

Kai Taeubner, Sonja Föhst, Prakash Easwaran, Annika Schwarz, Dascha Dobrovolskij, Dr. Thomas Weibel, Michael Arnold, Falco Hirschenberger, Sebastian Hubel, Dr. Katja Schladitz, Dr. Ronald Rösch, Dr. Henrike Stephani, Martina Sormani, Dr. Oliver Wirjadi, Markus Rauhut, Martin Montag, Martin Braun, Dr. Ali Moghiseh, Thomas Redenbach, Franz Schreiber

BILDVERARBEITUNG

- **OBERFLÄCHENINSPEKTION**

Online-Prüfung des optischen Erscheinungsbildes von Industrieprodukten

- **MIKROSTRUKTURANALYSE**

Charakterisierung und stochastische Modellierung von Mikrostrukturen anhand von 3D-Bilddaten

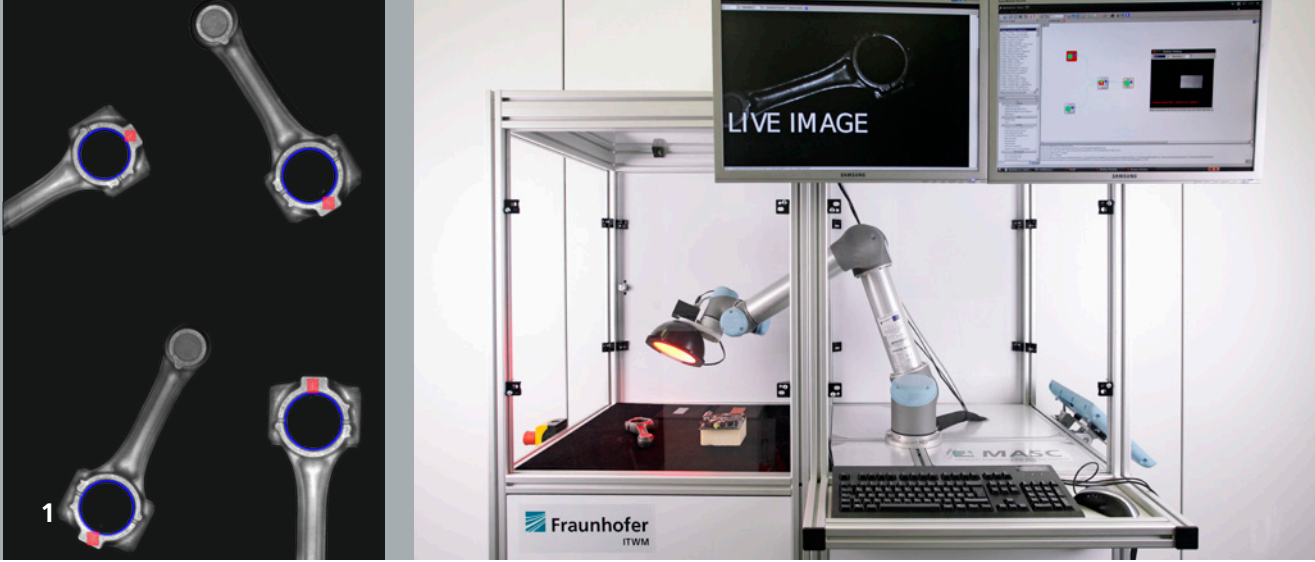




Bildverarbeitung ist heutzutage ein wichtiger Bestandteil der industriellen Produktion geworden. Seit einigen Jahren werden Prüfsysteme direkt bei der Planung einer Fertigungsstraße berücksichtigt statt nachträglich installiert zu werden. Vor allem die Oberflächeninspektion, d. h. die Prüfung des optischen Erscheinungsbildes eines Produktes, ist eine der wichtigsten Qualitätssicherungsmaßnahmen geworden. Fehler können dabei funktioneller oder ästhetischer Art sein. Insbesondere für ästhetische »Fehler« ist es schwierig, subjektives Empfinden in mathematischen Modellen abzubilden. Im letzten Jahr hat die Abteilung viele derartige Projekte durchführen können, d. h. der Bereich Qualitätssicherung und Optimierung ist stark gewachsen.

