überlappen können:

- Verwendung der CT in unterschiedlichen **Geschäftsbereichen** wie Medizin, Luft- und Raumfahrt, Automobil, energieerzeugende Anlagen etc.
- **Anwendungsgebiete** wie Bauteilprüfung, Materialcharakterisierung, Metrologie, Rohstoffrückgewinnung oder Homeland-Security
- **Einteilung nach Prüfobjektgröße** und erreichbarer Auflösung, also Nano- bis XXL-CT,
- **aufgabenspezifisches Systemdesign** wie Offline-/Inline-CT, Stationär/Mobil,
- **CT-Methoden**

Im Folgenden werden insbesondere die drei letztgenannten Klassifikationskriterien ausführlicher behandelt.

Klassifikation nach Methoden in der Computertomographie

In diesem Abschnitt werden sechs Methoden der CT am Beispiel unterschiedlicher Anwendungsfälle vorgestellt.

- Helix-CT
- Region-of-Interest-CT (RoI-CT)
- Mehrenergie-CT
- Limited-Angle-CT
- Translations-CT
- Simulations-CT

Helix-CT

Dieses Verfahren ähnelt dem aus der Medizin bekannten CT-System. Das Untersuchungsobjekt wird nicht nur um die eigene Achse rotiert, sondern gleichzeitig entlang dieser Achse verschoben, so dass sich eine helixartige Bahn ergibt (Abbildung 2).

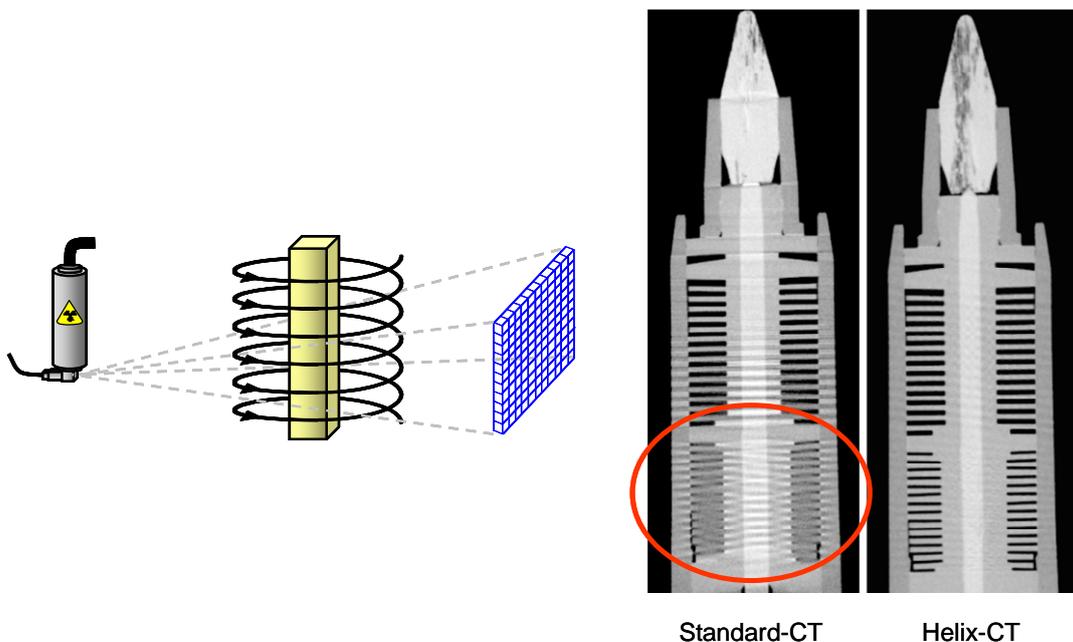


Abb. 2: Die Helix-CT unterscheidet sich durch das zusätzliche Verfahren des Objektes. Das Innere des Stiftes lässt sich damit artefaktfrei darstellen.

Auf diese Weise können Artefakte vermieden werden. Außerdem können Objekte quasi beliebiger Länge untersucht werden, da nicht das ganze Teil gleichzeitig auf den Detektor abgebildet werden muss, wie dies beim Standard-CT-Verfahren (Feldkamp) der Fall ist.

Region-of-Interest-CT

Eine Möglichkeit, einzelne Prüfbereiche auch bei großen Teilen mit hoher Auflösung zu tomographieren, ist die RoI-CT. Hier wird zunächst das gesamte Objekt mit geringer Auflösung erfasst. In einem zweiten CT-Scan wird das Objekt so positioniert, dass der RoI mit der maximal möglichen Vergrößerung aufgenommen wird, wobei ein offensichtlich unvollständiger Rekonstruktionsdatensatz entsteht. Das Verfahren basiert darauf, dass die im RoI-Scan fehlende Information aus dem vollständigen Sinogramm des ersten Scans mit verwendet werden und so aus diesen beiden Aufnahmen das Originalbild fehlerfrei und in guter Auflösung komplett rekonstruiert werden kann; Abbildung 3 zeigt dies am Beispiel eines CFK-Körpers.

