

L. Jacob / D. Kollhoff / R. Gergs / A. Graf / K.-H. Franke

System zur Inspektion von langen Bohrungen in Aluminiumguß

EINLEITUNG

Bauteile aus Aluminiumdruckguß, die in sicherheitskritischen Komponenten von Automobilen eingesetzt werden, müssen zu 100% geprüft werden, da keine prozeßsichere Technologie vorliegt. Aufgrund der hohen Stückzahl der Bauteile soll die manuelle Kontrolle durch eine automatische Prüfanlage, die robust, schnell und zuverlässig arbeitet, ersetzt werden. Die Anforderung an das System besteht darin, die Bohrungen im Prozeßtakt auf Lunker, Bohrspuren und Ausbrüche mit einer minimalen Größe von $0,4 \times 0,4 \text{ mm}^2$ zu prüfen. Die vorgestellte Systemlösung, die sich durch einen einfachen und robusten Aufbau auszeichnet, erfüllt diese Forderungen.

STAND DER TECHNIK

Die Inspektion von Bohrungen ist eine bekannte Aufgabenstellung der Oberflächeninspektion, die bereits in anderen Einrichtungen bearbeitet wurde, hier aber zu einer Weiterentwicklung führte.

Eine erste Herangehensweise an die Bohrungsinspektion ist der Einsatz von Endoskopen. Bevorzugt werden Endoskope mit Winkelspiegel eingesetzt, die allerdings eine Rotation der Probe bzw. des Endoskops erfordern, um den gesamten Mantel abzutasten. Eine Weiterentwicklung dieses Prinzips benutzt eine Panoramaoptik [1], wodurch auf die Rotation verzichtet werden kann. Die kugelförmige Optik, die sich an der Spitze des Endoskops befindet, ist allerdings für den rauen Industrieinsatz nicht geeignet. Hier ist mit Beschädigungen bei fehlerhafter Zustellung des Bauteils und mit Verschmutzungen durch Späne und Öl zu rechnen. Daraus ergab sich die Forderung an die Neuentwicklung, die teuren optischen Komponenten außerhalb der Bohrung zu belassen. Ein zweiter Ansatz verwendet Optiken mit stark gekrümmter Schärfenebene; hier ist die resultierende Auflösung des Systems zu gering.

Eine neuartige Lösung, die für dieses Projekt noch nicht zur Verfügung stand, beruht auf einem kreisförmigen CCD-Zeilensensor, der an die Inspektion

konzentrischer Objekte optimal angepaßt ist [2]. Bei Weiterentwicklungen besteht die Möglichkeit, diesen Sensor zu integrieren.

TECHNISCHE LÖSUNG

Der technische Ansatz nutzt den Umstand aus, daß im konkreten Fall Durchgangsbohrungen zu prüfen sind. Dieser Fall tritt häufig auf, so daß das Verfahren auch bei ähnlich gelagerten Problemstellungen eingesetzt werden kann. Die neue Lösung besteht darin, daß Beleuchtungseinrichtung und Sensorik auf den gegenüberliegenden Seiten der Bohrung angeordnet werden. Der Abstand zwischen Lichtquelle und Objektiv ist etwas größer als die Bohrungs- und Bauteillänge, so daß eine problemlose Zuführung der Bauteile möglich ist. Lichtquelle und Kamera befinden sich in konstantem Abstand auf dem Schlitten einer Verfahreinheit, wodurch mit konstanter Fokussierung gearbeitet werden kann. Die Lichtquelle wird durch die Bohrung hindurch gefahren, so daß jeder Teil des Mantels einmal beleuchtet wird.

