

Tomographische 3D-Rekonstruktion von Gußfehlern

Carsten Lehr

Universität Hannover,
Institut für Theoretische Nachrichtentechnik und Informationsverarbeitung,
Prof. Dr.-Ing. C.-E. Liedtke, Appelstr. 9a, 30167 Hannover, Germany
lehr@tnt.uni-hannover.de

Zusammenfassung In diesem Beitrag wird ein Verfahren zur tomographischen 3D-Rekonstruktion von Gußfehlern aus wenigen Röntgenaufnahmen vorgestellt. Das zweistufige Verfahren beruht auf einer Beschränkung der Rekonstruktion auf Regions of Interest um Fehlerbereiche herum. Dazu werden die Fehlerbereiche in den Aufnahmen segmentiert und auf die Ausdehnung des Gußfehlers repräsentierende Durchstrahlungsdaten umgerechnet. Für die Regularisierung des tomographischen Rekonstruktionsproblems wird das Maximum Entropie Prinzip in Verbindung mit einem iterativen Verfahren zur Binärisierung der Rekonstruktion verwendet. Die Rekonstruktion kann unabhängig von a priori Annahmen über die Form der zu rekonstruierenden Gußfehler durchgeführt werden.

1 Einleitung

Im Leichtmetall-Kokillenguß kommt es aufgrund von Unregelmäßigkeiten in den Prozeßparametern zu Fehlstellen, wie z.B. Innen- und Außenlunkern, Einfallstellen oder Warmrissen im Gußkörper. Für eine vollständige Klassifikation und Bewertung der Gußfehler werden Informationen über räumliche Lage, Volumen und Form der Fehler benötigt ([1],[3]). Eine einfache Röntgen-Durchstrahlungsprüfung liefert nur Informationen über die Lage des Gußfehlers in der Ebene senkrecht zur Durchstrahlungsrichtung. Eine 3D-Analyse der Gußfehler ist durch eine gemeinsame Auswertung mehrerer verschiedener Durchstrahlungsaufnahmen möglich (z.B. Stereoradioskopie, tomographische Verfahren). Stereoradioskopische Verfahren ermöglichen die Bestimmung von 3D-Lage und Volumen der Fehler, tomographische Verfahren zusätzlich die Rekonstruktion der 3D-Form der Fehler ([1], [2]). Voraussetzung für tomographische Verfahren ist in der Regel eine große Anzahl um den Gußkörper herum verteilter Aufnahmen. Im Bereich der industriellen Qualitätsprüfung steht jedoch häufig aus Zeit- und Kostengründen nur eine sehr begrenzte Anzahl von Aufnahmen zur Verfügung. Das Rekonstruktionsproblem ist in solchen Fällen stark unterbestimmt und häufig auf Grund von Fehleinflüssen (Kalibrierungsfehler, Rauschen) inkonsistent. Herkömmliche Tomographieverfahren (gefilterte Rückprojektion, Transformationsmethoden) sind für die Auswertung nur weniger Aufnahmen nicht geeignet. A priori Informationen

über das zu rekonstruierende Objekt müssen zusammen mit einem Regularisierungsverfahren verwendet werden, um eine eindeutige Lösung zu erhalten. Für die Rekonstruktion von Gußfehlern stehen die Materialparameter als wichtigste a priori Informationen zu Verfügung. Annahmen über die Form der Fehler sind dagegen meistens sehr unzuverlässig bzw. nur für jeweils eine spezielle Fehlerart zulässig.

Im folgenden wird ein zweistufiges Verfahren zur 3D-Rekonstruktion von Gußfehlern aus wenigen Röntgenaufnahmen vorgestellt, das ohne spezielle a priori Annahmen über die Form der zu rekonstruierenden Fehler arbeitet. Zunächst wird mit Hilfe geeigneter Vorverarbeitungsschritte das Rekonstruktionsgebiet auf Regions of Interest um die jeweiligen Fehler herum eingeschränkt. Dazu werden die Fehlerbereiche segmentiert und auf die Ausdehnung des Gußfehlers repräsentierende Durchstrahlungsdaten umgerechnet. Anschließend werden die Gußfehler mit einem speziell für die Verwendung nur weniger Aufnahmen geeigneten iterativen Tomographieverfahren rekonstruiert. Die Regularisierung des Rekonstruktionsproblems erfolgt auf der Grundlage des Maximum Entropie Prinzips in Verbindung mit einem iterativen Verfahren zur Binnärisierung des Rekonstruktionsergebnisses.

