

Neue Entwicklungen für die automatische Sichtprüfung von Innenflächen

Klaus SPINNLER, Andreas KULESCHOW, Cornelia ARNOLD, Matthias ELTER, Stephan RUPP, Thomas WITTENBERG, Fraunhofer IIS, Erlangen
Christian WINTER, Lehrstuhl für Informationstechnik, Universität Erlangen

Kurzfassung. Neben der Einhaltung geometrischer Toleranzen von Bohrungen und Röhren ist auch deren Oberflächenqualität von entscheidender Bedeutung. Bisher werden Bohrungen vorwiegend durch menschliche Prüfer geprüft, erste vollautomatische, endoskopische Prüfsysteme befinden sich im Einsatz.. Neuentwicklungen von automatischen Sichtprüfsystemen machen es möglich, Innenflächen von Bohrungen zuverlässig, wirtschaftlich und vollautomatisch zu prüfen. Derartige Neuentwicklungen von endoskopischen Prüfverfahren beziehen sich auf neue Beleuchtungskonzepte, sowie auf innovative Strategien zur Bildaufbereitung und –auswertung. Dabei werden Mikro-LED-Arrays in neuartiger Anordnung am distalen Ende des Endoskops eingesetzt. Die geringe Bildqualität faseroptischer Endoskope kann durch Methoden der digitalen Bildverarbeitung signifikant gesteigert werden.

1. Einführung

Bei Bremszylindern in Fahrzeugen können Fehler im Bereich der Bohrungsoberfläche beispielsweise zum vollständigen Ausfall der Funktion führen. Aber auch bei anderen Teilen mit funktionalen Bohrungsoberflächen, wie etwa bei hydraulischen Steuerelementen, müssen bei sicherheitsrelevanten Anwendungen strenge Normen eingehalten werden. Im Schadensfall drohen dem Hersteller u. U. hohe Regressforderungen und ein Imageverlust. Eine lückenlose Kontrolle ist deshalb unerlässlich. Bisher konnten Bohrungen allerdings nur durch menschliche Prüfer kontrolliert werden, eine Vorgehensweise, die die Realisierung von Null-Fehler-Konzepten grundsätzlich ausschließt. Weiterentwicklungen der Bildaufnahme- und Auswertetechnik automatischer Sichtprüfsysteme machen es nun möglich, die Innenfläche von Bohrungen zuverlässig, wirtschaftlich und vollautomatisch zu prüfen. Eine fertigungsbegleitende Prüfung bei gleichzeitiger lückenloser Dokumentation jedes Teils schafft die Voraussetzungen für eine Fertigung nach ISO 9000.

2. Manuelle und automatische Prüfung

2.1 Visuelle Prüfung

Stand der Technik ist derzeit noch die visuelle Qualitätskontrolle von Bohrungen durch den Menschen. Die optische Abbildung wird dabei vorwiegend mit starren Endoskopen vorgenommen, häufig mit einem Seitblick von 70 bis 120 Grad. Damit die gesamte innere Ober-

fläche eines Bohrlochs abgetastet werden kann, sind deshalb eine Vorschubbewegung und eine Drehung des Werkstücks notwendig. Dies wird mittels einer speziellen Handhabungsvorrichtung bewirkt, die eine schraubenförmige Bewegung ausführt. Während der Abtastung wird die Abbildung des Endoskops mit einer Videokamera aufgenommen und auf einem Monitor vom Prüfer beurteilt. Diese Vorgehensweise ist allerdings zeitaufwändig, verursacht hohe Personalkosten und gewährleistet kein völlig zuverlässiges, überprüfbares Ergebnis.

Da erheblicher personeller Aufwand notwendig ist, um in industriellen Fertigungslinien mit hohen Stückzahlen eine annähernd sichere Kontrolle zu erreichen, ist die Nachfrage nach Systemen für eine vollautomatische Sichtprüfung industrieller Bohrungen hoch. Am Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS in Erlangen wurde für diese Aufgabenstellung u. a. das Prüfsystem PanCam entwickelt (Bild 1).



Bild 1: Das Prüfsystem PanCam eingebunden in einen voll verketteten Fertigungsprozess.

