

Automatische Gußfehlererkennung: Stand der Technik

Domingo Mery, Thomas Jaeger und Dieter Filbert, Berlin

Schlagwörter: Gußfehlererkennung, Qualitätskontrolle, Röntgendurchleuchtungsprüfung, digitale Bildverarbeitung, Computertomographie

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 Röntgenprüfanlagen mit Bildverarbeitung in der Automobilindustrie eingesetzt. In diesem Beitrag wird eine Zusammenfassung der existierenden Detektionsansätze zur automatischen Gußfehlererkennung präsentiert.

Automated Quality Control of Castings: State of the Art

Radioscopy is increasingly being used as a tool for non-destructive testing in industrial production. An example is the serial examination of cast light-alloy workpieces used in the car industry, like aluminum wheels and steering gears. The material defects occurring in the casting process such as cavity, gas, inclusion, and sponge must be detected to satisfy the security requirements; consequently, it is necessary to check 100% of the parts. Since most defects are not visible, x-ray imaging is used for this task. In this paper we present a review of the existing approaches of automated flaw detections in aluminum castings.

1 Einleitung

Bei der Fertigung von Gußteilen treten beim Abkühlen der Metallschmelze Schrumpfprozesse auf, die zu Inhomogenitäten im Inneren des Werkstückes führen können. Diese manifestieren sich beispielsweise in blasenförmigen Hohlräumen oder Rissen. Hohlräume entstehen, wenn beim Gießprozeß kein oder zu wenig flüssiges Metall nachfließt, während Risse durch mechanische Spannungen entstehen, wenn benachbarte Bereiche verschiedene Temperaturgradienten aufweisen. Dazu kommen andere Gußfehler im Gießereiprozeß, wie Einschlüsse bzw. Schlacken.

In der Automobilindustrie werden Leichtmetallgußteile wie Felgen und Lenkgetriebegehäuse produziert,

die als sicherheitsrelevante Teile gelten. Um die Sicherheit ihrer Konstruktion zu gewährleisten, wird die Qualitätskontrolle für alle Teile vorgeschrieben.

Im 20. Jahrhundert hat sich die Röntgendurchleuchtungsprüfung in der Qualitätskontrolle von Gußteilen durch visuelle oder computergesteuerte Auswertung von Röntgenbildern durchgesetzt. Die Aufgabe dieser zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) ist die Untersuchung auf Gußfehler, die sich im Innern des Teiles befinden, und somit von außen nicht visuell zu erfassen sind. Als Beispiel ist ein Röntgenbild eines fehlerhaften Leichtmetallrades in Bild 1 dargestellt.

Im Vergleich zur visuellen Auswertung von Röntgenbildern bietet die automatische Gußfehlererkennung den Vorteil der Objektivität und Reproduzierbarkeit der Prüfergebnisse. Wesentliche Nachteile der bisher veröffentlichter Ansätze sind ihre aufwendige Konfiguration und ihre Inflexibilität gegenüber Veränderungen des Testobjektes (z. B. durch Designänderung), die die visuelle Prüfung durch den Menschen nicht aufweist.

Das Prinzip einer automatischen Röntgenprüfanlage ist in Bild 2 dargestellt. Typischerweise besteht sie aus i) einem Manipulator zur Handhabung des Prüflings, ii) einer Röntgenquelle, die den Prüfling mit einem kegelförmigen Strahlenbündel durchleuchtet und dadurch ein Röntgenbild des Prüflings via Zentralprojektion erzeugt, iii) einem Bildverstärker, der das nicht sichtbare Röntgenbild in ein sichtbares umwandelt, iv) einer CDD-

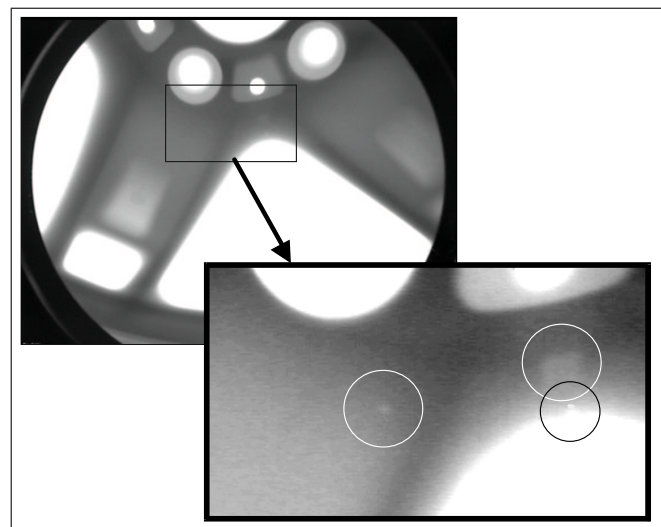


Bild 1: Drei Hohlräume (Lunker) in einer Alufelge.

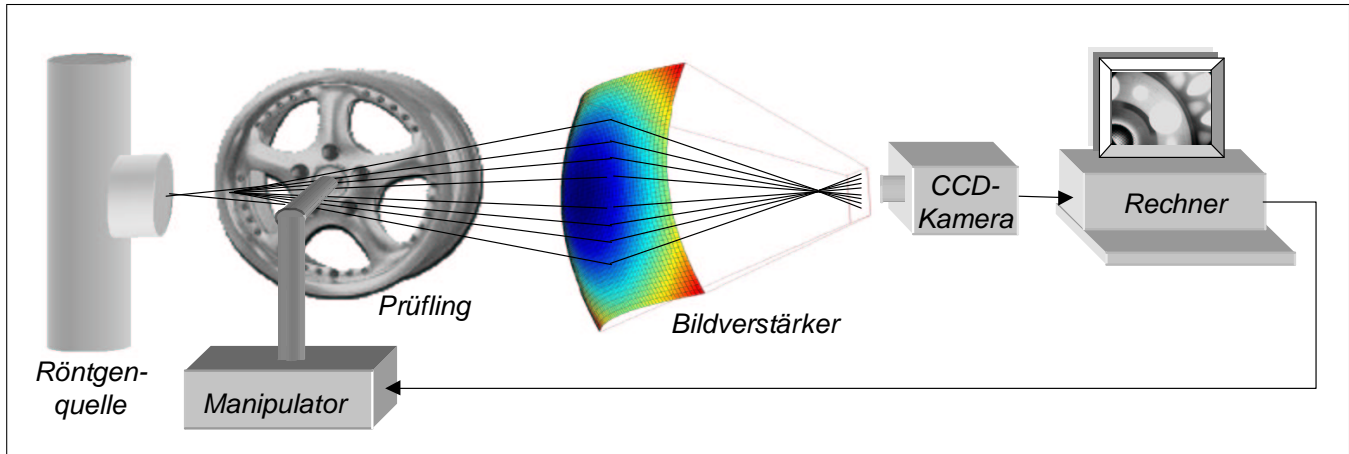


Bild 2: Diagramm einer automatischen Röntgenprüfanlage.

Kamera, die das sichtbare Röntgenbild aufnimmt, und v) einem Rechner, dessen Aufgaben die automatische Klassifizierung des Prüflings in Gutteil oder Ausschußteil durch die digitale Bildverarbeitung des Röntgenbildes und die Steuerung des Manipulators zur Bewegung des Prüfobjektes in der gewünschten Prüfposition sind¹. Heutzutage werden als Bildaufnehmer Flachdetektoren aus amorphen Silizium in einigen Prüfsystemen industriell eingesetzt [20; 2]. Bei diesen Detektoren wird die Energie des Röntgenstrahls von einem Halbleiter direkt in elektrische Signale (ohne Bildverstärker) umgesetzt. Allerdings ist die ZFP mit Flachdetektoren wegen ihrer hohen Kosten (im Vergleich zum Bildverstärker) nicht immer rentabel.

In diesem Beitrag werden verschiedene Verfahren zur automatischen Gußfehlererkennung mit Bildverarbeitung als Schwerpunkt erläutert. Diese Verfahren erschienen in die Literatur in den letzten fünfzehn Jahren und gelten als der Stand der Technik in diesem Gebiet. Man kann feststellen, daß die Detektionsansätze zur Gußfehlererkennung in drei grobe Gruppen gegliedert werden können: *i*) Ansätze, bei denen eine an die Struktur angepaßte Filterung durchgeführt wird, die in Abschnitt 2 behandelt werden; *ii*) Ansätze, die mit Hilfe der Mustererkennung, Expertensystemen, künstlicher neuronaler Netzwerke, allgemeiner Filter oder Mehr-Bild-Analyse eine Detektion unabhängig von der Position und Struktur des Prüflings erreichen, mit denen sich Abschnitt 3 beschäftigt; und *iii*) Ansätze, die mit Hilfe der Computertomographie nach einer Rekonstruktion des Gußteiles die Fehler erkennen können, wie im Abschnitt 4 erläutert wird. Schließlich werden die Schlußfolgerungen dieses Artikels im Abschnitt 5 präsentiert.

2 Referenzverfahren

Bei den Referenzverfahren werden Standbilder in festen, programmierten Prüfpositionen aufgenommen. Ein Prüfbild wird mit einem Referenzbild verglichen. Bei er-

heblichem Unterschied wird der Prüfling in die Fehlerklasse eingestuft. Um ein fest gespeichertes Referenzbild nutzen zu können, muß die Grauwertverteilung des Bildes dem der aktuellen Aufnahme entsprechen. Dazu gehört eine hohe Positioniergenauigkeit des Prüflings ebenso wie die Fertigungstoleranzen des Prüflings und die Reproduzierbarkeit der Röntgenparameter bei der Aufnahme. Kleine Abweichungen dieser Variablen führen zu einem großen Unterschied beider Bilder. Als alternativer Ansatz wurde von Klatte im Jahre 1985 vorgeschlagen, das Referenzbild durch Filterung aus dem Prüfbild selbst zu berechnen [24].

