

# 3D-Analyse 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

**Abstract.** In diesem Beitrag wird ein Verfahren zur 3D-Analyse (Lage- und Volumenbestimmung) von Gußfehlern aus zwei beliebigen Röntgenprojektionen vorgestellt. Eine Kalibrierung der Einzelaufnahmen mit Hilfe eines zusammen mit dem Gußteil aufzunehmenden einfachen planaren Kalibrierkörpers ermöglicht die gemeinsame Auswertung beliebiger Aufnahmen zur Berechnung der 3D-Lage der Gußfehler mittels eines Stereoverfahrens. Das Volumen der Gußfehler wird ausgehend von der 3D-Lage durch Auswertung der Strahlungsintensitäten unter Berücksichtigung des polychromatischen Spektrums der Strahlung bestimmt. Aufgrund der Verwendung des Kalibrierkörpers kann die 3D-Analyse mit Hilfe eines einfachen Radioskopiesystems ohne weiteren Geräteaufwand durchgeführt werden, da im Unterschied zu herkömmlichen Verfahren die Verwendung einer präzisen Positioniervorrichtung aufgrund der Kalibrierung nicht erforderlich ist.

## 1 Einleitung

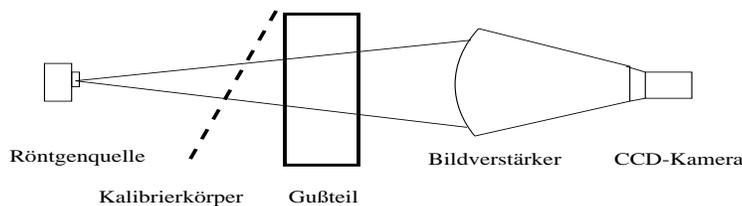
Im Leichtmetall-Kokillenguß kommt es aufgrund von Unregelmäßigkeiten in den Prozeßparametern zu Fehlstellen, wie z.B. Innen- und Außenlunkern, Einfallstellen oder Warmrissen im Gußkörper. Für eine vollständige Klassifikation und Bewertung der Gußfehler werden Informationen über die räumliche Lage und Ausdehnung der Fehler benötigt [1]. 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).

Im folgenden wird ein System zur 3D-Analyse von Gußfehlern auf der Grundlage eines Radioskopiesystems bestehend aus einer Mikrofokusröntgenröhre und einem Bildverstärker mit CCD-Kamera vorgestellt. Die gemeinsame Auswertung unterschiedlicher Aufnahmen zur Ermittlung der 3D-Informationen wird durch eine Kalibrierung der einzelnen Aufnahmen ermöglicht. Dazu wird zusammen mit dem Gußteil ein Kalibrierkörper aufgenommen, dessen relative Lage zum Gußteil zwischen den einzelnen Aufnahmen unverändert bleibt (Abbildung 1). Ausgehend von der Kalibrierung wird die Objektbewegung zwischen den Aufnahmen bestimmt. Damit kann die 3D-Analyse unabhängig von einer präzisen

mechanischen Positioniervorrichtung durchgeführt werden. Bisherige Verfahren verwenden mechanische Positioniervorrichtungen um die Objektbewegung zwischen den Aufnahmen zu bestimmen [1],[2],[3].

Die Kalibrierung wird zur Berechnung der 3D-Lage der Gußfehler mittels eines Stereoverfahrens sowie zur Korrektur der im Bildaufnehmersystem auftretenden nichtlinearen Verzerrungen genutzt. Das Volumen der Gußfehler wird durch die Auswertung der Strahlungsintensitäten unter Berücksichtigung der 3D-Lage der Fehler berechnet. Der Einfluß des polychromatischen Spektrums der Strahlung wird bei der Auswertung der Strahlungsintensitäten durch eine Kalibrierfunktion berücksichtigt.

Im folgenden wird zunächst das Kalibrierverfahren und anschließend die auf der Kalibrierung aufbauenden Verfahren zur 3D-Auswertung erläutert. Der Einsatz des Verfahrens sowie die erreichbare Genauigkeit wird anhand von Versuchsergebnissen dargestellt.



