



Doppelenergie-Röntgencomputertomographie – eine zerstörungsfreie Methode, Mehrkomponentensysteme zu untersuchen

Dipl.-Ing. M. Strabel, Prof. Dr.-Ing. K.-E. Wirth, Universität Erlangen-Nürnberg

Einleitung

Das tomographische Messverfahren unter Verwendung von Röntgenstrahlung findet in der Medizintechnik seit den 70er Jahre einen großen Anklang und ist aus der heutigen radiologischen Diagnostik nicht mehr wegzudenken. Bei dem Tomographieverfahren allgemein handelt es sich um eine Kombination aus einer physikalischen Messmethode, wie z.B. der Schwächung von Röntgenstrahlung beim Durchtritt durch Materie, und einen mathematischen Rekonstruktionsalgorithmus. Eine gute Übersicht über die unterschiedlichen Tomographietechniken findet sich z.B. bei Mewes und Renz [1] und bei Williams und Xie [2].

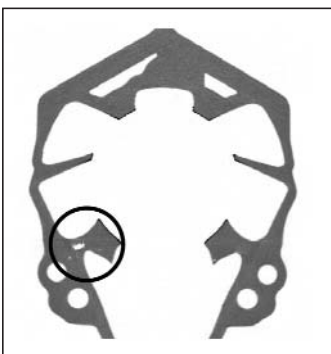


Abbildung 1: Röntgentomographisches Schnittbild eines Motorradzylinders mit Gussfehlern [3]

Die Röntgencomputertomographie etabliert sich aber zunehmend auch im technischen Bereich. Beispielhaft sei dazu die zerstörungsfreie Materialprüfung und verfahrenstechnische Anwendungen genannt. Abbildung 1 zeigt ein Schnittbild durch einen Motorradzylinder. Im Rahmen der zerstörungsfreien Materialprüfung können derartige Gussteile tomographisch vermessen und anhand eines vorgegebenes CAD-Modells auf geometrische und gusstechnische Fehler untersucht werden. In Abbildung 1 sind innerhalb des Kreises Luftporen zu erkennen, die das Bauteil unbrauchbar machen.

Messprinzip der Röntgencomputertomographie

Der verwendete Röntgentomograph setzt sich im wesentlichen aus einer 160 keV/640 W-Röntgenquelle mit einem Öffnungswinkel von 40° und einer linearen 8-bit-Zeilenkamera mit 1024 strahlungssensitiven Elementen zusammen.

Röntgenquelle und -detektor sind auf einem drehbaren Ring gelagert und können mittels eines Schrittmotors in unterschiedliche Winkelpositionen gebracht werden.

Abbildung 2 zeigt neben dem Aufbau auch das Prinzip der Durchstrahlungstomographie. Zunächst wird aus der Position 1 ein leeres Strömungsrohr als Meßobjekt von einem fächerförmigen Röntgenstrahl durch-

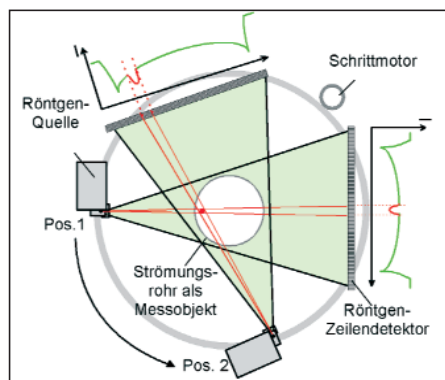


Abbildung 2: Prinzip der Durchstrahlungstomographie

Anzeige Nosebüs

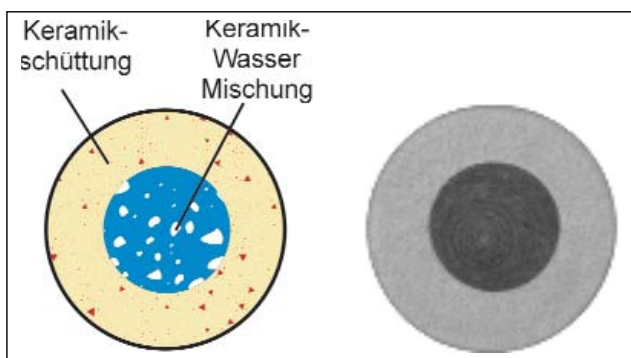


Abbildung 3: Skizze (links) und tomographisches Schnittbild (rechts) eines Mehrkomponenten-Messobjekts

