

Fachartikel

## Sensordatenfusion zur prozessintegrierten Qualitätsüberwachung für fehlerfreie Produkte



Abbildung 1 Demonstrationsanlage des Projektes IQZeProd zur vollautomatischen Prüfung von Holz-, Kunststoff- oder Metallteilen und lackierten Oberflächen

Suhl, Juni 2020. In der industriellen Fertigung stellt die Qualitätskontrolle einen entscheidenden, zugleich aber auch kritischen Prozessabschnitt dar, denn sie erfolgt in der Regel am Ende der Produktionskette. Zu diesem Zeitpunkt wurden bereits während der vorgelagerten Fertigungsschritte viel Energie und erhebliche Kosten in die Komponenten investiert. Häufig werden Qualitätsprüfungen zudem noch durch entsprechend geschultes Personal durchgeführt. Diese Art der visuellen Inspektion birgt aufgrund der begrenzten Aufnahmefähigkeit und Ermüdung des Menschen allerdings ein großes Fehlerpotenzial. Um diesen Prüfprozess effizienter und nahezu fehlerfrei zu gestalten, entwickelt und implementiert das Projekt IQZeProd (*Inline quality control for zero-error-products*) des Fraunhofer-Instituts für Werkzeugmaschinen

## und Umformtechnik IWU neue Inline-Überwachungslösungen zur Realisierung einer Null-Fehler-Strategie im Bereich der industriellen Fertigung.

Die zentrale Idee ist es, Struktur- und Oberflächenfehler im laufenden Herstellungsprozess durch eine Datenfusion mehrerer Sensoren zu erkennen. Fehler sollen während der Fertigung so früh wie möglich erkannt werden, um am Ende der Produktionskette ein fehlerfreies Produkt gewährleisten zu können. Für diese Null-Fehler-Fertigungsstrategie wurde ein skalierbarer Multisensor-Überwachungsansatz entwickelt, der auf eine Vielzahl von Fertigungstechnologien anwendbar ist.

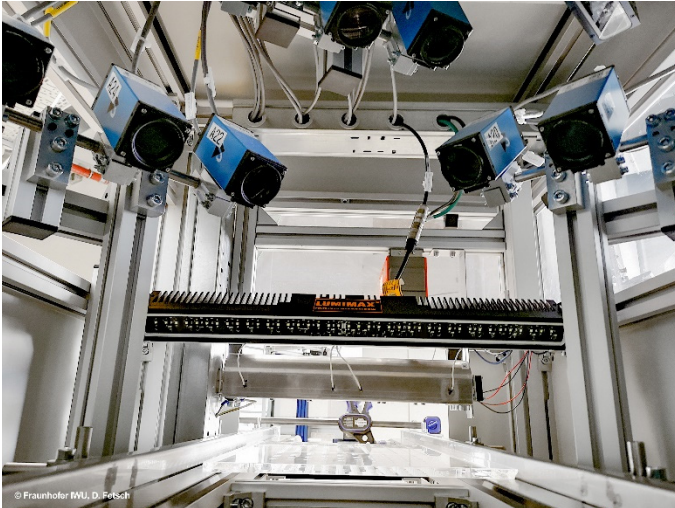


Abbildung 2 Kamera- und Beleuchtungskonzept der Demonstrationsanlage

Im Rahmen des Projektes IQZeProd entstand dabei eine Demonstrationsanlage, welche in der Lage ist, eine Vielzahl unterschiedlicher Produkte wie Holz-, Kunststoff- oder Metallteile und lackierte Oberflächen auf optische Fehler vollautomatisch zu überprüfen. Weiterhin wurde ein Software-Framework erarbeitet, das die effiziente Entwicklung der Überwachungssoftware für Prüfsysteme erlaubt. Hierfür wurden 19 Matrix-Kameras in Full-HD-Auflösung, eine Hyperspektralkamera sowie berührungslos arbeitende Rauheitsmesssysteme auf Basis von Laserstreulichtverfahren und Inline-Mikroskopie

mit Laserlinienprojektion erstmals kombiniert. Durch den Einsatz einer Hyperspektralkamera kann die molekulare Struktur der Prüfobjekte in einem Wellenlängenbereich von 400 nm (sichtbar) bis 1000 nm (Infrarot) analysiert werden. Infolgedessen können auch Fehler außerhalb des sichtbaren Bereiches erkannt werden. Insbesondere bei der Analyse von Werkstücken aus organischen Materialien bzw. der Prüfung auf Kontaminationen (z. B. Schimmelbefall, Ölreste) bietet die Hyperspektralanalyse ein erhebliches Potenzial. Neben den genannten Anwendungen wurden ebenso lackierte Produkte berücksichtigt. Für diesen Fall können im Infrarot-Bereich Schwankungen der Beschichtungsdicke detektiert werden, bevor es zu sichtbaren Farb- und Texturabweichungen der Lackoberfläche kommt.