In diesem Bereich hat die Abteilung auch 2014 wieder Oberflächeninspektionssysteme, Ultraschall-Prüfsysteme, aber auch Simulationssoftware z. B. für die Bestimmung der POD (Probability of Detection) entwickelt und erfolgreich in die Praxis gebracht. Ziel der dazugehörigen Projekte war dabei immer 100%-Kontrolle in der Produktion, d. h. die Inline-Defekterkennung und Überwachung der Prozessstabilität. Ein weiteres Arbeitsfeld war die Oberflächen- und Materialcharakterisierung. Die Mikro- und Nanostruktur moderner Werkstoffe bestimmt maßgeblich deren makroskopische Materialeigenschaften. Die Abteilung entwickelt Algorithmen zur Charakterisierung und stochastischen Modellierung solcher Strukturen anhand dreidimensionaler Bilddaten. Die Analyse der räumlichen Geometrie und der Struktur-Eigenschafts-Beziehungen in Werkstoffen eröffnen so neue Möglichkeiten zur Optimierung von Materialeigenschaften durch virtuelles Materialdesign. Konkrete Projekte dazu waren die Mikroanalyse von Faserverbundwerkstoffen, die Partikelanalyse bei Mikro-Spritzgussverfahren, aber auch die 3D-Rekonstruktion poröser Materialien aus FIB-REM-Aufnahmen (Focused-Ion-Beam-Rasterelektronenmikroskopie). Erst seit kurzer Zeit beschäftigt sich die Abteilung mit dem Thema Bildverstehen und Szenenanalyse. Weit gefasst geht es dabei darum, Bildinhalte automatisiert zu verstehen. Im Speziellen hat die Abteilung folgende Projekte bearbeitet: Das Auffinden visuell ähnlicher und inhaltsidentischer Videos aus einer Datenbank, die Detektion von in einer Datenbank abgelegten Objekten in Kamerabildern, z. B. von Smartphones, und die Erfassung und Analyse des Straßenraums mittels Kameras, z. B. die Erkennung von Straßenschildern.

Insgesamt hat die Abteilung im letzten Jahr wieder erfolgreich in enger Zusammenarbeit mit Partnern aus Industrie und Forschung maßgeschneiderte Lösungen auf den Gebieten der Bild-/ Signalverarbeitung und des bildgebenden Ultraschalls entwickelt und implementiert. Auch die beiden Bildverarbeitungs-Softwarepakete – MAVI und ToolIP – fanden wieder zahlreiche Abnehmer in Industrie und Forschung.



AUTOMATISCHE INSPEKTION NICHT-LAMBERTSCHER OBERFLÄCHEN MIT 4D-LICHTFELDERN

Die optische Inspektion von Bauteilen mit nicht-lambertschen Oberflächen stellt eine große Herausforderung dar. Mit steigender geometrischer Komplexität des Bauteils und wachsender Spekularität der Oberfläche wachsen auch die Anforderungen an Inspektionssysteme. Abbildung 1 zeigt, wie die Oberfläche eines Bauteils je nach Betrachtungswinkel teils stark spiegelnd oder diffus reflektiert.

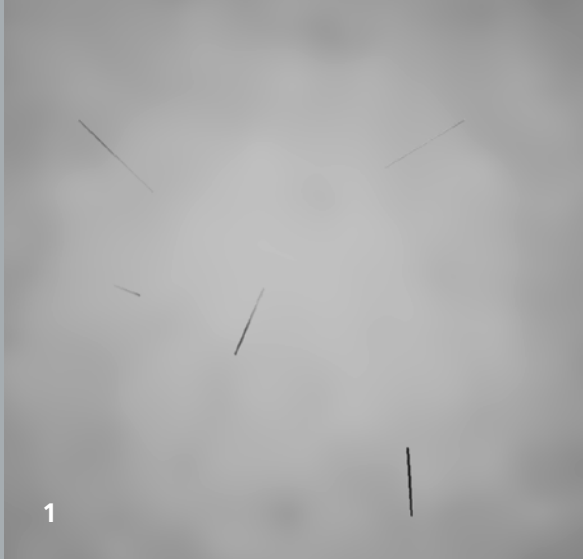
Ein in der Abteilung neu entwickelter Ansatz ermöglicht nun eine robuste Fehlerdetektion auf komplexen Oberflächen, selbst unter unbekannter Translation und Rotation des Bauteils. Die Aufnahme vierdimensionaler Lichtfelder erlaubt den Erhalt der vom Betrachtungswinkel abhängigen Reflexionsintensitäten an jedem Punkt der Bildebene. Abbildung 2 zeigt eine Maximum-Projektion aus dem 2D-Unterraum der Reflexionen in den herkömmlichen 2D-Bildraum. Diese ist unabhängig von Lage und Orientierung des Bildraums konstant und lässt in vielen Fällen bereits eine einfache, aber robuste Fehlerdetektion zu. Ebenso enthält ein 4D-Lichtfeld auch implizit die 3D-Objektgeometrie. Mittels neuartiger Rekonstruktionsalgorithmen lässt sich auch dann noch robust eine 3D-Oberfläche berechnen, wenn klassische Stereo-Algorithmen aufgrund von Spekularitäten scheitern.