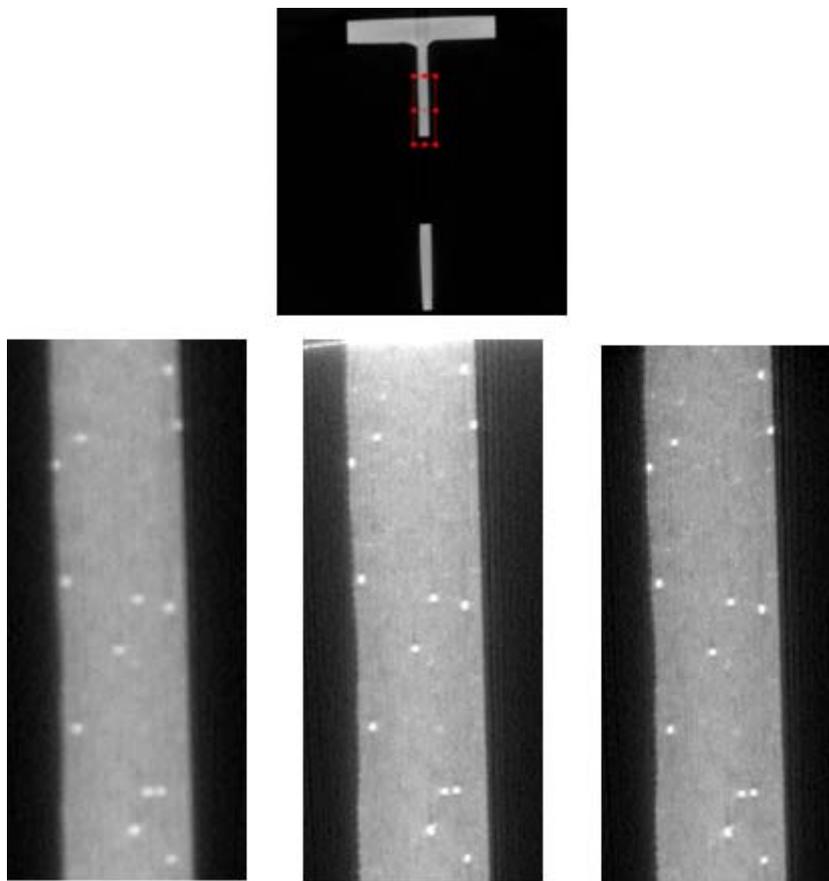


Abb. 3: RoI-Rekonstruktion (rechts) eines Ausschnitts eines CFK-Testkörpers (oben) aus den Daten der beiden CT-Scans mit niedriger (links) und hoher (Mitte) Auflösung.

Mehrenergie-CT

Diese Methode wird verwendet, wenn Materialien virtuell auf ihre chemisch-physikalische Zusammensetzung untersucht werden sollen. Ausgehend von zwei Messungen desselben Objekts, die sich hinsichtlich der spektralen Qualität der eingesetzten Röntgenstrahlung unterscheiden, werden die effektive Dichte ρ und die Kernladungszahl Z des Materials in einem Objekt orts aufgelöst berechnet. Das Prinzip der Zwei-Spektren- oder Mehrenergie-CT ist seit längerem aus der Medizintechnik bekannt, doch auf Grund der großen Vielfalt

der bei technischen Anwendungen vorliegenden Stoffe und Materialien stellt es eine große Herausforderung dar, die auf die Untersuchung von menschlichen Geweben und Organen optimierten Verfahren für industrielle Fragestellungen zu modifizieren.

Typische Anwendungen finden sich im Leichtbau bei der Analyse von Verbundwerkstoffen (Kohle- oder Glasfaserverstärkte Kunststoffe), bei Kompositmaterialien im Allgemeinen (z.B. Metall-Keramiken), bei der quantitativen Auswertung von Boden- und Gesteinsproben sowie im Abfall-Recycling (Sortierung von Almetallen). Abbildung 4 zeigt ein entsprechendes Beispiel. Zahlreiche weitere Anwendungen sind denkbar und werden derzeit intensiv erprobt. Eines der wesentlichen Ziele der Entwicklungsarbeiten ist hierbei die Bestimmung der Genauigkeit der Dichte- bzw. Kernladungszahlberechnungen, die naturgemäß je nach Prüfgegenstand, Materialzusammensetzung und eingesetzten Röntgenparametern unterschiedlich ausfällt.

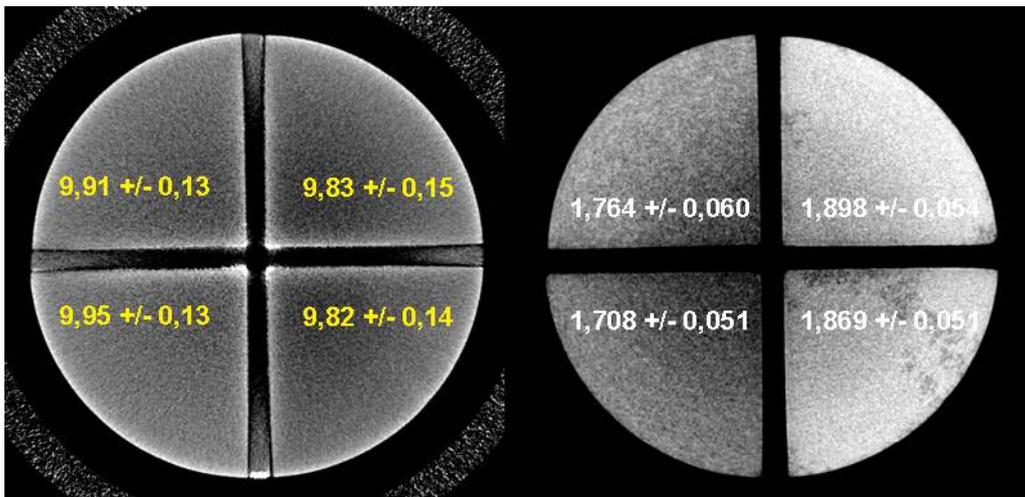


Abb. 4: Sandstein mit unterschiedlicher Salzwasserkonzentration; Kernladungszahl Z links, Dichte ρ rechts.

Limited-Angle-CT

Sind Untersuchungsobjekte nicht allseitig durchstrahlbar oder haben eine ungünstige Aspektgeometrie, so kann eine CT mit eingeschränktem Winkelbereich trotzdem dreidimensionale Bilder liefern. Das Verfahren findet insbesondere Anwendung im Elektronikbereich zur Prüfung beidseitig bestückter Flachbaugruppen (Abbildung 5). Aber auch für die Prüfung von anderen Plattenmaterialien, z.B. aus CFK (Flugzeuge, Windkraftanlagen) weist diese Methode in der Zukunft ein enormes Potenzial auf. Generell werden hier mit der *Tomosynthese* und der *Algebraischen Rekonstruktions-Technik ART* zwei Verfahren unterschieden [4][5].