2 Vorverarbeitung

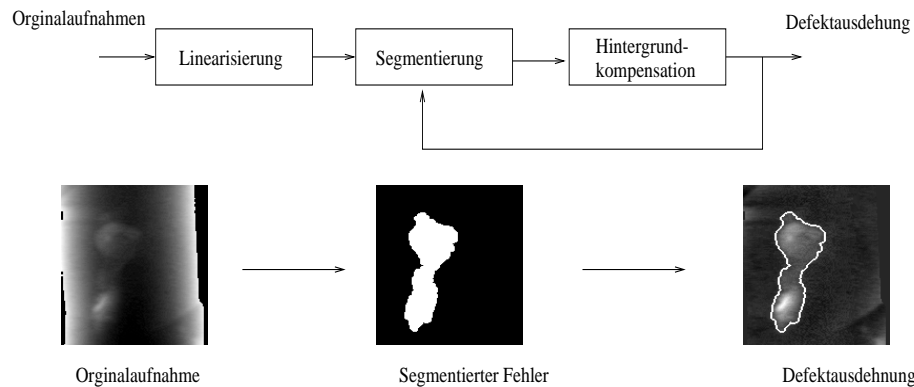


Abbildung1. Vorverarbeitung der Bilddaten

Eine vollständige Rekonstruktion von Gußkörper und Gußfehlern ist aus wenigen Röntgenaufnahmen auf Grund der Komplexität des Rekonstruktionsproblems in der Regel nicht möglich. Durch eine Beschränkung des Rekonstruktionsgebietes auf Regions of Interest um die Gußfehler herum kann eine deutliche Verringerung der Komplexität erreicht werden.

Dazu werden die Bilddaten in einem Vorverarbeitungsschritt so umgerechnet, daß sie jeweils die Fehlerausdehnung in Durchstrahlungsrichtung repräsentieren. In Abbildung 1 ist das Prinzip der Vorverarbeitung dargestellt. Die Bilddaten werden zunächst unter Berücksichtigung polychromatischer Strahlung und bekannter Materialwerte in durchstrahlte Materialausdehnungen umgerechnet (Linearisierung). Die Fehlerbereiche werden segmentiert (Segmentierung) und die Materialausdehnungen in den Fehlerbereichen aus den umgebenden Materialdehnungen extrapoliert. Extrapolierte und gemessene Materialdehnungen in Fehlerbereichen werden verglichen und daraus die Fehlerausdehnungen berechnet (Hintergrundkompensation) ([2]). In einem iterativen Prozeß werden die berechneten Fehlerausdehnungen für eine schrittweise Verbesserung von Segmentierung und Hintergrundkompensation verwendet.

Die Beschränkung auf die Rekonstruktion der Gußfehler ermöglicht es, Aufnahmen zu verwenden, in denen der Gußkörper nicht vollständig abgebildet wird. Damit können auch Fehler die klein gegenüber den Abmessungen des Gußkörpers sind in ausreichenden Vergrößerungen untersucht werden.

3 3D-Rekonstruktion

Die 3D-Rekonstruktion der Gußfehler wird aufbauend auf einem iterativen Tomographieverfahren durchgeführt. Iterative Tomographieverfahren beruhen auf der Darstellung des Rekonstruktionsproblems in Form eines großen linearen Gleichungssystems. Das Objektgebiet wird diskretisiert, in Voxel aufgeteilt und die Abbildung der einzelnen Voxel in die verschiedenen Aufnahmen mit Hilfe einer Abbildungsmatrix beschrieben (Gleichung 1).

