

Automatische Gussteileprüfung durch Bildverarbeitung

FOTOS 1, 2, 4, 5, 7, 8, 9: PROFACOR
FOTOS: 3, 6 WESTCAM



Bild 1: Oberflächenfehler an bearbeiteter Gussteilfläche

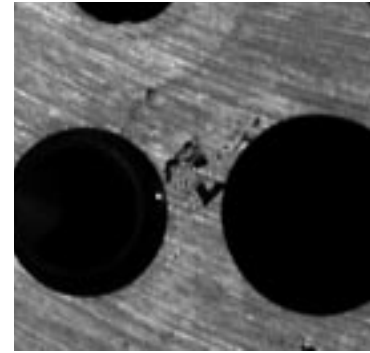


Bild 2: Lunker durch Schattenwurf sichtbar gemacht

VON WERNER REISNER UND CHRISTIAN EITZINGER AUS STEYR, ÖSTERREICH 1

Bei der Bearbeitung und Herstellung von Gussteilen können verschiedenste Arten von Fehlern an der Oberfläche auftreten. Trotz großer Sorgfalt können diese nicht immer verhindert werden. Zu den Fehlern gehören typischerweise Lunker, Poren, Kratzer, Beschädigungen, Ausbrüche oder Grate. In vielen Fällen beeinträchtigen diese Fehler die Funktion eines Teils und müssen daher im Rahmen einer Endkontrolle aussortiert werden (**Bild 1**).

Bildverarbeitung ist eine etablierte Methode, solche Prüfaufgaben automatisch, dokumentierbar und reproduzierbar durchzuführen. Aus Sicht der Bildverarbeitung ergeben sich aber bei der Inspektion von Gussteilen spezifische Herausforderungen, die mit der speziellen Oberfläche der Teile zusammenhängen. Zum einen besitzen Gussteile gewöhnlich eine komplexe Außenkontur, sind also in der Regel nicht geradlinig begrenzt. Zum anderen weisen rohe und auch bearbeitete Gussteile eine „zufällige“ Oberflächenstruktur (Textur) auf, die durch Bearbeitungsschritte wie Sandstrahlen, Fräsen oder Schleifen verursacht sind. Die Trennung zwischen regulärer Textur und Fehlern stellt daher besondere Herausforderungen an die Algorithmen, die die Bilder auswerten.

Auch das Reflexionsverhalten der Gussteiloberfläche – entscheidend für die In-

spektion mit Kameras – ist manchmal nur schwer vorherzusagen. Denn vorgelagerte Prozesse, wie z. B. das Bürsten oder das Waschen der Teile beeinflussen das Reflexionsverhalten ebenfalls.

Alle diese Umstände machen es daher oft notwendig, speziell angepasste Bildverarbeitungssysteme mit einer für Gussteile spezifisch entwickelten Auswertesoftware zu verwenden.

Sensorik zur Oberflächenerfassung

Technisch wird die Erfassung der Oberfläche heute so gelöst, dass mit Hilfe von Zeilen- oder Matrixkameras Bilder von der Oberfläche des Teils erzeugt und für die spätere Verarbeitung in einem Rechner abgelegt werden. Besonderes Augenmerk muss dabei auf die Optimierung der Beleuchtung gelegt werden. Während Kratzer sehr gut mit einer flach einfallenden, gerichteten Beleuchtung (Dunkelfeld) sichtbar gemacht werden können, benötigt die Erkennung von Lunkern und Poren eine diffuse Auflichtbeleuchtung. Häufig wird daher dasselbe Teil unter verschiedenen Beleuchtungen aufgenommen.

Für die Prüfung von rohen Gussteilen muss neben einer einfachen Durchlichtbeleuchtung auch sehr oft eine 3-D-Information erzeugt werden. Nur so können die relevanten Bereiche hinreichend genau erfasst werden. Dazu bieten sich verschiedene Sensorsysteme an, die je nach gewünschter Taktzeit und Genauigkeit ausgewählt werden müssen.

3-D-Inspektion von rohen Gussteilen.