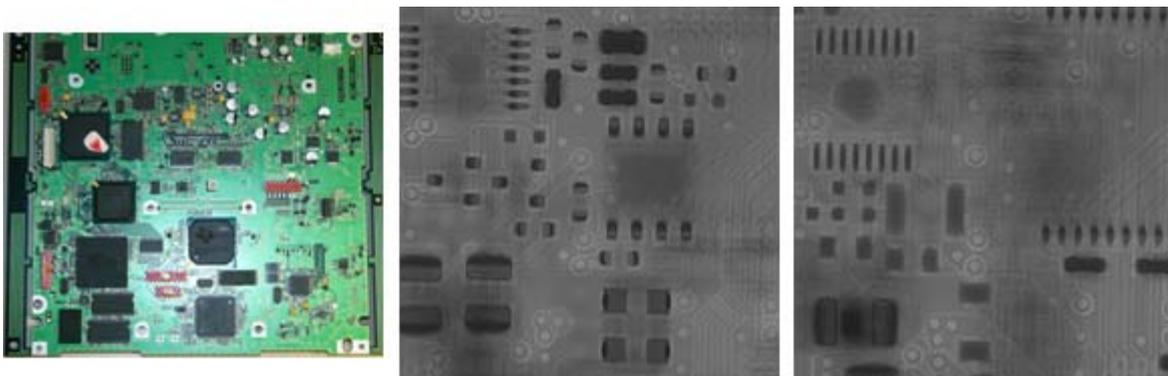


Abb. 5: Rekonstruktion zweier Schichten (Mitte und rechts) einer Leiterplatte (links).

Translations-CT

Dieses neue Verfahren [6] wird ebenfalls bei eingeschränkter Zugänglichkeit angewendet. Durch Verschiebung von Röntgenquelle und/oder Detektor parallel und/oder senkrecht zum Objekt (Variation der Vergrößerung) können ebenfalls dreidimensionale Informationen aus dem Inneren gewonnen werden. Abbildung 6 zeigt dies schematisch.

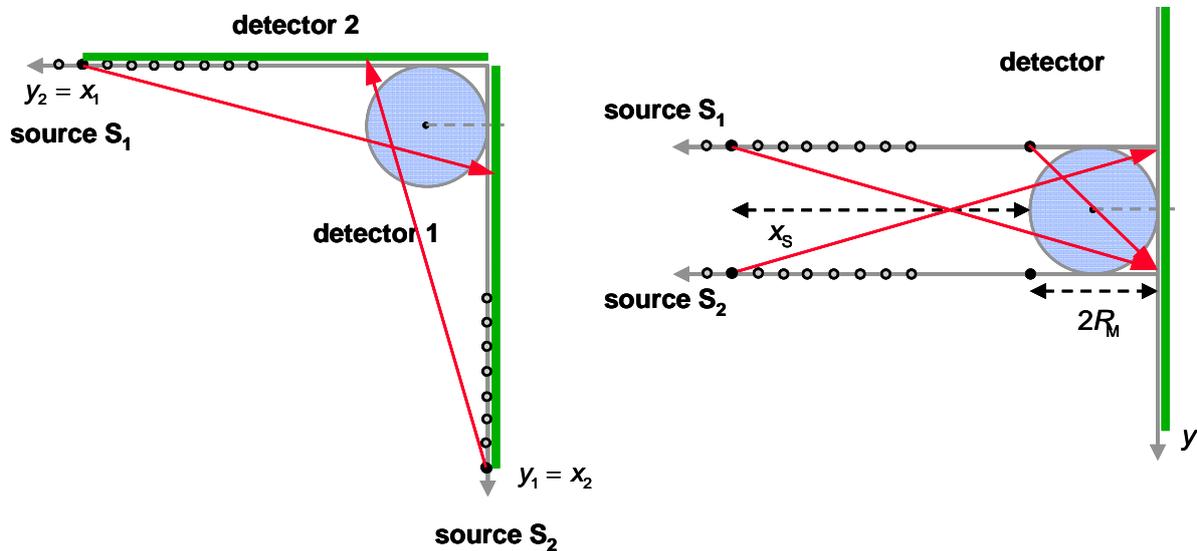


Abb. 6: Schematische Funktionsweise der Translations-CT; durch Kombination zweier translatorischer Bewegungen der Röntgenquelle wird ein Großteil der für eine Schnittbildrekonstruktion benötigten Daten abgedeckt („2T90“-System links, „2Tpar“-System rechts)

Ein Datensatz, der mittels einer oder mehrerer Translationsbewegungen der Röntgenquelle gewonnen werden kann, ist im Vergleich zu einem klassischen CT-Projektionsdatensatz, der während einer Drehung um mindestens 180° plus Fächerwinkel aufgezeichnet wird, unvollständig. Mit Hilfe eines iterativen Verfahrens (Algebraische Rekonstruktionstechnik ART) oder einer speziell angepassten gefilterten Rückprojektion können dennoch Bilder berechnet werden, die an die Aussagekraft konventioneller CT-Schnitte heranreichen.

Abbildung 7 zeigt das Ergebnis einer Simulationsstudie. Als virtuelles Prüfobjekt wurde ein schwer zugängliches Rohr gewählt, in dem verschiedene Kabel und Versorgungsleitungen verpackt sind.