**Fig. 1.** Aufbau des Röntgenkamerasystems mit Kalibrierkörper und Gußteil

## 2 Kamerakalibrierung

Die Kalibrierung der geometrischen Abbildungseigenschaften beruht auf der Trennung der Kalibrierung der im Bildverstärker auftretenden Verzerrungen von der Kalibrierung der Projektionseigenschaften der Kamera. Die Kalibrierung der Projektionseigenschaften zeichnet sich durch ein Verfahren zur gleichzeitigen Kalibrierung aller Aufnahmen aus (Mehrbildkalibrierung). Der gegenüber einer einfachen Einzelbildkalibrierung erhöhte Rechenaufwand ist durch erheblich verbesserte Kalibrierungsergebnisse gerechtfertigt.

### 2.1 Kameramodell

Zum Beschreiben des Abbildungsverhaltens der Röntgenkamera wird ein Projektionsmodell ergänzt durch die Modellierung der im Bildaufnehmersystem auftretenden nichtlinearen Verzerrungen verwendet (Abbildung 2). Im Bildverstärker

treten zwei verschiedene Typen von nichtlinearen Verzerrungen auf, zum einen Radialverzerrungen aufgrund des gewölbten Eingangsschirms des Bildverstärkers, zum anderen S-förmige Verzerrungen aufgrund der Ablenkung bewegter Elektronen im Bildverstärker durch das umgebende Magnetfeld [2, ?]. Weitere Verzerrungen werden durch die Optik der CCD-Kamera verursacht.

Das Projektionsmodell beschreibt die Abbildung eines 3D-Raumpunktes  $P_w = (x_w, y_w, z_w)^T$  in den 2D-Punkt  $P_i = (x_i, y_i)^T$  eines virtuellen, unverzerrten Bildes. Der 3D-Punkt  $P_w = (x_w, y_w, z_w)^T$  wird zunächst mittels einer Rotation  $\mathbf{R}$  und einer Translation  $\mathbf{T}$  in die Darstellung  $P_c = (x_c, y_c, z_c)^T$  im Kamerakoordinatensystem (KKS) überführt (äußere Kameraparameter)(Gleichung 1) und anschließend perspektivisch in die Bildebene projiziert (innere Kameraparameter) (Gleichung 2). Dabei wird eine Skalierung der Abbildung auf Pixelkoordinaten ( $S_x$  und  $S_y$  als Skalierungsfaktoren) und eine Verschiebung des Koordinatensystemursprungs (Hauptpunktverschiebung ( $C_x, C_y$ )) berücksichtigt. Der Abstand der Röntgenquelle zur Eingangsebene des Bildverstärkers wird mit  $f$  bezeichnet.

$$P_c = (x_c, y_c, z_c)^T = \mathbf{R} * P_w + \mathbf{T} \quad (1)$$

$$P_i = (x_i, y_i)^T : \begin{cases} x_i = f/S_x * x_c/z_c + C_x \\ y_i = f/S_y * y_c/z_c + C_y \end{cases} \quad (2)$$

Das Verzerrungsmodell beschreibt die Transformation des Bildpunktes  $P_i = (x_i, y_i)^T$  des unverzerrten Bildes in den Bildpunkt  $P_v = (x_v, y_v)^T$  des realen, verzerrten Ausgangsbildes durch zweidimensionale Polynome 3.Grades in  $x_i$  und  $y_i$  (Gleichung 3).

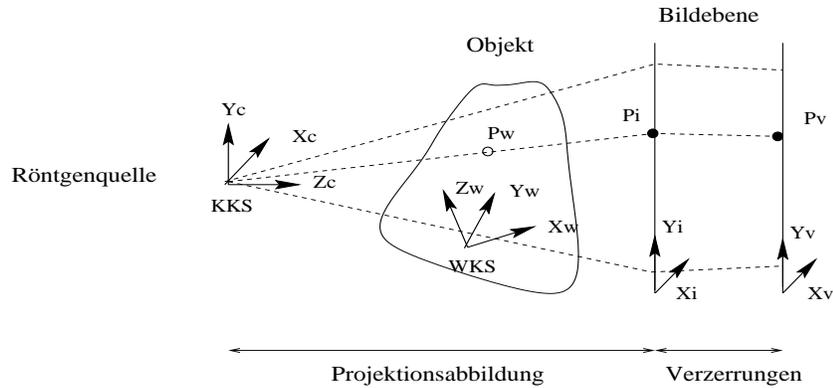
$$P_v = (x_v, y_v)^T : \begin{cases} x_v = f_1(x_i, y_i) \\ y_v = f_2(x_i, y_i) \end{cases} \quad (3)$$

$$f_1(), f_2() : \text{Polynomfunktionen}$$

Diese Aufteilung der Abbildungsbeschreibung in Projektions- und Verzerrungsmodell ermöglicht die Trennung der Kalibrierung der Verzerrungsparameter von der Kalibrierung der Projektionsparameter.