Ein allgemeines Blockdiagramm dieser Detektionsansätze zur automatischen Gußfehlererkennung ist in Bild 3 dargestellt. Zur Rauschunterdrückung wird zuerst eine Mittelung (Integration) über mehrere, kurz hintereinander aufgenommene Röntgenbilder bei jeder programmierten Position durchgeführt². Zunächst wird ein fehlerfreies Referenzbild y aus jedem integrierten Röntgenbild x mit Hilfe eines Filters geschätzt. Bei diesem Verfahren hat jede Prüfposition p ein Filter (Filter_p), das aus mehreren kleinen Masken besteht. Die Größe dieser Masken und die Besetzung ihrer Koeffizienten im Filter_p sind so einzustellen, daß sie an die projizierte Struktur des Prüflings bei der Position p angepaßt werden. Anschließend wird ein Fehlerdifferenzbild $x - y$ berechnet. Gußfehler werden dann detektiert, wenn eine genügend große Differenz zwischen Röntgenbild und Referenzbild auftritt. Das binäre Segmentierungsergebnis ist in Bild 3 als e dargestellt.

2.1 Das MODAN-Filter

Das modifizierte Medianfilter, *MODAN-Filter*, wurde von Heinrich in den 80er Jahren zur automatischen Gußfehlererkennung entwickelt [9; 17; 18]. Mit Hilfe des MODAN-Filters lassen sich konstruktive Strukturen des Gußteiles und Gußfehler voneinander trennen.

Das MODAN-Filter ist ein Medianfilter mit adaptierten Filtermasken. Zur Erinnerung: Das Medianfilter

¹ Diese Aufgabe wird normalerweise von einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) übernommen.

² Bei einer arithmetischen Mittelung erzielt man ein Signal/Rausch-Verhältnis proportional zu $\sqrt{N_Q}$, wobei N_Q die Anzahl der aufsummierten Bilder ist [7].

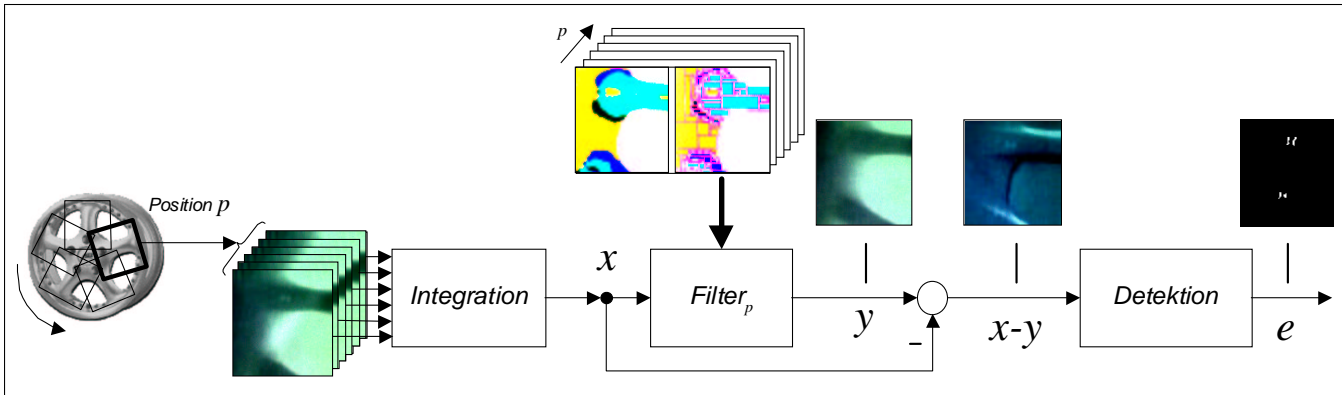


Bild 3: Referenzverfahren zur automatischen Gußfehlererkennung.

| $n =$ | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 |
|------------|----------------------|---|---|---|----|----|----|----|--|----------------------|---|---|---|----|----|----|----|--|----------------------|---|---|---|----|----|----|----|
| Struktur → | [Structural pattern] | | | | | | | | | [Structural pattern] | | | | | | | | | [Structural pattern] | | | | | | | |
| $m = 3$ | [Median result] | | | | | | | | | [Mittelwert result] | | | | | | | | | [Gauß result] | | | | | | | |
| 5 | [Median result] | | | | | | | | | [Mittelwert result] | | | | | | | | | [Gauß result] | | | | | | | |
| 7 | [Median result] | | | | | | | | | [Mittelwert result] | | | | | | | | | [Gauß result] | | | | | | | |
| 9 | [Median result] | | | | | | | | | [Mittelwert result] | | | | | | | | | [Gauß result] | | | | | | | |
| 11 | [Median result] | | | | | | | | | [Mittelwert result] | | | | | | | | | [Gauß result] | | | | | | | |
| 13 | [Median result] | | | | | | | | | [Mittelwert result] | | | | | | | | | [Gauß result] | | | | | | | |
| 15 | [Median result] | | | | | | | | | [Mittelwert result] | | | | | | | | | [Gauß result] | | | | | | | |
| 17 | [Median result] | | | | | | | | | [Mittelwert result] | | | | | | | | | [Gauß result] | | | | | | | |
| | Median | | | | | | | | | Mittelwert | | | | | | | | | Gauß | | | | | | | |

Bild 4: Medianfilterung einer Struktur der Größe $n \times n$ durch eine quadratische Maske der Größe $m \times m$ im Vergleich zu Mittelwert- bzw. Gauß-Tiefpaßfilterung.

ist ein Rangordnungsoperator (und damit nichtlinear), bei dem der Ausgangswert der mittlere der nach der Größe sortierten Folge von Eingangswerten ist [7]³. Ist der vom Medianfilter erfaßte Hintergrund konstant, so kann er Strukturen im Vordergrund des Bildes unterdrücken, wenn die Anzahl der zur Struktur zugehörigen Werte weniger als die Hälfte der Eingangswerte des Filters betraegt. Man benutzt diese Filtereigenschaften zur Unterdrückung der Fehlerstrukturen und zur Erhaltung der konstruktiven Strukturen des Prüflings im Bild. Als Beispiel zeigt Bild 4 die Medianfilterung verschiedener Strukturen und Maskengrößen im Vergleich zu den Auswirkungen anderer linearer Tiefpaßfilterungen. Man sieht, daß lediglich beim Medianfilter die relativ kleinen Strukturen vollständig unterdrückt werden, während die relativ großen Muster ihre Grauwerte und scharfe Kanten behalten.

Ziel der Hintergrundbildfunktion ist also ein fehlerfreies Bild aus dem Prüfbild selbst zu bestimmen. Bei der Berechnung der Hintergrundbildfunktion wird mit Hilfe des MODAN-Filters versucht, nur die Gußfeh-

lerstrukturen im Prüfbild zu unterdrücken. Lokal variierende Masken werden bei der MODAN-Filterung angewendet, indem die Form und Größe der Masken des Medianfilters an die konstruktive Struktur des Prüfling angepaßt werden. Auf diese Weise wird die Erhaltung der konstruktiven Struktur im Prüfbild (und gleichzeitig die Unterdrückung der Fehler) gewährleistet. Dazu wird die Anzahl der Elemente des Operators zur Optimierung der Rechenzeit durch Besetzung nicht aller Positionen der Maske reduziert.

Verschiedene Filtermasken werden von Heinrich in [18] vorgeschlagen. Dazu entwickelt er ein automatisches und ein interaktives Verfahren zur Auswahl der Maske des MODAN-Filters, die die Anpassung an die Struktur berücksichtigt. Bei beiden Verfahren werden die Prüfpositionen manuell festgelegt, so daß die Prüfung jedes Volumenelementes des Gußteiles gewährleistet wird. Beim automatischen Verfahren wird für jedes Pixel die Maske, die eine Gütefunktion im Prüfbild des Gutteiles minimiert, ausgewählt. Heinrich schlägt als Gütefunktion

$$Q_{ij}(d, e) = Q_{ij}^d(d, e) + Q_{ij}^s(d, e) + Q_{ij}^m(d, e) \quad (1)$$

vor. Dabei sind (i, j) die Koordinaten des Pixels; (d, e)

³ Für eine gerade Anzahl von Eingangswerten definiert man den Medianwert als den arithmetischen Mittelwert der beiden mittleren Werte.

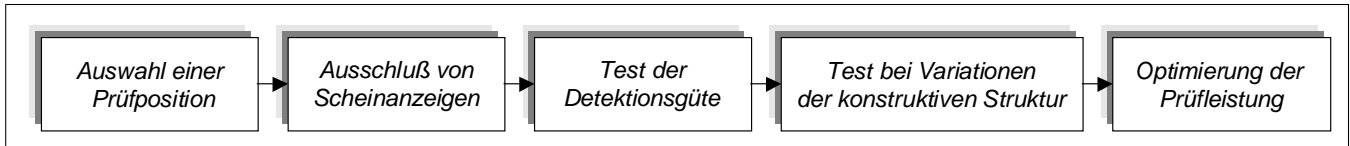


Bild 5: Interaktives Verfahren zur Maskenauswahl des MODAN-Filters.