Zur Aufnahme von Lichtfeldern sind seit einiger Zeit sogenannte Lichtfeldkameras auf dem Markt. Diese verwenden verschiedene Anordnungen von Mikrolinsen nahe des Kamerachips. Die einfallenden Lichtstrahlen, welche aus unterschiedlichen Richtungen auf einen Bildpunkt abbilden, werden so über mehrere Pixel verteilt. Dadurch lässt sich ein 4D-Lichtfeld in der Kameraebene rekonstruieren. Ein Nachteil dieses Ansatzes ist jedoch, dass sowohl der Messbereich als auch die Auflösung der Einfallswinkel durch den optischen Aufbau eingeschränkt sind. Daher verfolgt das ITWM einen anderen Ansatz: den der virtuellen Lichtfeldkamera. Dabei wird Vorwissen (z. B. aus CAD-Daten) über das zu inspizierende Objekt benutzt, um eine virtuelle Kameraebene auf die Objektoberfläche zu kalibrieren. Mithilfe eines Roboters werden dann eine herkömmliche Kamera und eine diffuse Lichtquelle um das Objekt geführt. Aus den dabei gewonnenen 2D-Bildern lässt sich das 4D-Lichtfeld berechnen.

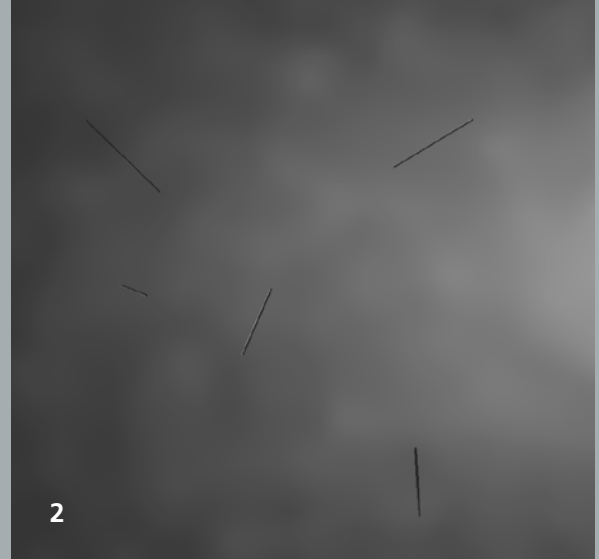
Im Lichtfeld lassen sich nun Defekte anhand von Veränderungen ihrer Textur, Reflexionseigenschaften oder 3D-Geometrie erfassen. Dabei können sowohl lokale Merkmale als auch statistische Methoden zum Einsatz kommen. Da diese Auswertungen je nach Eigenschaft in unterschiedlichen, aber stets zweidimensionalen Unterräumen des 4D-Lichtfeldes stattfinden, können dabei herkömmliche Verfahren aus der 2D-Bildverarbeitung verwendet werden.

1 *Beispiele für nicht-lambertsche Oberflächen: Je nach Positionierung von Kamera und Beleuchtung lassen sich Defekte mal gut und mal schlecht erkennen.*

2 *Aufbau des Systems zur Messung von 4D-Oberflächenlichtfeldern. Der Roboter bewegt Standardkomponenten um das Objekt. Aus den Einzelaufnahmen lässt sich dann das 4D-Lichtfeld berechnen.*



1 *Virtuell erzeugtes Bild einer Hellfeldaufnahme; die Risse sind mit dem Auge schwer zu erkennen.*



2 *Virtuell erzeugtes Bild einer Dunkelfeldaufnahme; die Risse sind viel besser zu erkennen als in Abbildung 1.*