Um Fehler auf rohen Gussteilen zu finden, ist aufgrund der oft komplexen Geometrie der Einsatz von speziellen Beleuchtungen bzw. die Extraktion von 3-D-Information sinnvoll. Um dies zu bewerkstelligen, stehen eine Reihe von Methoden zur Verfügung, die für den industriellen Einsatz robust, genau und schnell genug sind:

1. Shape from shading:

In vielen Fällen ist es nicht notwendig, die Geometrie des Teils exakt zu vermessen. Meistens reichen für die Klassifikation und Erkennung von Fehlern Informationen über die Beschaffenheit des Fehlers aus. Das heißt, ob der Fehler nach außen gewölbt, wie z. B. bei Schmutz oder eben ist, wie z. B. ein Fleck oder nach innen gewölbt ist, wie z. B. eine Delle. Eine flach einfallend gerichtete Beleuchtung, die z. B. mit einem LED-Linienlicht erzeugt werden kann, führt zu einem charakteristischen hell-dunkel Verlauf (**Bild 2**). Anhand dessen können diese Fehlerarten unterschieden werden. Diese Art der Bildaufnahme und -auswertung ist allerdings auf ebene oder zylindrische Flächen beschränkt, die keine große Krümmung aufweisen. Dieses Verfahren wird häufig ergänzend eingesetzt, um Fehler abzuklären und Detailinformation zu gewinnen.