2.2 Automatische Prüfsysteme

Ähnlich wie bei der visuellen Begutachtung durch einen menschlichen Prüfer muss auch bei der automatischen Prüfung im ersten Schritt ein technisch möglichst gutes Abbild von der Bohrungsoberfläche erzeugt werden. Um eine optimale Bildqualität zu erzielen, müssen Endoskop, Videokamera und Beleuchtung an die jeweilige Aufgabenstellung angepasst werden. Die Verwendung gängiger Standardkomponenten sorgt für eine hohe Modularität des Systems. So besteht die Plattform des Auswertungsrechners aus einem Industrie-PC. Auch bei den übrigen Bestandteilen wie Videokamera, Endoskop und Beleuchtung handelt es sich um am Markt verfügbare, bewährte und kostengünstige Komponenten, die je nach Anwendungsfall (z. B. für unterschiedliche Bohrungsgeometrien oder Oberflächenbeschaffenheiten) flexibel miteinander kombiniert und konfiguriert werden können. Dabei ist die

geeignete Auswahl und Abstimmung der optischen und elektronischen Komponenten (Endoskop, Endoskop-Adapter, Kamera, Beleuchtung) aufeinander von entscheidender Bedeutung. Für den Inline-Einsatz in der Produktionslinie ist eine mit dem Fertigungstakt schritthaltende Prüfgeschwindigkeit erforderlich. Industrie-PCs stellen heute i. a. eine ausreichende Rechenleistung für die Bildauswertung bereit, in Grenzfällen kann auch vergleichsweise kostengünstig zusätzliche Rechenleistung durch PC-Cluster bereitgestellt werden. Herausforderungen bestehen im wesentlichen bei der Bildgewinnung, insbesondere bei der geeigneten Ausleuchtung unter den beschränkten Platzbedingungen sowie bei der Positionierung zur schnellen Erfassung aller relevanten Prüfflächen.

3. Bildgewinnung

3.1 Panorama-Technologie

Einen Nachteil bei der Prüfung durch den Menschen stellt oftmals die bereits erwähnte Notwendigkeit dar, das Endoskop zu drehen, um die gesamte Oberfläche kontrollieren zu können. Der Rechner dagegen ist nicht auf eine anschauliche Perspektive angewiesen, er kann auch die komplexe Ansicht von Rundum-Objektiven auswerten. Zur Beschleunigung der Inspektion werden deshalb sog. Panorama- oder Weitwinkel-Endoskope mit einem Blickwinkel von 360° eingesetzt, die keinerlei Drehung des Werkstücks oder des Endoskops erforderlich machen [1]. Für die Aufnahme des Prüflings ist damit nur noch eine lineare Vorschubbewegung des Sensors bzw. des Werkstücks nötig. Je nach geforderter Auflösung können dadurch Bildaufnahmegeschwindigkeiten von bis zu 50 mm/s oder mehr in der Bohrung erreicht werden. Die komplette Prüfung eines 100 mm tiefen Bohrlochs kann somit inklusive Zu- und Abförderung in einem Fertigungstakt von ca. 7 Sekunden erfolgen. Durch eine Bildtransformation werden aus jedem aufgenommenen Panoramabild Segmente ausgeschnitten und mittels einer modifizierten, inversen Polarkoordinaten-Transformation elektronisch abgewickelt und entzerrt. Um ein Bild der gesamten inneren Oberfläche zu erhalten, werden die Bilder während der Vorschubbewegung gespeichert und anschließend zu einem Gesamtbild zusammengesetzt (Bild 2).

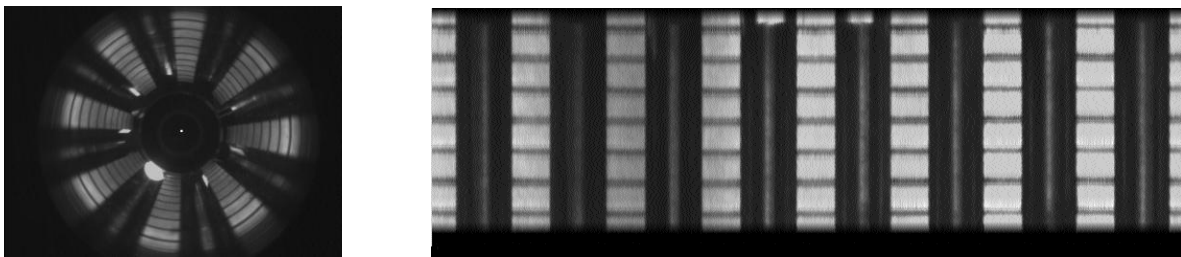


Bild 2: Diese Aufnahmen veranschaulichen an einem Testkörper mit umfänglichen Rillen und Längsrillen die Entzerrung, die PanCam automatisch vornimmt. Das linke Bild zeigt die Tunnelperspektive der Kamera, rechts ist die abgewickelte, entzerrte Darstellung nach der Transformation zu sehen.