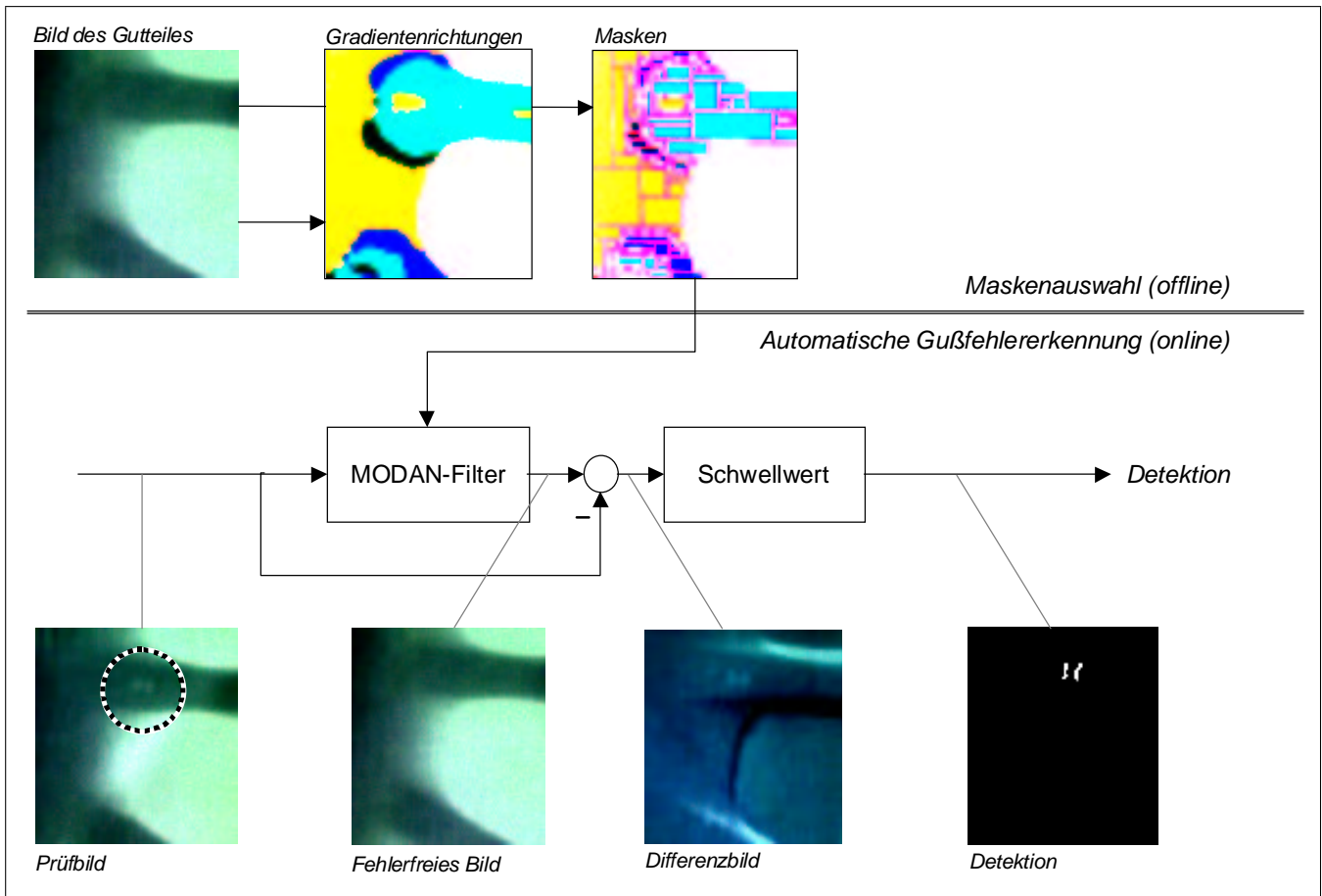


Bild 6: Automatische Maskenauswahl des MODAN-Filters und Detektion nach Hecker [16].

Höhe und Breite der Maske; Q^d , Q^s bzw. Q^m der Detektionsfehler, die Scheinanzeige⁴ bzw. die Matrixgröße der Maske. Das fehlerfreie Referenzbild wird für drei Eingangswerte folgendermaßen geschätzt:

$$y[i, j] = \text{median}(x_1, x_2, x_3), \quad (2)$$

mit

$$\begin{aligned} x_1 &= x[i, j] \\ x_2 &= x[i + d_{ij}, j + e_{ij}] \\ x_3 &= x[i - d_{ij}, j - e_{ij}], \end{aligned}$$

dabei sind $y[i, j]$ bzw. $x[i, j]$ Grauwerte des Referenz- bzw. Prüfbildes beim Pixel (i, j) . Die Filterrichtung der Maske wird durch die Abstände d_{ij} und e_{ij} festgelegt. Gußfehler werden detektiert, wenn:

$$|y[i, j] - x[i, j]| > \theta_{ij} \quad (3)$$

⁴ Für drei Eingangswerte des MODAN-Filters (x_1, x_2, x_3) wird der Detektionsfehler bzw. die Scheinanzeige als $|x_2 - x_1| + |x_2 - x_3|$ bzw. $x_2 - \text{median}(x_1, x_2, x_3)$ definiert [18].

Dadurch ist eine gute Anpassung an die konstruktive Struktur möglich, es besteht jedoch ein hoher Bedarf an Speicherplatz wegen der Anwendung unterschiedlicher Filtermasken in allen Pixeln.

Um den Speicherplatzbedarf zu reduzieren, wird beim interaktiven Verfahren in rechteckigen Gebieten des Bildes immer die gleiche Maske verwendet. D.h.:

$$d_{ij} = d_k \quad \text{für} \quad i_k^0 \leq i \leq i_k^1, \quad j_k^0 \leq j \leq j_k^1. \quad (4)$$

Die Anpassung an die Struktur ist in diesem Fall nicht so genau wie beim ersten Verfahren. Das interaktive Verfahren ist in Bild 5 wiedergegeben: Bei jeder Prüfposition werden Masken mit horizontalen, vertikalen und beiden diagonalen Filterrichtungen anhand eines fehlerfreien Gußteiles auf Scheinanzeigen getestet. In diesem Schritt wird entschieden, welche Richtungen nicht angewendet werden dürfen. Zunächst wird die Gütefunktion (1) bewertet, um die beste Maske auszuwählen. Die Filtermasken sind so zu selektieren, daß die Variationen der konstruktiven Strukturen der Prüflinge nicht zu Schein-

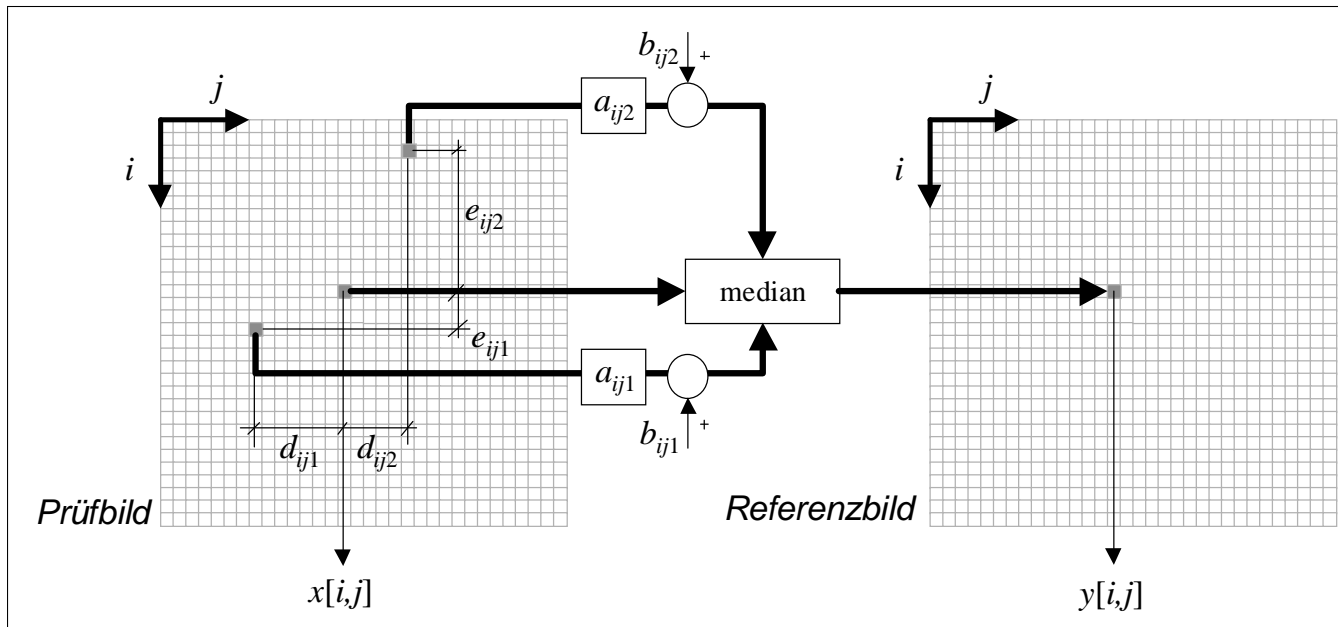


Bild 7: Gewichtete synchrone Filterung (bei ungewichteter Filter sind $a_{ijk} = 1$ und $b_{ijk} = 0$).

anzeigen führen. Schließlich werden einzelne Filtergebiete zusammengefaßt.

