

Verfolgung von Gußfehlern in einer digitalen Röntgenbildsequenz: Eine neue Methode zur Automatisierung der Qualitätskontrolle von Gußteilen

Domingo Mery und Dieter Filbert, Berlin

Schlagwörter: Gußfehlererkennung, Qualitätskontrolle, Röntgenbildsequenzen, Röntgendurchleuchtungsprüfung, Epipolargeometrie

In der Automobilindustrie gibt es Leichtmetallgußteile, die als sicherheitsrelevant gelten. Die Qualitätskontrolle von Gußteilen erfolgt mit Hilfe der Röntgendurchleuchtungsprüfung. Ihre Aufgabe ist die Untersuchung auf Gußfehler, die sich im Innern des Teiles befinden und somit von Außen nicht visuell zu erfassen sind. Seit einigen Jahren werden Röntgenprüfanlage mit Bildverarbeitung in der Automobilindustrie eingesetzt. Detektionsansätze schätzen ein Referenzbild aus jedem aufgenommenen Röntgenbild. Ein Gußfehler wird dann detektiert, wenn eine große Differenz zwischen Röntgenbild und Referenzbild auftritt. Diese Methoden sind von der Struktur des Teiles abhängig, d.h. für jedes Gußteil, das eine neue Struktur besitzt, müssen die Parameter des Ansatzes berechnet werden. In dieser Arbeit wird eine neuartige Methode zur automatischen Gußfehlererkennung vorgestellt: Eine Sequenz von Röntgenbildern wird aus verschiedenen Positionen des Teiles aufgenommen. In jedem Röntgenbild der Sequenz werden hypothetische Gußfehler gesucht. Es wird dann versucht, diese hypothetische Fehler in der Bildsequenz zu verfolgen. Diejenigen, die sich verfolgen lassen, werden als echte Gußfehler und die anderen als Fehldetektionen angenommen. Die potentielle Nutzung des neuen Verfahrens kann in der Erhöhung des Durchsatzes der automatischen Gußfehlererkennung liegen, wenn geprüft wird, ob sich mögliche Materialfehler in der Röntgenbildsequenz verfolgen lassen. Mit dieser Methode kann die Anzahl der Fehldetektionen stark reduziert werden. Die Methode hängt nicht von der Struktur des Gußteiles ab.

Flaw Tracking in a Sequence of Digital X-Ray Images: A New Method of Automated Quality Control of Castings

This paper presents a new method of inspecting aluminum castings automatically from a monocular sequence of radioscopic images taken at different positions

of the casting. The classic image processing methods for flaw detection of aluminum castings consist of modified median filters which generate an error-free image from each taken radioscopic image at programmed positions. These images are compared with each other, and flaws are detected at pixels where the difference between the images is significant. However, the configuration of each filter depends strongly on the size, form and position of the structure of the casting under test. We propose a new technique to automated flaw detection of aluminum castings that uses a single filter and non a priori information of the structure of the specimen under test. First, the method identifies potential defects in each image of the sequence and second, it tracks them from image to image. The key idea of this work is to consider as false detections those potential defects, which cannot be tracked in the sequence. Using this method the real flaws can be tracked and detected with high probability and the number of false detections can be significantly reduced.

1 Einleitung

Zur Automatisierung der Qualitätskontrolle von Gußteilen werden in den achtziger Jahren Röntgenprüfanlagen in der Automobilindustrie eingesetzt [4]. Eine automatische Röntgenprüfanlage (s. Bild 1) besteht aus einer Röntgenfernsehleinrichtung mit Röntgenquelle und bildgebendem System (Bildverstärker und CCD-Kamera); einem Manipulator zur Handhabung des Prüflings und einem Bildverarbeitungsrechner. Die Aufgabe des Rechners ist die automatische Klassifizierung der Prüflinge nach Gutteilen und Ausschussteilen.

Bei der Röntgendurchleuchtungsprüfung werden in der Regel monokulare Projektionen aus verschiedenen Positionen des Prüflings aufgenommen. Die in der Praxis eingesetzten Detektionsansätze [4; 3; 8; 7] berechnen ein Referenzbild aus jedem aufgenommenen Röntgenbild. Ein Gußfehler wird dann detektiert, wenn eine große Differenz zwischen Röntgenbild und Referenzbild auftritt. Diese Methoden unterscheiden sich in der Art der Filterung, die zur Berechnung des Referenzbildes angewendet wird. Allerdings suchen sie nach Mate-