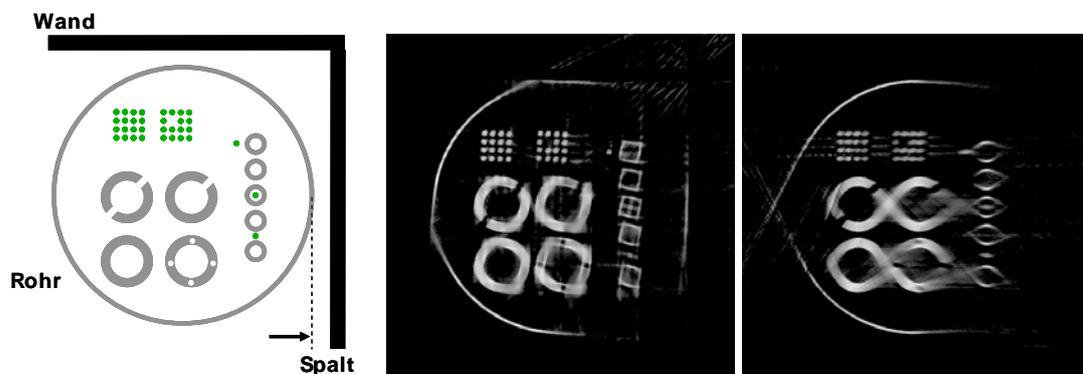


Abb. 7: Ergebnisse einer Simulationsstudie zur Translations-CT. Die im Objektquerschnitt (links) enthaltenen Details werden mit den beiden Datenaufnahme-Varianten 2T90° (Mitte) bzw. 2Tpar (rechts) mit hoher Abbildungstreue wiedergegeben, ohne dass das Objekt oder das Röntgengerät schrittweise rotiert werden muss.

Aus Abbildung 7 geht hervor, dass wesentliche Details wie Risse oder Brüche in Kabeln oder Leitungsrohren mit hoher Sicherheit erkannt werden können, obwohl die Schnittbilder auf der Basis von Daten berechnet wurden, die ohne rotatorische Bewegung sondern ausschließlich mittels zweier linearer Verschiebungen der Röntgenquelle aufgenommen wurden. Der Unterschied zwischen den beiden dargestellten Schemen 2T90 und 2Tpar wird in den Bildern in der Symmetrie der Verzerrungen widergespiegelt.

Simulations-CT

Zur Planung einer optimalen CT-Aufnahme ist es möglich und sinnvoll, entsprechende Simulationen durchzuführen. Heute wird in den verschiedenen Entwicklungslabors an der Thematik geforscht. Das Software-Tool Scorpius XLab ermöglicht beispielsweise die Simulation und gezielte Untersuchung verschiedener relevanter Einflussgrößen [7]:

- Röntgenspektrum (mono- oder polychromatisch)
- Vorfilterung
- Brennfleck (Größe, Intensität, Stabilität)
- Eigenschaften des Detektors (DQE, Pixelgröße, Imagelag, Rauschen, Streueffekte)
- Streustrahlung im Objekt
- Systemrauschen

Dadurch lassen sich die zu erwartenden Ergebnisse gut vorhersagen und ermitteln, ob eine CT-Prüfung die Anforderungen erfüllen kann. Insbesondere können durch die Simulation mit Hilfe von CAD Daten des Objekts ohne aufwändige Vorversuche diejenigen Parameter ermitteln, die unter den gegebenen Randbedingungen zu den besten Ergebnissen führen.

Klassifikation nach Prüfobjektgröße und aufgabenspezifischen Systemdesign

In diesem Abschnitt werden CT-Systeme anhand von Kriterien eingeteilt, die sich weniger an der Rekonstruktionsmethodik sondern an der Geometrie und Prüfaufgabe des Objekts orientieren:

XXL-CT

Müssen Objekte sehr großer Dimension, wie Seefrachtcontainer, ganze PKW oder Flugzeugteile untersucht werden, sind die heute verwendeten Standard-CT Verfahren mit den üblichen Röntgenröhren in Energiebereichen bis etwa 500 keV ungeeignet. Um solche Objekte noch durchdringen zu können, müssen Röntgenquellen mit höheren Strahlenergien zum Einsatz kommen wie z.B. Linearbeschleuniger (engl. *linear accelerator*, kurz LINAC) oder Betatrons. Diese erfordern jedoch eine deutlich aufwändigere Handhabung als Röntgenröhren, z.B. muss der Strahlenschutzraum die entsprechende Größe und Schutzfähigkeit aufweisen. Abhängig von den Objekten können auch mit LINAC oder Betatron unterschiedliche CT-Verfahren realisiert werden. Da es Objekte gibt, die, ähnlich wie der menschliche Körper bei medizinischen Untersuchungen, entweder nicht bewegt oder nur in einer bestimmten Position gescannt werden können, wird derzeit im Rahmen eines Forschungsprojekts eine Gantry CT mit einem LINAC als Strahlungsquelle entwickelt (Abbildung 8).

