

## Qualitätskontrolle

# Lichtfeld- kamas als Schlüssel

Eine 100 Jahre alte optische Technologie bringt heute den Durchbruch in industrieller Bildverarbeitung. Eine neue Option für die Fertigungskontrolle.

### Autoren



#### Philipp Schmid

Head Research and Business Development Industry 4.0 & Machine Learning, CSEM



#### Dr. Alexander Steinecker

Regional Development and Relations, CSEM

Die Mission des CSEM ist der Transfer angewandter Technologien in die Industrie. Schwerpunkte sind Precision Manufacturing, Digitalisierung sowie Clean Energy.

> [www.csem.ch](http://www.csem.ch)

Philipp Schmid und Alexander Steinecker

Die Fertigung von preissensitiven Massengütern in einem Hochlohnland wie etwa der Schweiz ist eine Herausforderung. Die Kunden erwarten höchste Qualität bei konkurrenzfähigen Preisen. Optische Qualitätskontrolle ist in der Produktion ein entscheidender Prozessschritt. Häufig müssen Bauteile auf ihre Masshaltigkeit hin überprüft werden. Mechanische, aber auch mikrotechnische Komponenten werden immer komplexer, sind aus mehreren Unterbaugruppen aufgebaut und erfordern Präzision. Die dreidimensionale Vermessung solcher Teile ist anspruchsvoll. Hier helfen alte Ideen im neuen Gewand: 100 Jahre nach ihrer Erfindung ist die Lichtfeldtechnologie heute eine höchst interessante Alternative zu herkömmlichen industriellen Prüfverfahren. Sie ermöglicht präzise 3D-Vermessung in Echtzeit und lässt sich einfach in Produktionslinien integrieren.

### 3D-Inspektionstechnologie

Für eine dreidimensionale Oberflächeninspektion stehen zahlreiche bewährte Verfahren mit Vor- und Nachteilen zur



© CSEM

Verfügung. Die bekanntesten darunter sind klassische 2D-Abbildung mit strukturierter Beleuchtung, Stereobildaufnahmen, laserbasierte Verfahren, aber auch Time-of-Flight-Kameras. Ferner kommen Verfahren wie konfokale Mikroskopie, digitale holografische Mikroskopie oder optische Kohärenz-Tomografie industriell zum Einsatz. Gerade im Hochgeschwindigkeitsbereich mit mehreren komplexen Teilen pro Sekunde eignen sich diese Verfahren nur bedingt. Erschwerend kommen oft zusätzliche Anforderungen ins Spiel: Das System sollte einfach in der Einrichtung, robust im Betrieb und nahtlos in die bestehende Produktionslinie integrierbar sein. Natürlich spielen auch die Systemkosten eine wichtige Rolle.

### Lichtfeldtechnologie

Die Lichtfeldtechnologie ist bereits seit über hundert Jahren ein bekannter optischer Ansatz. Erste Kameras mit diesem Prinzip wurden in den 1990er-Jahren entwickelt. Wie funktioniert diese Technologie? Konventionelle 2D-Kameras