Mit Hilfe dieser Panoramatechnik können nicht nur Bohrungen mit rundem Querschnitt, sondern gleichermaßen auch Innenräume mit anderen, z. B. rechteckigen Querschnitten erfasst werden [3]. Da die Abwicklung, Entzerrung und Darstellung der Oberflächen aus den gewonnenen Bildsequenzen ausschließlich durch entsprechende Algorithmen in der Software erfolgt, sind hier auch weitergehende, komplexere Verfahren möglich, mit denen beispielsweise unregelmäßig geformte, innere Oberflächen lückenlos abgewickelt und dar-

gestellt werden können. Andererseits ist zu beachten, dass abhängig von der gegebenen Geometrie des Hohlraumes eine exakte, verzerrungsfreie Abwicklung grundsätzlich nicht immer möglich ist. Hier ist ein applikationsspezifischer Kompromiss bezüglich der zu erzielenden Genauigkeit, bzw. der zulässigen Verzerrungen und der erforderlichen Verarbeitungsgeschwindigkeit im Online-Prüfprozess zu finden.

3.2 Dünne Fiberskope für sehr kleine Bohrungen

Gegenstand aktueller Entwicklung ist die Inspektion von sehr kleinen Bohrungen mit einem Durchmesser unter 2 mm. Dies ist beispielsweise bei der Prüfung von Einspritzdüsen oder Turbinenschaufeln eine relevante Aufgabenstellung. Die eingangs genannte Untergrenze inspizierbarer Bohrungen von ca. 2 mm ist derzeit beschränkt durch die am Markt verfügbaren, linsenoptischen Endoskope, die bis zu einem Arbeitsdurchmesser von ca. 1,7 mm angeboten werden. Noch dünnere Endoskope sind nur mit der Bildübertragungstechnik durch bildleitende Glasfaserbündel verfügbar. Hier liegt der kleinste, marktverfügbare Arbeitsdurchmesser bei ca. 0,3 mm. Anwendung finden solche Geräte bislang ausschließlich bei der „manuellen“ Inspektion durch den Menschen, wie z.B. dem Arzt bei der Untersuchung von Speichel- oder Tränenkanälen. Die übertragene Bildqualität von bildleitenden Faserbündeln ist wesentlich geringer als bei linsenoptischen Bildübertragungssystemen und zusätzlich durch das Auftreten kontrastreicher Artefakte aufgrund der Kern- / Mantelstruktur der Glasfasern beeinträchtigt [5].

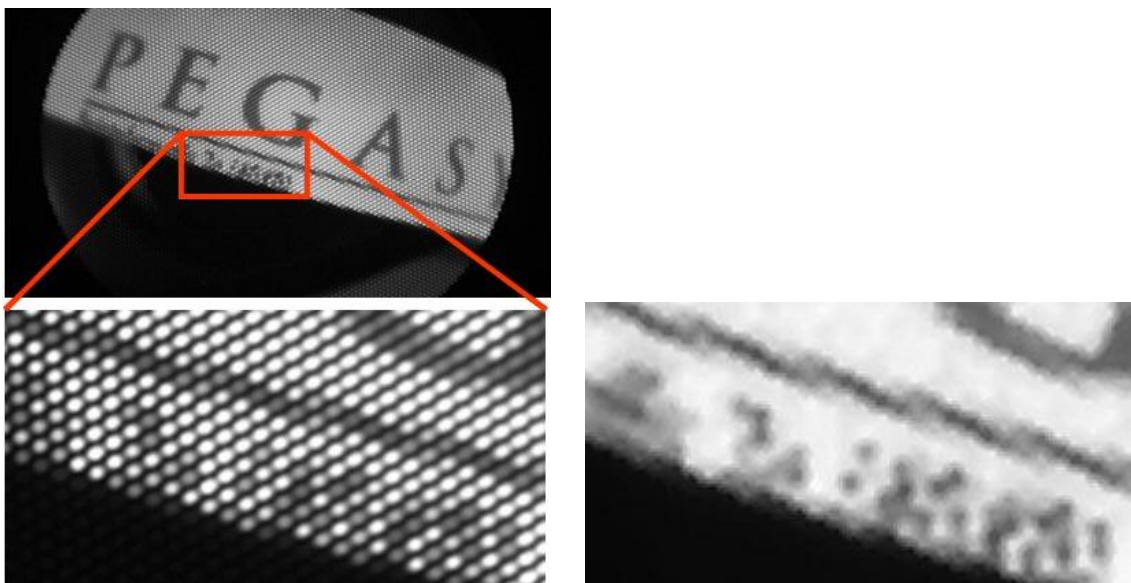


Bild 3:

a) Bildaufnahme mit einem faseroptischen Bildleiter-Endoskop

b) Bildverbesserung durch physikalische Modellierung des faseroptischen Bildleiters