strahlt. Die dargestellten Transmissionswerte I eines jeden Elements der Zeilenkamera sind ein Maß für Materialdichte, integriert über die Länge des Röntgenstrahls. Die durchstrahlte Weglänge der Strömungsröhrwandung erreicht im Bereich des oberen und unteren Rands den maximalen Wert und verringert sich in Richtung der Rohrmitte. Dadurch entsteht die grün dargestellte Intensitätsprojektion des leeren Rohres mit den typischen Intensitätsminima im oberen und unteren Rohrwandbereich. Befindet sich im Rohr noch zusätzlich ein Material, dargestellt durch ein einzelnes rotes Partikel, wird der Röntgenstrahl weiter geschwächt und der gemessene Transmissionswert I verringert sich im Vergleich zum leeren Rohr.

Durchstrahlt man das Partikel im Rohr nur aus einer Richtung, lässt sich die Position des Partikels längs des eingezeichneten Strahlengangs nicht herausfinden. Zur Bestimmung der genauen lokalen Position sind Informationen aus mindestens zwei unterschiedlichen Richtungen (Projektionen) notwendig. Um eine möglichst gute optische Auflösung zu erhalten, fährt das gesamte System mittels des Schrittmotors 128 verschiedene Winkelpositionen an und nimmt dabei die Intensitätsprojektion auf.

Die Berechnung der lokalen Messgrößen aus den einzelnen Intensitätsprojektionen geschieht mittels der „Algebraic-Reconstruction-Technique“ (ART). Im Bereich der verfahrenstechnischen Anwendungen lassen sich aus den Grauwerten der rekonstruierten Bilder mit den entsprechenden Kalibrierfunktionen, z.B. lokale Feststoffkonzentrationen von Gas/Feststoff-Systemen, erfolgreich messen.

Besteht das Meßobjekt aus mehreren unterschiedlichen Stoffen, wird die Interpretation der tomographischen Er-

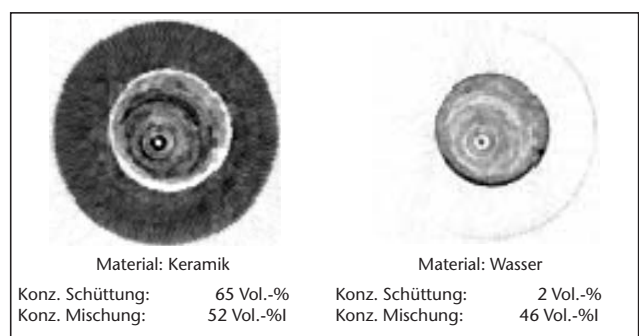


Abbildung 4: Mehrphasiges PET-Messobjekt aufgetrennt in Keramik (links) und Wasser (rechts) mit den querschnittsgemittelten Materialkonzentrationen

gebnisse erschwert. Die obenstehende Abbildung zeigt ein PET-Messgefäß in dem sich ein Mehrkomponenten-System aus Keramik, Wasser und Luft befindet. Im Inneren des Messobjekts befindet sich eine Keramik-Wasser-Mischung (59 Vol.-% Keramik und 41 Vol.-% Wasser), welche durch eine dünne Latexhülle von der äußeren trockenen Keramikschüttung (67 Vol.-% Keramik) abgetrennt ist.

Abbildung 3 (rechts) zeigt das rekonstruierte Tomogramm des mehrphasigen Messobjekts. Nur aufgrund deutlich unterschiedlicher Grauwerte ist eine räumliche Trennung des inneren und äußeren Meßbereichs möglich. Die unterschiedlichen Phasen der Keramik-Wasser-Mischung können jedoch nicht unterschieden werden. Eine quantitative Auswertung der Materialkonzentrationen im Messobjekt ist somit nicht möglich.