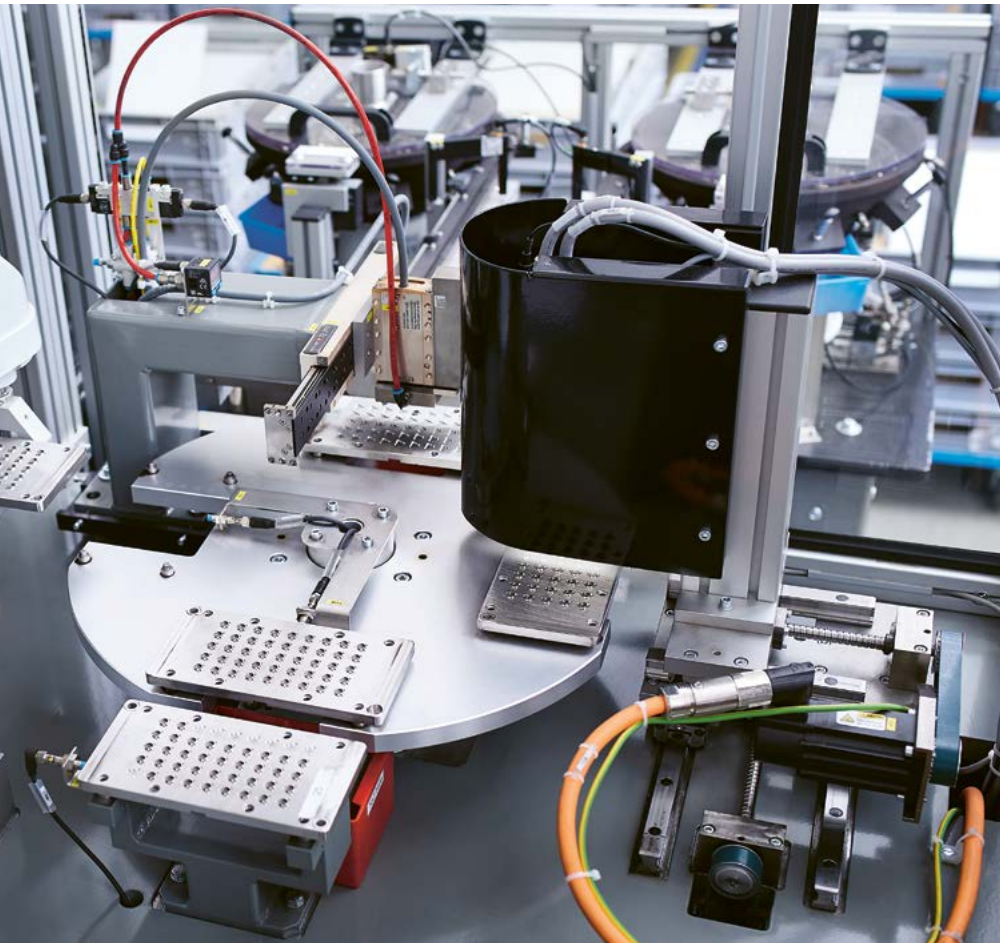


Abbildung 1:  
Hochgeschwindigkeitslinie  
bei Renata mit integrierter  
3D-Lichtfeldkamera.

Was verhalf der Lichtfeldtechnologie erst jetzt zum Durchbruch? Zum einen ist es die enorme Rechenleistung heutiger Computer. Moderne Grafikprozessoren (GPUs) bewältigen die umfangreichen Kalkulationen zur Rekonstruktion der 3D-Daten in Sekundenbruchteilen. Gleichzeitig ist die Verfügbarkeit präziser Mikrolinsenarrays mit massgeschneiderten geometrischen und optischen Eigenschaften gegeben. Das CSEM hat als erste Firma weltweit eine anspruchsvolle industrielle Prüfaufgabe mit dieser vielversprechenden Technologie erfolgreich entwickelt und in der Industrie umgesetzt (vgl. Abb. 1).

### Vorteile

**Hardware:** Lichtfeldkameras basieren auf handelsüblichen Industriekameras von renommierten Herstellern. Die Kamerasensoren werden nachträglich im Reinraum mit dem Mikrolinsenarray bestückt. Der Rest erledigt die ausgeklü-

belten einen Gegenstand über ein Objektiv auf einem Sensor ab. In einer sogenannten plenoptischen Kamera hingegen ist auf dem Bildsensor zusätzlich ein Mikrolinsenarray aufgebracht. Das Objektiv bildet nun vor dem Mikrolinsenarray ein Zwischenbild ab, dessen Segmente dann von den Mikrolinsen auf Teilbereiche des Sensors abgebildet werden. So entstehen getrennte Unterbilder von Objektregionen mit unterschiedlichen optischen

Parametern sowie begrenzten Gesichtsfeldern. Jedes Objektdetail wird mehrfach auf dem Sensor dargestellt. Es entsteht eine Multi-Mikro-Stereo-Aufnahme des Objekts (vgl. Abb. 2).