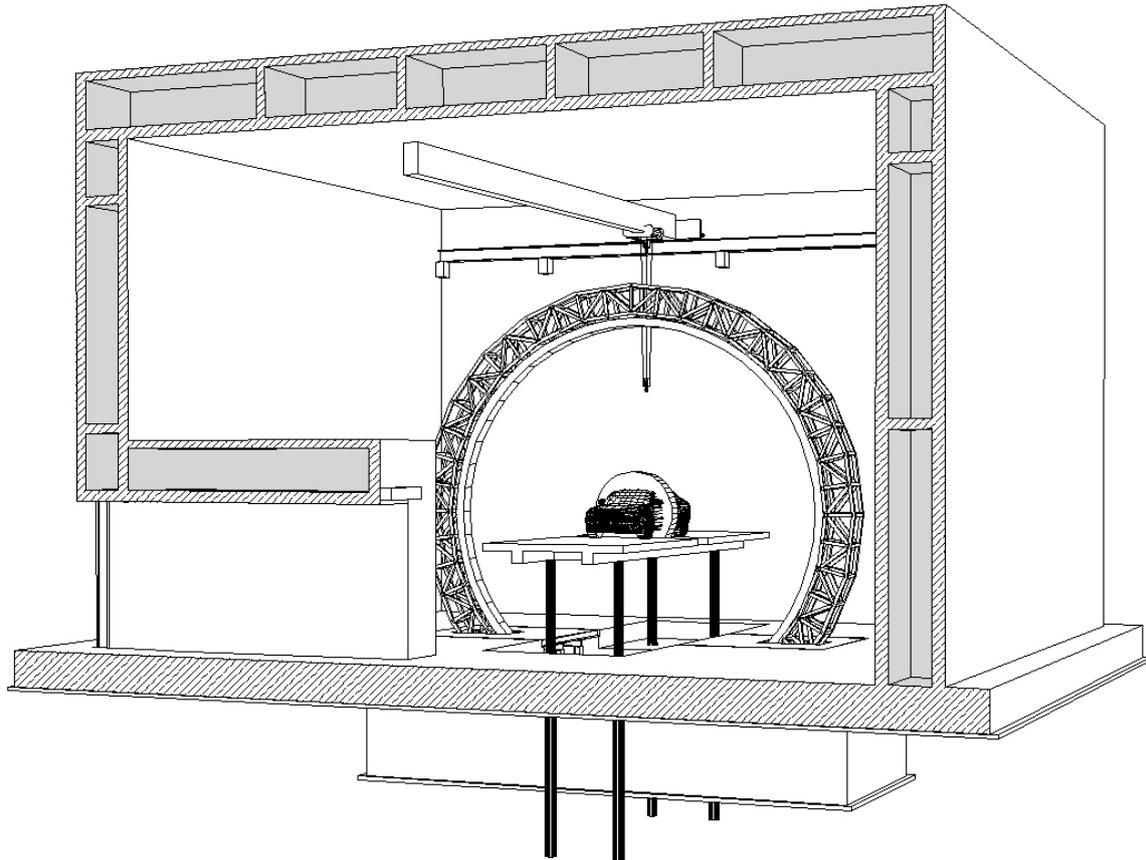


Abb. 8: Geplanter Aufbau der Linac-Gantry CT.

Makro-CT

Als Makro CT bezeichnet man in aller Regel Anlagen mit Röntgenquellen bis zu etwa 450 keV Strahlenergie und einer Detailerkennbarkeit bis etwa 0,1 mm. Auf Grund der hohen Strahlenergien können in solchen Anlagen größere Gussteile wie Aluräder, Motorblöcke oder Zylinderköpfe mit Wandstärken bis zu maximal 40 cm Aluminium untersucht werden. Typische Aufgabenstellungen für solche Anlagen, die je nach Anwendungszweck mit Flachbilddetektoren oder Zeilenkameras ausgerüstet sind, sind die Detektion von Lunkern, Poren und ggf. auch Rissen sowie die Ermittlung metrologischer Daten von optisch nicht zugänglichen Strukturen und der Soll/Ist Vergleich mit CAD-Daten.

Mikro-CT

Bei kleineren Teilen mit Abmessungen bis zu einigen Millimetern werden heute Mikro-CT Systeme eingesetzt. Kernstück dieser Maschinen sind die meist offenen Mikrofokusröntgenröhren mit Brennfleckgrößen bis hinunter zu etwa einem Mikrometer. In diesen Anlagen komme eine Vielzahl unterschiedlichster Sensoren (Flatpanel, CMOS, CCD, usw.) mit Pixelgrößen bis zu etwa 50 μm zum Einsatz. Auf Grund der kleinen Brennflecke und/oder kleinen Pixelgrößen der Sensoren dürfen die untersuchten Objekte nicht mehr sehr groß bzw. stark absorbierend sein. Ebenso liegt die Messzeit bei diesen Anlagen für die heute üblichen untersuchten Objekte auf Grund der längeren Belichtungszeiten noch eher im Bereich von einigen Stunden bei Auflösungen bis herab zu etwa 1 μm . Einsatzgebiete sind z.B. medizintechnische oder elektronische Komponenten

oder kleinere Leichtbauteile. Als Aufgabenstellung kann mit solchen Anlagen die Mikrostruktur kleinskaliger Bauteile heute hervorragend zerstörungsfrei analysiert werden.

Sub- μ -CT

Sind höchste Auflösungen erforderlich, so kann die Sub- μ -CT dies mit heute verfügbarer CT-Technik bis etwa 500 nm Detailerkennbarkeit ermöglichen [8][9]. Die Probengrößen sind hierbei jedoch auf den mm-Bereich beschränkt und die Aufnahmezeiten liegen noch über denen der Mikro-CT Systeme. Da mit dem immer kleiner werden Brennfleck, der für die hohen Auflösungen benötigt wird, auch die Strahlleistung sinkt, liegt bei diesen Anlagen der Entwicklungsschwerpunkt unter anderem auch bei den Detektoren. Insbesondere kommen hier zunehmend direkt konvertierende, Einzelphotonen zählende Sensoren zur Anwendung. Ebenso sollten aus rein geometrischen Gründen die Pixelgrößen der Detektoren nicht mehr viel größer als 50 μm sein. Derartige Systeme werden mittlerweile verstärkt für die Materialcharakterisierung eingesetzt, und bieten z.B. die Möglichkeit, Schliffbilder in der Metallographie, die aufwendig präpariert werden müssen und keine dreidimensionalen Informationen bieten, zu ersetzen [10] (Abbildung 9).