$$B = \mathbf{A} * Obj \quad (1)$$

\mathbf{A} : Abbildungsmatrix

B : Vektor aller Bildpunkte

Obj : Vektor aller Objektvoxel

Der unbekannt Vektor Obj repräsentiert die Materialwerte der Voxel, der Datenvektor B enthält die Bildwerte sämtlicher Pixel der verschiedenen Aufnahmen und die Abbildungsmatrix \mathbf{A} gibt die Abbildungseigenschaften des Aufnahmesystems für die verschiedenen Aufnahmen wieder, d.h. der Matrixwert a_{ij} entspricht dem Anteil des i .ten Voxels am j .ten Projektionsstrahl. Da die Größe des Gleichungssystems Lösungsverfahren, die auf einer Matrixinversion beruhen unbrauchbar macht, werden iterative Lösungsverfahren zur Bestimmung des Vektors Obj eingesetzt.

Bei Verwendung nur weniger Aufnahmen ist das tomographische Rekonstruktionsproblem unterbestimmt und auf Grund von verschiedenen Fehlereinflüssen in den Eingangsdaten häufig inkonsistent. Fehlereinflüsse sind insbesondere Fehler in der Vorverarbeitung, Kalibrierungsfehler sowohl in der densitometrischen

als auch in der geometrischen Kalibrierung des Aufnahmesystems sowie Rauschen.

Eingangsdaten für die tomographische Rekonstruktion von Gußfehler sind die Fehlerausdehnungen in Durchstrahlungsrichtung. Die zu rekonstruierenden Materialwerte der Voxel sind daher eingeschränkt auf den Wert Eins für ein Voxel, das zu einem Gußfehler gehört und den Wert Null für Voxel außerhalb der Fehler. Für solche binäre Rekonstruktionsprobleme werden verschiedene modellbasierte Rekonstruktionsverfahren vorgeschlagen, die auf der Beschreibung der zu rekonstruierenden Objekte durch parametrisierte Ansatzfunktionen beruhen ([7], [8]). Auf Grund der Vielfalt möglicher Gußfehler ist ein modellbasierter Ansatz für die Gußfehlerrekonstruktion immer nur für eine stark eingeschränkte Klasse von Fehlern möglich. Abweichend von den modellbasierten Ansätzen wird daher ein auf der Regularisierung des Rekonstruktionsproblems nach dem Maximum Entropie Prinzip beruhender Ansatz verfolgt, bei dem für die Rekonstruktion auf einschränkenden Formannahmen verzichtet werden kann.

3.1 Maximum Entropie Prinzip

Das Maximum Entropie Prinzip stellt ein natürliches Kriterium zur Bestimmung der Lösung eines unterbestimmten und inkonsistenten Rekonstruktionsproblems dar ([4], [5]). Die Entropie ist ein Maß für den Informationsgehalt einer Lösung. Im Sinne des Maximum Entropie Prinzips ist diejenige Lösung des Rekonstruktionsproblems optimal, die die maximale Entropie, d.h den minimalen Informationsgehalt aller möglichen Lösungen aufweist (Gleichung 2) . Ist das zu lösende Gleichungssystem inkonsistent, so wird eine Näherungslösung bestimmt, die möglichst konsistent mit den gemessenen Bilddaten ist und die eine maximale Entropie besitzt. Da die Lösung maximaler Entropie den geringsten Informationsgehalt aller möglichen Lösungen hat, ist sie maximal unbestimmt in Bezug auf nicht gemessene Projektionen. Es werden nur solche Strukturen rekonstruiert, die eindeutig aus den gemessenen Daten hervorgehen.

Maximiere

$$Entropie = - \sum_i Obj_i * \ln (Obj_i) \quad (2)$$

unter den Nebenbedingungen

$$B = \mathbf{A} * Obj \text{ und } 0 \leq Obj_i \leq 1$$

Das Maximum Entropie Prinzip ermöglicht somit eine Regularisierung der Rekonstruktion von Gußfehlern ohne auf einschränkende Formannahmen zurückgreifen zu müssen. In der Lösung maximaler Entropie sind die Materialwerte nicht auf Null oder Eins beschränkt. Je größer der Materialwert eines Voxels in der Lösung maximaler Entropie ist, desto wahrscheinlicher ist es jedoch, daß der Voxel zum Gußfehler gehört. Die Lösung maximaler Entropie kann daher als eine Wahrscheinlichkeitsverteilung interpretiert werden, die angibt, wie groß die Wahrscheinlichkeit für die Zugehörigkeit eines Voxels zum dem zu rekonstruierenden Gußfehler ist.