Hecker in [16] schlägt eine Methode zur automatischen Anpassung der Masken an die konstruktiven Strukturen der Prüflinge vor. Zur richtigen Auswahl einer Maske sind bei dem Verfahren zwei Kriterien zu erfüllen: *i*) Die entsprechenden Grauwerte der Struktur in der Maske müssen konstant sein; und *ii*) die Größe der Maske muß mindestens doppelt so groß wie die Ausdehnung des zu detektierenden Gußfehlers sein. Zur Erfüllung des ersten Kriteriums wird die Richtung der Maske senkrecht zur Gradientenrichtung der konstruktiven Struktur eingestellt. Die Größe der Maske wird nach der Prüfspezifikation der erwarteten Gußfehlerausdehnung ausgewählt. Das Verfahren ist in Bild 6 (vgl. Bild 3) gezeigt. Hier werden nur vier Richtungen des Gradienten angewendet: $[0^\circ - 180^\circ]$, $[45^\circ - 225^\circ]$, $[90^\circ - 270^\circ]$ und $[135^\circ - 315^\circ]$, durch die vier verschiedene Grauwerte in Bild 6 dargestellt sind. Das Verfahren generiert rechteckige Gebiete als geeignete Prüfbereiche, deren Masken die gleiche Richtung und Größe besitzen.

In [14] verbessert Hecker die automatische Parametrierung des MODAN-Filters. Die Methode, die als optimierte MODAN-Filterung von ihm bezeichnet wird, weist jedem Pixel des Prüfbildes diejenige Maske aus einem *Maskenpool* zu, die den geringsten *Amplitudenfehler* liefert. Bei dieser Suche werden repräsentative Gutbilder, die bei derselben Position von gleichen Gußteilen aufgenommen werden, angewendet. Der Amplitudenfehler wird von Hecker als die Abweichung der tatsächlichen von der detektierten Fehlertiefenausdehnung definiert. Der erwähnte Pool beinhaltet 128 unterschiedlichen Masken mit drei Eingangswerten. Die Masken sind auf sechzehn Maskengrößen (16, 17, ..., 31 Pixel) bei acht verschiedenen Richtungen ($[0^\circ - 180^\circ]$, $[22,5^\circ - 202,5^\circ]$, ..., $[157,5^\circ - 337,5^\circ]$) verteilt.

2.2 Signalsynchrones Filter

Hecker entwickelt in [14] das *signalsynchrone Filter* zur Berechnung der Hintergrundbildfunktion. Diese Methode verallgemeinert die Gleichung des MODAN-Filters (2):

$$y[i, j] = \text{median}\{x[i, j], x[i + d_{ij1}, j + e_{ij1}], \dots, x[i + d_{ijn_s}, j + e_{ijn_s}]\}, \quad (5)$$

wobei die Filterparameter (d_{ijk}, e_{ijk}) so zu bestimmen sind, daß die Gütefunktion

$$Q_{ijk}(d_{ijk}, e_{ijk}) = \sum_{m=1}^{N_R} \{x_m[i, j] - x_m[i + d_{ijk}, j + e_{ijk}]\}^2 \quad (6)$$

unter den Bedingungen $(d_{ijk}, e_{ijk}) \neq (d_{ijl}, e_{ijl})$ und $d_{ijk}, e_{ijk} > \tau_{\min}$, für $k, l = 1, \dots, n_s$ mit $k \neq l$ minimiert wird. Die Gütefunktion berücksichtigt N_R repräsentative Gutbilder $\{x_1\}, \dots, \{x_{N_R}\}$, die bei derselben Position von gleichen Gußteilen aufgenommen werden. Bei den Untersuchungen werden nur 3 Eingangswerte ($n_s = 2$) verarbeitet (s. Bild. 7). Zur Bestimmung der Parameter sei die Anzahl der repräsentativen Gutbilder $20 \leq N_R \leq 30$ ausreichend.

Darüber hinaus entwickelt Hecker den gewichteten Medianoperator, bei dem der Eingangswert $x[i + d_{ijk}, j + e_{ijk}]$ durch

$$a_{ijk} \cdot x[i + d_{ijk}, j + e_{ijk}] + b_{ijk}$$

in (5) für $k = 1, \dots, n_s$ eingesetzt wird. Die Gütefunktion lautet im Fall des gewichteten Medianoperators:

$$Q_{ijk}(a_{ijk}, b_{ijk}, d_{ijk}, e_{ijk}) = \sum_{m=1}^{N_R} \{A - a_{ijk} \cdot B + b_{ijk}\}^2, \quad (7)$$

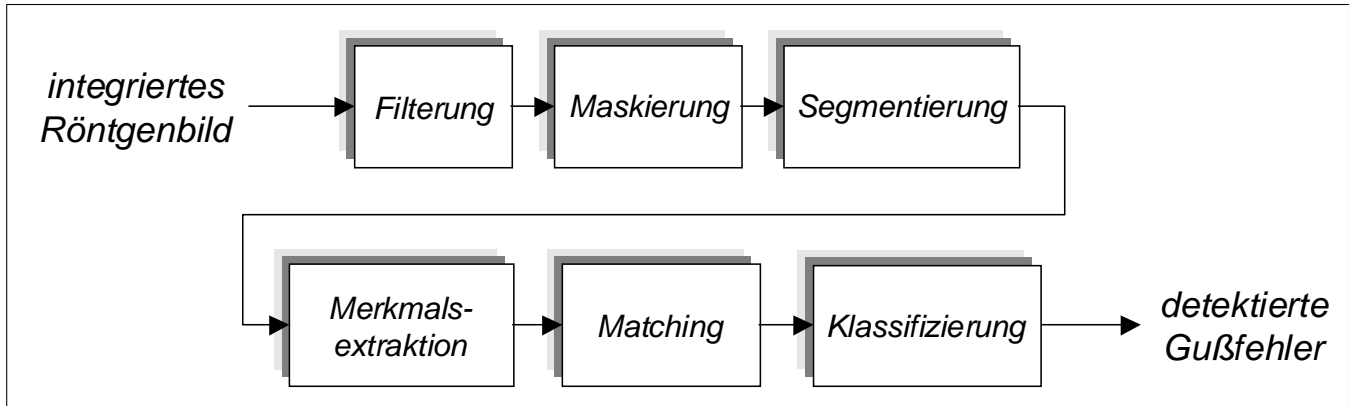


Bild 8: Blockdiagramm des Detektionsansatzes PXV5000.

mit

$$A = x_m[i, j]$$

$$B = x_m[i + d_{ijk}, j + e_{ijk}].$$

Stellt man (d_{ijk}, e_{ijk}) in (7) fest, kann man die Koeffizienten (a_{ijk}, b_{ijk}) zur Minimierung der Gütefunktion durch lineare Regression berechnet:

$$a_{ijk} = \frac{N_R \sum AB - \sum A \sum B}{N_R \sum B^2 - (\sum B)^2}$$

$$b_{ijk} = \frac{\sum A \sum B^2 - \sum AB \sum B}{N_R \sum B^2 - (\sum B)^2}$$
(8)

wobei die Summen von $m = 1$ bis $m = N_R$ laufen. Da die Koeffizienten (a_{ijk}, b_{ijk}) abhängig von d_{ijk} und e_{ijk} sind, kann das Optimierungsproblem so formuliert werden, daß die Gütefunktion lediglich eine Funktion der Abstandsparameter (d_{ijk}, e_{ijk}) bleibt.

Da das absolute Minimum der Gütefunktion durch Suchen ermittelt wird, stellt die Bestimmung der Filterparameter einen enormen Rechenaufwand dar. Zur Parametrierung des Filters bei N Positionen des Prüflings, N_R repräsentativen Gutbildern pro Position und $N_I \times N_J$ Pixel pro Bild benötigt man $NN_I^2 N_J^2 N_R$ Vergleichsoperationen. Im Fall des gewichteten Medianoperators müssen dazu $8 + 2N_R$ Multiplikationen und $3 + 3N_R$ Summen je Vergleich zur Bestimmung der Parameter a und b in (8) durchgeführt werden. Typischerweise erfordert die Suche der optimalen Parameter eines Prüflings mehrere Wochen. Um die Rechenzeit zu reduzieren, schlägt Hecker u. A. die Unterabtastung der Vergleichsbilder und die Beschränkung des Bereiches vor, in dem die optimalen Abstände d und e gesucht werden. Offensichtlich gibt es einen Kompromiß zwischen Reduktion der Rechenzeit und Robustheit der Detektion. Aus diesem Grund bleiben die reduzierten Rechenzeiten, bei denen die Detektion noch robust ist, für eine industrielle Anwendung nicht akzeptabel.

2.3 Röntgenprüfsystem PXV 5000

Das Röntgenprüfsystem PXV 5000 wurde von der Firma Philips Industrial X-Ray GmbH für die vollautomatische Röntgenprüfung Anfang der 90er Jahre entwickelt

[15; 26]. Das System wurde später von der Firma YX-LON International X-Ray GmbH⁵ weiterentwickelt.

Das Prüfsystem bewertet in einem Lernprozeß eine Stichprobe fehlerfreier Prüflinge. Jede Struktur und jede Unregelmäßigkeit, die das System in dieser Stichprobe findet, wird als reguläre Struktur klassifiziert und in eine entsprechende Bibliothek eingetragen [25]. Die wesentlichen Schritte des Systems PXV5000 (s. Blockdiagramm in Bild 8) werden im folgendem erläutert [32]:

Integration: Zur Unterdrückung des Rauschens werden je nach Anwendung zwischen 4 und 16 Röntgenbilder bei derselben Position des Prüflings integriert.