## 2.2 Schätzung der Verzerrungsparameter

Für die Schätzung der Verzerrungsparameter wird ein planarer Kalibrierkörper unmittelbar vor dem Eingangsschirm des Bildverstärkers verwendet. Die Kalibriermarken sind als rechtwinkliges Gitter mit in horizontaler und vertikaler Richtung konstantem Gitterabstand angeordnet. In den Kalibrieraufnahmen erhält man eine verzerrte Abbildung des Kalibriergitters. Aus den Gitterpunkten  $P_v$



**Fig. 2.** Kameramodell

des verzerrten Gitters wird die Lage der Gitterpunkte  $\tilde{P}_i$  desjenigen rechtwinkligen Gitters mit konstantem Gitterabstand geschätzt, das dem verzerrten Gitter am ähnlichsten ist. Dabei wird als Ähnlichkeitsmaß der quadratische Abstand der Gitterpunkte voneinander verwendet. Die Parameter des Verzerrungsmodells werden über ein Optimierungsverfahren bestimmt, daß den Abstand des mit dem Verzerrungsmodell entzerrten Gitters von dem zuvor geschätzten unverzerrten Gitter minimiert.

Die Kalibrierung der Verzerrungsparameter ist abhängig von der Position und Orientierung des Bildaufnehmers zur Röntgenquelle sowie der Lage des Bildverstärkers relativ zum umgebenden Magnetfeld und muß für jede Änderung der Kameraposition neu durchgeführt werden. Wird nur die Lage des Objektes relativ zur Kamera verändert, so muß keine neue Kalibrierung der Verzerrungsparameter erfolgen.

Ausgehend von den Verzerrungsparametern wird der Einfluß der Verzerrungen in den weiteren Aufnahmen mit Hilfe bilinearer (wahlweise cubic-spline) Interpolation kompensiert (Entzerrung).

### 2.3 Schätzung der Parameter des Projektionsmodells

Die Kalibrierung der Parameter des Projektionsmodells erfolgt ausgehend von entzerrten Bildern. Zur Kalibrierung der Projektionsparameter wird ein zusammen mit dem Objekt aufzunehmender, planarer Kalibrierkörper verwendet. Als Kalibrierpunkte dienen kreisförmige Marken, die mit Hilfe eines Ellipsenschätzverfahrens im Bild lokalisiert werden. Für die Kalibrierung werden nur diejenigen Kalibriermarken verwendet, die mit ausreichender Sicherheit bestimmt werden können. Als Gütemaß wird dabei die Güte der Ellipsenschätzung sowie die Ähnlichkeit der als Kalibriermarken geschätzten Ellipsen verwendet. Die Kalibriermarken sind um eine kreisförmige Aussparung im Kalibrierkörper angeordnet. Der Bereich des Objektes, der sich im Strahlengang hinter der Aussparung befindet, kann ohne eine Beeinflussung durch den Kalibrierkörper aus-

gewertet werden, d.h die Verwendung des Kalibrierkörpers führt nur zu einer Verkleinerung des für die weitere Auswertung nutzbaren Bildbereiches, aber nicht zu einer Beeinflussung der Auswertung.

Die Bestimmung der Projektionsparameter erfolgt durch einen Vergleich der im entzerrten Bild lokalisierten Koordinaten  $P_i$  der Kalibrierpunkte mit den durch Projektion mit dem Kameramodell berechneten Bildkoordinaten  $\tilde{P}_i$ . Ausgehend von einer direkten Schätzung werden die Parameter durch Minimierung des Abstands der projizierten Bildpunkte  $\tilde{P}_i$  von den tatsächlichen Bildpunkten  $P_i$  über alle Kalibrierpunkte  $k$  optimiert.

$$\sum_k \|\tilde{P}_i(k) - P_i(k)\|^2 \rightarrow \min \quad (4)$$

Die Optimierung der Parameter erfolgt in mehreren Stufen mit einer schrittweisen Erhöhung der Anzahl der jeweils zu optimierenden Parameter. Die direkte Schätzung der Parameter sowie die nachfolgende Optimierung beruhen auf einer Erweiterung des Verfahrens von Tsai zur Kalibrierung von CCD-Kameras [5].