3.2 Iterative Gußfehlerrekonstruktion

Ausgehend von der Interpretation der Lösung maximaler Entropie als Wahrscheinlichkeitsverteilung ergibt sich folgendes iteratives Verfahren zur binären Rekonstruktion von Gußfehler (Abbildung 2).

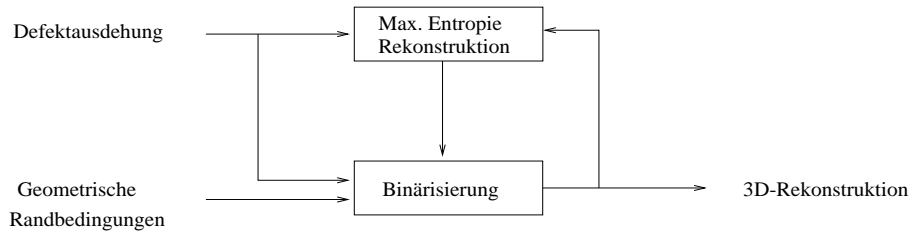


Abbildung 2. Rekonstruktionsverfahren

Zunächst wird die Lösung maximaler Entropie bestimmt. Dazu wird der MART Algorithmus oder wahlweise der von Minerbo ([6]) vorgeschlagene MENT Algorithmus verwendet. Beide Verfahren beruhen auf einer iterativen Anpassung der Rekonstruktionsdaten an die Bilddaten durch multiplikative Korrekturen und konvergieren gegen die Lösung maximaler Entropie ([4]).

In einem Binärisierungsprozeß werden diejenigen Voxel mit den größten Materialwerten in der Lösung maximaler Entropie als zum zu rekonstruierenden Defekt gehörend identifiziert. Dies entspricht einer Interpretation der Lösung maximaler Entropie als Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Zugehörigkeit eines Voxels zum Defekt. Anschließend wird die an die als Defekt identifizierten Voxel als Nebenbedingung angepaßte neue Lösung maximaler Entropie bestimmt. Dieses Verfahren wird iterative bis zu einer vollständigen binären Rekonstruktion wiederholt. Für die Steuerung der Binärisierung werden einige natürliche geometrische Randbedingungen genutzt, die als sicheres a priori Wissen über die zu rekonstruierenden Gußfehler zur Verfügung stehen. So kann z.B. innerhalb des Fehlers kein Material eingeschlossen sein. Falls a priori Annahmen über die Form der Gußfehler vorliegen, so können diese in Form weiterer Einschränkungen in den Binärisierungsprozeß eingebracht werden. Entscheidend für den Erfolg des Verfahrens ist es, das in jedem Iterationsschritt nur relative wenige Voxel dem Defekt zugeordnet werden um eine schrittweise Anpassung der Lösung maximaler Entropie an die veränderten Nebenbedingungen zu gewährleisten.

4 Ergebnisse

Die Untersuchung des vorgeschlagenen Verfahrens wird zunächst an simulierten Datensätzen durchgeführt. Als Testobjekte werden eine Kugel, ein Quader und

ein in Abbildung 3 dargestelltes Objekt (Objekt 1) mit einer komplexeren Form verwendet. Für die Rekonstruktion werden 3 Aufnahmen im Winkelbereich von 90° und für Objekt 1 in einem zweiten Versuch 6 Aufnahmen in einem Winkelbereich von 180° verwendet.