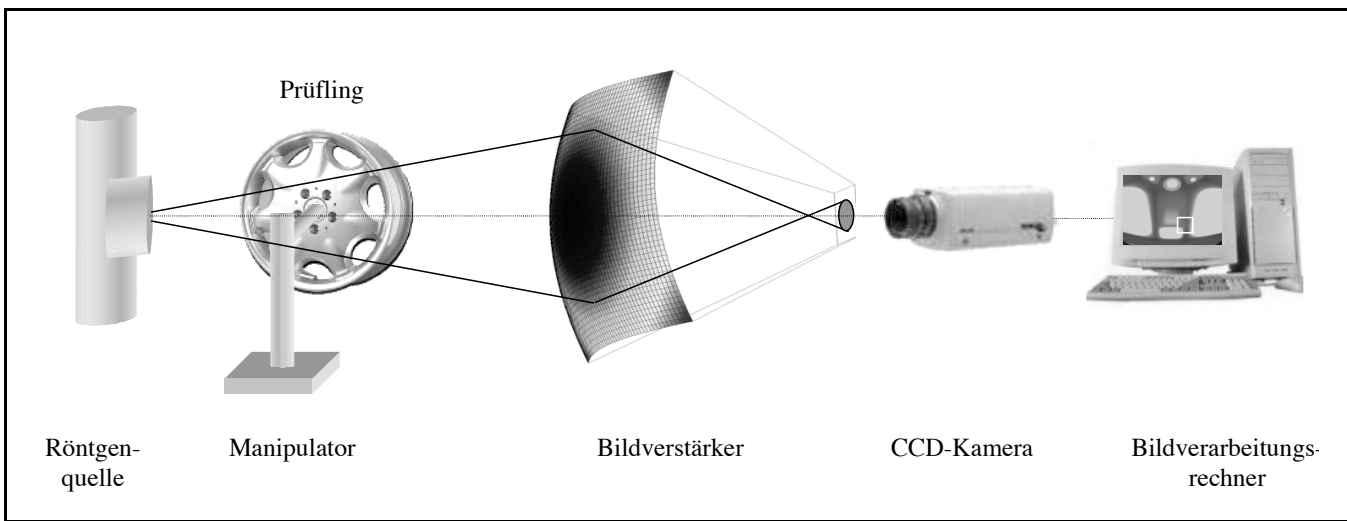


Bild 1: Automatische Röntgenprüfanlage.

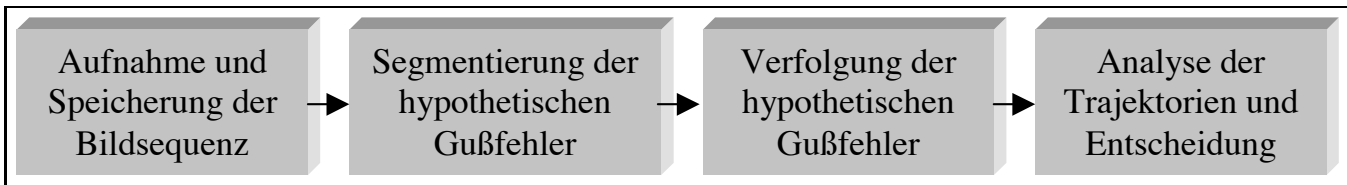


Bild 2: Verarbeitungsschritte der GuSSfehlerdetektion.

rialfehlern in jedem digitalisierten Röntgenbild, ohne zu berücksichtigen, daß die Fehler in mehreren Projektionen zum Vorschein kommen können. Diese zusätzliche Information, die normalerweise bei jedem Manipulator zur Verfügung steht, kann verwendet werden, um herauszufinden, ob die in den einzelnen Bildern detektierten Fehler echte Gußfehler oder Fehldetektionen sind.

In dieser Arbeit wird eine neuartige Methode zur automatischen Gußfehlererkennung vorgestellt, die eine Sequenz von Röntgenbildern verarbeitet. Es handelt sich um ein Verfahren, das die Korrespondenz zwischen den in den Einzelbildern segmentierten Gußfehlern in Betracht zieht.

Der vorliegende Beitrag gliedert sich in vier Abschnitte. Die Beschreibung des Verfahrens ist Gegenstand des 2. Abschnittes, in dem die einzelnen Verfahrensschritte erklärt sind. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 3 dargestellt. Abschnitt 4 beschäftigt sich mit den Schlußfolgerungen.

2 Beschreibung des Verfahrens

Das Verfahren orientiert sich daran, wie ein Prüfer ein Gußteil auf Materialfehler untersucht. Statt Einzelbildern betrachtet er eine Bildsequenz. Der Prüfling bewegt sich in der Prüfanlage und die Augen des Prüfers verfolgen die Details, die auf dem Bildschirm zum Vorschein kommen. Ein Gußfehler wird dann detektiert, wenn die Augen den Fehler in der Bildsequenz verfolgen können. Dieses Verfahren erlaubt dem Menschen jeden Prüfling unabhängig von der konstruktiven Struktur des Gußteiles zu untersuchen.

Das Blockdiagramm des entwickelten Verfahrens ist in Bild 2 dargestellt. Zunächst wird die Folge der Röntgenbilder des Prüflings aufgenommen und gespeichert. Im zweiten Schritt werden hypothetische Gußfehler in jedem gespeicherten Bild der Sequenz segmentiert. Anschließend werden die zuvor segmentierten Gußfehler in der gesamten Bildsequenz verfolgt. Danach werden die Trajektorien der verbundenen Segmentierungen gesucht und analysiert. Schließlich wird ein Gußfehler detektiert, wenn die gefundenen Trajektorien ein Kriterium erfüllen. Im folgenden werden die Segmentierung hypothetischer Gußfehler, die Verfolgung und die Analyse der Trajektorien erläutert.