**Mehrbildkalibrierung** Aufgrund von Abhängigkeiten der Kameraparameter untereinander können schon kleine Fehler bei der Kalibrierpunktlokalisierung im Bild große Fehler bei der Bestimmung der Kameraparameter verursachen. Das Abbildungsverhalten wird in diesen Fällen nur für die Kalibrierkörperebene gut wiedergegeben, mit größer werdenden Abstand zu dieser Ebene treten verstärkt Abweichungen vom realen Abbildungsverhalten auf. Werden die inneren Kameraparameter zwischen den einzelnen Aufnahmen nicht verändert, so ermöglicht die gemeinsame Auswertung der Aufnahmen eine Verbesserung der Kalibrierungsergebnisse (Mehrbildkalibrierung). Dazu werden aufbauend auf den Einzelbildkalibrierungen die inneren Kameraparameter gemeinsam optimiert und die äußeren Parameter entsprechend angepaßt. Das dafür eingesetzte Optimierungsverfahren ist eine Erweiterung des Einzelbildkalibrierungsverfahrens. Das Optimierungskriterium umfaßt die Kalibrierpunkte aller verwendeter Aufnahmen gleichzeitig.

### 3 3D-Analyse

Die 3D-Analyse der Gußfehler beinhaltet die Berechnung der 3D-Lage der Fehler durch ein erweitertes Stereoverfahren sowie des Volumens der Fehler durch die quantitative Auswertung der Strahlungsintensitäten.

#### 3.1 3D-Lagebestimmung

Für die Bestimmung der 3D-Lage der Gußfehler wird die Bewegung des Objektes zwischen den Aufnahmen als Bewegung der Kamera relativ zum festen Objekt interpretiert. Die 3D-Lage einer Fehlerstelle wird durch den Schnittpunkt der von der Röntgenquelle zu den Abbildungen der Fehlerstelle in unterschiedlichen

Aufnahmen gehenden Projektionsstrahlen festgelegt. Für die Zuordnung korrespondierender Fehlerstellen in unterschiedlichen Aufnahmen wird die Einschränkung des Suchbereichs durch die Bedingungen der Epipolargeometrie berücksichtigt. Die Projektionsstrahlen sowie die Einschränkungen durch die Epipolargeometrie werden mit Hilfe des Kameramodells berechnet. Mit diesem Verfahren kann die 3D-Lage von Fehlerstellen aus einer beliebigen Kombination zweier oder mehrerer Aufnahmen berechnet werden.

### 3.2 Volumenbestimmung

Das Volumen der Gußfehler wird durch die Auswertung der Strahlungsintensitäten bestimmt. Die Dämpfung der Röntgenstrahlung in einem Material ist exponential von der im Material zurückgelegten Wegstrecke  $s$  abhängig. Aufgrund der Abhängigkeit des linearen Schwächungskoeffizienten  $\mu$  von der Strahlungsenergie  $E$  wird zur Berechnung der Strahlungsintensität über den gesamten Energiebereich der Strahlung integriert.

$$Ip(s) = \int Io(E)D(E) * \exp \{ -(\mu(E) * s) \} dE \quad (5)$$

$s$ : Materialdicke in Durchstrahlungsrichtung  
 $Ip(s)$ : Intensität im Bild  
 $Io(E)$ : Strahlungsintensität vor dem Objekt  
 $D(E)$ : Detektorempfindlichkeit  
 $\mu(E)$ : linearer Schwächungskoeffizient

Liegt ein Gußfehler vor, so ist die Intensität abhängig von der Fehlerausdehnung  $d_F$  in Strahlungsrichtung und der Differenz der Schwächungskoeffizienten von Gußmaterial  $\mu_{Mat}$  und Luft  $\mu_{Luft}$  erhöht.

$$Ip_F(s, d_F) = \int Io(E)D(E) * \exp \{ -\mu_{Mat}(E) * s + (\mu_{Mat}(E) - \mu_{Luft}(E)) * d_F \} dE \quad (6)$$

$d_F$ : Fehlerausdehnung in Durchstrahlungsrichtung  
 $Ip_F(s, d_F)$ : Intensität im Bild im Bereich eines Gußfehlers

Das Spektrum der Strahlung einer Mikrofokusröntgenröhre wird durch die gewählte Beschleunigungsspannung  $U_B$  bestimmt. Eine von  $U_B$  abhängige Kalibrierfunktion  $\tilde{\mu}(s, d_F, U_B)$  führt daher auf folgende Näherung zur Berechnung der Fehlerausdehnung  $d_F$  in Durchstrahlungsrichtung.

$$d_F \approx 1 / \tilde{\mu}(s, d_F, U_B) \ln \{ Ip_F / Ip \} \quad (7)$$

Die Kalibrierfunktion  $\tilde{\mu}(s, d_F, U_P)$  wird aus Kalibrieraufnahmen eines Testkörpers mit Fehlerstellen bekannter Tiefenausdehnung bestimmt.