Durch neue Verfahren in der digitalen Bildverarbeitung konnten hier in jüngerer Zeit Maßnahmen zur Bildverbesserung realisiert werden, die zukünftig auch eine automatische, maschinelle Auswertung solcher Bilder möglich erscheinen lassen. Dabei kommen Ansätze aus der physikalischen Modellierung der Faserbündel zum Einsatz, um eine optimale Anpassung und Ausnutzung des Übertragungskanals „faseroptischer Bildleiter“ zu ermöglichen.

Bild 3a zeigt ein Beispielbild, das mit einem faseroptischen Endoskop mit 1,2 mm Arbeitsdurchmesser gewonnen wurde. Bild 3b zeigt anhand des rot markierten Ausschnitts aus Bild 3a den ersten Bildverbesserungs-Schritt durch physikalische Modellierung des

Bildleiters. Dabei werden die Artefakte des Faserbündels entfernt sowie die Intensitätsinformationen gemäß der Helligkeitsinformation der einzelnen Fasern optimal extrahiert und anschließend interpoliert. Da diese Verfahren von kartesischen Anordnungen der Pixelmatrix ausgehen, mussten die Verfahren weiterentwickelt und auf die üblicherweise hexagonale Struktur der faseroptischen Bildleiter angepasst werden.

3.3 Beleuchtung

Die Beleuchtung des untersuchten Hohlraums bei endoskopischen Inspektionen wird heute praktisch ausschließlich durch einen im Endoskopschaft integrierten faseroptischen Lichtleiter realisiert, der das Licht einer externen Lichtquelle zum distalen Ende des Endoskops leitet und dort die beobachtete Szene ausleuchtet (vgl. Bild 4). Die externen Lichtquellen, üblicherweise auf Basis von Hochleistungs-Halogenglühlampen oder Bogenlampen, werden in jüngster Zeit durch externe Lichtquellen auf Basis von Hochleistungs-LEDs ergänzt.



Bild 4: Handelsübliche, starre Endoskope mit integrierter Beleuchtung

Die geeignete Beleuchtung der endoskopisch erfassten Szenen ist für die automatische, maschinelle Auswertung der Bilder von entscheidender Bedeutung. Die heute am Markt verfügbaren Endoskope weisen ausnahmslos Beleuchtungseinrichtungen auf, deren Funktionsweise für die Betrachtung des endoskopischen Abbildes durch den Menschen optimiert ist (Bild 4). Da in automatisierten, endoskopischen Prüfsystemen die gewonnenen Bilder nicht mehr vom Auge erfasst und vom Menschen bewertet werden, sondern von Kamera und Mustererkennungs-Algorithmen in Computern, bedarf es anderer, neuer Endoskop-Beleuchtungen, um optimale Bilder für das Maschinen-Sehen zu gewinnen.

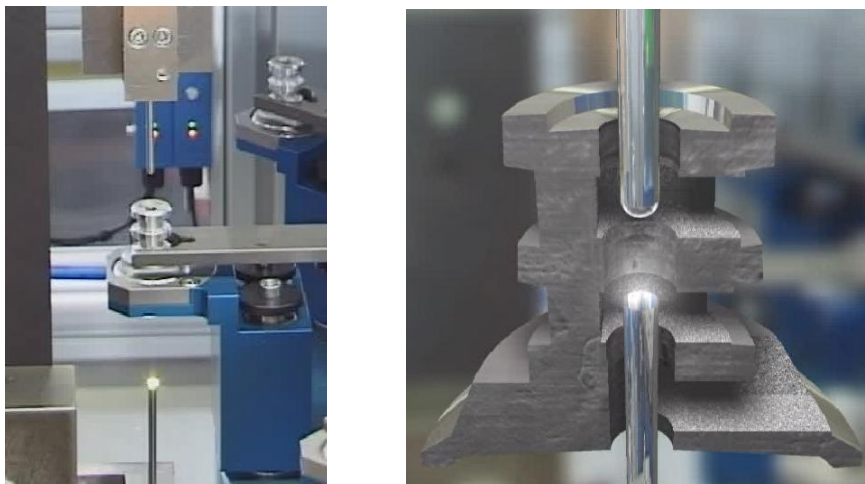


Bild 5: Automatische endoskopische Bildgewinnung in einer Durchgangsbohrung mit Gegenlichtanordnung. Von unten wird der Lichtfinger zugestellt und synchron mit dem Endoskop durch die Bohrung bewegt.