2.1 Aufnahme und Speicherung

Die Kamera nimmt das vom Bildverstärker gelieferte Röntgenbild auf und führt das analoge Videosignal einem Rechner zu. Die Frame-Grabber-Karte des Rechners tastet es ab und bildet eine Sequenz von digitalisierten Röntgenbildern, die auf dem Rechner gespeichert wird. Die Bildsequenz wird während der Bewegung des Prüflings ohne Integration aufgenommen. Die aufgenommenen Röntgenbilder sind deshalb verrauscht.

In dieser Arbeit besteht eine Bildsequenz aus 72 digitalen Röntgenbildern, deren Auflösung 576 Zeilen \times 768 Spalten beträgt. Die Grauwertauflösung geht von $2^8 = 256$ Stufen aus. Zur Verfolgung ist es notwendig, die genaue Position des Prüflings bei jeder Aufnahme zu registrieren. Diese Information steht im Manipulator online zur Verfügung.

Als Beispiel zeigt Bild 3 acht Röntgenbilder einer aufgenommenen Sequenz einer BMW-Alufelge. In die-

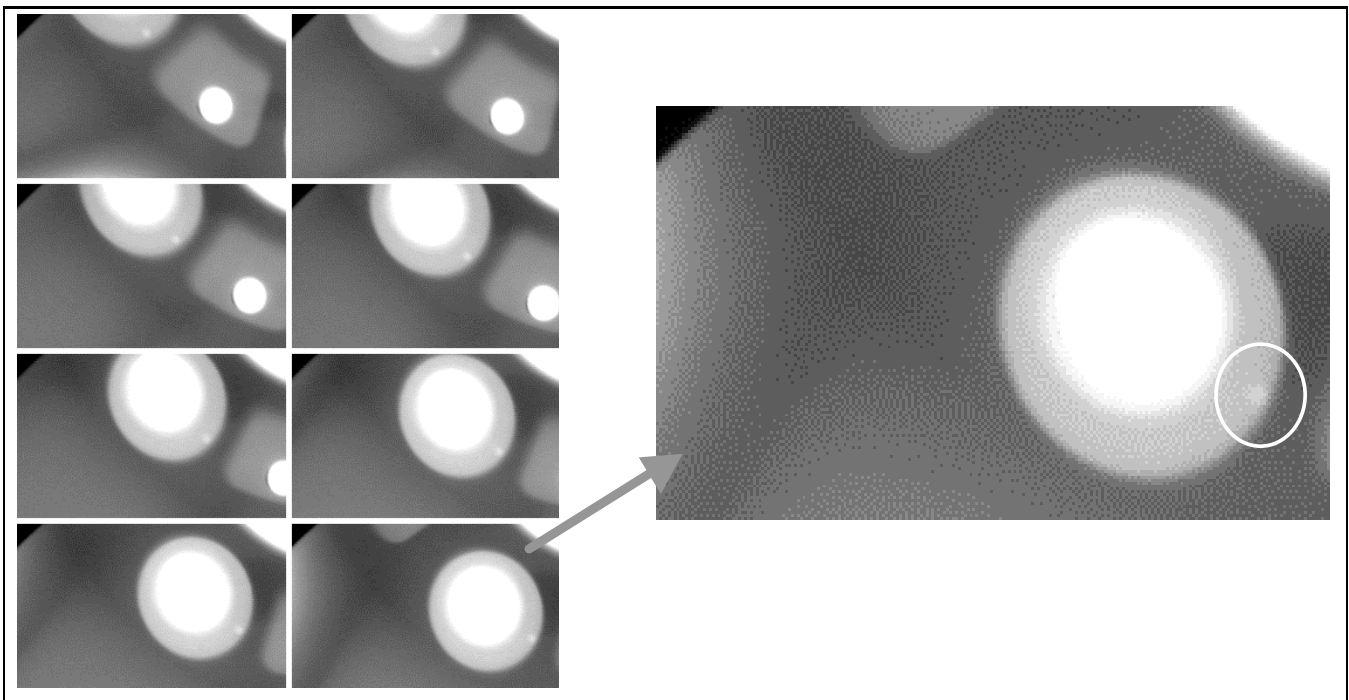


Bild 3: Aufnahme und Speicherung einer Bildsequenz. Das Gußteil besitzt einen Gußfehler an der Kante der kreisförmigen Struktur (s. Vergrößerung des letzten Bildes).

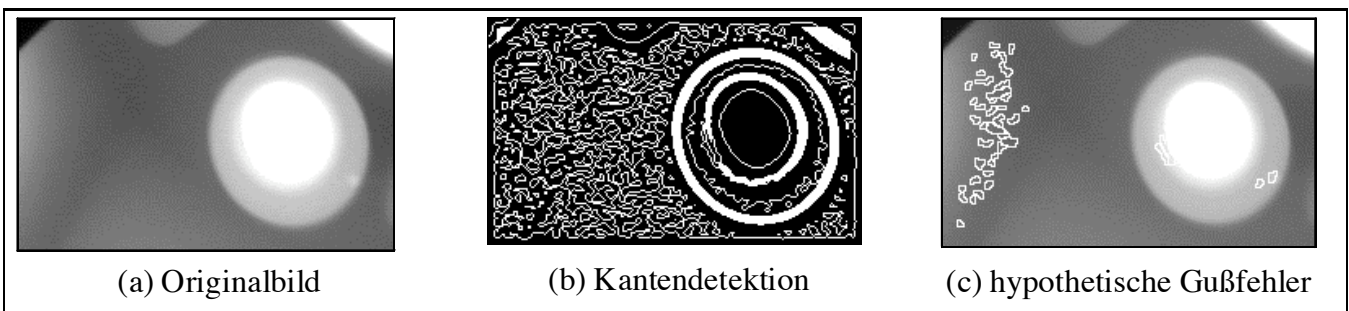


Bild 4: Verfahren zur Segmentierung hypothetischer Gußfehler.