2. Streifenlichtprojektion:

Bei dieser Methode wird ein Sensor-kopf verwendet, der aus einer Projekti-

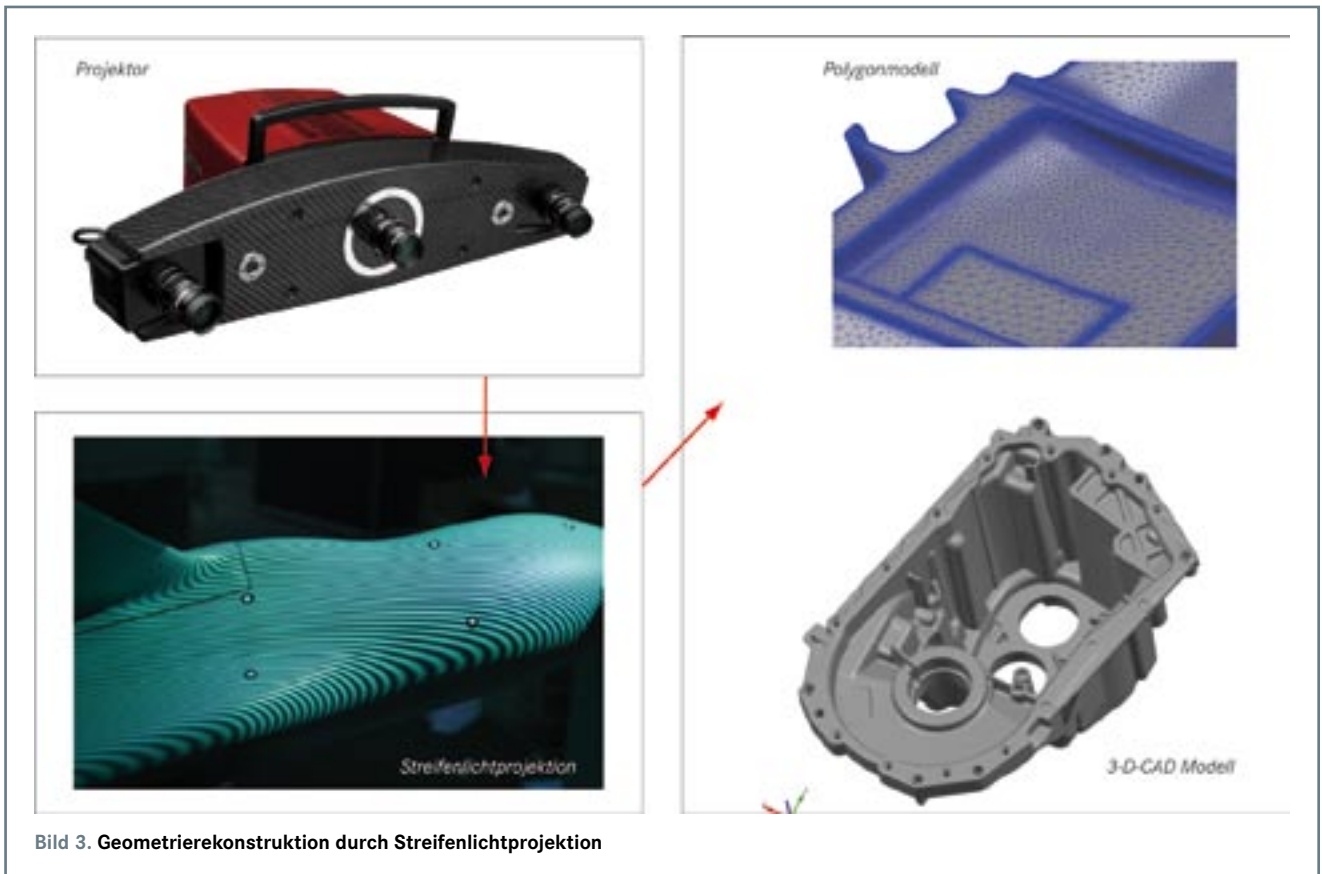


Bild 3. Geometrierekonstruktion durch Streifenlichtprojektion

onseinheit in der Mitte des Gerätes und zwei Kameras besteht. Vor der Projektionseinheit verschiebt sich ein Streifenmuster, das durch eine starke Lichtquelle auf die Bauteiloberfläche projiziert wird. Die beiden Kameras, deren Winkel zueinander über eine photogrammetrische Kalibrierung bekannt ist, nehmen das Streifenmuster auf und errechnen daraus über das Triangulationsprinzip, die 3-D-Koordinaten der Oberfläche. Bild 3 zeigt schematisch den Weg von der Projektion über ein Polygonmodell zur Teilegeometrie.

Typischer Einsatzbereich ist die Analyse von Gussteilen zum Vergleich zwischen 3-D-CAD-Daten und der tatsächlichen Form des Gussteils. Für 100 %-Prüfungen wird dieses Verfahren aufgrund der Taktzeit nicht eingesetzt. Zudem ist es manch-

mal auch notwendig, die Oberfläche des Teils zu modifizieren, um Reflexionen zu vermeiden.

3. Laser-Triangulation:

Bei diesem Messverfahren wird als Lichtquelle ein Laser verwendet, dessen punktförmiger Strahl durch eine Optik auf eine Linie ausgeweitet ist. Damit kann ein Querschnitt des Prüfteils erfasst werden. Durch sequentielles Abtasten des Objektes und Aufzeichnung der Laserprojektionen mit Kameras kann ebenfalls die 3-D-Geometrie errechnet werden (Bild 4).

Das Triangulationsverfahren ist sehr flexibel und kann sehr gut in Verbindung mit einem Roboter eingesetzt werden, der die relevanten Konturen abfährt. Weiterhin spricht die erreichbare Genauigkeit sowie die Geschwindigkeit für dieses Sys-

tem. Verfügbare Sensoren erlauben je nach Helligkeit des Lasers bis zu 1000 Profile pro Sekunde. Dadurch werden 100 %-Prüfungen möglich. Der Einsatz einer gerichteten Laserbeleuchtung hat den Vorteil einer großen Unabhängigkeit von der umgebenden Beleuchtung sowie von den speziellen Reflexionseigenschaften der Teile (Robustheit). Insbesondere beeinträchtigen Verschmutzungen der Oberfläche oder starke Schwankungen der Oberflächentextur den Laserscanner nur minimal.

Das unmittelbare Resultat einer solchen Laserabtastung ist eine 3-D-Punktwolke, d. h. 3-D-Koordinaten von Punkten, die verstreut auf der Oberfläche liegen (Bild 5). Diese 3-D-Punktwolke kann mittels Software in ein Polygonmodell, also eine zusammenhängende Beschreibung der Oberfläche und schließlich in