Filterung: PXV 5000 erlaubt die Anwendung von bis zu acht Verarbeitungsschritten pro Position, in denen verschiedene Filter aus einer großen Liste von Filter-Algorithmen und Masken, die beliebig miteinander kombiniert werden können, ausgewählt werden. Dadurch wird aus dem Prüfbild eines fehlerfreien Röntgenbildes bestimmt. Ein Differenzbild wird durch Vergleich beider Bilder erzeugt.

Maskierung: In diesem Schritt werden alle irrelevanten Strukturen entfernt, die sich außerhalb einer frei definierbaren Maske befinden.

Segmentierung: Mit Hilfe eines Zweischwellenverfahrens werden mögliche Fehlerstrukturen segmentiert. Dabei dient die höhere der beiden Schwellen zur Detektion der Struktur und die niedrigere zur Erfassung der projizierten Größe im Bild.

Merkmalsextraktion: Aus den gewonnenen Segmenten werden Merkmale (z.B. Schwerpunkt, Fläche, Umfang, Feret Koordinaten⁶, Kompaktheitsmaß, Ausdehnung, Minimum, Maximum und Mittelwert der Grauwerte) extrahiert, die ihre Eigenschaften beschreiben.

Matching und Klassifizierung: Durch Vergleichen der extrahierten Merkmale mit den Merkmalen der Modelle, die während des Lernprozesses extrahiert und in einer Bibliothek gespeichert wurden, lassen sich die Segmente der konstruktiven Strukturen des Teiles elimi-

⁵ Die Firma YXLON International X-Ray GmbH entstand 1997 aus der deutschen Philips Industrial X-Ray GmbH und der dänischen Andrex GmbH.

⁶ Koordinaten der linken unteren Ecke und rechten oberen Ecke des kleinsten umschreibenden Rechtecks des Segmentes.

nieren.

Nach Angabe der Firma YXLON habe es bei einer Inspektion von 600 Gußteilen aus Aluminium nur 3 Fehldetektionen gegeben. Außerdem seien alle Gußfehler größer als $1,56 \text{ mm}^2$ detektiert worden.

2.4 Röntgenprüfsystem SABA 2000T

Die vollautomatische Röntgendurchleuchtungs-Anlage *Seifert automatische Bildauswertung* (SABA) wurde Ende der 80er Jahre von der Firma Rich. Seifert & Co. entwickelt [36]. Durch kontinuierliche Weiterentwicklung von Mechanik und Rechnerleistung konnte Seifert die Röntgenprüfsysteme SABA 2000 im Jahre 1994 [33] und SABA 2000T im Jahre 1998 [34] anfertigen, die bessere digitale Bildauflösungen und schnellere Prüfgeschwindigkeiten erreichten. Nach Angabe der Firma Seifert in [34] blieb der Detektionsansatz der SABA-Familie jedoch in dieser Zeit unverändert, da er auf der Optimierung des in den 80er Jahren entwickelten MODAN-Filter (s. Abschnitt 2.1) zur Schätzung eines fehlerfreien Röntgenbildes beruht. Die Gußfehlerdetektion geschieht wie in Bild 3 gezeigt. Dieses Prüfsystem habe in einer Untersuchung bei 1034 übereinstimmenden Entscheidungen nur zwei Abweichungen festgestellt [10; 36].

3 Verfahren ohne a priori Wissen

In diesem Abschnitt werden die Ansätze beschrieben, die die Gußfehler eines Prüflings ohne a priori Wissen über die Struktur des Prüflings detektieren können.

3.1 Röntgenprüfsystem ISAR

Das *intelligente System zur automatischen Röntgenprüfung* ISAR wurde vom Fraunhofer Institut für integrierte Schaltungen (IIS-A) in der 90er Jahre entwickelt [38; 39]. Die Inspektion erfolgt mit Hilfe des am Fraunhofer Institut entwickelten Filters COMMED (*COMbined MEDianfilter*).

Die Gußteile werden durch das System identifiziert, um eine teilspezifische Prüfung durchführen zu können. Nach dieser Gußteilerkennung werden die Strahlungsparameter, Prüfkriterien, Verfahrenweg des Handlingsystems und Prüfpositionen eingestellt.

Nach Angaben des IIS-A könne das COMMED-Filter Gußfehler ohne a priori Kenntnisse der Struktur des Prüflings detektieren. Der Algorithmus könne konstruktive Strukturen (Kanten, Ecken, Bohrungen, usw.) von Strukturen unterscheiden, die nicht zum Prüfling gehören. Für den Bereich der Räderprüfung beträgt die Auswertzeit für ein Aluminiumfelge mit einem Durchmesser von 17" ca. 35s bei 25 notwendigen Einzelpositionen.

3.2 Methode von Gayer et al.

Diese Methode zur Fehlererkennung wurde von Gayer et al. ursprünglich für die Schweißnahtprüfung im Jahre 1990 veröffentlicht [11]. Der Algorithmus kann

allerdings in der Gußfehlererkennung angewendet werden. Die vorgeschlagene Methode läßt sich in zwei Schritten zusammenfassen:

i) Schnelle Suche nach potentiellen Fehlern im Röntgenbild: In der Annahme, daß die Fehler kleiner als die konstruktiven Strukturen des Prüflings sind, werden als potentielle Fehler diejenigen Regionen des Bildes klassifiziert, deren Bestandteile der höheren Frequenzen bedeutend sind. Das Spektrum des Röntgenbildes wird mit Hilfe einer eindimensionalen schnellen Fourier-Transformation bestimmt, die zeilenweise bzw. spaltenweise in kleinen 32×32 Fenstern berechnet wird. Wenn die Summe der höheren Frequenzen eines Fensters größer als ein vorgegebener Schwellwert ist, wird das ganze Fenster als potentieller Fehler markiert. Eine zweite Möglichkeit wird von den Autoren zu dieser Aufgabe vorgeschlagen: Ein Fenster wird als potentieller Fehler selektiert, wenn die Summe der ersten Ableitung der Zeilen und Spalten des Fensters groß genug ist.

ii) Identifikation und Lokalisierung der echten Fehler: Da dieser Schritt zeitaufwendig ist, wird nur in den Regionen untersucht, die als potentielle Fehler in vorigem Schritt detektiert wurden. Hier wurden auch zwei Algorithmen entwickelt. Der erste führt ein Matching⁷ zwischen den potentiellen Fehlern und typischen Fehlern durch, die in einer Bibliothek als *Template* gespeichert werden. Gibt es eine große Ähnlichkeit zwischen einem potentiellen Fehler und einem *Template*, dann wird der potentielle Fehler als echter Fehler klassifiziert. Der zweite Algorithmus schätzt ein fehlerfreies Röntgenbild des Prüflings, indem jede Zeile als eine interpolierende Spline-Funktion modelliert wird, ohne die potentiellen Regionen zu berücksichtigen. Anschließend werden das Original und das fehlerfreie Röntgenbild miteinander verglichen. Die tatsächlichen Fehler werden in den Pixeln des Eingangsbildes detektiert, in denen ein großer Unterschied auftritt.

3.3 Methode von Kehoe und Parken

1992 stellten Kehoe und Parken in [23] eine intelligente wissensbasierte Gußfehlerdetektion vor, die mit Hilfe der Bildverarbeitung und eines Expertensystems Gußfehler automatisch erkennen kann. Die Methode besteht im wesentlichen aus zwei Schritten:

Detektion und Analyse: Zunächst werden mögliche Fehler durch angepaßte Schwellen in kleinen Bereichen [21] segmentiert. Danach werden die detektierten möglichen Fehler durch Dilatation und Erosion (*closing*) [7] fusioniert. Schließlich werden geometrische Merkmale der fusionierten Regionen extrahiert.

Klassifizierung: Durch Anwendung eines Expertensystems werden die Regionen zu Fehlerklassen zugeordnet, wie z.B. Lunker, Schlacken, Risse, usw.

Dieses System wurde im Labor mit acht Röntgenbildern untersucht und mit einer visuellen Detektion verglichen. Die automatische Detektion konnte mehr Fehler erkennen als von menschlichen Operatoren gefunden wurden. Die Schwierigkeit des Verfahrens liegt im Ent-

⁷ Für das Matching wird die *Sequential Similarity Detection Methode* angewendet.

wurf einer Wissensdatenbank, die alle möglichen Fehler berücksichtigt.

3.4 Methode von Boerner und Strecker

Ende der 80er Jahre stellten Boerner und Strecker in [3] eine Methode zur automatischen Gußfehlererkennung vor, die sie bei Philips Research Laboratory Hamburg entwickelten. Wie üblich konzentriert sich die Methode auf Analyse einzelner Röntgenbilder, die in den gewünschten Positionen des Prüflings aufgenommen werden. Nach einer Verbesserung der Bildqualität durch *Look-up-table* [7] und *Shadingkorrektur* [18] extrahiert das Verfahren zur Segmentierung Merkmale in jedem Pixel des Röntgenbildes.

Ein Klassifikator wird entworfen, um jedes Pixel (i, j) des Bildes zu einer Klasse k zuzuordnen. Typischerweise gibt es nur zwei Klassen: $k = 1$ für die Klasse *konstruktive Struktur* und $k = 2$ für die Klasse *Fehler*. Im allgemeinen gilt das Verfahren für N_K Klassen.