Doppelenergie-Röntgencomputertomographie

Um Objekte bestehend aus mehreren Stoffen untersuchen zu können, müssen zwei Durchstrahlungsmessungen bei unterschiedlichen Energien der Röntgenstrahlung nacheinander ausgeführt werden. Die Energie der Röntgenstrahlung stellt man dabei über die Beschleunigungsspannungen U_0 der Röntgenröhre ein. Bei der Doppelenergie Röntgencomputertomographie wird die unterschiedliche Abhängigkeit des Absorptionsverhaltens von der verwendeten Röntgenenergie ausgenutzt, um mehrere Stoffe getrennt voneinander örtlich aufzulösen. Durch die zusätzlichen Informationen ist es möglich, einerseits unterschiedliche Materialkomponenten aus einer Mischung getrennt voneinander qualitativ aufzulösen, aber andererseits auch quantitativ die lokale Konzentrationsverteilung der jeweiligen Kom-

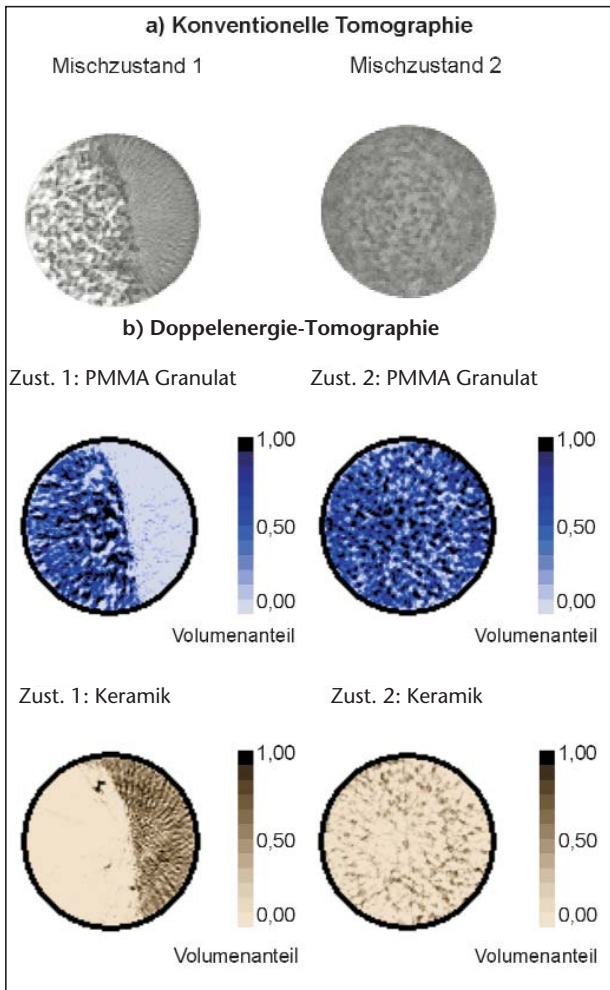
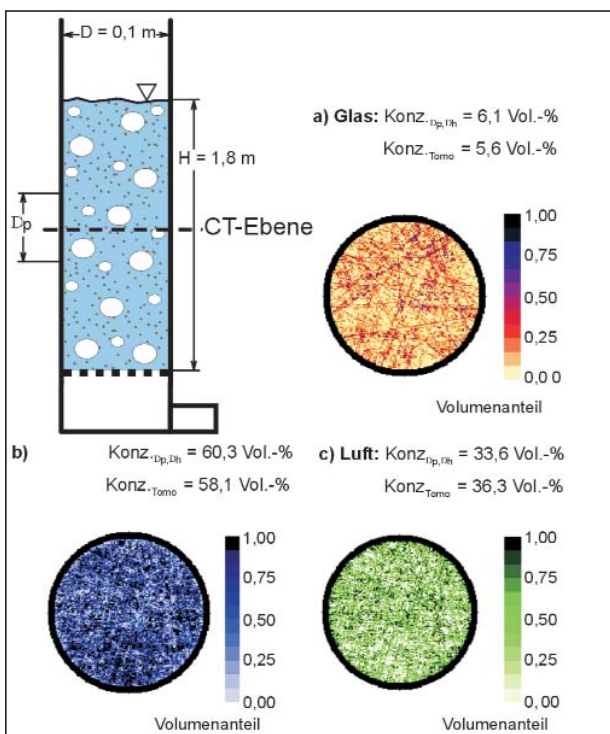


Abbildung 5: Konventionelle und Doppelenergie-Tomographie zur Beurteilung der Mischungsgüte vom PMMA-Granulat und Keramikpulver



ponente zu bestimmen. Eine wichtige Voraussetzung für die Auftrennbarkeit von Mehrstoffsystemen ist ein linear unabhängiges Absorptionsverhalten beider Materialien gegenüber unterschiedlicher Röntgenstrahlungsenergie.