Im Bereich von Endoskopie-Sichtprüfautomaten mit maschineller Verarbeitung der erfassten Bilder kommen überwiegend andere Beleuchtungstechniken zum Einsatz. Diese beruhen nicht auf dem vom Endoskop-Hersteller standardmäßig integrierten Beleuchtungssystem, da sich diese Art der Beleuchtung als wenig geeignet für die Gewinnung von Bildern für eine maschinelle Auswertung erwiesen hat. Im Fall von Durchgangs-Bohrungen hat sich eine Gegenlichtbeleuchtung durch eine vom Endoskop unabhängige Lichtquelle, die auf einem sog. Lichtfinger angebracht ist, als vorteilhaft erwiesen. Bild 5 zeigt exemplarisch die Anordnung zur Bildgewinnung im Prüfautomaten.

In diesem Beispiel wurde der Lichtfinger durch einen faseroptischen Lichtleiter realisiert, der am vorderen Ende in einem geeigneten Metallröhrchen geführt wird. Diese Anordnung ist bei Sackbohrungen mit nur einer Öffnung nicht möglich. Hier bietet die Industrie Sonderbauformen von Endoskopen mit sogenanntem Retro-Rundumblick an. Dabei wird der Panorama-Blick durch eine geeignete Spiegelkonstruktion oder eine sog. Greguss-Linse am distalen Ende des Endoskops nach hinten umgelenkt (Bild 6). Nachteilig bei dieser Anordnung ist die Beschränkung des Sichtfeldes nach vorn, d.h. der Boden einer Sackbohrung kann mit solchen Geräten nicht beobachtet werden.



Bild 6: Retro-Rundumblick Endoskop mit Greguss-Linse

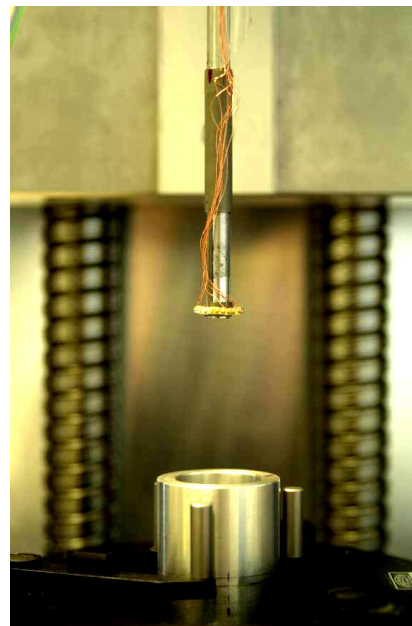
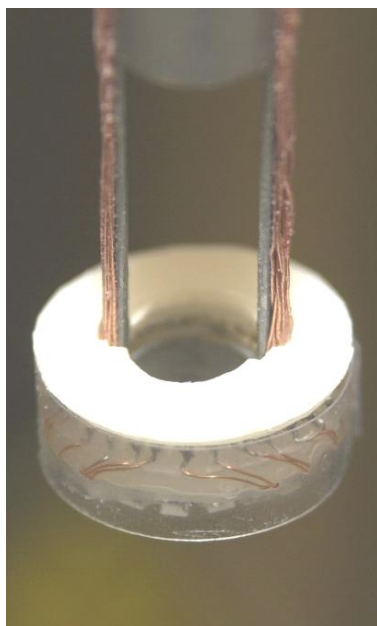


Bild 7: Beleuchtungsträger mit Mikro-LED-Arrays zur Vorwärts- und Rückwärts-Abstrahlung. Links: Anordnung des Beleuchtungsträgers auf dem Endoskop vor einem Testkörper

Mit Hilfe eines gegenüber dem Endoskop beweglichen Beleuchtungsträgers (Bild 7) in Kombination mit einem Rundum-Vorablick-Endoskop konnte eine prototypische Beleuchtungseinrichtung realisiert werden, die in Sackbohrungen sowohl eine Beobachtung des Bodens der Sackbohrung als auch eine Hellfeld-Beleuchtung der Bohrungswand ermöglicht [4].