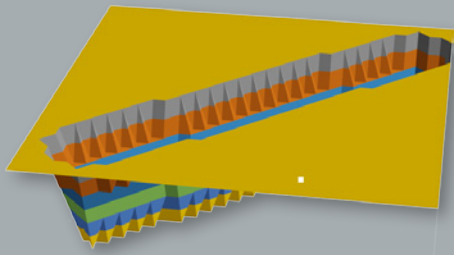
SIMULATION VON OBERFLÄCHENDEFEKTEN MITTELS RAYTRACING ZUR BESTIMMUNG DER FEHLERAUFFINDWAHRSCHEINLICHKEIT (POD)

Bei optischen Prüfsystemen entscheidet das Erreichen der vom Endanwender vorgegebenen Detektionsrate und Auffindwahrscheinlichkeit darüber, ob ein solches System in der Praxis einsetzbar ist. Eine Möglichkeit, diese Parameter quantitativ zu bestimmen, bieten \hat{a} versus a -Analysen zur Bestimmung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (Probability of Detection, POD). Die POD-Analyse erlaubt, die sicher detektierbaren minimalen Fehlergrößen quantitativ zu berechnen. Eine Möglichkeit, die POD-Analyse für optische Systeme zu evaluieren, ist die Erstellung von Prüfkörpern mit eingebrachten Soll-Fehlern, z. B. Nuten zur Beschreibung von Rissen. Aufgrund der hohen Vielfalt kann so aber nur ein kleiner Teil von Defekten abgedeckt werden. Wir haben daher mittels Raytracing ein Verfahren zur realistischen Simulation von Oberflächendefekten entwickelt. Die so erzeugten Bilddaten ermöglichen eine POD-Analyse auf Basis einer großen Anzahl von Defekten. Die POD-Analyse ist ein wichtiges Werkzeug, um quantitative Aussagen wie z. B. »dieses Prüfsystem detektiert garantiert Fehler der Größe 0,1 mm« zu generieren.

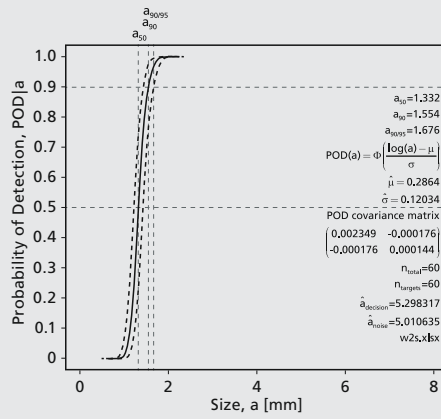
Wir haben die international anerkannte Vorgehensweise zur POD-Analyse verwendet; diese wird im vom US-Department of Defense herausgegebenen Handbuch MIL-HDBK-1823 definiert. Sie basiert auf der Annahme einer Standard-Normalverteilung der Messwerte. Dabei wird von einer linearen Abhängigkeit des Antwortsignals von der Fehlergröße und von einer konstanten Streuung/Varianz der Messwerte ausgegangen.

Um die virtuelle Simulation umsetzen zu können wurde ein Werkzeugkasten bestehend aus den folgenden Elementen entwickelt bzw. verwendet:

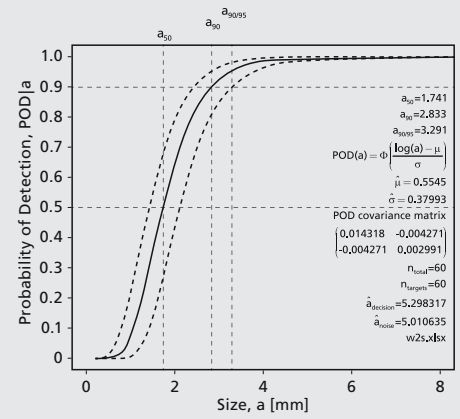
- zwei Kameramodelle für entozentrische und telezentrische Kameras (bzw. Objektive)
- Ein Verfahren zur Erstellung virtueller Bilder von Materialien ist das Raytracing; hierbei werden Strahlen, ausgehend von einer (virtuellen) Kamera in einer 3D-Szene, verfolgt. Die 3D-Szene ist aus Dreiecksnetzen zusammengesetzt. Für jeden Bildpixel wird ein Strahl konstruiert und dessen Schnittpunkt mit dem Dreiecksnetz berechnet. Von diesem Schnittpunkt wird ein Strahl zu jeder Lichtquelle in der Szene berechnet und somit der Helligkeitswert dieses Bildpixels berechnet. Wir haben für das Raytracing den OpenSource Raytracer PovRay verwendet.
- ein Algorithmus zur Erzeugung virtueller Defekte in die durch Dreiecksnetzte beschriebene Materialoberfläche (unsere Ground-Truth); wir haben ein Verfahren zur Erzeugung von Rissen entwickelt, d. h. andere Defekttypen blieben außen vor. Ausgaben des Algorithmus sind Höhenkarten, die vom Raytracer gerendert werden können.
- ein Algorithmus zur Detektion von Defekten auf den virtuell erzeugten Bilddaten; dies ist ein klassisches Detektionsverfahren. Es wurde dabei kein Vorwissen bezüglich der Position der Defekte verwendet.