ser Sequenz gibt es einen kleinen Gußfehler, dessen Detektion in den folgenden Abschnitten beschrieben wird.

2.2 Segmentierung hypothetischer Gußfehler

Die Detektion hypothetischer Gußfehler findet in jedem Bild der Sequenz statt. In diesem Schritt wird die Korrespondenz zwischen Bildern noch nicht berücksichtigt. Der Algorithmus zur Segmentierung hypothetischer Gußfehler besteht aus zwei Schritten, die in Bild 4 dargestellt sind. Zunächst werden die Kanten jedes Röntgenbildes der Sequenz detektiert. Die Kanten entsprechen den Konturen, auf denen starke Änderungen der Grauwerte im Röntgenbild auftreten. In dieser Arbeit wird ein auf Laplacian-of-Gaussian [1] basierendes Kantendetektionsverfahren angewendet, das die Nulldurchgänge der zweiten Ableitung des nach Gauß tiefpaßgefilterten Bildes detektiert. Dazu werden die Pixel markiert, bei denen der Gradient größer als ein Schwellwert ist (s. dicke Kanten in Bild 4b). Schließlich werden die durch die Kanten gebildeten Regionen gesucht, die geschlossen sind, eine bestimmte Flächengröße besitzen und einen hohen Kontrast gegenüber der Umgebung ha-

ben.

Durch dieses Segmentierungsverfahren werden nicht nur die echten Gußfehler detektiert, sondern auch andere Regionen, die keine Gußfehler sind. Die detektierten Regionen werden in dieser Arbeit als hypothetische Gußfehler bezeichnet. Bild 7 stellt die hypothetischen Gußfehler (s. weiße Regionen) der Sequenz von Bild 3 dar, die nach diesem Verfahren detektiert wurden. Die Anzahl der hypothetischen Gußfehler beträgt in diesem Beispiel 110. Der echte Gußfehler wurde nur in 4 Röntgenbildern segmentiert (s. Bilder 3, 4, 6 und 8 in Bild 7). In den nächsten Abschnitten wird die Anzahl der Fehldetektionen reduziert und eliminiert.

2.3 Verfolgung

Ausgehend von einer segmentierten Region A_i des Sequenzbildes i werden alle segmentierten Regionen der nächsten drei Sequenzbilder ($A_{i+1}, B_{i+1}, C_{i+1}, \dots, A_{i+2}, B_{i+2}, C_{i+2}, \dots, A_{i+3}, B_{i+3}, C_{i+3}, \dots$) als mögliche Nachfolger untersucht (s. Bild 5). Die Verfolgung geschieht durch ein Matching-Verfahren, das zwei Regionen miteinander verbindet, wenn sie die epipolare Bedingung

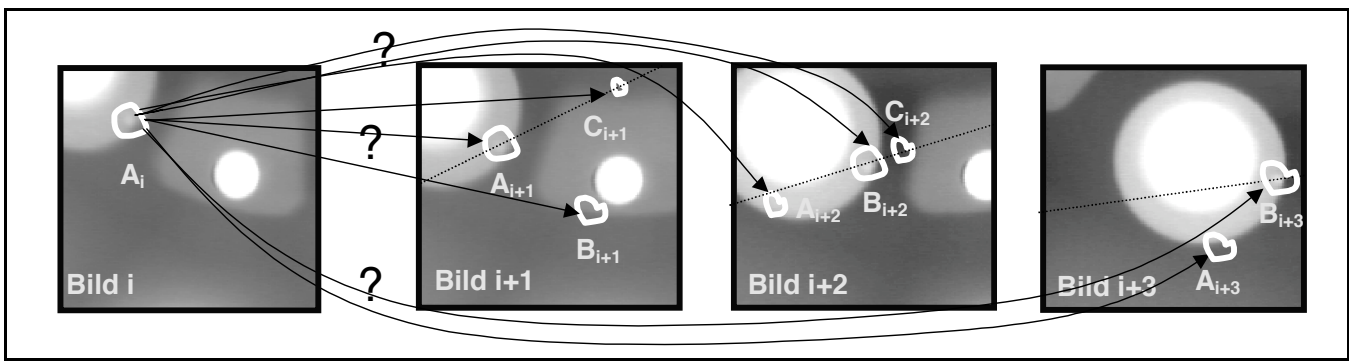


Bild 5: Verfolgung der hypothetischen Gußfehler (- - - Epipolarlinien des Schwerpunktes von A_i)

und das Kriterium der Ähnlichkeit erfüllen:

Epipolare Bedingung: Die Korrespondenz zwischen zwei verschiedenen Projektionen eines Objektes wird durch die Epipolare Geometrie erläutert [2]. Dies ist in Bild 6 deutlich gezeigt: Wenn der Projektionspunkt \mathbf{x}_i eines 3-D Punktes \mathbf{P} auf der Projektionsebene i erscheint, muß \mathbf{P} auf der Geraden $\langle \mathbf{Q}_i, \mathbf{x}_i \rangle$ liegen, die durch die Verbindung des optischen Zentrums \mathbf{Q}_i der Projektion i und dem Projektionspunkt \mathbf{x}_i definiert ist. Alle korrespondierenden Punkte von \mathbf{x}_i auf der Projektionsebene j müssen deshalb auf der Projektion dieser Geraden durch das optische Zentrum \mathbf{Q}_j liegen, d.h. der Projektion von $\langle \mathbf{Q}_i, \mathbf{x}_i \rangle$ durch \mathbf{Q}_j auf die Projektionsebene j . Die projizierte Gerade heißt *Epipolarlinie*. Bei der Röntgendurchleuchtungsprüfung sind die Projektionen normalerweise monokular. Dazu weist der Bildverstärker der Röntgenprüfanlage eine Krümmung auf, die eine Verzerrung des Röntgenbildes verursacht. Ein geometrisches Modell kann angewendet werden, das die relative Bewegung zwischen Kamera und Prüfling berücksichtigt und den Eingangsschirm des Bildverstärkers als eine nichtlineare Funktion modelliert [5]. Statt epipolaren Geraden erhält man in diesem Fall epipolare Kurven.

Die epipolare Bedingung besagt, daß ein Punkt \mathbf{x}_j des Sequenzbildes j die Korrespondenz des Punktes \mathbf{x}_i des Bildes i nur dann sein kann, wenn \mathbf{x}_j auf der Epipolarlinie von \mathbf{x}_i liegt. Die Gleichung der Epipolarlinie in Projektionsebene j lautet:

$$\mathbf{x}_j^T \mathbf{F}_{ji} \mathbf{x}_i = 0 \quad (1)$$

dabei ist \mathbf{F}_{ji} die sogenannte *Essential-Matrix* der zwei Projektionen, die unabhängig von \mathbf{x}_i und \mathbf{x}_j ist [2]. Die Korrespondenzsuche beschränkt sich auf die Untersuchung der Punkte auf der Epipolarlinie. Im Beispiel von Bild 5 erfüllen nur die Regionen A_{i+1} , C_{i+1} , B_{i+2} , C_{i+2} und B_{i+3} diese Bedingung. Hier werden die Schwerpunkte der Regionen betrachtet.

Kriterium der Ähnlichkeit: Zwei Regionen, die die epipolare Bedingung erfüllen, werden miteinander verbunden, wenn sie *ähnlich* sind. Um ein Ähnlichkeitsmaß zu bestimmen, werden n rotationsinvariante Merkmale jeder Region extrahiert, wie z.B. Flächengröße, Mittelwert des Grauwertes, Formfaktor, usw. Man vergleicht

diese Merkmale und verbindet nur solche Regionen, bei denen alle Merkmale im erforderlichen Maße ähnlich sind. Das Ähnlichkeitsmaß zweier Regionen R_1 und R_2 ist in dieser Arbeit definiert als

$$S(R_1, R_2) = \sqrt{\sum_{k=1}^n [m_k^{R_1} - m_k^{R_2}]^2} \quad (2)$$

wobei m_k^X der k -te Merkmalswert der Region X ist. Für *ähnlich* wird entschieden, wenn S kleiner als ein Schwellwert ist. Im Beispiel von Bild 5 erfüllt die Region C_{i+1} dieses Kriterium nicht, weil ihre Flächengröße im Vergleich zu dem entsprechenden Merkmal der Region A_i zu klein ist. Da die Region C_{i+2} viel dunkler als die Region A_i ist, erfüllt auch diese ebenfalls nicht das Kriterium der Ähnlichkeit. In diesem Fall sind die möglichen Verfolgungen der Region A_i die Regionen A_{i+1} , B_{i+2} , und B_{i+3} .

In Bild 7 werden die nach dem Matching-Verfahren gefundenen Trajektorien dargestellt. Wenn die hypothetischen Gußfehler die erwähnten Kriterien nicht erfüllen, werden sie eliminiert. Die Verfolgung des echten Gußfehlers ist hier gewährleistet. Es gibt andere unerwünschte Verfolgungen von Fehldetektionen, die im nächsten Schritt entfernt werden.