Bild 4: Extraktion von 3-D-Information aus Laserprojektionen



Bild 5: Oberflächenerfassung durch Lasertriangulation

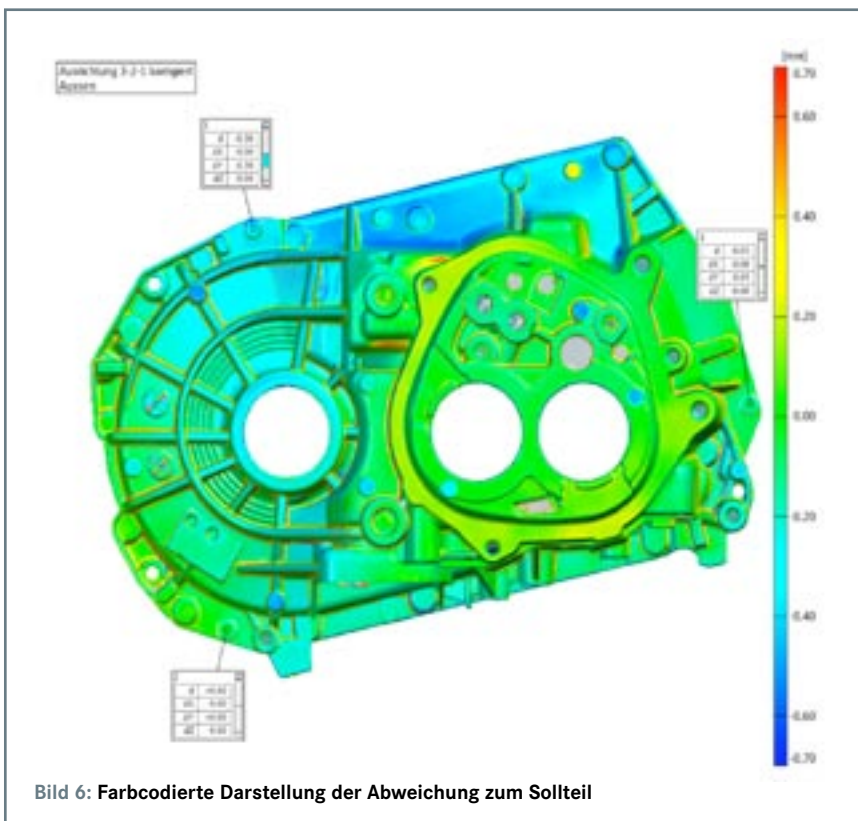


Bild 6: Farbcodierte Darstellung der Abweichung zum Sollteil

CAD-Daten transformiert werden. Damit ist es möglich, ein eingescanntes Teil mit einem Sollteil zu vergleichen und Abweichungen zu detektieren (Bild 6). Es können aber auch Ebenheitsmaße oder Krümmungsradien direkt aus dem Polygonmodell berechnet werden und auf Toleranzüber- bzw. -unterschreitung geprüft werden.

2-D-Inspektion von bearbeiteten Flächen. 2-D-Bildverarbeitung wird vorwiegend für die Prüfung von bearbeiteten Flächen eingesetzt. Dies umfasst z. B. die automatische Kontrolle der Umrisse einer Fläche oder die Analyse der Textur, d. h. das Finden von Merkmalen im „normalen“ Bearbeitungsmuster, etwa Lunker, Ausbrüche, Kratzer (Bild 7).

Die Bilder werden dabei entweder von Zeilenkameras oder von Matrixkameras aufgenommen, wobei sich bei der Aufnahme mit Zeilenkameras entweder der Teil oder die Kamera bewegen muss. Diese Bewegung muss in der Regel mittels einer Triggereinrichtung mit der Bildaufnahme synchronisiert werden, um von Bewegungsschwankungen unabhängig zu sein.

Hierbei fallen z. B. für Bauteile der Größe 500 mm x 300 mm x 300 mm und einer Fehlerauflösung von 0,2 mm etwa 150 MB an Rohdaten an, die von der Auswertesoftware verarbeitet werden müssen. Moderne PC-basierte Systeme bewältigen dies in wenigen Sekunden.

Der Auswahl der Beleuchtung kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Je nach Anforderungen können durch eine gerichtete Beleuchtung die Oberflächenstrukturen wie Schleif- oder Fräsriefen oder kleine Kratzer stärker hervorgehoben werden. Bei diffuser Beleuchtung wird die Oberflächenstruktur unterdrückt und Poren werden besser sichtbar. Häufig ist es auch sinnvoll, mehrere Bilder unter verschiedenen Beleuchtungen zu kombinieren und gemeinsam auszuwerten.