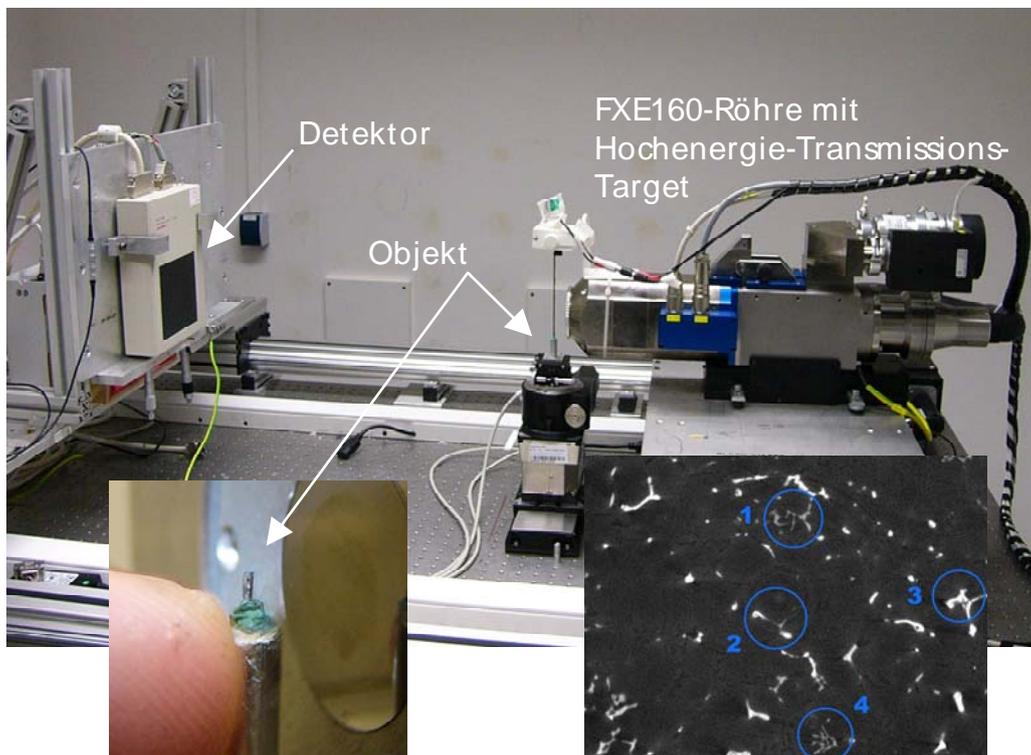


Abb. 9: Aufbau einer hochauflösenden Sub- μ -CT-Anlage.

Nano-CT

Werden noch höhere Auflösungen im Bereich von 100 nm und kleiner erforderlich, ist keine konventionelle CT mehr möglich. Typischerweise werden Messungen in diesen Anwendungsgebieten heute an speziellen Synchrotron-Messplätzen (ESRF; BESSY, DESY, ANKA, SLS, u.ä.) durchgeführt [11][12]. Auf der Basis von Röntgenlinsen (Fresnel-Zonenplatten) existieren jedoch erste Lösungsansätze, auch in Laborumgebung eine Nano-CT Anlage zu realisieren. Darüber hinaus gibt es weitere, erfolgversprechende Lösungsansätze auf der Basis von Elektronenmikroskopen, deren hochpräzise und stabile Elektronenstrahloptiken für die Erzeugung kleinster Röntgenbrennflecke verwendet werden können. Dazu wird der hochfokussierte Elektronenstrahl nicht mehr auf eine Probe sondern

auf ein geeignetes Röntgentarget geschossen und erzeugt dabei in dem Target Röntgenphotonen mit Energien bis etwa 40 keV in einem extrem kleinen Fokus ($< 100 \text{ nm}$) [13]. Durch den so erzielten kleinen Brennfleck des weiterentwickelten Elektronenmikroskops in Verbindung mit hochempfindlichen und -auflösenden Röntgensensoren können kleinste Objekte mit einer Detailerkennbarkeit bis unter 100 nm untersucht und charakterisiert werden. Anwendungen finden sich hier ebenfalls in der Materialcharakterisierung aber auch z.B. in der Biologie oder Halbleitertechnologie.