3



4



5

Die Detektionsqualität eines Bildverarbeitungssystems wird durch die Konzeption der Beleuchtung stark beeinflusst. Durch die Variation des Aufnahmewinkels zwischen Kamera und Beleuchtung können bestimmte Arten von Defekten auf einer Oberfläche stärker sichtbar und somit detektierbar gemacht werden. Vereinfacht dargestellt gibt es zwei Möglichkeiten, den Winkel zwischen Kamera und Beleuchtung einzustellen: wenn die Beleuchtung aus Richtung der Kamera kommt und vom Prüfobjekt zurück in die Beobachtungsrichtung reflektiert wird, spricht man von einer Hellfeldaufnahme. Es ergibt sich ein gleichmäßig helles, gut kontrastiertes Bild. Bei der Dunkelfeldaufnahme geht die Beleuchtung am optischen System vorbei, nur die Streuung durch Defekte an der Oberfläche ist im Kamerabild sichtbar, d. h. Defekte erscheinen hell.

Ist die Simulation physikalisch korrekt, dann sollten verschiedene Aufnahmesituationen auch verschiedene Bildqualitäten erzeugen. Risse werden in der Praxis immer im Dunkelfeld detektiert, da diese Beleuchtungsart Risse besonders hervorhebt. Dies sollte schon mit dem Auge erkennbar sein; besonders im Vergleich zum Hellfeld. Ebenso sollte die quantitative Beurteilung (z. B. durch die POD) bessere Erkennungsraten im Dunkelfeld als im Hellfeld aufzeigen.

Mittels des Werkzeugkastens wurden 480 Datensätze mit verschiedenen Rissbreiten und Risstiefen erzeugt. Die Risstiefe variierte dabei von 0,01 mm bis 0,08 mm (zufällig erzeugt). Die dabei erzeugten virtuellen Bilder wurden jeweils mit einer Hell- und einer Dunkelfeldaufnahme von dem Raytracer gerendert. Nachdem die Risse schon mit dem Auge besser im Dunkelfeld als im Hellfeld erkennbar waren, wurden die POD-Werte berechnet. Die POD gibt dabei an, ab welcher Größe ein Fehler sicher detektiert werden kann:

Aufnahme/Breite in mm	0,15	0,25	0,35	0,45
Dunkelfeld	1,67	1,04	0,8	0,62
Hellfeld	3,29	1,56	1,38	1,05

Die Ergebnisse zeigen, dass die POD für die virtuell erzeugten Dunkelfeldaufnahmen wesentlich besser ist, d. h. es können viel kleinere Defekte sicher detektiert werden.

Es wurde ein erster Werkzeugkasten für die virtuelle Bildverarbeitung erstellt; die Ergebnisse entsprechen dabei den Erfahrungen aus der Praxis. Die POD ermöglicht eine quantitative Einschätzung von Inspektionsaufgaben und Raytracing ist ein probates Mittel zur Erzeugung virtueller Kameraaufnahmen.

3 Virtuell erzeugter Riss als Dreiecksnetz; diese Höhenkarte wird vom Raytracer gerendert.

4 POD-Kurve einer Dunkelfeldaufnahme bei einer Rissbreite von 0,15 mm; die POD liegt bei 1,6.

5 POD-Kurve einer Hellfeldaufnahme bei einer Rissbreite von 0,15 mm; im Vergleich zu Abbildung 4 ist die wesentlich schlechtere POD von 3,2 mm zu erkennen.