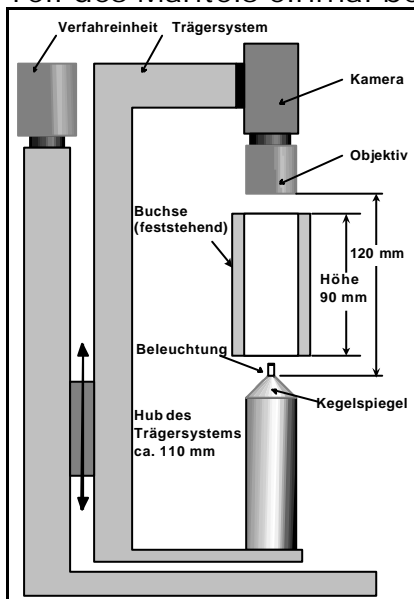


Abb. 1: Aufbau des Systems

Die Beleuchtung muß so gestaltet werden, daß keine Blendung der Kamera eintritt. Deshalb wird die Beleuchtung, die aus einer Kaltlichtquelle mit Lichtleitkabel oder einer Miniaturglühlampe bestehen kann, zur Kamera hin abgedeckt. Vom Lichtaustritt fällt das Licht auf einen Kegelspiegel aus poliertem Stahl, der das Licht auf die Bohrungswand reflektiert. Die Neigung des Spiegels ist vom Durchmesser und der erforderlichen Auflösung abhängig.

Da die Innenwand ebenfalls blank ist, wird das Licht wieder zurück auf den Spiegel reflektiert. Nur bei Lunkern und anderen Oberflächendefekten wird das Licht in andere Richtungen gestreut.

Über die Optik wird das Bild auf dem Spiegel auf den CCD-Sensor, in diesem Fall ein non-interlaced, progressive scan Sensor, abgebildet.

Bei der gewählten Geometrie wird jeweils ein Ring des Mantels mit einer Kameraaufnahme erfaßt. Durch eine entsprechende Vorschubgeschwindigkeit der Verfahreinheit wird eine lückenlose Abtastung des Mantels mit nicht überlappenden Ringen in Video-Echtzeit erreicht.

ALGORITHMISCHE LÖSUNG

Die von der Kamera erfaßten Rohbilder können nicht direkt ausgewertet werden, sondern müssen einer Bildvorverarbeitung bestehend aus geometrischer und photometrischer Korrektur unterzogen werden.