Von dem Messobjekt aus Abbildung 3 wurden zwei tomographische Messungen bei unterschiedlichen Beschleunigungsspannungen der Röntgenröhre ($U_{0,1} = 60$ kV und $U_{0,2} = 140$ kV) durchgeführt und ausgewertet. Die nachfolgende Abbildung 4 zeigt die nach Stoffen aufgetrennten und anschließend rekonstruierten Tomogramme. Dabei entsprechen dunkle Grauwerte hohen Konzentrationen.

Qualitativ lassen sich Keramik und Wasser bei der gewählten Energiekombination gut von einander trennen. Beim Keramik-Tomogramm (Abbildung 4 links) ist im Vergleich zur inneren Keramik-Wasser-Mischung ein höher konzentrierter Außenbereich zu erkennen. Im Bereich der Latexhülle wird kein Feststoff detektiert. Das Wasser-Tomogramm weist vernachlässigbare Spuren von Flüssigkeit im Außenraum auf. Der Hauptanteil des Wassers wird korrekt in der Fest-Flüssig-Mischung gefunden. Auch die experimentell bestimmten querschnittsgemittelten Materialkonzentrationen zeigen im gesamten Messobjekt gute Übereinstimmung mit den vorgegebenen Größen. Die nachfolgenden Beispiele sollen einen Überblick über die breite Anwendbarkeit des Doppelenergie-Röntgencomputertomographieverfahrens geben.

Praktische Anwendungsmöglichkeiten des Doppelenergie-Verfahrens

Ein Großteil der heutigen Produkte, wie z.B. Waschmittel, Medikamente etc., bestehen aus einer Vielzahl von Einzelkomponenten. Bei Composite-Materialien, z.B. angewendet in Hubschrauberrotorblättern, hängen die mechanischen Eigenschaften stark von der gewünschten Verteilung der Einzelkomponenten ab. Es ist jedoch oftmals schwer zerstörungsfrei den Erfolg des Mischens der Einzelkomponenten zu beurteilen. In Abbildung 5 wurde ein typisches Mischungsproblem simuliert.

Mischzustand 1 in Abbildung 5 zeigt den Ausgangspunkt eines Mischprozesses. In einem Behälter befinden sich räumlich getrennt voneinander granuliertes Polymethylmethacrylat (PMMA) mit einem Durchmesser von 3 mm und Keramikpulver aus Aluminiumsilikat mit einer Partikelgröße von 0,1 mm. Die Partikelschüttungen sind nicht kompaktiert und besitzen somit Luft gefüllte Hohlräume. Liegen wie beim Mischzustand 1 in Abbildung 5 beide Stoffe getrennt voneinander vor, lassen sich auch mit der konventionellen Tomographie die Einzelkomponenten unterscheiden. Die großen PMMA Partikel auf der linken Gefäßseite zeigen unterschiedliche Graustufenverläufe im Vergleich zum Keramikmaterial in der rechten Hälfte. Bei Verwendung der Doppelenergie-Tomographie lassen sich mit gutem Erfolg zwei getrennte Tomogramme für die Reinstoffe PMMA und Keramik errechnen. Die Tomogramme der Reinstoffe wurden zur Verdeutlichung eingefärbt.

Der Zustand 2 in Abbildung 5 zeigt eine nahezu ideale Mischung aus PMMA und Keramik und soll den Abschluss des Mischprozesses beschreiben. Das Ergebnis der konventionellen Tomographie (siehe Zustand 2 in Abbildung 5a) zeigt, dass eine Unterscheidung der Einzelkomponenten nicht mehr möglich ist. Hingegen führt das Doppelenergie-Verfahren zu

Abbildung 6: Anwendung der Doppelenergie-Tomographie auf eine dreiphasige Blasensäule

Anzeige Tiede

zwei aufgetrennten Tomogrammen, auf denen man die gleichmäßige Verteilung beider Stoffe deutlich erkennt. In den ursprünglich mit Luft gefüllten Hohlräumen zwischen den großen PMMA-Partikeln befindet sich nun das feinere Keramikmaterial, wie in Abbildung 5b zu sehen ist.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit bezieht sich auf Konzentrationsverteilungen in dreiphasigen Systemen, wie z.B. in dreiphasigen Blasensäulen. Die Doppelenergie-Tomographie erlaubt es, Ungleichverteilungen der einzelnen Phasen zu erfassen, und somit die Güte der Phasenverteilung zu beurteilen.