Mit Hilfe einer Entscheidungsfunktion werden die Pixel des Bildes klassifiziert. Die Entscheidungsfunktionen werden als lineare Funktionen der Merkmale

$$d_k[i, j] = a_{k0} + \sum_{p=1}^n a_{kp} z_p[i, j] \quad (9)$$

oder als quadratische Funktionen der Merkmale

$$d_k[i, j] = a_{k0} + \sum_{p=1}^n a_{kp} z_p[i, j] + \sum_{p=1}^n \sum_{q=p}^n a_{k,p,q} z_p[i, j] z_q[i, j] \quad (10)$$

für $k = 1, \dots, N_K$ berechnet. Dabei sind $z_p[i, j]$ der Wert des p -ten extrahierten Merkmals des Pixels (i, j) , für $p = 1, \dots, n$; und a_{k0}, a_{k1}, \dots die lineare Parameter der Entscheidungsfunktionen. Mit Hilfe einer linearen Regression werden diese Parameter in einer Lernphase durch Minimierung des quadratischen Abstandes zwischen $d_k[i, j]$ und der idealen Entscheidungsfunktion $d_k^*[i, j]$ bestimmt. Die Funktion $d_k^*[i, j]$ wird manuell aus der Lernstichprobe definiert und nimmt den Wert 1 bzw. 0 an, wenn das Pixel (i, j) zu der Klasse k gehört bzw. nicht gehört.

Ist der Klassifikator angelernt, wird ein Pixel (i, j) eines Prüfbildes zur Klasse k zugeordnet, wenn $d_k[i, j] \geq d_{k'}[i, j] > \theta_k$, für $k' = 1, \dots, N_K$, wobei θ_k der Schwellwert der k -ten Klasse ist.

Danach werden die fehlerhaften, benachbarten Pixel verbunden, um Regionen zu bilden. Schließlich wird eine Region als Fehler detektiert, wenn sie eine kreisförmige Form und eine genügend große Fläche besitzt.

Als Pixel-Merkmale werden von Boerner und Strecker die Differenz zwischen Originalbild und seinem nach DoG⁸- oder Median-gemildertem Bild, und die rotationsinvarianten *Zernike*-Merkmale vorgeschlagen.

⁸ Das DoG (*Difference of Gaussians*)-Filter wird als die Differenz zwischen zwei Gauß-Filtern berechnet. Die Filterung entspricht einem Bandpaßfilter [6; 7].

Beim letzten wird der Grauwert des Pixels unter Einbeziehung der lokalen Umgebung in eine Reihe von Zernike-Polynomen [37] entwickelt.

Nach Angaben der Autoren sei 92% der Fehler mit weniger als 4% Fehldetektionen in der Inspektion von 200 Gußteilen erkannt worden. Die Methode kann allerdings nur kreisförmige Fehler detektieren.

3.5 Methode von Lawson und Parker

Im Jahre 1994 schlugen Lawson und Parker in [27] die Anwendung von künstlichen neuronalen Netzwerken (KKN) zur automatischen Detektion von Fehlern in Röntgenbildern vor. Das Verfahren erzeugt aus dem Prüfbild ein Binärbild, bei dem ein Pixel gleich 0 bzw. 1 ist, wenn eine konstruktive Struktur bzw. ein Fehler detektiert wird. Es handelt sich um ein überwachtes Lernen eines Mehrschicht-Perzeptron-Netzwerkes (MLP)⁹, in dem versucht wird, aus Trainingsdaten die gewünschte Detektion zu bekommen. Zur Gewichtsbestimmung des MLP wird ein *Backpropagation*-Algorithmus angewendet [4].

Die Autoren benutzen eine aus zwei versteckten Schichten des KKN bestehende Netzwerktopologie, bei der die Eingangssignale einem Fenster aus $m \times m$ Grauwerten des Röntgenbildes entsprechen. Das Ausgangssignal ist das Pixel des Zentrums des Fensters im Binärbild. Da die Schwellwertfunktionen der Neuronen in diesem Verfahren sigmoidal sind, wird eine Schwelle benutzt, um ein binäres Ausgangssignal zu erhalten.

Die zwei versteckten Schichten besitzen jeweils zehn Zellen. Bei den Untersuchungen wurde festgelegt, daß die Größe des Fensters der Eingangssignale größer als 7×7 ($m > 7$) sein muß, da es sonst keine Konvergenz in der Lernphase gibt. Für die Trainingsdaten wurden 50.000 Fenster zufällig ausgewählt.

Die gewünschte Detektion der Trainingsdaten erfolgt durch ein auf adaptierte Schwellen basierendes Segmentierungsverfahren. Bei Untersuchungen von fünf Röntgenbildern zeigen Lawson und Parker, daß die Detektion mit KKN besser als das Segmentierungsverfahren der adaptierten Schwellen ist. Die Fehler wurden erfolgreich erkannt und es gab keine Scheinanzeige.

3.6 Methode von Mery und Filbert

Eine neue Methode zur automatischen Inspektion von Aluminium - Gußteilen mit Hilfe monokularer Röntgenbildsequenzen wurde von Mery und Filbert vor kurzem vorgestellt [31; 29]. Das Verfahren kann die Gußfehlererkennung in zwei Schritten mit Hilfe eines einzelnen Filters und ohne a priori Kenntnisse über die Struktur des Prüflings automatisch durchführen.

In einem ersten Schritt wird ein auf Laplacian-of-Gaussian (LoG) basierendes Kantendetektionsverfahren eingesetzt, um Grauwertsprünge (*Kanten*) in jedem Röntgenbild zu finden. Dabei werden die Nulldurchgänge der zweiten Ableitung des nach Gauß tiefpaßgemilderten Bildes detektiert [7]. Diese Kanten werden anschließend herangezogen um Regionen zu suchen, die eine be-

⁹ Englisch: *Multi-layer perceptron*.

stimmte Fläche besitzen und einen hohen Kontrast gegenüber ihrer Umgebung aufweisen¹⁰.

Im zweiten Schritt wird versucht, die hypothetischen Gußfehler in der Bildsequenz zu verfolgen. Die Fehldetektionen der hypothetischen Gußfehler können gut eliminiert werden, da sie in den folgenden Bildern der Sequenz nicht mehr auftreten und somit nicht verfolgt werden können. Hingegen können die echten Gußfehler in der Bildsequenz mit Erfolg verfolgt werden, weil sie sich in Positionen befinden, bei denen geometrische Bedingungen erfüllt werden.

Die Verfolgung der hypothetischen Gußfehler in der Bildsequenz wird nach den Prinzipien der Mehr-Bild-Analyse durchgeführt [30; 13]. Multifokale Tensoren werden zur Reduzierung der Rechenzeit angewendet. Nach einer 3D-Rekonstruktion der Position der in der Bildsequenz verfolgten hypothetischen Gußfehler können diejenigen eliminiert werden, die nicht zum Raum des Prüflings gehören.

Die Bestandteile des Verfahrens wurden in einem Laborprototyp bei realen und simulierten Fällen getestet, und die vorläufigen Ergebnisse bei der Detektion sind vielversprechend (100% der Gußfehler in 16 Bildsequenzen wurden ohne Fehldetektionen erkannt). Darüber hinaus sind die Rechenzeiten für einen praktischen Einsatz akzeptabel. Da aber die Leistung der Methode nur auf einigen Bildsequenzen untersucht wurde, ist eine Auswertung auf einer breiteren Datenbank notwendig.

4 Industrielle Computertomographie

Ein anderes Verfahren zur automatischen Gußfehlererkennung stellt die (Röntgen-) Computertomographie dar, die ebenfalls die Schwächung der Röntgenstrahlung durch das Objekt auswertet. Im Gegensatz zur Röntgendurchleuchtungsprüfung liefert die zweidimensionale Computertomographie ein Querschnittsbild des Prüflings¹¹: Aus eindimensionalen Projektionen werden zweidimensionale Abbildungen eines ebenen Schnittes durch das zu untersuchende Objekt rekonstruiert. Dabei stellen die Projektionen Schwächungsprofile des durchstrahlten Objekts dar, die als winkelabhängige Funktionen der Absorption gemessen wurden. Die Strahlenquelle muß dazu um das Objekt in der interessierenden Ebene herumgeführt werden (oder das Objekt wird rotiert), um Meßdaten der verschiedenen Winkelpositionen zu erhalten. Damit unterscheidet sich die Computertomographie grundlegend von der herkömmlichen Durchstrahlungstechnik, in der das Durchstrahlungsbild eine zweidimensionale Projektion des zu untersuchenden Objekts ist. Die in der Durchstrahlungsebene in verschiedenen Objektiefen liegenden Strukturen können

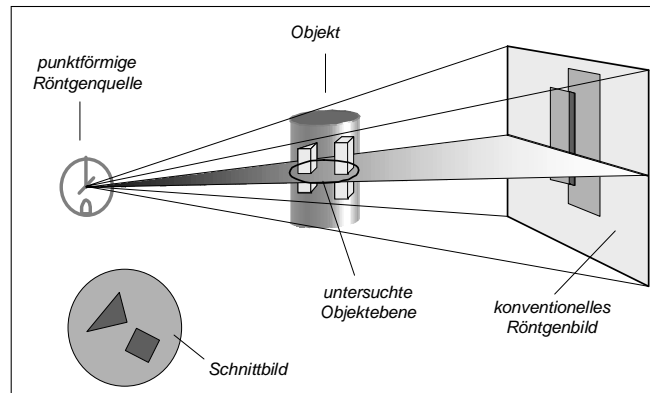


Bild 9: Vergleich eines konventionellen Röntgenbildes mit dem Ergebnis einer computertomographischen Rekonstruktion.

im Querschnittsbild der computertomographischen Rekonstruktion überlagerungsfrei dargestellt werden (vgl. Bild 9).