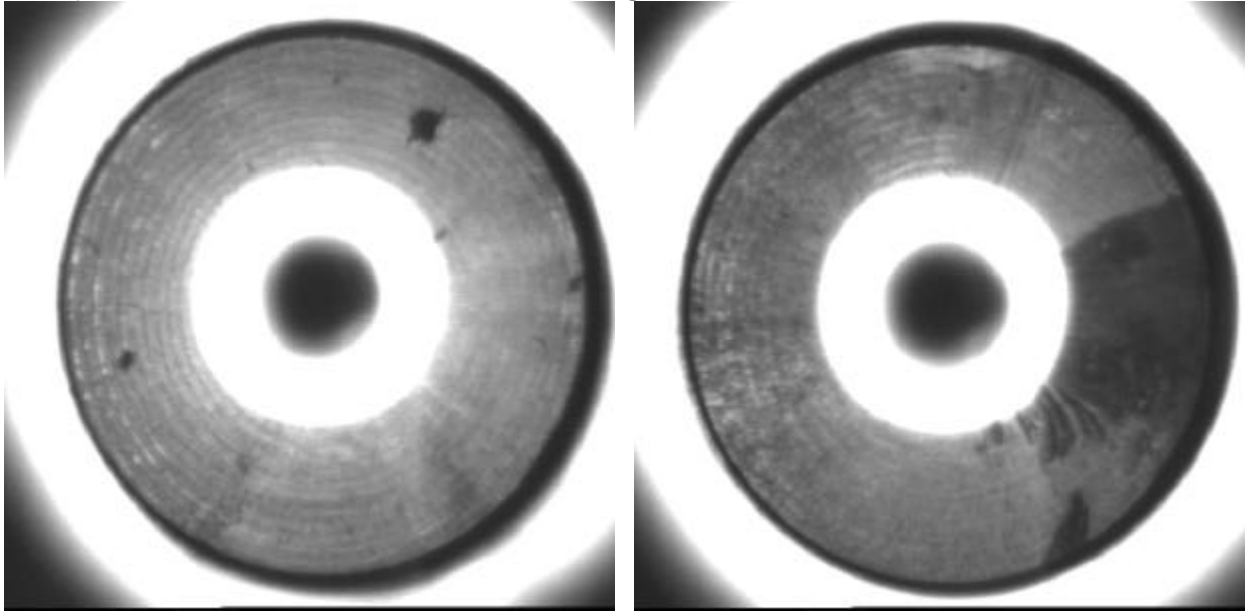


Abb. 2: Rohbild mit Lunker

Abb. 3: Rohbild einer Abschabung

Die geometrische Verzerrung ist dadurch gekennzeichnet, daß die Pixel in Abhängigkeit von ihrem Ort eine unterschiedliche geometrische Auflösung besitzen, die von innen nach außen zunimmt, d.h. die Nachweisempfindlichkeit für Defekte wird von der Auflösung im inneren Ring bestimmt. Durch die Toleranzen des mechanisch-optischen Systems ist die relative Lage des Spiegels zur Kamera nicht ausreichend sicher fixiert.

1. Bestimmung der Orientierung

Es wird davon ausgegangen, daß der Mittelpunkt des Spiegels im Bild dem Schwerpunkt der dunklen, zentralen Fläche, die über eine Schwellwertbildung abgegrenzt wird, entspricht. Da sich die Position der Spiegelmittelpunkte über alle Aufnahmen nur stetig ändern kann, erfolgt zur Ausreißereliminierung ein Ausgleich der ermittelten Positionen über mehrere Bilder hinweg.

2. Geometrische Entzerrung

Aus dem Bild des Kreisringes mit festgelegten Innen- und Außenradien (r_i und r_a) wird über eine geometrische Transformation ein rechteckiges Bild der Mantelabwicklung mit konstanter Auflösung aller Pixel erzeugt. Die Breite x'_{\max} des neuen Bildes wird gleich dem Umfang des inneren Kreises zuzüglich eines Überlappungsbereiches festgelegt; dementsprechend die Höhe y'_{\max} aus der

skalierten Durchmesserdifferenz, so daß quadratische Pixel entstehen. Die Transformation erfolgt mittels gezielter Abtastung des Originalbildes. Für ein Pixel des neuen Bildes an der Stelle (x', y') ergibt sich der Ort (x, y) des korrespondierenden Pixels im Ausgangsbild zu:

$$\begin{aligned}x &= x_m + r \sin \mathbf{j}, & y &= y_m + r \cos \mathbf{j}, \\r &= \frac{y'}{y'_{\max}} (r_a - r_i) + r_i, \\ \mathbf{j} &= \frac{2\mathbf{p} \cdot x'}{x'_{\max} - \text{overlap}}\end{aligned}\tag{1}$$

mit x_m, y_m = Mittelpunkt des Kreisringes, overlap = Überlappungsbereich

3. Photometrische Korrektur

Die aufgenommenen Bilder sind durch eine ortsabhängige Helligkeit gekennzeichnet, die die nachfolgende Verarbeitung stören. Dies sind insbesondere Glanzlichter an Bohrer Spuren, ein Helligkeitsabfall in radialer Richtung, sowie eine nicht völlig gleichmäßige Ausleuchtung in unterschiedlichen Richtungen. Da diese Effekte in starkem Maße von den konkreten Oberflächeneigenschaften abhängen, werden die Parameter der Helligkeitskorrektur an den Bildinhalt angepaßt, indem der mittlere Helligkeitsgradient entlang des Radius (im unkorrigierten Bild) neutralisiert wird.



Abb. 4: Ergebnis der Transformation von Abb. 2



Abb. 5: Ergebnis der Transformation von Abb. 3

Aus den Bildern der einzelnen Ringe wird anschließend ein auflösungsreduziertes Bild der gesamten Bohrung zusammengesetzt.

FEHLERDETEKTION

Für die Erkennung der Fehler müssen entsprechend den unterschiedlichen Fehlerklassen und Fehlereigenschaften angepaßte Algorithmen eingesetzt werden. Dies geschieht in zwei Auflösungsstufen.

Detektion kleiner Lunker

In den korrigierten Bildern eines Ringes der Bohrungswand können Lunker erkannt werden, die kleiner als die Ringhöhe und größer als die zulässige Mindestgröße sind. Obwohl sich Lunker in erster Linie durch ihre geringere Helligkeit im Vergleich zur normalen Bohrungswand auszeichnen, ist dieses Kriterium allein nicht hinreichend für eine sichere Aussagen. Hinzu kommt, daß Lunker in der Regel scharf berandet sind. Algorithmisch werden Kantenfilterung und Schwellwertoperationen eingesetzt. Mit einer morphometrischen Glättung werden Fehlerobjekte zusammengefaßt und Pseudofehler unterdrückt.