Auf dem Beleuchtungsträger wurden dabei geeignet angeordnete Arrays von Mikro-LEDs eingesetzt. Die Vorteile liegen einerseits in der geringeren Leistungsaufnahme, der einfachen und hochdynamischen Steuerbarkeit, andererseits in der wesentlich höheren Lebensdauer der LEDs. Die Entwicklung neuer, leistungsfähiger LEDs in immer kleineren Gehäusen (z.B. SMD-Bauform) verläuft in den letzten Jahren rasant, und es ist zu erwarten, dass auch im Bereich der Endoskopie LED-Beleuchtungen zunehmend Eingang finden werden.

4. Bildauswertung

Nach der Bilderfassung und Aufbereitung gemäß der in Kap. 3.1. beschriebenen Panorama-Technologie erfolgt die automatische Bildauswertung, bis hin zur Generierung eines Gut-/Schlecht-Ergebnisses zur automatischen Teilesortierung. In Bezug auf die vom Anwender parametrisierten Prüfbereiche wird dabei zunächst die Segmentierung von fehlerverdächtigen Gebieten durchgeführt sowie anschließend deren Klassifikation und Bewertung nach einstellbaren Kriterien.

4.1 Segmentierung

Die Segmentierung von möglichen Fehlstellen erfolgt in zwei wesentlichen Schritten (Bild 8). Zunächst werden Stellen mit hohem Kontrast detektiert. Dies geschieht durch einen Vergleich zwischen dem aktuellen und einem gefilterten Bild. Überschreitet die Differenz der Intensitätswerte zweier korrespondierender Bildpunkte eine bestimmte Schwelle, so wird an dieser Position eine Markierung gesetzt.

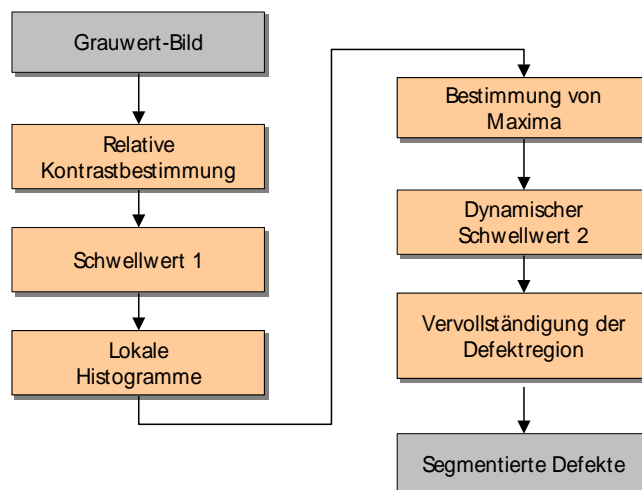


Bild 8: Ablaufschema des Segmentierungsverfahrens.

Die in Bild 9 gezeigten Oberflächen weisen dunkle Defekte auf heller, fehlerfreier Umgebung auf, so dass in diesem Fall die relativ dunklen Stellen markiert werden. Die markierten Stellen, im weiteren "Kerne" genannt, stehen im Mittelpunkt der folgenden Schritte des Auswerteverfahrens [2]. Als Ergebnis erhält man einerseits Kerne (siehe Bild 9, Mitte), die

schon genau den Defekten entsprechen (a), aber auch solche, die nur einen Teil des Objekts umfassen (b), oder sogar Gruppen von Kernen, die einen einzelnen Defekt jeweils teilweise markieren (c). Es existieren auch Kerne, die keinem echten Defekt entsprechen (d). Sie werden markiert, weil der Kontrast an diesen Stellen eine vorgegebene Schwelle übersteigt. Solche Artefakte werden in späteren Verfahrensschritten wieder eliminiert. Würde der Nutzer die Schwelle weiter heruntersetzen, so würden Defekte mit schwachen Kontrasten nicht mehr detektiert.

Im zweiten Schritt des Verfahrens werden, ausgehend von den gefundenen Kernen, unvollständige Markierungen von Defekten vervollständigt. Die exakten Objektgrenzen werden dabei mithilfe weiterer Verfahren gefunden (Bild 9 rechts). Danach werden die Charakteristiken der auf diese Weise ermittelten Objekte, wie z.B. Position, Fläche und Abmessungen oder Kontrast gegenüber dem Hintergrund, berechnet. Die verwendeten Methoden sind sehr unempfindlich gegenüber Änderungen der Beleuchtung und erlauben es, Objekte sicher aufzufinden.