Das gesamte Prüfsystem ist für Durchlaufgeschwindigkeiten von bis zu 1 m/s ausgelegt. Dazu transportiert ein Zahnriemenförderer die Bauteile auf einem Werkstückträger durch die Prüfstation. Ein Drehgeber am Motor des Förderers meldet der Software auf das Hundertstel-Millimeter genau, wo sich der Werkstückträger gerade auf der Förderanlage befindet. Die Kameras sind an flexibel einstellbaren Halterungen angebracht und lassen sich in drei Achsen justieren. Sie machen innerhalb von drei bis vier Sekunden 400 Bilder.

Aufgrund der geplanten Durchlaufgeschwindigkeit von bis zu 1 m/s ergab sich ein besonderer Anspruch bei der Auswahl der Beleuchtungskomponenten. Da das konzipierte Bildverarbeitungssystem den laufenden Produktionsprozess nicht unterbrechen soll, werden die Prüfbilder direkt in der Bewegung aufgenommen und ausgewertet. Mit einer Permanent- oder Schaltbeleuchtung ist eine auswertbare Bildaufnahme undenkbar. Die Lichtstärke ist viel zu gering, um das Prüfobjekt ausreichend zu beleuchten. Außerdem ist die Einschaltverzögerung einer Schaltbeleuchtung mit etwa 5 ms für diese Anwendung zu groß. Aus diesen Gründen fiel die Wahl auf

Beleuchtungen mit integrierter Blitztechnologie der Marke LUMIMAX® des Unternehmens iim AG. Diese Blitzbeleuchtungen reagieren enorm schnell auf den Triggerimpuls der Kamera, sodass die maximale Lichtleistung innerhalb von höchstens 5 µs verfügbar ist. Eine sehr kurze Belichtungszeit ist dadurch überhaupt kein Problem. Die Bewegung des Objekts kann quasi eingefroren werden und wirkt somit für das menschliche Auge und die Kamera wie ein Stillstand. Die Bildauswertung ist damit problemlos möglich.

Neben der Problematik der Bewegungsunschärfe gab es noch weitere Anforderungen an die Beleuchtungssysteme. Zum Beispiel musste die Ausleuchtung der Prüfobjekte aus unterschiedlichen Winkeln gewährleistet werden, um Fehler auf den einzelnen Flächenelementen der Bauteile sichtbar zu machen. Auf diese Weise wurde das sogenannte „Auspiegeln“ der manuellen Prüfung nachgeahmt. Dabei wurden Beleuchtungen ohne Diffusorvorsatz verwendet, sodass eine quasi-strukturierte Lichtgebung vorlag. Zum Einsatz kamen letztendlich große Standard-Balkenbeleuchtungen der Marke LUMIMAX® sowie eine Sonderanfertigung der LUMIMAX® Flächenleuchten. Dank ihrer großen Leuchtfläche und den sehr schmalen Seitenrändern ermöglicht dieses Flächendurchlicht die Ausleuchtung der nahezu gesamten Breite der Prüfanlage. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Beleuchtungsauswahl war eine kompakte Bauform mit integriertem Controller, da aufgrund der Kameraanzahl und deren flexiblen Halterungen nur noch wenig Bauraum für Beleuchtungskomponenten zur Verfügung stand.



Abbildung 3 Sonderflächenbeleuchtung der Marke LUMIMAX® ermöglicht die Ausleuchtung von nahezu der gesamten Breite der Prüfanlage

Insgesamt fallen bei dem entwickelten Bildverarbeitungssystem sehr hohe Datenmengen von bis zu 400 MByte/s an, welche selbstverständlich verarbeitet werden müssen. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, ist eine sogenannte massiv-parallele Datenverarbeitung unter Einbeziehung von 28 Rechenkernen und eines Grafikprozessors notwendig. Durch diese Parallelisierung wird das Prüfsystem in die Lage versetzt, mit dem Produktionstakt Schritt zu halten und eine inline-fähige 100%-Kontrolle zu gewährleisten.

Weiterhin wurde vom Fraunhofer-Institut IWU das Framework XEIDANA® mit visueller Programmierschnittstelle entwickelt, um eine schnelle Entwicklung von anwendungsspezifischen, massiv-parallelen Qualitätsüberwachungsprogrammen zu ermöglichen. Das Framework stellt eine Vielzahl von Programmmodulen zum Einlesen unterschiedlicher Sensoren, der Signalverarbeitung und Methoden des maschinellen Lernens in Bibliotheken bereit. Zum Aufbau eines Analyseprogramms werden Funktionsmodule aus einer Bibliothek von Datenanalysemethoden (z. B. Datenfilter, Klassifikatoren) und Datenquellenverbindungen (z. B. Sensoren, Datenbankschnittstellen) per Drag & Drop platziert und an ihren Ein- und Ausgabe-Slots miteinander verbunden. Im Ergebnis entsteht ein Verarbeitungsnetzwerk, welches die anwendungsspezifische Prüfaufgabe löst. Das Framework ist modular aufgebaut und kann über ein Plug-In-System um neue Module erweitert werden. Mithilfe dieses flexiblen Plug-In-Konzepts ist auch die Kombination verschiedener Sensortypen (z. B. Wirbelstromsonden, Hyperspektralkameras, Laseroberflächenscanner, Kameras oder akustische Sensoren) und Algorithmen zur Datenauswertung möglich.