Detektion von Mikrodefekten (Spots)

Da das erste Verfahren nicht zur Detektion von Mikrodefekten geeignet ist, wurde ein separates Verfahren implementiert, das naturgemäß nur bei ansonsten homogenen Oberflächen einsetzbar ist. Spots werden mit dem Laplace-Operator mit einstellbarer Filterbreite und einstellbarem Schwellwert erkannt.

Detektion größerer Defekte

Wenn die Lunker genauso groß oder größer als die Streifenhöhe sind, reicht die getrennte Beurteilung der Streifenbilder nicht mehr aus. Auch Riefen und Risse erstrecken sich in der Regel über mehr als ein Teilbild.

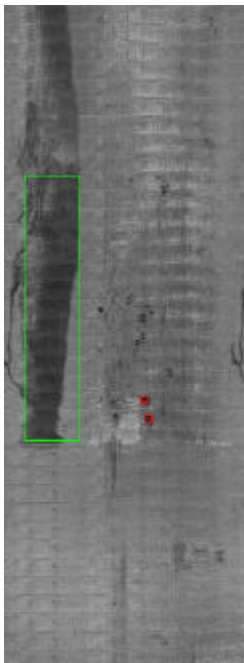


Abb. 6: Zusammengesetztes Bild zu Abb. 3 mit Defekt

Als Alternative bietet sich die Erzeugung eines verkleinerten Gesamtbildes der Bohrung und die Suche nach Objekten, die dunkler als das typische Erscheinungsbild der Bohrungsoberfläche sind, in diesem Bild an. Die Skalierung erfolgt mittels Gauß-Tiefpaß und Unterabtastung.

Wie bei der Detektion kleiner Lunker erfolgt auch hier eine Schwellwertbildung mit anschließender morphometrischer Glättung. Nach der Extraktion der Objekte aus den Bildern entsprechend dem Zusammenhangskriterium müssen diese hinsichtlich Größe und Form bewertet werden, um hinreichend sichere Aussagen zu gewinnen.

Als problematisch bezüglich der Erkennungssicherheit hat sich die unterschiedliche Bearbeitungsqualität der einzelnen Bohrungen erwiesen. Bearbeitungsmängel wie unbearbeitete Gußflächen an den Enden der Bohrung, grobe Bohrspuren, aufgerissene Oberfläche und Einlaufspuren am Bohrungsanfang führen zu Pseudofehlern, die nicht eindeutig von Lunkern unterschieden werden

können. Die besonders kritischen Bereiche wie die Bohrungsenden müssen im Zweifelsfall von der Inspektion ausgeschlossen werden.

FEHLERKLASSIFIKATION

Die Fehlerklassifikation erfolgt getrennt für jeden Detektionsalgorithmus. Zur Klassifikation werden geometrische Merkmale wie Fläche und Kompaktheit sowie photometrische Merkmale wie Grauwertdifferenz zwischen Objekt und Umgebung, Kantensteilheit und Homogenität verwendet. Aufgrund der einfachen Aufgabenstellung ist ein Hyperquader-Klassifikator mit fester Dimensionierung ausreichend.

SOFTWARE UND BEDIENOBERFLÄCHE

Für die Inspektion von Bohrungen in Buchsen aus Aluminiumdruckguß wurde eine komplette Systemlösung geschaffen. Die erstellte Software hat im wesentlichen die Aufgaben

- Initialisierung und Ansteuerung der Hardwarekomponenten (Framegrabber, SPS)
- Unterstützung bei der Kamera- und Beleuchtungsjustage (Systemeinrichtung)
- Einstellung von Parametern für die Lunkersuche
- Steuerung des Ablaufs von Bildeinzug, Inspektionsalgorithmen und SPS-Protokoll
- Anzeige des Inspektionsablaufes und Darstellung der Ergebnisse (Prüfmodus)

Im Prüfmodus werden die zusammengesetzten Abbildungen der beiden zuletzt inspizierten Bohrungen mit den eingezeichneten Objekten sowie ein Meldungsfenster zur Anzeige von Status-, Fortschritts- und Fehlermeldungen dargestellt. Über alle geprüften Bohrungen wird eine Statistik der Gut- und Schlecht-Ergebnisse geführt, die zur Trendanalyse genutzt werden kann.