Hieraus können rechnerisch Objektiefen bestimmt und ein dreidimensionales Bild rekonstruiert werden.

Ein kommerzieller Anbieter plenoptischer, industrieller Kamerasysteme ist heute die Firma Raytrix.

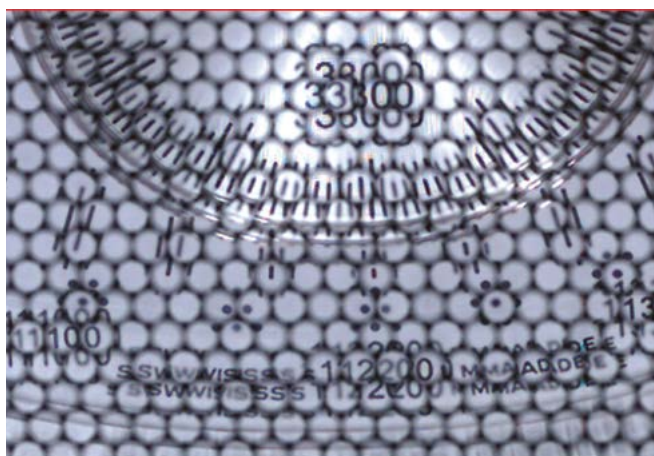
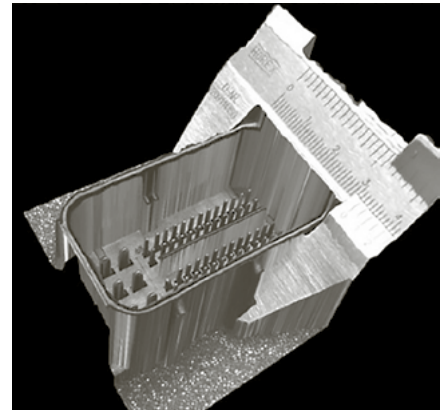
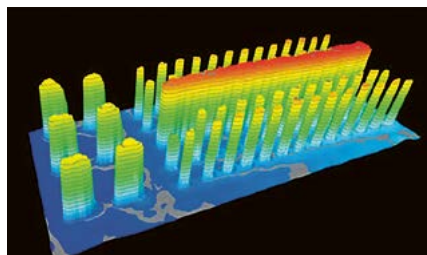
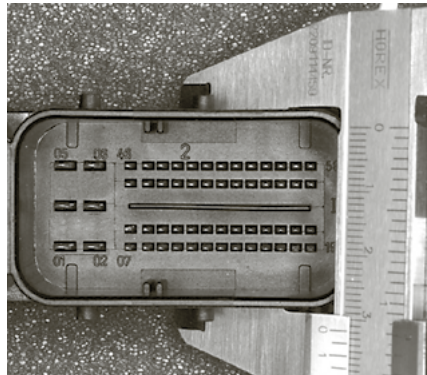


Abbildung 2:  
Links das 2D-Rohbild  
mit den runden  
Mikrolinsen,  
rechts das rekon-  
struierte Bild mit  
Tiefeninformation.



Abbildung 3:  
Links: Totalfokus- (links),  
3D- (rechts) und  
metrisch kalibrierte  
3D-Darstellung (unten).



Bilder: © Raytrix

gelte Kalibrations- und Rekonstruktionssoftware. Dadurch ergeben sich gleich mehrere Vorteile. Die Kameras sind robust und bereits in der Industrie etabliert. Dem Anwender steht eine breite Palette von Baugrößen, Auflösungen sowie Schnittstellen zur Verfügung. Es besteht eine hohe Flexibilität und Kompatibilität mit bestehenden Vision-Komponenten (Objektive, Beleuchtungen, Stative). Die Technologie weist eine grosse Unabhängigkeit gegenüber den verwendeten Prüf-

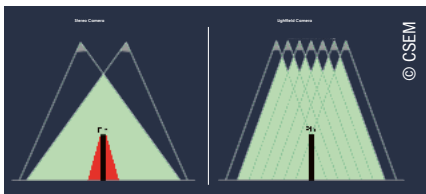


Abbildung 4: Abschattungen bei einem 3D-System.

materialien auf: matte Oberflächen, reflektierende Metalle, Pasten oder Flüssigkeiten. Durch den zusätzlichen Einsatz eines Rauschmusterprojektors können auch völlig strukturlose Oberflächen exakt rekonstruiert werden.