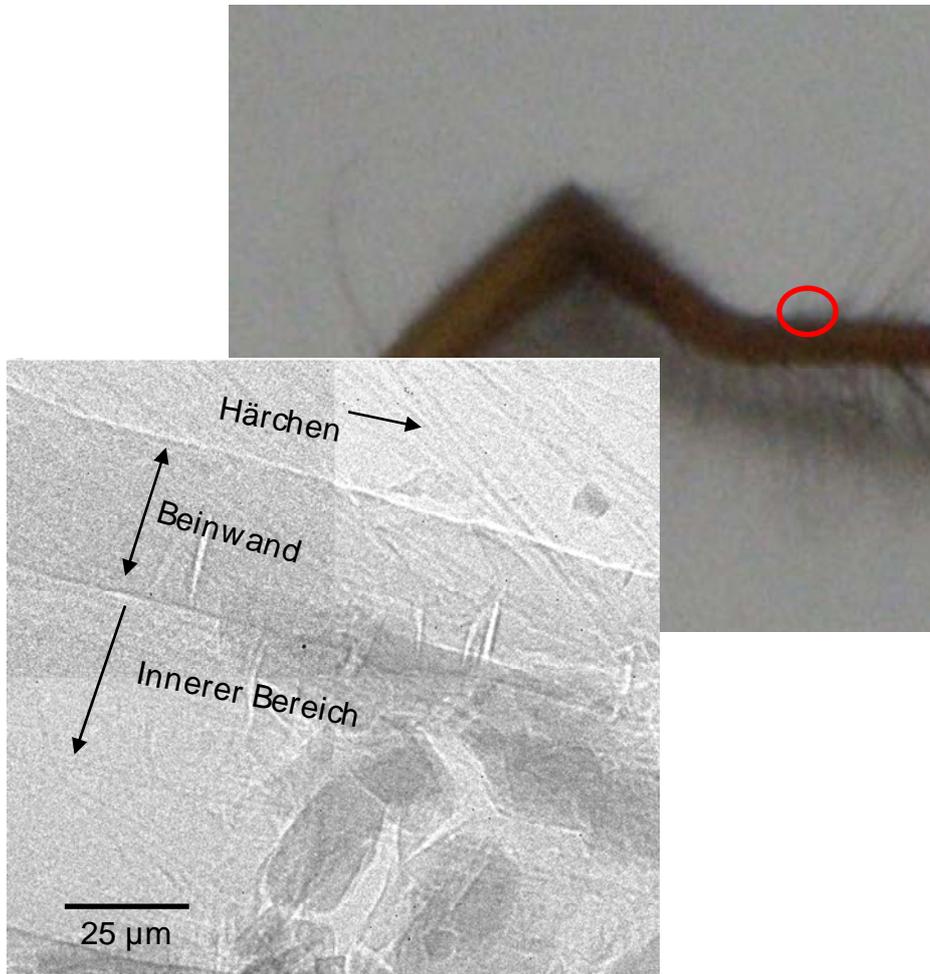


Abb. 10: Nano-Radioskopie eines Spinnenbeins; Phasenkontrast erhöht die Erkennbarkeit zusätzlich.

Mobile CT

Flügel von Windkraftanlagen oder große Flugzeugbauteile können nicht in gewöhnlichen, stationären CT-Systemen untersucht werden sondern müssen vor Ort an ihren Produktionsplätzen geprüft werden. Hier gibt es neue Entwicklungsansätze, die es zukünftig erlauben, solche Bauteile dennoch mittels mobiler CT zu untersuchen [14]. Ein Beispiel hierfür ist u.a. die Roboter gestützte CT: Hierzu werden zwei miteinander korrespondierende Roboter benötigt, die präzise miteinander synchronisiert sein müssen. Der Masterroboter trägt die Röntgenquelle, der Slave, der dem Röntgenstrahler folgt, trägt den Röntgendetektor. Beide bewegen sich auf frei wählbaren, z.B. durch Simulationsstudien an CAD-Daten des Objekts erzeugten, optimalen Aufnahme-Trajektorien um das Untersuchungsobjekt herum. Damit müssen neue Rekonstruktionsverfahren entwickelt werden, die Röntgen-Rohdaten aus beliebigen, dem Prüfobjekt ideal angepasste Aufnahmegeometrien verarbeiten können [4]. Das

grundlegende Problem dabei ist die Kenntnis der exakten, räumlichen Position beider Roboterarme in allen Aufnahmepositionen, die allein durch die Positionierung der Roboter jedoch nicht gegeben ist. Mittels geeigneter Kalibrierkörper kann die jeweils aktuelle Position von Quelle und Detektor mit ausreichender Genauigkeit (ca. 50 μm) aus den Röntgenprojektionen direkt berechnet werden und den Rohdaten für die nachfolgende Rekonstruktion zur Verfügung gestellt werden.

Inline-CT

Die Geschwindigkeit konventioneller CT-Systeme liegt heute noch im Bereich einiger Minuten bis hin zu mehreren Stunden. Für die Integration der CT als Prüfmethode in den Produktionsprozess sind aber Zeiten von 30 Sekunden oder darunter erforderlich um den Produktionstakt nicht durch die Tomographieprüfung zu verzögern. Durch die Verwendung hochoptimierter Algorithmen, geeigneter Handling-Systeme und schnell auslesenden Röntgendetektoren kann heute bereits eine CT von z.B. Gussteilen mit vollautomatischer Auswertung und IO/NIO-Bestimmung in weniger als 30 Sekunden erfolgen [15]. Ziel ist es, die Radioskopie, also 2D-Prüfung im Prozess durch eine 3D-Prüfung zu ersetzen. Weitere Optimierungen auf der Seite der Strahlerzeugung lassen CT-Prüfzeiten (Aufnahme, Rekonstruktion und Auswertung) für die Volumen CT-Prüfung im Bereich kleiner einer Sekunde als durchaus realistisch erscheinen, womit zukünftig auch InSitu-CT oder Dynamische CT an sich langsam verändernden Objekten möglich sein wird!

Messtechnik

Taktile oder optische Verfahren, die heute im Bereich Messtechnik eingesetzt werden, sind zum Teil langsam und/oder erlauben keine Messung innerer Strukturen eines Bauteils. Die CT liefert ein komplettes dreidimensionales Modell der untersuchten Objekte. Nach der Trennung von Material- und Hintergrundvoxel (Luft) und der subvoxelgenauen Oberflächenextraktion kann mit dem so gewonnen 3D-Modell des Bauteils ein Soll/Ist-Wertevergleich mit vorliegenden CAD-Daten oder auch die Generierung von vollständigen CAD-Daten aus dem Objekt selbst (Reverse Engineering) durchgeführt werden. Heute gibt es bereits eine Reihe von Herstellern (Zeiss, Werth, Wenzel), die erste Koordinatenmessgeräte auf der Basis von CT anbieten. Grundlegende Probleme und damit Aufgaben zukünftiger weiterer Forschungsarbeiten sind bei dieser quantitativen Aufgabenstellung die genaue Bestimmung und Kenntnis der Messgenauigkeit und der Bedeutung der Einflussparameter sowie eine leistungsfähige Korrektur der fehlerbehafteten Rohdaten für eine reproduzierbare und zuverlässige Volumenrekonstruktion.