Zur Volumenbestimmung werden entsprechend Gleichung 7 die Intensitäten in den Aufnahmen in Grauwerte proportional zur Fehlerausdehnung umgerechnet. Dazu wird die Intensitätsverteilung, die sich im Bereich der Fehlerstellen ohne Fehler ergeben würde, ausgehend von der Intensitätsverteilung in der Umgebung der Fehlerstellen geschätzt. Das Volumen einer Fehlerstelle wird durch Integration der Fehlerausdehnung über die Fläche des Fehlers im Bild bestimmt. Mit Hilfe der zuvor berechneten 3D-Lage wird dabei die perspektivische Vergrößerung der Fläche im Bild gegenüber der tatsächlichen Fehlerfläche senkrecht zur Durchstrahlungsrichtung berücksichtigt.

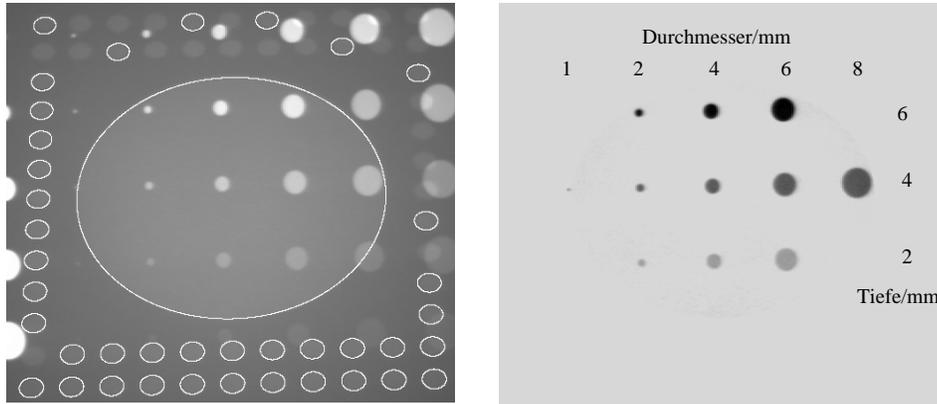
## 4 Ergebnisse

Für die Durchführung der Experimente standen eine Mikrofokusröntgenröhre mit einem Brennfleckdurchmesser zwischen 0.01mm und 0.06mm, ein Bildverstärker mit einem Durchmesser des sensitiven Bereichs des Eingangsschirms von 225mm sowie eine CCD-Kamera mit Framegraber mit einer Bildgröße von 768\*576 Pixel und einer Grauwertaufösung von 8 bit zur Verfügung.

Um die bei der 3D-Lage- und Volumenberechnung erreichbaren Genauigkeiten zu überprüfen, werden Aufnahmen eines Testkörpers unter Durchstrahlungswinkeln zwischen  $-35^\circ$  und  $35^\circ$  bei einer perspektivischen Vergrößerungen zwischen etwa 1.1 und 1.4 ausgewertet. Der Winkel von  $0^\circ$  entspricht einer senkrechten Durchstrahlungsaufnahme. Die Lage von Röntgenquelle und Bildverstärker wird zwischen den Aufnahmen nicht verändert. Material und Abmessungen des Testkörpers orientieren sich an einer für weiteren Untersuchungen zur Verfügung stehenden Versuchskokille für den Leichtmetallkokillenguß [1]. Fehlerstellen werden im Testkörper durch Bohrlöcher unterschiedlicher Ausdehnung und unterschiedlicher Tiefe simuliert. In Abbildung 3 ist links der Testkörper zusammen mit dem Kalibrierkörper unter einem Durchstrahlungswinkel von etwa  $0^\circ$  dargestellt. Die bei der Kalibrierung detektierten und ausgewählten Kalibriermarken sind durch Ellipsen gekennzeichnet. Im mittleren Bildbereich ist die kreisförmige Aussparung des Kalibrierkörpers, die den ohne Beeinträchtigung durch den Kalibrierkörper auswertbaren Objektbereich definiert, zu erkennen. Das rechte Bild zeigt die entsprechend Gleichung 7 für diesen Bereich bestimmten Fehlertiefen in Durchstrahlungsrichtung. Größere Fehlertiefen sind dunkler dargestellt.