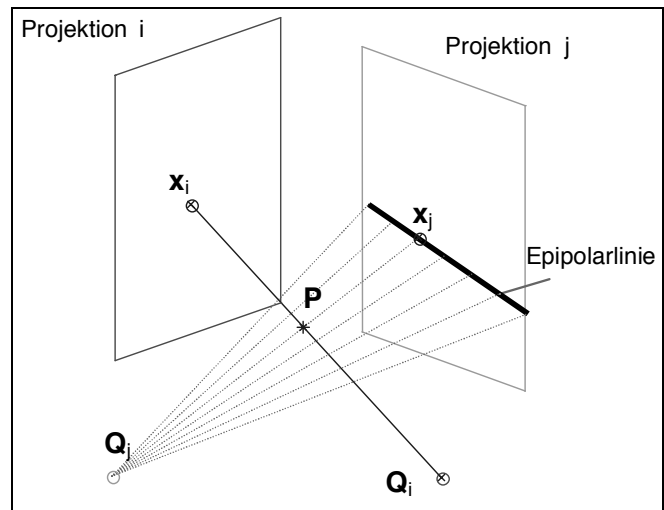


Bild 6: Epipolare Geometrie für zwei Projektionen

2.4 Analyse der Trajektorien und Entscheidung

Aus den zunächst bestimmten Verbindungen von zwei Regionen kann man untersuchen, ob es Trajektorien

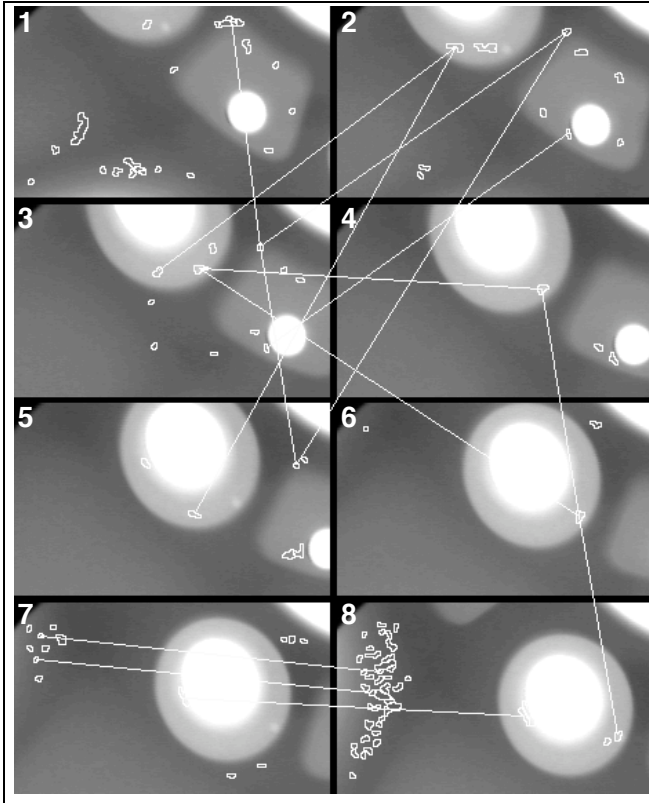


Bild 7: Hypothetische Fehler und ihre Verbindungen in zwei Bildern.

mit drei Regionen gibt, deren Schwerpunkte die Projektionen ein und desselben 3D-Punktes \mathbf{P} sind. D.h., aus den im vorigen Schritt gefundenen Verbindungen $\mathbf{A}_i \leftrightarrow \mathbf{A}_{i+1}$ und $\mathbf{A}_{i+1} \leftrightarrow \mathbf{B}_{i+3}$ wird nun mit Hilfe einer *Least-Squares*-Schätzung der 3D-Punkt \mathbf{P} geschätzt, der die Schwerpunkte der Regionen \mathbf{A}_i , \mathbf{A}_{i+1} und \mathbf{B}_{i+3} , $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3)$ erzeugen würde. Die Projektion von \mathbf{P} auf die entsprechenden Bildebenen liefert die Schätzscherpunkte $(\hat{\mathbf{x}}_1, \hat{\mathbf{x}}_2, \hat{\mathbf{x}}_3)$. Es wird dann angenommen, daß $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3)$ Korrespondenzpunkte sind, wenn ihre Abweichung von $(\hat{\mathbf{x}}_1, \hat{\mathbf{x}}_2, \hat{\mathbf{x}}_3)$ klein ist, d.h. wenn

$$\sum_{k=1}^3 \|\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k\| < \varepsilon \quad (3)$$

Dazu wird untersucht, ob \mathbf{P} sich innerhalb des Raumes des Gußteiles befindet. Ist das der Fall, dann wird die Trajektorie mit drei Regionen $\mathbf{A}_i \leftrightarrow \mathbf{A}_{i+1} \leftrightarrow \mathbf{B}_{i+3}$ akzeptiert. Bild 8 stellt die Trajektorien dar, die dieses Kriterium erfüllen. Das gleiche Verfahren wird wiederholt, um Trajektorien mit vier Regionen ausfindig zu machen. Das Ergebnis ist in Bild 9 gezeigt.

In dieser Arbeit wird ein Gußfehler detektiert, wenn er sich in vier Sequenzbildern verfolgen läßt. Dieses Verfahren macht die Detektion robuster gegenüber dem in [6] vorgestellten Detektionsansatz, bei dem ein Gußfehler in mindestens vier aufeinanderfolgenden Sequenzbildern segmentiert werden und eine elliptische Trajektorie bilden mußte.