	Rauschen 0%	Rauschen 5%	Rauschen 10%
Kugel	0%	1%	3%
Quader	0%	2%	3%
Objekt 1 (180°)	<0.1%	2%	5%
Objekt 1 (90°)	4%	5%	7%

Tabelle 1. Simulationsergebnisse: Fehlerhaft rekonstruierte Voxel

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Rekonstruktion aus simulierten Projektionen zusammengestellt. Die angegebenen Ergebnisse sind über mehrere Versuche mit unterschiedlichen Aufnahmenanordnungen gemittelt. Ohne Rauscheinfluß wird für Kugel und Quader eine exakte Rekonstruktion erreicht. Bei der Verwendung von 6 Aufnahmen im Winkelbereich von 180° wird Objekt 1 ebenfalls fast fehlerlos rekonstruiert. Bei der Verwendung von 3 Aufnahmen im Winkelbereich von 90° treten in den Randbereichen verstärkte Abweichungen der rekonstruierten Form von der wahren Form auf. Diese Artefakte sind auf den stark eingeschränkten Winkelbereich der Aufnahmen zurückzuführen und sind abhängig von der Durchstrahlungsrichtung der Aufnahmen.

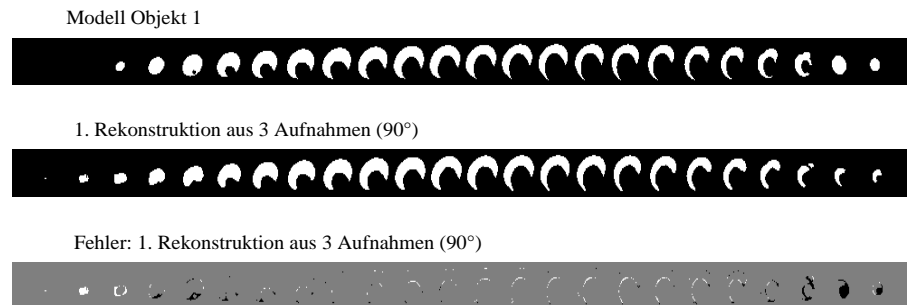


Abbildung 3. Rekonstruktion Objekt 1

Mit zunehmenden Rauschen nimmt die Anzahl der falsch rekonstruierten Voxel zu, die generelle Objektform wird jedoch in allen Fällen nur unwesentlich schlechter als im Fall idealer Daten rekonstruiert. In Abbildung 3 sind die Rekonstruktionsergebnisse für Objekt 1 schichtweise dargestellt. In den Darstellungen

der Rekonstruktionsfehler sind Voxel, die fehlerhaft als zum Fehler gehörende rekonstruiert wurden weiß dargestellt. Voxel, die fehlerhaft als nicht zum Fehler gehörend bestimmt wurden, sind schwarz dargestellt.

Im Anschluß an die Simulationen werden Untersuchungen an Fehlern bekannter Geometrie sowie an realen Gußfehlern durchgeführt. Die Aufnahmen wurden mit einem einfachen Radioskopie-System bestehend aus Mikrofokus-Röntgenröhre, Bildwandler und CCD-Kamera aufgenommen. Die Kalibrierung der geometrischen Abbildungseigenschaften des Aufnahmesystems erfolgte über ein spezielles Kalibrierungsverfahren unter Verwendung eines zusammen mit den Objekten aufzunehmenden Kalibrierkörpers. Einzelheiten des Kalibrierungsverfahrens sind in [2] beschrieben.