### 4.1 Kalibrierung

Die Aufnahmen werden zunächst entzerrt und kalibriert. Mit Hilfe des Entzerrungsverfahrens werden die maximal auftretenden Verzerrungen von mehr als 11 Pixel in den Originalbildern auf maximal 0.3 Pixel in den entzerrten Bildern gesenkt (Pixelgröße etwa  $0.28mm * 0.28mm$ ).



**Fig. 3.** Testkörper mit Kalibriermuster

Nach der Kalibrierung beträgt die Abweichung der mit dem Modell in die Bildebene projizierten Kalibrierpunkte von den tatsächlichen Abbildungen in der Bildebene (2D-Fehler) maximal 0.6 Pixel, der Abstand der 3D-Kalibrierpunkte von den Projektionsstrahlen, die von der Röntgenquelle zu den zugehörigen Bildpunkten verlaufen (3D-Fehler) weniger als 0.3mm.

#### 4.2 3D-Lage- und Volumenbestimmung

Die 3D-Lage einer Fehlerstellen wird schon bei einer Differenz von  $15^\circ$  zwischen den Durchstrahlungswinkeln der Aufnahmen mit maximalen Abweichungen von der tatsächlichen Lage von weniger als 0.4mm bestimmt. Die Abweichungen sind unabhängig von der Lage der Fehlerstellen im Testkörper. Eine Vergrößerung der Differenz zwischen den Durchstrahlungswinkeln bringt nur geringfügige Verbesserungen der Ergebnisse. Wird auf das Mehrbildkalibrierungsverfahren verzichtet, so treten bei der Lagebestimmung Fehler von mehr als 1mm auf. Dies zeigt, daß der erhöhte Aufwand für die Mehrbildkalibrierung gerechtfertigt ist.

Das Volumen der Fehlerstellen wird mit Abweichungen von unter 10% des Fehlervolumens bestimmt. Die Abweichungen sind ebenfalls unabhängig von der räumlichen Lage der Fehlerstellen im Testkörper. Wird bei der Bestimmung der Kalibrierfunktion zur Intensitätsauswertung vereinfachend von monoenergetischer Strahlung ausgegangen, so treten bei der Volumenbestimmung Fehler von bis zu 20% auf. D.h., die häufig verwendete Annahme monochromatischer Strahlung ist für die Intensitätsauswertung bei der hier betrachteten Anwendung nicht zulässig.

Die Ergebnisse der Versuche mit dem Testkörper zeigen, daß die Kalibrierung eine zuverlässige 3D-Analyse ermöglicht und eine präzise mechanische Positionierung der Objekte ersetzen kann. Das System kann durch die Wahl des Vergrößerungsfaktors der Projektionsabbildung an verschiedene Fehlergrößen

angepaßt werden. Dabei muß berücksichtigt werden, daß der mit einer Aufnahme erfaßte Objektbereich mit zunehmender Vergrößerung kleiner wird. Das vorgestellte Verfahren zur 3D-Analyse von Gußfehlern ist auch auf andere Anwendungsbereiche, in denen 3D-Informationen aus Röntgenprojektionen benötigt werden, übertragbar.

## References

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. Doering, E.R.; Basart, J.P.; Gray, J.N.: Three-dimensional flaw reconstruction and dimensional analysis using a real-time X-ray imaging system. NDT+E International, Vol. 26(1), 1993, S. 7–17.
3. Hanke, R.; Böbel, F.: Determination of material flaw size bei intensity evaluation of polychromatic X-ray transmission. NDT+E International, Vol. 25(2), 1992, S. 87–93.
4. Schueler, B.; Xiaoping H.: Correction of image intensifier distortion for three-dimensional x-ray angiography. SPIE, Vol. 2432, Physics of Medical Imaging, 1995, S. 272–279.
5. Tsai, R.Y.: A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shell tv cameras and lenses. IEEE J.Robotics Automation, Vol. RA-3(4), August 1988, S. 323-344.