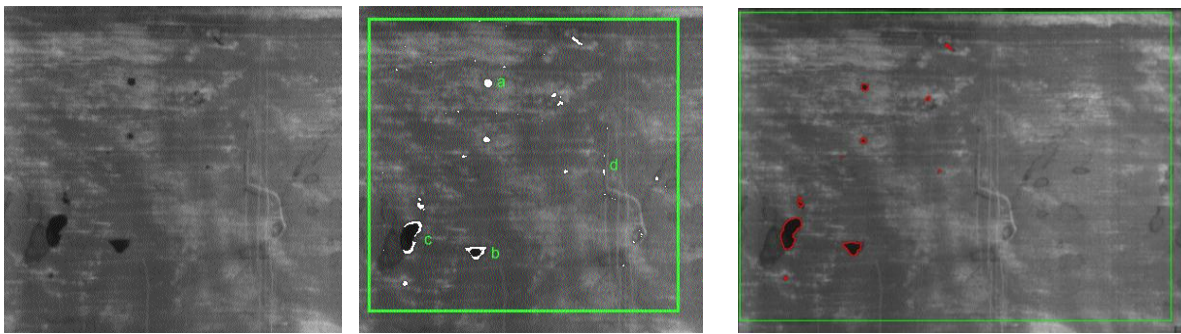


Bild 9: Beispiel für eine Kerndetektion. Links: Originalbild mit Lunkern; Mitte: detektierte Kerne aus dem Originalbild; rechts: endgültig segmentierte Lunker.

4.2 Klassifikation und Bewertung

Entsprechend den Erfordernissen des Anwenders können die gefundenen Objekte nach Größe und Form als unterschiedliche Fehlerarten wie Poren, Lunker, Kratzer, Riefen oder Kantenfehler differenziert werden. Fehler ab einer Größe von 0,05 mm können sicher erkannt und bewertet werden. Die Kriterien für die Bewertung eines Bauteils können vom Benutzer interaktiv eingestellt werden. Vorgegeben werden können beispielsweise Mindestgrenzen für die Fehlergröße, unterhalb derer ein Objekt nicht als Defekt bewertet wird, oder die Anzahl von Defekten, die in einem Bauteil zulässig sind, bevor es als Ausschuss zu bewerten ist. Das System ist auch in der Lage, verschiedene Oberflächenbereiche nach unterschiedlichen Prüfkriterien zu bewerten. Sämtliche Inspektionsergebnisse werden in einer Protokolldatei festgehalten, in der auch die gefundenen Fehler aufgelistet sind. Zusätzlich wird die Anzahl der ermittelten Gut- und Schlechteile protokolliert. Die Protokolldateien können auf einfache Weise in übliche Datenbanksysteme oder Tabellenkalkulations-Programme importiert und dort nach anwenderspezifischen Kriterien weiter ausgewertet werden. Die Monitor-Darstellung der geprüften Oberflächen zeigt die gefundenen Defekte sowie deren Bewertung und ermöglicht so die fortlaufende Kontrolle der Produktion und des Prüfbetriebs durch das Bedienungspersonal. Ausschuss-Teile werden nach der Prüfung durch eine Sortiervorrichtung automatisch ausgesondert.

5. Anwendung

Derzeit können Bohrungen mit einem Durchmesser ab ca. 2 Millimeter geprüft werden. Bei einer Durchmesser-Obergrenze von 30 Millimeter liegt die Auflösungsschwelle bei ca. 0,1 Millimeter pro Pixel. Selbstverständlich können auch Bohrungen größeren Durchmessers geprüft werden, allerdings bei niedrigeren Auflösungen.

Grundsätzlich ist das vorgestellte System für die Überprüfung bearbeiteter Metalloberflächen auf Lunker, Poren (Guss) und Kratzer hin geeignet. Ein besonders lohnendes Einsatzgebiet für das System ist die Prüfung von Hydraulik- und Pneumatikzylindern (Bild 10), wie sie im Automobilbau in großer Zahl benötigt werden, aber auch von Brems-, Kupplungs-, ABS-, Geber- und Nehmerzylindern sowie von Getriebe- und Motorgehäusen. Bei der Anwendung zur Sichtprüfung von gezogenen Stahl- oder Präzisionsrohren werden Kratzer und Ziehriefen zuverlässig erkannt. Eine weitere Aufgabenstellung besteht in der Prüfung von Innenflächen an Sanitärfittings und Armaturen.