Dank der Datenfusion von Sensoren mit unterschiedlichen Messprinzipien oder Sensoren mit redundanter Information wird eine höhere Auswertungssicherheit der zu überwachenden Merkmale erreicht und das Spektrum der identifizierbaren Fehler erweitert. Durch die Kombination verschiedener Sensorsignale können neue virtuelle Sensorsignale errechnet werden, die mit einem Fehlermerkmal korrelieren, welches anhand der Einzelsignale der Sensoren nicht erkennbar gewesen wäre. Dies kann zum Beispiel bei sehr kleinen Defekten auf stark glänzenden Oberflächen der Fall sein, welche nur unter bestimmten Perspektiven sichtbar sind. Um diese Defekte dennoch zu erfassen, kombiniert die Software mehrere Aufnahmen einer Sequenz, die von ein- und derselben Region des Werkstücks unter verschiedenen Kamera- und Beleuchtungswinkeln aufgenommen wurden. Anschließend werden die Fehlerbereiche aus den Bildern der Aufnahmesequenz extrahiert, in welchen der Fehler sichtbar ist. Eine andere Möglichkeit ist die Vorauswahl von fehlerverdächtigen Bereichen anhand der Bilder der Matrix-Kameras und deren anschließende detaillierte Analyse mit der Hyperspektralkamera.

Alles in allem, ist für die zuverlässige Detektion von Fehlern an Produkten die Kombination mehrerer Sensoren und Sensorprinzipien oft sinnvoll. Durch solch eine Datenfusion können neue virtuelle Sensorsignale generiert werden. Anhand derer werden Fehler erkennbar, die sich in den Einzelsignalen der Sensoren oft nicht abbilden. Für die Datenfusion muss ggf. auf Algorithmen der statistischen Daten und des maschinellen Lernens zurückgegriffen werden. Aufgrund der Vielzahl von zu fusionierenden Sensorsignalen muss mit einem sehr hohen Datenaufkommen umgegangen werden. Gleichzeitig muss die Datenauswertung mit dem Produktionstakt Schritt halten. Im Hintergrund bewerkstelligt das XEIDANA-Framework die optimale Parallelisierung der einzelnen Verarbeitungsschritte auf mehrere Prozessoren (CPU) und Graphikprozessoren (GPU) sowie die Synchronisation der Datenströme zwischen den einzelnen Programmmodulen, wodurch der Anwendungsentwickler stark entlastet wird. Das Framework wurde für den Anwendungsfall der Multisensor-Fehlerüberwachung evaluiert. Dabei werden Matrix-Kameras mit Hyperspektralkameras und optischen Rauheitsmessgeräten kombiniert. Aufgrund der erreichten höheren Leistung können solche Multisensor-Systeme für die fertigungsprozessintegrierte Überwachung jedes produzierten Teiles zur 100%-Kontrolle eingesetzt werden, wodurch fehlerhafte Teile nicht an nachfolgende Prozessschritte bzw. an den Endkunden weitergegeben werden. Zukünftige Weiterentwicklungen werden sich mit der Integration und Datenfusion von 3D-Kameras und Sensoren im nicht-sichtbaren Bereich (z. B. UV, Terahertz-Strahlung, Radar, Röntgen) befassen, um zusätzlich Maßabweichungen und innere Defekte der Werkstücke mit zu berücksichtigen.

Weiterführende Informationen zum Thema finden Sie auch unter [www.xeidana.de](http://www.xeidana.de).

## Danksagung

Die IIM AG ist aktives Mitglied des Industriearbeitskreises des Projektes IQZeProd und steht im engen fachlichen Austausch mit den Forschungspartnern. Das IGF-Vorhaben IQZeProd (232 EBG) der Forschungsvereinigung Deutsche Forschungsvereinigung für Mess-, Regelungs- und Systemtechnik e.V. - DFMRs, Linzer Str. 13, 28359 Bremen wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Auf die Verfügbarkeit des Schlussberichtes des IGF-Vorhabens 232 EBG für die interessierte Öffentlichkeit in der Bundesrepublik Deutschland wird hingewiesen. Bezugsmöglichkeiten für den Abschlussbericht sind: Die Deutsche Forschungsvereinigung für Meß-, Regelungs- und Systemtechnik e.V. - DFMRs, Linzer Str. 13, 28359 Bremen und das Fraunhofer IWU, Reichenhainer Straße 88, 09126 Chemnitz. Gefördert durch Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.



**Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie**

## Autoren

**Alexander Pierer, Fraunhofer-Institut IWU**

**Anne Kehl, iiM AG**