Der 3D-Punkt \mathbf{P} kann in die Röntgenbilder, bei denen der echte Gußfehler nicht segmentiert wurde, projiziert

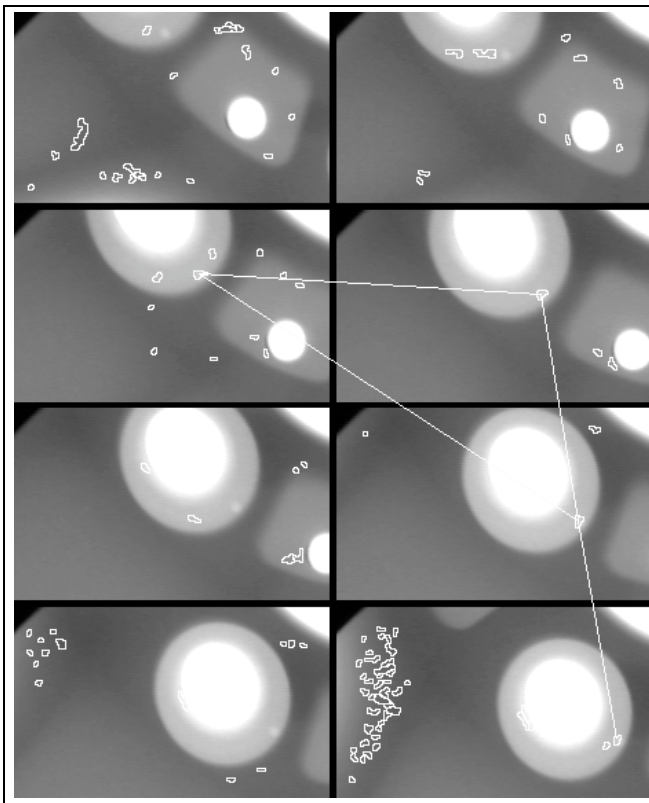


Bild 8: Verfolgung der hypothetischen Gußfehler in drei Bildern.

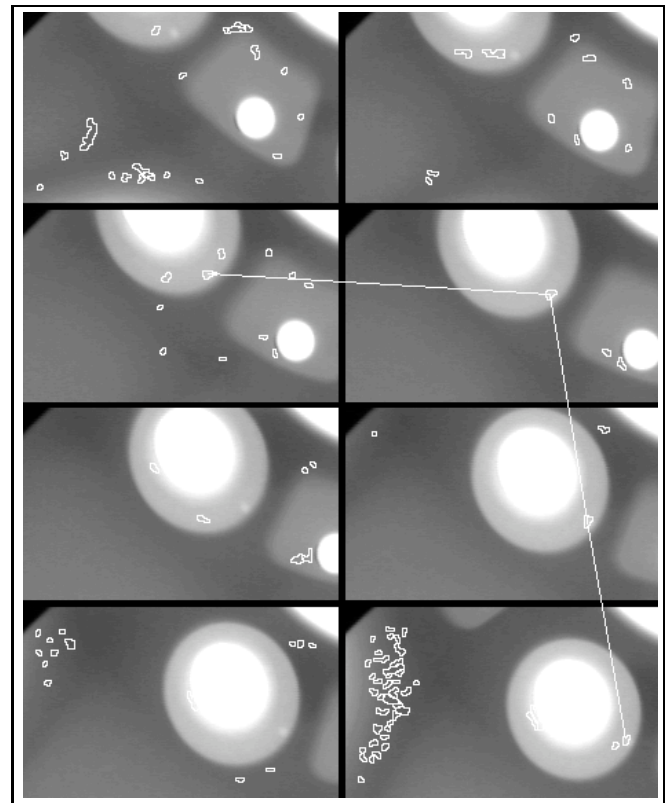


Bild 9: Verfolgung der hypothetischen Gußfehler in vier Bildern.

werden. Bild 10 stellt das Ergebnis der Detektion dar.

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, daß dieses Verfahren für jeden Prüfling benutzt werden kann, ohne aufwendige Konfiguration durchzuführen. Die Anzahl der Fehldetektionen wird stark reduziert, wie in Bild 10 dargestellt wurde. In unserem Beispiel wird der echte Gußfehler detektiert. Die Fehldetektionen lassen sich eliminieren. Mit diesem Verfahren wurde eine Alufelge auf Materialfehler untersucht. Die Felge wurde vorher durch Bohrungen mit gußfehlerähnlichen Fehlern versehen. Somit ist die Lage der Gußfehler bekannt und kann zur anschließenden Auswertung der Ergebnisse des Detektionsansatzes herangezogen werden. Allerdings handelt es sich auch um Fehler in *schwierigen* Positionen, z.B. im Bereich von Objektkanten oder auch um sehr kleine Fehler ($\emptyset = 2.5 \sim 7.5$ mm). Die Ergebnisse sind in Tab. 1 zusammengefaßt: Es werden 11 von 12 Gußfehlern (91,67%) detektiert. In dieser Untersuchung gibt es nur eine Fehldetektion (8,33%).