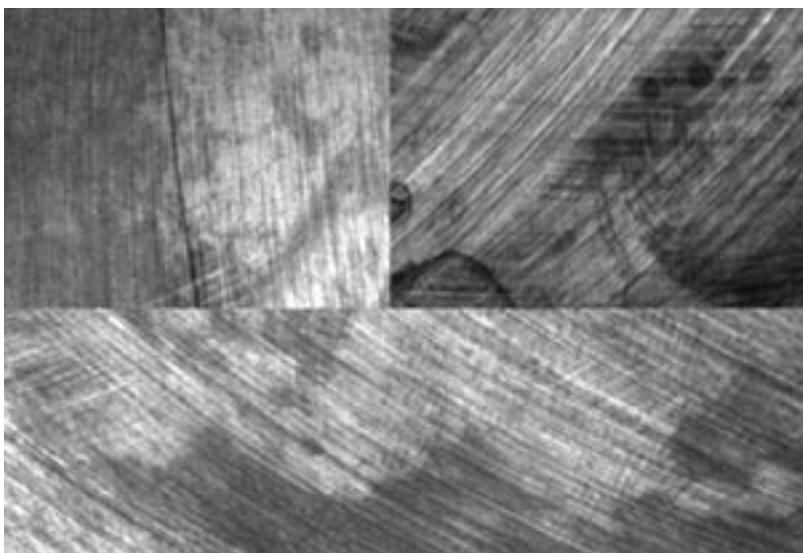


Bild 7: Frässtruktur bearbeiteter Oberflächen

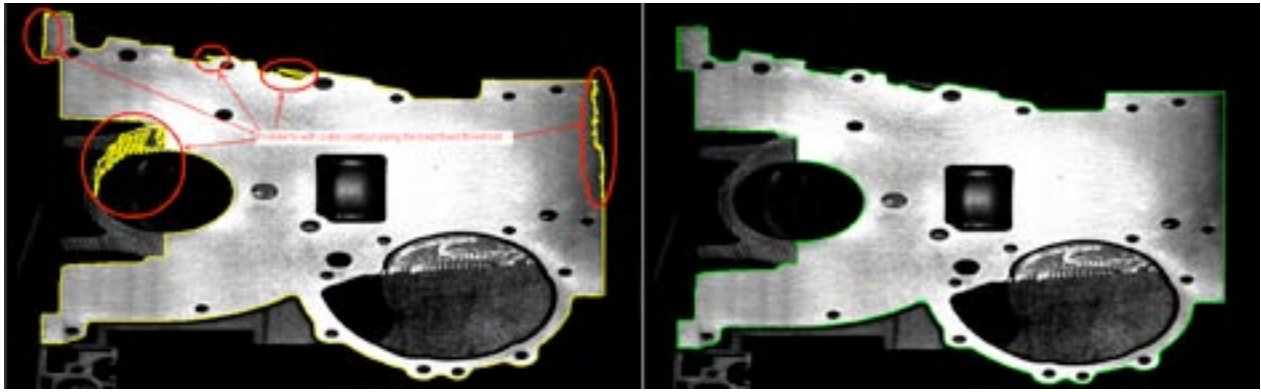


Bild 8: Verfolgung der Umriss zur Erkennung von Formfehlern

Auswertesoftware

Die Auswertung der Daten vom Bild bis zur gut/schlecht-Entscheidung erfordert eine Reihe von Verarbeitungsschritten:

1. Umrisse finden: Das Auffinden der Umriss dient einerseits dazu den Prüfbereich einzuschränken und andererseits Formfehler bzw. Fehler in der Abmessung zu detektieren. Die Kanten werden dabei verfolgt und Bohrungen und Ausnehmungen erkannt (Bild 8). Da die Maße der Gussteile und deren Lage vor der Kamera leicht variieren, ist die Definition von fixen Prüfmasken nicht möglich. Kantenverfolgung bietet eine flexible und robuste Möglichkeit mit diesen Variationen umzugehen (Bild 9).

2. Texturanalyse: Die Prüfflächen sowohl von rohen als auch von bearbeiteten Gussteilen weisen eine starke Textur auf (Fräsriefen, Schleifspuren, Sandabdruck usw.). Um Fehler in dieser Textur zu erkennen, muss sie charakterisiert werden. Jede Abweichung von der Normaltextur ist dann potentiell ein Fehler.