Zur Berechnung der Objektschicht aus den gemessenen Projektionen stehen eine Vielzahl von Algorithmen zur Verfügung, die sich grundsätzlich in Transformationsmethoden und Reihenentwicklungsansätze einteilen lassen. Die in der zerstörungsfreien Materialprüfung eingesetzten Verfahren gehören üblicherweise den Transformationsverfahren an. Diese beruhen auf dem Zentralschnitt-Theorem (engl.: *projection slice theorem*), das besagt, daß die eindimensionale Fouriertransformierte einer Projektion P_θ unter dem Winkel θ gleich der zweidimensionalen Fouriertransformierten der Objektfunktion entlang einer Geraden durch den Koordinatenursprung im Fourierbereich unter dem Winkel θ ist [5; 35] (vgl. Bild 10). Dabei wird als Projektion P_θ einer Funktion $f(x,y)$ unter dem Winkel θ die Gesamtheit aller Linienintegrale dieses Winkels bezeichnet. Ein Linienintegral p_θ entlang einer Geraden l von A nach B ist definiert als

$$p_\theta(r) = \int_l f(x,y) ds, \tag{11}$$

wobei $f(x,y)$ die zweidimensionale Verteilung der Röntgenabsorptionskoeffizienten der Schnittebene des durchstrahlten Objekts beschreibt und die Gerade l der Weg eines einzelnen monoenergetischen Röntgenstrahls

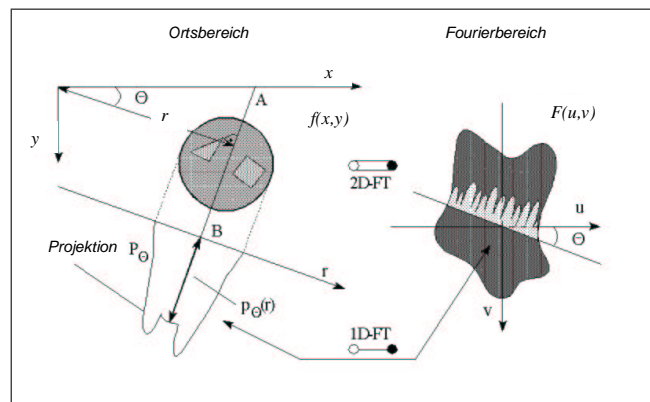


Bild 10: Zentralschnitt-Theorem.

¹⁰ Andere Verfahren zur Segmentierung hypothetischer Gußfehler, wie zum Beispiel das im PXV5000 verwendete (s. Abschnitt 2.3), können im ersten Schritt angewendet werden [32].

¹¹ Das Wort "Tomographie" leitet sich aus den griechischen Worten *tomos* und *graphos* ab und läßt sich mit Schnittbild übersetzen. "Computer" soll mehr auf die Berechnung (engl.: *to compute*) als auf den benutzten Rechner (engl.: *computer*) hinweisen.

von der Röntgenquelle durch das Objekt zum Detektorelement darstellt. Der Röntgenstrahl wird entsprechend dem Röntgenabsorptionsgesetz

$$I = I_0 \exp\left(-\int_l \mu(x,y) ds\right) \quad (12)$$

geschwächt, wobei $\mu(x,y)$ die zweidimensionale Verteilung der Röntgenabsorptionskoeffizienten beschreibt, die der Bildfunktion $f(x,y)$ entspricht. Dabei bezeichnet I_0 die von der Röntgenquelle ausgesandte Strahlung und I die am Detektor auftreffende und durch das Objekt gedämpfte Strahlung. Nach Umformung der Gl. (12) ergibt sich für den Meßwert eines Detektors:

$$p_\theta = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \int_l \mu(x,y) ds \quad (13)$$

Eine Projektion P_θ unter dem Winkel θ erhält man dann durch Realisierung einer Parallelstrahlgeometrie, indem z. B. die Quelle-Detektor-Anordnung nach jeder Meßwertaufnahme radial verschoben wird. Die Rekonstruktion der Objektfunktion $f(x,y)$ aus ihren Projektionen stellt damit ein typisches inverses Problem dar [12].

Allerdings lassen sich diese idealen Verhältnisse nicht in die Praxis umsetzen [22]. Zur Rekonstruktion stehen nur eine endliche Anzahl von Projektionsmessungen zur Verfügung, die wiederum nur aus einer endlichen Anzahl von Linienintegralen bestehen. Damit kann eine zweidimensionale Funktion nie eindeutig rekonstruiert werden. Es lassen sich immer andere Bildfunktionen generieren, die dieselben Projektionen besitzen.

Für die dreidimensionale Computertomographie werden Verfahren benutzt, die zweidimensionale Projektionen auswerten¹². Feldkamp beschreibt in [8] einen mathematischen Ansatz zur Berechnung dreidimensionaler Ergebnisse mit "Kegelstrahl"-Projektionen (engl.: *cone beam*). Einen anderen Ansatz verfolgen Verfahren, die die Ergebnisse konventioneller 2D-Tomographie entsprechend ihrer Lage im Objekt übereinander schichten und die Werte zwischen den einzelnen (rekonstruierten) Objektebenen interpolieren.

Allen Verfahren der Transformationsmethoden ist gemeinsam, daß sie Filter benutzen, die Tiefpaßverhalten aufweisen. Dies wirkt sich äußerst negativ gerade in der Gußteilprüfung aus, da hier starke Meßwertsprünge durch Objektkanten in den Projektionen auftreten (hochabsorbierendes Material neben konstruktiven Hohlräumen). Das führt zu starken Artefakten, die eine Bildauswertung unmöglich machen können.

Um hohe Ortsauflösungen im Rekonstruktionsergebnis zu erzielen, ist ein möglichst kleiner Brennfleck (Fokus) der Röntgenröhre wünschenswert. In der Mikrofokus-Computertomographie (μ CT) sind Auflösungen im μ m-Bereich erzielbar. Um jedoch relevante Materialdicken von Aluminium-Gußteilen für den Einsatz in der Automobilindustrie zu durchstrahlen, ist eine Mindestenergie notwendig, die über den Spezifikatio-

nen der meisten Mikrofokusröhren liegt. Das zu lösende Problem liegt hierbei in der Wärmeabfuhr, die schnell genug erfolgen muß, um eine Zerstörung der Röhre zu verhindern.

Ferner ist die Computertomographie ein recht zeitaufwendiges Verfahren, da sowohl eine Mindestmeßzeit für ein ausreichendes Signal/Rausch-Verhältnis als auch eine Mindestanzahl von Projektionen für eine gewünschte Ortsauflösung notwendig ist. Da aus physikalischen Gründen eine bestimmte Mindestmeßzeit pro Winkelposition nicht unterschritten werden kann, bleibt für eine Meßzeitverkürzung nur die Verringerung der Anzahl der Meßpositionen. In diesen Fällen, in denen Meßdaten fehlen, spricht man vom 'limited data problem' [19]. Abgesehen von der Meßzeitersparnis kann es für bestimmte industrielle Anwendungen wünschenswert sein, nur ausgewählte Projektionen zur Rekonstruktion heranzuziehen. Gründe dafür können sowohl die Unzugänglichkeit bestimmter Winkelpositionen oder Winkelbereiche sein als auch Objekte, deren Projektionen durch die Objektgeometrie für eine Auswertung ungeeignet sind (polyvalente Röntgenabsorptionseigenschaften; kein ausreichendes Signal/Rausch-Verhältnis für alle Winkelpositionen).

Für diesen Bereich des 'limited data problems' sind den Autoren keine industriellen Anwendungen bekannt. Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit verschiedenen Ansätzen der Optimierungsrechnung als auch mit Modifikationen bekannter Algorithmen.

5 Schlußfolgerungen

In diesem Artikel wurden die Grundprinzipien verschiedener Verfahren zur automatischen Gußfehlererkennung erläutert. Diese Verfahren erschienen in der Literatur in den letzten fünfzehn Jahren und zeigen die Entwicklung des Gebietes im Rahmen der Industrie und der Wissenschaft.

Die Detektionsansätze wurden in drei grobe Gruppen gegliedert: Referenzverfahren, Verfahren ohne a priori Wissen und Computertomographie.

Aufgrund der besten Detektionsergebnisse haben sich die Verfahren der ersten Gruppe in der Industrie durchgesetzt. Diese Verfahren leiden jedoch unter aufwendiger Konfiguration der an die Struktur des zu prüfenden Objekts angepaßten Filterung. Üblicherweise dauert diese Konfiguration zwei oder mehr Wochen unabhängig davon, ob sie manuell oder automatisch stattfindet.

Voraussetzung für die Verfahren der zweiten Gruppe ist die Existenz von gemeinsamen Eigenschaften, die alle möglichen Gußfehler gut definieren und gleichzeitig von den Eigenschaften der konstruktiven Strukturen zu unterscheiden sind. Voraussetzungen, die nur in speziellen Prüfsituationen erfüllt sind.

Der industrielle Einsatz der Computertomographie in der Gußteilprüfung für die Automobilindustrie beschränkt sich bisher auf den Materialentwicklungs- und Forschungsbereich sowie auf die Prüfung besonders wichtiger und teurer Teile [1; 28]. Die Gründe dafür liegen sowohl in dem hohen Zeitbedarf der Meßwertauf-

¹² Die prinzipbedingten Probleme der Tomographie bleiben bestehen: auch die dreidimensionalen Ergebnisse weisen eine um eins höhere Dimension auf als die dazu ausgewerteten Projektionen (zweidimensionale 'Bilder').

nahmen als auch an den ungenügenden Ortsauflösungen wirtschaftlicher Systeme, um die geforderten Fehlergrößen zu detektieren.