4 Schlußfolgerungen

Wegen der Positionierungsungenauigkeit und dem an die Struktur angepaßten Detektionsfilter sind die klassischen Methoden zur automatischen Gußfehlererkennung normalerweise inflexibel gegenüber unterschiedlichen Randbedingungen, wie Prüflingsstruktur und Pa-

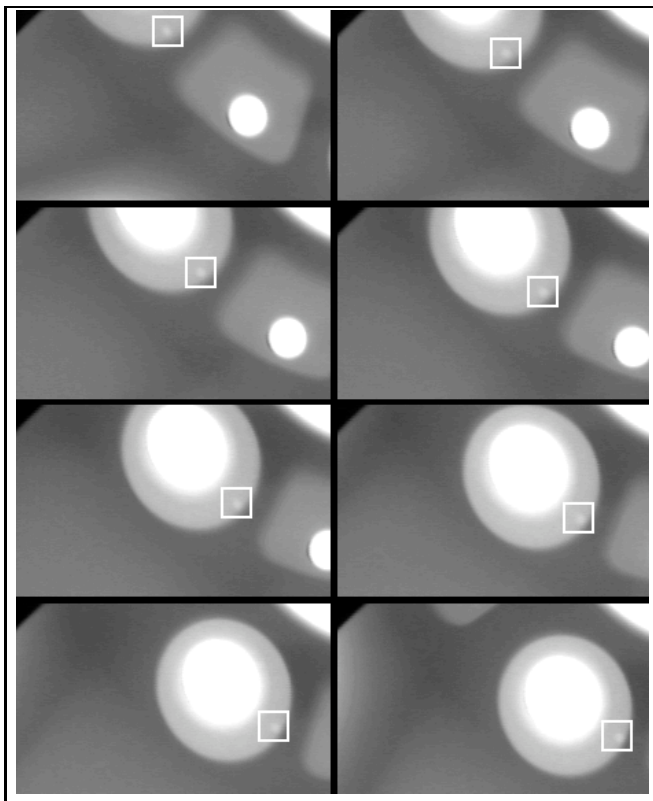


Bild 10: Detektion des Gußfehlers.

Bildsequenz	Röntgenbilder	Gußfehler	hypo. Fehler	GD	FD
1	10	2	93	2	0
2	8	1	110	1	0
3	9	3	153	3	0
4	8	1	185	1	0
5	6	1	304	1	0
6	6	1	41	1	0
7	15	3	809	2	1

Tabelle 1: Ergebnisse der automatischen Gußfehlererkennung (GD: Gute Detektionen, FD: Fehldetektionen).

parameterkonfiguration. D.h., einerseits müssen die Parameter des angepaßten Detektionsfilters bei jedem Standbild eines neuen Prüflings wieder konfiguriert werden und andererseits hängt der Erfolg des Detektionsansatzes stark von der Art und Position des Prüflings ab.

Das vorgestellte Verfahren hat den großen Vorteil der Unabhängigkeit von der Struktur und der Positionierung des Prüflings. Statt Einzelbildern wird in dieser Arbeit eine Bildsequenz verarbeitet. Die Korrespondenz zwischen den in jedem Einzelbild detektierten Gußfehlern wird in Betracht gezogen, um die Robustheit der Detektion zu erhöhen.

Die potentielle Nutzung des neuen Verfahrens kann in der Erhöhung des Durchsatzes der automatischen Gußfehlererkennung liegen, wenn geprüft wird, ob sich mögliche Materialfehler in der Röntgenbildsequenz verfolgen lassen. Mit dieser Methode kann die Anzahl der Fehldetektionen stark reduziert werden.

Danksagung

Die Verfasser möchten sich bei dem Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) und der Firma YXLON International X-Ray GmbH in Hamburg für die Unterstützung dieser Forschung bedanken.

Literatur

- [1] Castleman, K.R.: Digital Image Processing, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1996.
- [2] Faugeras, O.: Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1993.
- [3] Hecker, H.: Ein neues Verfahren zur robusten Röntgenbildauswertung in der automatischen Gußteilprüfung. Dissertation am Institut für Allgemeine Elektrotechnik, Technische Universität Berlin, 1995.
- [4] Heinrich, W.: Automatische Röntgenserienprüfung von Gußteilen. Dissertation am Institut für Allgemeine Elektrotechnik, Technische Universität Berlin, 1988.
- [5] Mery, D.; Filbert, D.: The Epipolar Geometry in Radioscopic Images. International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiology, BAM, DGZfP: 181-187, March 15 - 17, 1999, Berlin.
- [6] Mery, D.; Filbert, D.; Krüger, R.; Bavendiek, K.: Automatische Gußfehlererkennung aus monokularen Bildsequenzen, Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP), (1):93-102, 10.-12. Mai 1999, Celle.
- [7] Purschke, M., Schulenburg, H.: Fortschritte der vollautomatischen Röntgenprüfung. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP), (1):309-317, Bamberg 7.-9. September, 1998.
- [8] Wenzel, T., Hanke, R.: Fast image processing on die castings. Anglo-German Conference on Non-Destructive Testing Imaging and Signal Processing, Oxford, 27-28 March, 1998.

Dipl.-Ing. Domingo Mery und **Prof. Dr.-Ing. Dieter Filbert**, Institut für Meß- und Automatisierungstechnik, TU-Berlin Sekr. E2, Einsteinufer 19, D-10587 Berlin. www: <http://ima.ee.tu-berlin.de>
E-Mail: domingo.mery@tu-berlin.de