3. Berechnung der Fehlermerkmale: Von den in Punkt 2 identifizierten Stellen werden Merkmale berechnet, z. B. die Fläche, die maximale Ausdehnung, etc., deren Toleranzen in der Software abgelegt sind.

4. Klassifikation: Anhand der Merkmale können die Fehler in Klassen eingeteilt werden. Dies kann eine einfache gut/schlecht-Entscheidung sein oder eine genauere Unterscheidung etwa für statistische Zwecke.

Allgemein werden an die Software eines Inspektionssystems für Gussteile ganz besondere Anforderungen gestellt. Sie muss mit allen prozessbedingten Schwankungen der Oberflächenstruktur umgehen können, aber gleichzeitig in der Lage sein, kleine Fehler zu detektieren. Zudem ist es sehr häufig notwendig, positionsabhängig unterschiedliche Qualitätskriterien anzuwenden. So müssen z. B. Flächen, die zur Abdichtung dienen, wesentlich genauer geprüft werden, als Flächen in unbelasteten Bereichen.

Die Algorithmen müssen dabei den Kameraeinstellungen und den Beleuchtungseinstellungen optimal angepasst werden. Denn die Bilder der zu detektierenden Fehler können bei unterschiedlichen Kamera- und Beleuchtungseinstellungen sehr unterschiedlich aussehen. Die Parametrierung sollte zuerst von einem Bildverarbeitungsexperten zusammen mit dem Personal erfolgen, welches die Qualitätsprüfung der Teile bisher durchgeführt hat und daher die potentiellen Fehler kennt. Lernalgorithmen können diesen Prozess unterstützen und abkürzen. Nach erfolgter Parametrierung ist eine Phase der Feineinstellung notwendig, bei der ebenfalls Bildverarbeiter und Maschinenbediener kooperieren müssen. Nach dieser Phase ist es für den Maschinenbediener nicht mehr notwendig in den Inspektionsablauf einzugreifen. Die Kommunikation läuft dann nur noch zwischen Inspektionssystem und Anlagensteuerung ab.

Projektablauf

Neben den technischen Randbedingungen, die bei der Realisierung eines automatischen Inspektionssystems zu beachten sind, spielt auch die Einbindung aller beteiligten Personen eine wesentliche Rolle. Wurde die Prüfung bisher von menschlichen Experten durchgeführt, so muss das Wissen dieser Experten nun in die Software einfließen und dort abgebildet werden. Dieses Wissen ist in Grenzmusterkatalogen oder Prüfanweisungen häufig nur unzureichend dokumentiert. Um eine möglichst effiziente und reibungslose Umstellung von menschlicher auf automatische Prüfung zu gewährleisten, sind folgende Punkte zu beachten:

- > Bildaufnahme von repräsentativen Musterteilen über einen längeren Zeitraum: Die Bildaufnahmetechnik kann für die gesammelten Musterteile optimal ausgelegt werden. Dies spart Überdimensionierung und damit Kosten, bzw. stellt sicher,

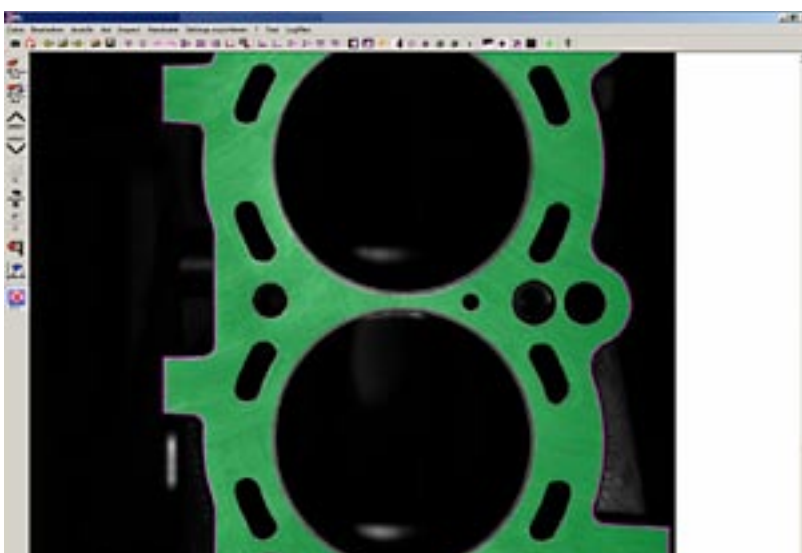


Bild 9: Automatisch detektierte Prüffläche auf Gussteil

dass alle Kategorien von Fehlern auch sichtbar gemacht werden können.