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] I. Bauscher and U. Hassler. Fortschritte in der Computertomographie. In *DACH Jahrestagung*, Innsbruck, Austria, 29.-31. Mai 2000. Deutsche, Österreichische und Schweizerische Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung.
- [2] K. Bavendiek, A. Krause, and A. Beyer. Durchsatzserhöhung in der industriellen Röntgenprüfung – Eine Kombination aus innovativem Prüfablauf und optimierter Bildauswertung. In *DGZfP Jahrestagung*, volume Berichtsband 63.1, pages 301–306, Bamberg, 7-9 Sept. 1998. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.
- [3] H. Boerner and H. Strecker. Automated x-ray inspection of aluminum casting. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 10(1):79–91, 1988.
- [4] H.-H. Bothe. *Neuro-Fuzzy-Methoden: Einführung in Theorie und Anwendungen*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1998.
- [5] R.N. Bracewell. Strip integration in radio astronomy. *Astrophysical Journal of Physic*, (9):198–217, 1956.
- [6] J. Canny. A computational approach to edge detection. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-8(6):679–698, 1986.
- [7] K.R. Castleman. *Digital Image Processing*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1996.
- [8] L.A. Feldkamp, L.C. Davis, and J.W. Kress. Practical cone-beam algorithm. *Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision*, 1(6):612–619, 1984.
- [9] D. Filbert, R. Klatt, W. Heinrich, and M. Purschke. Computer aided inspection of castings. In *IEEE-IAS Annual Meeting*, pages 1087–1095, Atlanta, USA, 1987.
- [10] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. *Radioskopie, Unterlagen für den Grundkurs Stufe 2*. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., 1996. RS2 2.96.
- [11] A. Gayer, A. Saya, and A. Shiloh. Automatic recognition of welding defects in real-time radiography. *NDT International*, 23(4):131–136, 1990.
- [12] C.W. Groetsch. *Inverse Problems in the Mathematical Sciences*. Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden, 1993.
- [13] R. Hartley. Lines and points in three views and the trifocal tensor. *International Journal of Computer Vision*, 22(2):125–150, 1997.
- [14] H. Hecker. *Ein neues Verfahren zur robusten Röntgenbildauswertung in der automatischen Gußteilprüfung*. PhD thesis, Institut für Allgemeine Elektrotechnik, Technische Universität Berlin, 1995.
- [15] H. Hecker. PXV 5000.2, Vollautomatische Röntgenprüfung, Bedienungsanleitung. Technischer Bericht, Philips Industrial X-Ray GmbH, Hamburg, 1996.
- [16] H. Hecker and D. Filbert. Röntgendurchleuchtungsprüfung: Automatische Anpassung eines Prüfsystems an Prüfaufgaben. In *DGZfP Jahrestagung*, volume Berichtsband 33.2, pages 655–660, Fulda, 27.-29. April 1992. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.
- [17] W. Heinrich. Ein zeitoptimaler Rangordnungsoperator für die Automatisierung der radiologischen Gußteilprüfung. Technischer Bericht 123, Institut für Allgemeine Elektrotechnik, Technische Universität Berlin, 1987.
- [18] W. Heinrich. *Automatische Röntgenserienprüfung von Gußteilen*. PhD thesis, Institut für Allgemeine Elektrotechnik, Technische Universität Berlin, 1988.
- [19] Th. Jaeger. *Optimierungsansätze zur Lösung des limited data problem in der Computertomographie*. Verlag Dr. Köster, Berlin, 1997.
- [20] Th. Jaeger, U. Heike, and K. Bavendiek. Experiences with an amorphous silicon array detector in an adr application. In *International Computerized Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiology, DGZfP Proceedings BB 67-CD*, pages 111–114, Berlin, March 15-17 1999. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.
- [21] B. Jähne. *Digitale Bildverarbeitung*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2 edition, 1995.
- [22] A.C. Kak and M. Slaney. *Principles of computerized tomographic imaging*. IEEE, New York, 1988.
- [23] A. Kehoe and G.A. Parker. An intelligent knowledge based approach for the automated radiographic inspection of castings. *NDT & E International*, 25(1):23–36, 1992.
- [24] R. Klatt. *Computergestützte Röntgenprüfung zur objektiven Qualitätssicherung von Werkstücken*. PhD thesis, Institut für Allgemeine Elektrotechnik, Technische Universität Berlin, 1985.
- [25] J.-M. Kosanetzky. Optimierung des Produktionsprozesses in der Gießerei-Industrie durch vollautomatische Röntgenprüfung. In *DGZfP Jahrestagung*, volume Band 59.2, Dresden, 1997. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.
- [26] J.-M. Kosanetzky and H. Putzbach. Modern x-ray inspection in the automotive industry. In *Proc. 14th world Conference of NDT*, New Delhi, Dec. 8-13 1996.
- [27] S.W. Lawson and G.A. Parker. Intelligent segmentation of industrial radiographic images using neural networks. In *Machine Vision Applications and Systems Integration III, Proc. of SPIE*, volume 2347, pages 245–255, November 1994.
- [28] M. Maisl, H. Reiter M. Purschke, E. Zabler, and M. Rosenberger. Industrielle 3D-Computertomographie. In *DACH Jahrestagung*, Innsbruck, Austria, 29.-31. Mai 2000. Deutsche, Österreichische und Schweizerische Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung.
- [29] D. Mery. *Automatische Gußfehlererkennung aus digitalen Röntgenbildsequenzen*. Verlag Dr. Köster, Berlin, 2000.
- [30] D. Mery and D. Filbert. Die Epipolareometrie in der Röntgendurchleuchtungsprüfung: Grundlagen und Anwendung. *at - Automatisierungstechnik*, 68(12):588–596, Dezember 2000.
- [31] D. Mery and D. Filbert. Verfolgung von Gußfehlern in einer digitalen Röntgenbildsequenz – Eine neue Methode zur Automatisierung der Qualitätskontrolle von Gußteilen. *tm - Technisches Messen*, 67(4):160–165, 2000.
- [32] D. Mery, D. Filbert, and N. Parspour. Improvement in automated aluminum casting inspection by finding correspondence of potential flaws in multiple radiosopic images. In *15th World Conference on Non-Destructive Testing*, Rom, Oct. 15-21 2000.
- [33] M. Purschke and H. Schulenburg. Neue Möglichkeiten der objektiven Durchleuchtungsprüfung. In *DGZfP Jahrestagung*, pages 145–151, Timmendorfer Strand, 9-11 Mai 1994. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.
- [34] M. Purschke and H. Schulenburg. Fortschritte der vollautomatischen Röntgenprüfung. In *DGZfP Jahrestagung*, volume Berichtsband 63.1, pages 309–317, Bamberg, 7-9 Sept. 1998. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.
- [35] J. Radon. Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integrale längs gewisser Mannigfaltigkeiten. *Ber. Sächs. Akad. Wiss., Math. Phys. Kl.*(69):262–277, 1917.
- [36] M. Schaefer and M. Purschke. Vollautomatische Röntgenprüfung - zuverlässig und wirtschaftlich. *Sonderausdruck der Zeitschrift 'Qualität und Zuverlässigkeit'*, 36(7), 1991. München.
- [37] A. Wallin and O. Kübler. Complete sets of complex zernike moment invariants and the role of the pseudoinvariants. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 17(11):1106–1110, 1995.
- [38] T. Wenzel. *ISAR: Ein intelligentes System zur automatischen Röntgenprüfung*. Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen, Erlangen, 1996.

[39] T. Wenzel and R. Hanke. Fast image processing on die castings. In *Anglo-German Conference on NDT Imaging and Signal Processing*, Oxford, 27-28 March 1998.

Dr.-Ing. Domingo Mery, Dr.-Ing. Thomas Jaeger 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: dmery@iee.org

Dr.-Ing. Domingo Mery: promovierte als Gastwissenschaftler am Institut für Meß- und Automatisierungstechnik an der Technischen Universität Berlin auf dem Gebiet der automatischen Gußfehlererkennung. Seit März 2001 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter vom Fachbereich Informatik an der Universidad de Santiago de Chile. Im Bereich der industriellen Bildverarbeitung liegt sein Schwerpunkt bei der Qualitätskontrolle. Adresse: Department of Computer Science, Universidad de Santiago de Chile, Av. Ecuador 3659, Santiago, Chile. www: <http://www.diinf.usach.cl/~dmery>, E-Mail: dmary@iee.org

Dr.-Ing Thomas Jaeger: promovierte am Institut fuer Meß- und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Berlin auf dem Gebiet der industriellen Computertomographie. Anschließend hat er bei der Firma YXLON International X-Ray GmbH, Hamburg, als Software-Entwickler für vollautomatische Röntgenprüfanlagen gearbeitet. Zur Zeit ist er in Berlin im Bereich der industriellen Bildverarbeitung beschäftigt. E-Mail: Th.Jaeger@gmx.net

Prof. Dr.-Ing. Dieter Filbert: vertritt das Fachgebiet Elektrische Meßtechnik am Institut für Meß- und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Berlin. Seine Hauptarbeitsgebiete sind Bildverarbeitung in der Materialprüfung, Computertomographie, technische Diagnose von Elektromotoren, Expertensysteme zur Überwachung elektronischer Schaltungen. Adresse: Institut für Meß- und Automatisierungstechnik, TU-Berlin Sekr. E2, Einsteinufer 19, D-10587 Berlin. www: <http://ima.ee.tu-berlin.de>, E-Mail: dieter.filbert@tu-berlin.de