Zusammenfassung und Ausblick

Aus der vorangegangenen Behandlung bzw. Klassifizierung der CT-Problematik lassen sich zusammenfassend sechs Bereiche ausmachen, in denen die künftige Entwicklung von CT-Systemen voranschreiten muss und wird:

- **Stabilität und Reproduzierbarkeit:** Im Übergang vom Prüfen zum Messen werden hochgenaue und empfindliche Verfahren sowie Korrekturmethode für die Rohdaten (Röntgenprojektionen) zum Einsatz kommen.
- **Kontrast:** Heute noch qualitative Verfahren werden quantifizierbar durch Entwicklungen bei der Mehrenergie-CT oder Nanofokus-Systemen (Phasenkontrast).
- **Ortsauflösung:** Durch Verwendung moderner Sub- μ -CT- und durch weitere Entwicklungen zu Nano-CT-Anlagen lassen sich Auflösungen bis in den

Nanometerbereich erzielen, die z.B. bei der Materialcharakterisierung gefordert sind und zukünftig auch Phasenkontrastbildgebung im Labor ermöglichen werden.

- **Objektgröße** bzw. -durchdringung: Röntgenquellen (LINAC, Betatron) und neue Röntgendetektoren mit und für höhere Energien, erlauben die tomographische Untersuchung größerer bzw. höher absorbierender Gegenstände (Hochenergie-Gantry-CT).
- **Flexibilität:** Mobile Methoden wie die Roboter CT oder Methoden bei eingeschränkter Zugänglichkeit erlauben die Anwendung von CT auch in bisher nicht erschlossenen Bereichen in Produktionshallen oder sogar off-shore an Windkraftanlagen.
- **Geschwindigkeit:** Zur Integration in den Produktionsprozess wird die Scan- und Rekonstruktionsgeschwindigkeit durch die Weiterentwicklung von Komponenten und Algorithmen weiter erhöht, so dass schließlich eine Art CT-Kino möglich wird, die Live-Betrachtung von dynamischen Prozessen mittels CT.

Referenzen

- [1] S. Kasperl, M. Krumm, J. Hiller, "Computed Tomography - Metrology in Industrial Research & Development", In Proc: Materials Testing, Vol. 51, Carl Hanser Verlag, München
- [2] U. Haßler, L. Garnero, P. Rizo, "X-Ray Dual-Energy Calibration Based on Estimated Spectral Properties of the Experimental System"; IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 45, No. 3, June 1998
- [3] B. J. Heismann, J. Leppert, K. Stierstorfer, "Density and atomic number measurements with spectral x-ray attenuation method", J. Appl. Phys. 94, 2073 (2003)
- [4] F. Porsch, U. Haßler, M. Maisl, C. Schorr: "Laminographische Methoden zur 3D-Röntgenuntersuchung flächiger Bauteile,, Vision Leitfaden Nr. 11, Leitfaden zur industriellen Röntgentechnik, Fraunhofer Verlag, 2010
- [5] S. Gondrom: "Inline Planar Computed Tomography (IPCT) for the inspection of Flat Components like e.g. PCBAs", Workshop on X-Ray Micro Imaging of Materials, Devices and Organisms, 22-24, October 2008, Dresden, Germany
- [6] T. Fuchs, T. Schön, R. Hanke, "Translational Computed Tomography: A New Data Acquisition Method for Inspection of Inaccessible Objects ", 10th European Conference on Non-destructive Testing ECNDT, June 7th - 11th, 2010, Moscow.
- [7] J. Hiller, S. Kasperl, "Messunsicherheitsbetrachtungen in der industriellen Computertomographie (CT) mittels Simulation." In: Tagungsband, 4. Fachtagung Messunsicherheit, Erfurt, 2008.
- [8] M. Salamon et al., "Realization of a computed tomography setup to achieve resolutions below 1 µm", Nucl. Instr. and Meth. A 591(2008), p.50-53
- [9] V. van der Linden, E. van de Castele, M. Thomas, et al. "Analysis of micro computed tomography images; a look inside historic enamelled metal objects", APPLIED PHYSICS A-MATERIALS SCIENCE & PROCESSING, Volume: 98 Issue: 2, Pages: 385-392
- [10] N. Uhlmann et al., "Höchstaufauflösende Röntgencomputertomographie zur Analyse von Gefügemerkmalen metallischer Werkstoffe", Giesserei 97 6/2010, S. 44-49
- [11] A. Moffat, P. Wright, L. Helfen, et al. "In situ synchrotron computed laminography of damage in carbon fibre-epoxy [90/0](s) laminates", SCRIPTA MATERIALIA, Volume: 62, Issue: 2, Pages: 97-100
- [12] Rack, A; Riesemeier, H; Zabler, S, et al. "The high resolution synchrotron-based imaging stations at the BAMline (BESSY) and TopoTomo (ANKA)" 6th Conference on Developments in X-Ray Tomography, AUG 12-14, 2008 San Diego CA, DEVELOPMENTS IN X-RAY TOMOGRAPHY VI, Volume: 7078, Pages: X780-X780
- [13] R. Hanke et al., "Setup of an electron probe micro analyzer for highest resolution radioscopy", Nucl. Instr. and Meth. A 607(2009), p.173-175, doi:10.1016/j.nima.2009.03.151
- [14] B. Redmer, J. Robbel, U. Ewert, et al., "Mechanised weld inspection by tomographic computer-aided radiometry (TomoCAR)", 8th ECNDT 2002 Conference, JUN, 2002 BARCELONA SPAIN, INSIGHT, Volume: 44, Issue: 9, Pages: 564-567
- [15] S. Oeckl, T. Wenzel, S. Gondrom, et al., "Real Inline X-Ray 3D CT with short Cycle Times for Light Metal Casting Inspection in Production" IEEE Nuclear Science Symposium/Medical Imaging Conference, OCT 19-25, 2008 Dresden GERMANY, IEEE NUCLEAR SCIENCE SYMPOSIUM AND MEDICAL IMAGING CONFERENCE (2008 NSS/MIC), VOLS 1-9, Pages: 5453-5455