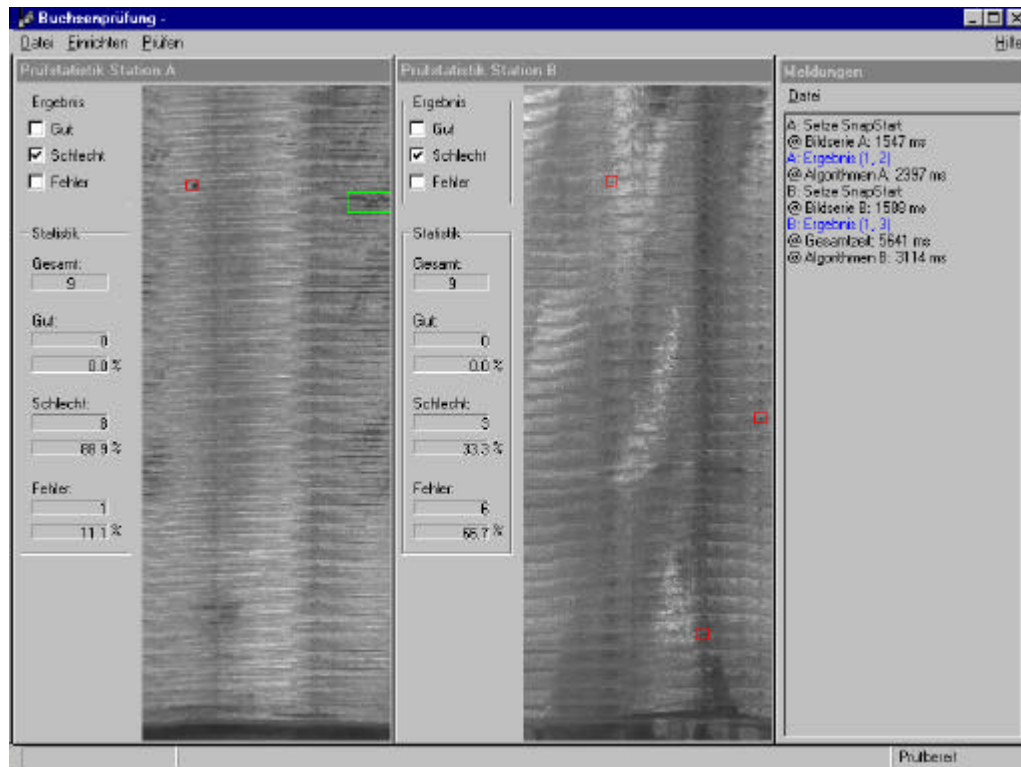


Abb. 7: Normalansicht der Bedienoberfläche im Prüfmodus

Die nachstehende Abbildung verdeutlicht nochmals den Zusammenhang von Kameraaufnahme, geometrischer Transformation, Fehlererkennung und Zusammensetzung aller Teilbilder zum Gesamtbild der Bohrungswand.