Dazu ist ein Rohrelement mit einem Innendurchmesser von 0,1 m mit einer Mischung aus Wasser und 10 Vol.-% Glaskugeln gefüllt worden. Über eine poröse Bodenplatte kann die Suspension zusätzlich begast werden. Die auftretende Säulenexpansion und der gemessene Differenzdruck Δp über das Höhenelement Δh erlaubt die Berechnung der Volumenkonzentrationen der einzelnen Komponenten (Index: $\Delta p, \Delta h$). Die durchgeführte Doppelenergie-Tomographie erlaubt die Konzentrationsbestimmung von zwei Materialien: Glas (Abbildung 6a) und Wasser (Abbildung 6b). Durch Subtraktion dieser Volumenanteile vom Maximalwert 1 lässt sich die Konzentrationsverteilung von Luft im Rohrelement errechnen (Abbildung 6c). Die Darstellung der Glaskugeln zeigt eine nahezu homogene Verteilung über den Querschnitt. In der Rohrmitte ist ein Anstieg der Konzentration der Gasfraktion und korrespondierend dazu eine Abnahme der Flüssigkeitsanteile zu beobachten.

Der Index *Tomo* bezeichnet die mittels der Tomographie bestimmten querschnittsgemittelten Materialkonzentrationen

über das Rohrelement. Ein Vergleich dieser Werte mit den errechneten Größen aus Bettexpansion und Druckverlust zeigt eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse.

Zusammenfassung

Die konventionelle Einenergie-Röntgencomputertomographie kann bei der verfahrenstechnischen Anwendung zur Bestimmung der lokalen Verteilung einer Materialkomponente genutzt werden. Das Verfahren weist eine hohe örtliche Auflösung mit großer Genauigkeit auf. Nachteilig ist die relativ lange Messdauer, die somit nur zu zeitgemittelten Informationen führen kann.

Um die Verteilung mehrphasiger Systeme zu erfassen, ist das konventionelle Tomographie-Verfahren durch eine Doppelenergie-Technik erweitert worden. Damit ist es möglich, tomographische Informationen, die bei zwei unterschiedlichen Strahlungsenergien aufgenommen worden sind, in aufgetrennte Konzentrationsverteilungen zweier Stoffe zurückzuführen. Anhand von Testobjekten konnte die erfolgreiche Trennung zweier Materialien nachgewiesen werden. Mögliche technische Anwendungen liegen im Bereich der Mischprozesse Stoffe und bei fluiddynamischen Untersuchungen dreiphasiger Blasensäulen. Weitere Untersuchungen zum Flüssig-Feed-Eindüsen in zirkulierenden Wirbelschichten und Zerstäuben von überhitzten Sprays werden zur Zeit durchgeführt.

Danksagung

Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen der Forschergruppe „Reaktionslenkung durch Strömungsführung“ finanziell gefördert.

Formelzeichen

D	[m]	Durchmesser der Blasensäule
H	[m]	Höhe der Blasensäule
I	[-]	Intensität der Röntgenstrahlung
L	[m]	Dicke des absorbierenden Materials
U_0	[V]	Beschleunigungsspannung der Röntgenröhre
Δh	[m]	Abstand zwischen den Druckmesspositionen
Δp	[Pa]	Differenzdruck

Literatur

- [1] MEWES, D.; RENZ, R.: Meß- und Rekonstruktionsmethoden für tomographische Messungen, Chem. Ing. Tech. 63 (1991), S. 699-715.
- [2] WILLIAMS, R.A.; XIE, C.-G.: Tomographic Techniques for Characterizing Particulate Processes, Part. Syst. Charact. 10 (1993), S. 252-261.
- [3] BECKER, E.: Grobstrukturprüfung mittels Röntgenstrahlung und Gammastrahlung, Deutscher Verlag für Grundstoffprüfung, Leipzig 1983.

Die Autoren

Michael Strabel (oben), geboren 1973, studierte Chemieingenieurwesen an der Universität Erlangen und ist derzeit bei Prof. Dr.-Ing. K.-E. Wirth wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik"

Dipl.-Ing. M. Strabel, Prof. Dr.-Ing. K.-E. Wirth
Universität Erlangen-Nürnberg, Cauerstrasse 4,
D-91058 Erlangen
Tel.: ++49-(0)91 31-85-29401, Fax.: ++49-(0)91 31-85-29402

E-mail: sekretariat@mvt.uni-erlangen.de