Ergebnis: Auslegung der Bildaufnahme-technik (Kamera, Beleuchtung usw.).

> Erstellen eines umfangreichen Testdatensatzes bewerteter Bilder und Guss-teile von den Prüfern:

Die aufgenommenen und bewerteten Bilder dienen als Basis für die Anpassung und Parametrierung der Auswertesoftware. Die Parameter werden dabei so eingestellt, dass die maschinelle Klassifikation optimal der menschlichen gleicht.

Ergebnis: Datenbasis für die Entwicklungen schaffen.

> Integration und Inbetriebnahme des Systems:

Mit den Vorarbeiten der vorhergehenden Punkte kann nach der mechanischen und elektrischen Installation, sowie der Integration der Softwarekomponenten das System in kürzest möglicher Zeit in Betrieb genommen werden.

> Nachbetreuung:

Um letzte Abstimmungen am System durchzuführen, ist eine Phase der gemeinsamen Bewertung des automatischen Systems mit der menschlichen Prüfung sinnvoll. In dieser Zeit werden schrittweise die Prüfkriterien angepasst, sodass ein optimales automatisches Prüfergebnis erzielt werden kann.

Diese bewährte Vorgangsweise erlaubt eine kostengünstige Lösung. Durch die Herangehensweise in einzelnen Schritten können die wesentlichen Informationen erarbeitet werden, sodass ein optimiertes Anlagendesign ohne Überdimensionierung möglich ist. Zudem wird durch die Einbindung der Bediener und Prozessverantwortlichen eine reibungslose Umstellung von menschlicher auf automatische Prüfung möglich.

Zukünftige Entwicklungen

Neben den Bildverarbeitungsalgorithmen entsteht bei Inspektionsprojekten eine besondere Herausforderung auch dadurch, dass ein menschlicher Entscheidungsprozess in Software abgebildet werden muss. Trotz umfangreicher Qualitätsvorschriften und Grenzmusterkataloge liegt die Detailentscheidung immer noch beim Experten, der mit der täglichen Prüfung der Teile beschäftigt ist. Dieser menschliche Entscheidungsprozess muss in das Bildverarbeitungssystem übertragen werden. Bisher konnte diese Herausforderung nur durch ein fix vorgegebenes Regelsystem gelöst werden, in dem einzelne Parameter manuell eingestellt und schrittweise an die Entscheidungen des Experten angepasst wurden. In einigen Fällen reicht dieses Regelsystem nicht aus und Änderungen an der Software werden notwendig. Generell tritt

die Problematik auf, dass der Einstellprozess lange dauert und immer wieder Eingriffe in die Software erforderlich macht.

Neuere Entwicklungen ermöglichen es, diesen Vorgang zu automatisieren. Die Software wird dazu flexibel gestaltet, sodass Methoden des maschinellen Lernens eingesetzt werden können. Statt einer lange andauernden, manuellen Adaptierung, lernt das Prüfsystem vom Experten. Dazu prüft der Experte einige Zeit lang parallel zum System. Wann immer sich Prüfsystem und Experte uneinig sind, lernt das System und passt seine Entscheidungen an die des Prüfers an. Besonders berücksichtigt werden muss dabei, dass es zwischen den einzelnen Experten in der Regel systematische Unterschiede in der Bewertung der Teile gibt. Mit diesen Widersprüchen muss das Prüfsystem konstruktiv umgehen und trotzdem zu einer gültigen Entscheidung kommen.

Eine weitere technische Hürde stellt die Tatsache dar, dass es für die Beurteilung eines Teils nicht ausreicht, jeden einzelnen Fehler sequentiell zu betrachten. Sehr oft spielt die Gesamtheit der Fehler, also zum Beispiel die räumliche Anordnung, die Anzahl oder die Gesamtfläche, eine Rolle. Dies stellt besondere Anforderungen an die Klassifikationsalgorithmen, die mit einer undefinierten Anzahl an möglichen Fehlern umgehen können müssen.