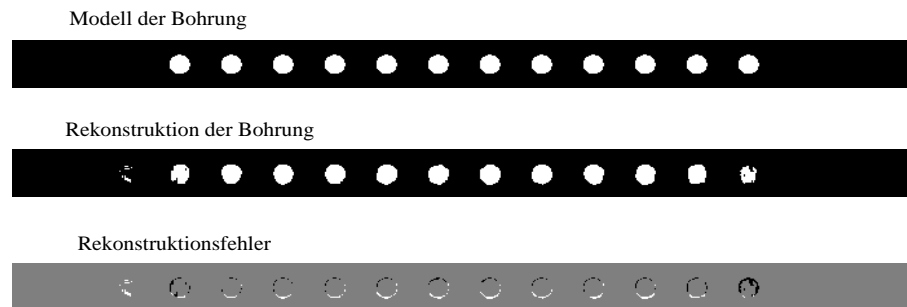


Abbildung 4. Rekonstruktion einer zylindrischen Bohrung

Fehler bekannter Geometrie werden in einem Testkörper durch Bohrungen unterschiedlicher Tiefe und Ausdehnung simuliert. Geometrie und Material des Testkörpers orientieren sich an einer für weitere Untersuchungen zur Verfügung stehenden Versuchskokille für den Leichtmetallkokillenguß [1]. In Abbildung 4 ist das Ergebnis der Rekonstruktion einer zylindrischen Bohrung dargestellt. Bei der Verwendung von 3 Aufnahmen in einem Winkelbereich von 90° werden etwa 5% der Voxel falsch rekonstruiert. Die Abweichungen sind alle im Bereich der Randvoxel zu finden und führen zu Abweichungen der rekonstruierten Oberfläche der Bohrung von der tatsächlichen Form von im Mittel weniger als einem Voxel. Die maximale Formabweichung beträgt 2 Voxel. Diese Ergebnisse konnten an verschiedenen Bohrungen unterschiedlicher Form und Größe bestätigt werden.

In Abbildung 5 ist das Ergebnis der Rekonstruktion eines realen Gußfehlers dargestellt. Gegenübergestellt sind die Maximum Entropie Lösung und die binäre Lösung der Rekonstruktionen. Erst die Binärisierung läßt die tatsächliche Form des Fehlers erkennen. Ein Vergleich mit der tatsächlichen Gußfehlerform ist hier nicht möglich.

Rekonstruktion nach Binärisierung



Maximum Entropie Rekonstruktion



Abbildung 5. Rekonstruktion eines Gußfehlers

5 Zusammenfassung

Es wurde ein Verfahren zur tomographischen Rekonstruktion von Gußfehlern aus wenigen Röntgenaufnahmen vorgestellt. Das zweistufige Verfahren beruht auf einer Beschränkung der Rekonstruktion auf Regions of Interest um Fehlerbereiche herum. Für die Regularisierung des tomographischen Rekonstruktionsproblems wird das Maximum Entropie Prinzip in Verbindung mit einem iterativen Verfahren zur Binärisierung der Rekonstruktion verwendet.

Untersuchungen an simulierten Datensätzen sowie an Fehlern bekannter Geometrie haben gezeigt, dass das vorgestellte Verfahren eine Rekonstruktion aus nur sehr wenigen Aufnahmen ermöglicht. Bei einfachen Gußfehlergeometrien ergibt sich eine hohe Rekonstruktionsgenauigkeit. Die Genauigkeit der Rekonstruktion komplexer Gußfehler wird derzeit in weiteren Versuchen untersucht.

Literatur

1. Feiste, K.; Hanke, R.; Stegemann, D.; Reimche, W.: Three Dimensional Analysis of Growing Casting Defects. International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications, Applications II: 20, Berlin, 1994.
2. Lehr, C.: 3D-Analyse von Gußfehlern. 19.DAGM Symposium, Braunschweig, 1997.
3. Hanke, R.: Ein Verfahren zur Bestimmung von Lage und Umfang von Volumendefekten in Echtzeit am Beispiel der Gußteileprüfung. Dissertation Erlangen, 1996.
4. Reis, M.L.; Roberty, N.C.: Maximum entropy algorithm for image reconstruction from projections. Inverse Problems 8 (1992), S. 623-644.
5. Grandy, W.T.: Incomplete Information and Generalized Inverse Problems. Maximum-Entropy and Bayesian Methods in Inverse Problems, S. 1-19.
6. Minerbo, G.: MENT: a maximum entropy algorithm for reconstructing a source from projection data. Computer Graphic and Image Processing, 10, 1997, S. 48-68.
7. Milanfar, P.; Karl, W.C.; Wilesky, A.S.: Reconstructing Binary Polygonal Objects from Projections: A Statistical View. Graphical Models and Image Processing, Vol 56, 5, 1994.
8. Wallingford, R.M.; Basart, J.P.: Reconstruction of Ellipsoidal Flaw Models from X-Ray Radiographs. Review of Progress in Quantitative nondestructive Evaluation, Vol 10A, 1991.