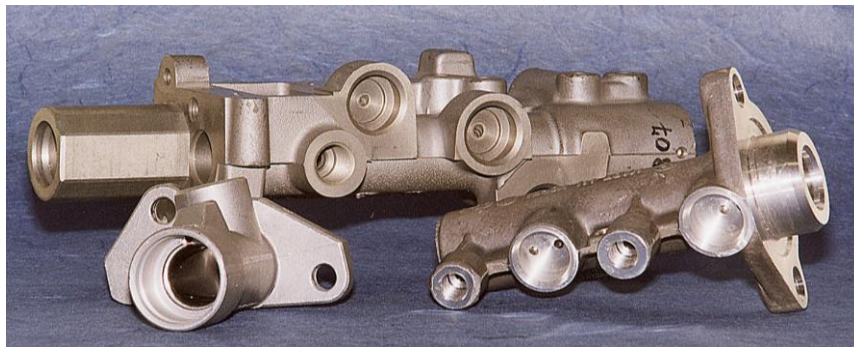


Bild 10: Anwendungsbeispiel Hydraulik- und Bremszylinder.

6. Ausblick

Obwohl für die Bohrungsprüfung an vielen technischen Objekten mittlerweile bewährte Lösungen verfügbar sind, gibt es immer noch Aufgabenstellungen, die fortgesetzter Anstrengungen in Forschung und Entwicklung bedürfen. Neben den in Kap. 3.2 beschriebenen Verfahren sind weitergehende Verfahren zur Steigerung der Abbildungsqualität in Entwicklung.

Ein Ansatz besteht in der Nutzung von sog. „Superresolution-Techniken“, um das sehr geringe Auflösungsvermögen der dünnen, faseroptischen Bildleiter zu steigern. Der Superresolution-Ansatz in der digitalen Bildverarbeitung beruht auf dem Prinzip, für das zu verbessernde Bild in einer Bildfolge mit Hilfe der vorangegangenen oder nachfolgenden Bilder derselben Bildfolge zusätzliche Information zu gewinnen und an den entsprechenden Stellen in das zu verbessernden Bild einzufügen. Ein erstes Beispiel ist in Bild 11 gezeigt. Bild 11 zeigt den rot markierten Ausschnitt von Bild 3 nach der Anwendung des Superresolution-Verfahrens. Während in Bild 3 kaum erkennbar ist, dass es sich in dem rot markierten Ausschnitt um kleine Schrift handelt, kann sie durch die beschriebenen Verfahren der Bildverbesserung sicht- und lesbar gemacht werden (Bild 11).



Bild 11: Bildverbesserung durch verbessertes Superresolution-Verfahren

Weiterer F&E Bedarf besteht in der Optimierung und Verbesserung der Beleuchtungseinrichtungen, speziell für die Anwendung des Maschinensehens in Sichtprüfautomaten. Hier sind in naher Zukunft Neuentwicklungen zu erwarten, die mit Hilfe der neuerdings verfügbaren, modernen LED-Technologien und der einhergehenden Miniaturisierung neue Lösungen bisher nicht lösbarer, bzw. nicht wirtschaftlich lösbarer Aufgabenstellungen ermöglichen werden.

7. Literatur

- [1] Spinnler, K.; Kuleschow, A.; Flachmann, M.; Helmreich, G.; Schmidt, R.; Wittenberg, T.: **Automatische Sichtprüfung von Bohrungen in hydraulischen Steuerelementen** VDI/VDE-GMA Fachtagung „Bildverarbeitung im industriellen Einsatz“, Stuttgart 2000
- [2] Kuleschow, A.; Spinnler, K.: **New Methods For Segmentation Of Images Considering The Human Vision Principles** ICCVG Warschau 2004
- [3] Spinnler, K.: **Rechteckige Querschnitte kontrollieren** QZ 50 2/2005
- [4] Arnold, C.: **Experimentelle Untersuchung unterschiedlicher Beleuchtungstechniken für die automatische Bohrungsinspektion** Diplomarbeit, Fraunhofer IIS, Erlangen 2006
- [5] Winter, C.; Rupp, S.; Elter, M.; Münzenmayer, C.; Gerhäuser, H.; Wittenberg, T.: **Automatic Adaptive Enhancement for Images Obtained With Fiberscopic Endoscopes** IEEE Trans. Biomed. Engineering, VOL. 53, NO. 10, Oct 2006