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes „DynaVis“ werden die Grundlagen für diese lernfähigen Systeme geschaffen. Das Projekt wurde 2005 gestartet und läuft noch bis 2008. Erste Prototypen wurden bereits im industriellen Umfeld getestet und zeigen sehr gute Eigenschaften in Bezug auf Trefferrate und Robustheit. So konnte bei komplexen Aufgabenstellungen nach einer Lernphase von 1000 Teilen eine Trefferquote von 99,8 % bei der gut/schlecht-Entscheidung erreicht werden, ohne vorher applikationsspezifische Feineinstellungsarbeiten durchführen zu müssen. Erste Installationen werden im Lauf der nächsten drei Jahre erwartet.

Dipl. Ing. Werner Reisner, PL nationaler und internationaler F&E Projekte und Dr. Christian Eitzinger, Leiter der Gruppe Bildverarbeitung, Profactor Produktionsforschung GmbH Bildverarbeitung/Robotik, Steyr, Österreich

Literatur:

[1] Smith, M. & Bull, L. (2005) *Genetic Programming with a Genetic Algorithm for Feature Construction and Selection*. *Genetic Programming and Evolvable Machines*. (in press).
 [2] Mohanta P. P., Mukherjee D. P.: *Acton S.T. Agglomerative Clustering for Image Segmentation*. *Proceedings of 16th International Conference on Pattern Recognition*,

p. 664-667, 2002.

[3] Lughofer E., Bodenhofer U.: *Incremental Learning of Fuzzy Basis Function Networks with a Modified Version of Vector Quantization*, to appear in *Proceedings of IPMU, 2006*.

[4] Chiang L. H., Russell E. L. and Braatz R. D.: *Fault Detection and Diagnosis in Industrial Systems*, Springer-Verlag New York Berlin Heidelberg 2001.

[5] Pang S., Ozawa S. and Kasabov N.: *Incremental Linear Discriminant Analysis for Classification of Data Streams*, *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics - part B: Cybernetics*, 35 (5), October 2005.

[6] Juyang Weng, Wey-Shiuan Wang. *Incremental Hierarchical Discriminant Regression for Online Image Classification*. *Proceedings of ICDAR 2001: 476-480, 2001*.

[7] Roubos H., Setnes M., Abonyi J.: *Learning Fuzzy Classification Rules from Labeled Data*. *Information Sciences - Informatics and Computer Science*, 150 (1-2), p. 77-93, 2003.

[8] Goodrich M. A., Boer E. R.: *Model-based Human-centered Task Automation: A Case Study in ACC System Design*, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, Vol. 33, No. 3, pp. 325-336, 2003.

[9] Müller W., Wiederhold E.: *Machine learning methodology and cognitive modeling of human expert operators in anthropocentric processes*, *Proceedings of the Human Centered Processes Conference, Brest, France*, pp. 301-306, 1999.

[10] Kuncheva L. I.: *Combining Pattern Classifiers: Methods and Algorithms*, Wiley, 2004.

[11] Duin R. P. W.: *The combining classifier: to train or not to train?*, *Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition*, Vol. 2, p. 765-770, 2002.

[12] Seichter S. D., Eitzinger C., Breitenecker F.: *Model-Based Learning Classifiers for Surface Inspection Problems*. *Frontiers in simulation. Simulationstechnique 19th Symposium in Hannover*. Eds. Matthias Becker, Helena Szczerbicka. Society for Modeling and Simulation International. SCS Publishing House e.V. San Diego, Erlangen. 2006. ISBN 3-936150-49-4. Hannover, September 2006.

[13] Eitzinger C., Reisner W.: *Texture Fault Detection by Non-parametric Sampling*, *28th OAGM/AAPR Workshop, Digital Imaging in Media and Education*, June 17-18, 2004, Hagenberg, pp. 95-102, ISBN 3-85403-179-3.

[14] Eitzinger C.: *Nonsmooth Training of Fuzzy Neural Networks*, *Soft Computing* 8, pp. 443-448, 2004.

Die Arbeiten an lernfähigen Systemen zur Qualitätssicherung werden unterstützt durch die Europäische Kommission (Vertrag Nr. 016429). Der Artikel gibt diesbezüglich nur die Ansichten des Autors wieder.