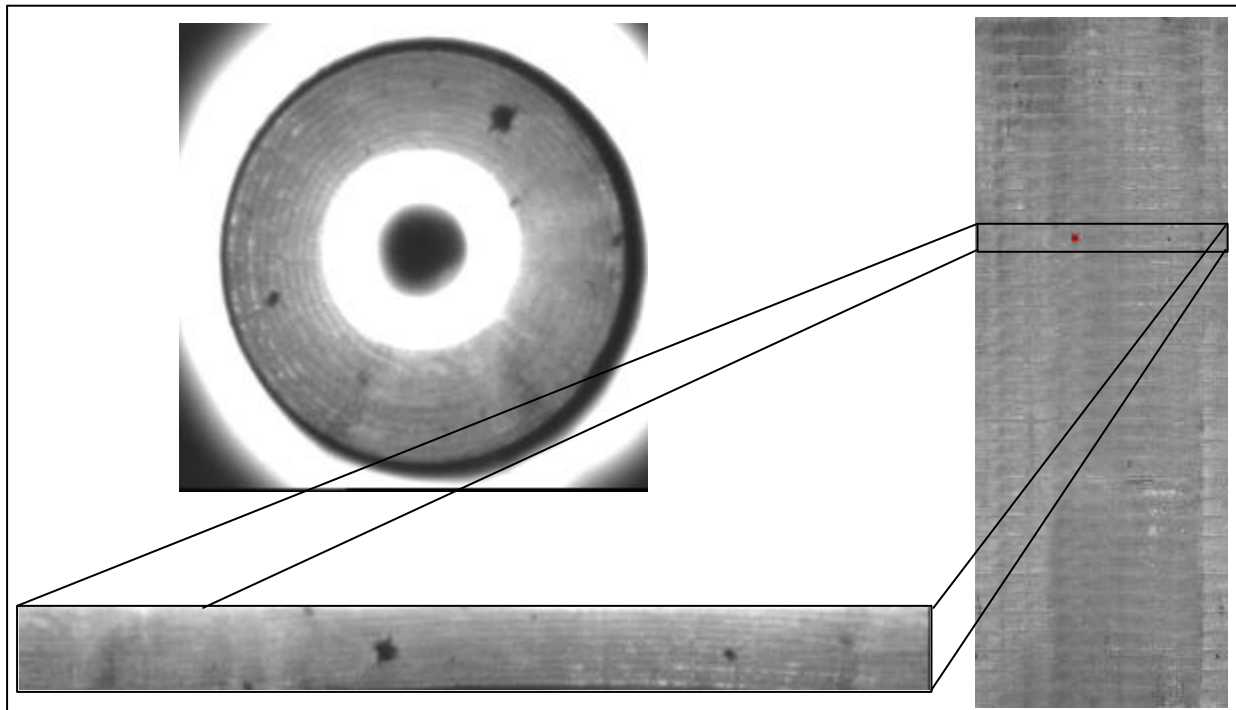


Abb. 8: Aufnahme, korrigiertes Streifenbild und Gesamtbild der Bohrung

ZUSAMMENFASSUNG

Mit der getrennten Anordnung von Beleuchtung und Kameratechnik wird eine robuste und kostengünstige Lösung zur Inspektion von Durchgangsbohrungen vorgestellt. Durch kontinuierliches Durchfahren der Bohrung mit der Lichtquelle in Verbindung mit Kurzzeitbelichtung (Shutter) wird der gesamte Innenmantel streifenweise abgetastet. Mittels zugeschnittener Bildauswerteverfahren werden Oberflächeninhomogenitäten wie Lunker und Ausrisse erkannt. Das realisierte Prüfsystem erreicht mit Standard-PC eine Inspektionsdauer von 3 s / Buchse bei 12 mm Durchmesser und 90 mm Länge. Je Buchse werden 36 Aufnahmen erzeugt und ausgewertet. Dabei werden Lunker bis zu 0,4 x 0,4 mm² sicher und bis zu 0,3 x 0,3 mm² unter guten Bedingungen erkannt. Eine Übertragbarkeit des Verfahrens auf ähnliche Aufgabenstellungen ist gegeben.

Literaturhinweise:

- [1] Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen IIS: PanCam. Automatische Sichtprüfung in Bohrungen und Rohren. Firmenprospekt 1998
- [2] Opti-Sens GmbH: Innenprüfsensor IPS10, Datenblatt

Autorenangaben:

Dipl.-Ing. Lutz Jacob	PD Dr.-Ing. habil. K.-H. Franke
Dipl.-Ing. Dietmar Kollhoff	TU Ilmenau, FG Graphische Datenverarbeitung
Dipl.-Ing. Roy Gergs	PF 100565, D-98684 Ilmenau
Dipl.-Ing. Axel Graf	Tel.: 03677-691205
Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e.V.,	Fax: 03677-668464
Ehrenbergstraße 11, D-98693 Ilmenau	E-mail: karl-heinz.franke@prakinf.tu-
Tel.: 03677-668489	ilmenau.de
Fax: 03677-668464	
E-mail: info@zbs-ilmenau.de	