**Präzision:** Der Einsatzbereich der 3D-Lichtfeldtechnologie erstreckt sich dank dem frei wählbaren Primärobjektiv vom Sub- $\mu\text{m}$ -Bereich für die Mikroskopie bis hin zu Meterauflösung für Gebäude oder Drohnenanwendungen. In der typischen Qualitätsinspektion für mechanische Komponenten erreicht die Technologie bei einem Volumen von  $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$  eine absolute Messpräzision von lateral  $1 \mu\text{m}$  und in z-Richtung  $10 \mu\text{m}$ .

**Geschwindigkeit:** Der wohl grösste Vorteil der Lichtfeldkameras ist die enorm hohe Aufnahme- und Auswertegeschwindigkeit. Für die Bildakquise wird standardisierte Hardware verwendet. Das 2D-Rohbild der Kamera wird über gängige Industrieschnittstellen an den PC übertragen. Dabei kommen speziell für den Bereich der industriellen Bildverarbeitung entwickelte Protokolle wie USB3, CameraLink, GigE oder CoaX-Press zum Einsatz. Dies ermöglicht maximale Datendurchsätze von bis zu 7200 MB/s. Selbst bei einer Kameraauflösung von 20 Megapixel können so problemlos mehr als 100 Bilder pro Sekunde übertragen werden. Die 3D-Rekonstruktion wird auf dem PC berechnet und ist für die beste Auflösung sehr rechenintensiv. Durch den parallelen Einsatz von mehreren Grafikprozessoren kann die Last dynamisch verteilt werden. Dadurch ist Auswertung in Echtzeit mit bis zu 80 Bildern pro Sekunde bei moderaten Kosten möglich. Die Lichtfeldtechnologie ist heute so schnell, dass der Flaschenhals die Handhabung und Zuführung der Prüfteile ist. Dank einem leistungsfähigen Blitz, schnellen Achsen und präzisen Triggern konnte eine Applikation mit 20 Teilen pro Sekunde realisiert werden. Innerhalb von 50 ms erfolgen nebst der Bildaufnahme, 3D-Rekonstruktion auch

Bilder: © Raytrix

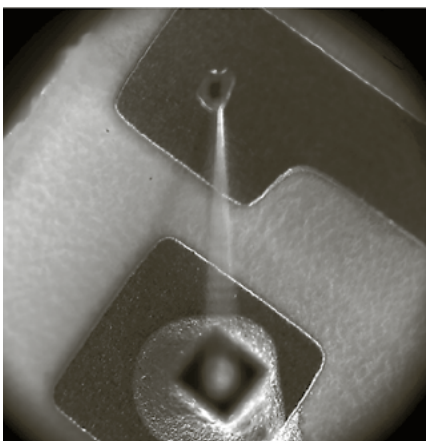
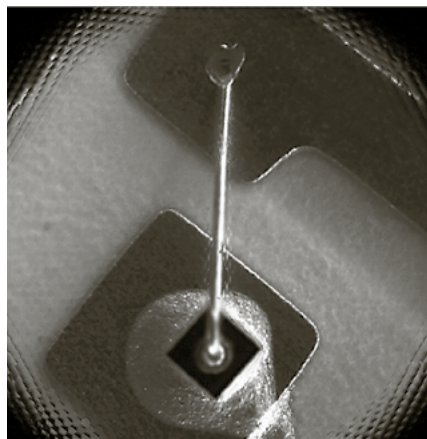


Abbildung 5: Links die Standardkamera, rechts die Lichtfeldkamera mit bis zu 6-fach höherer Tiefenschärfe.



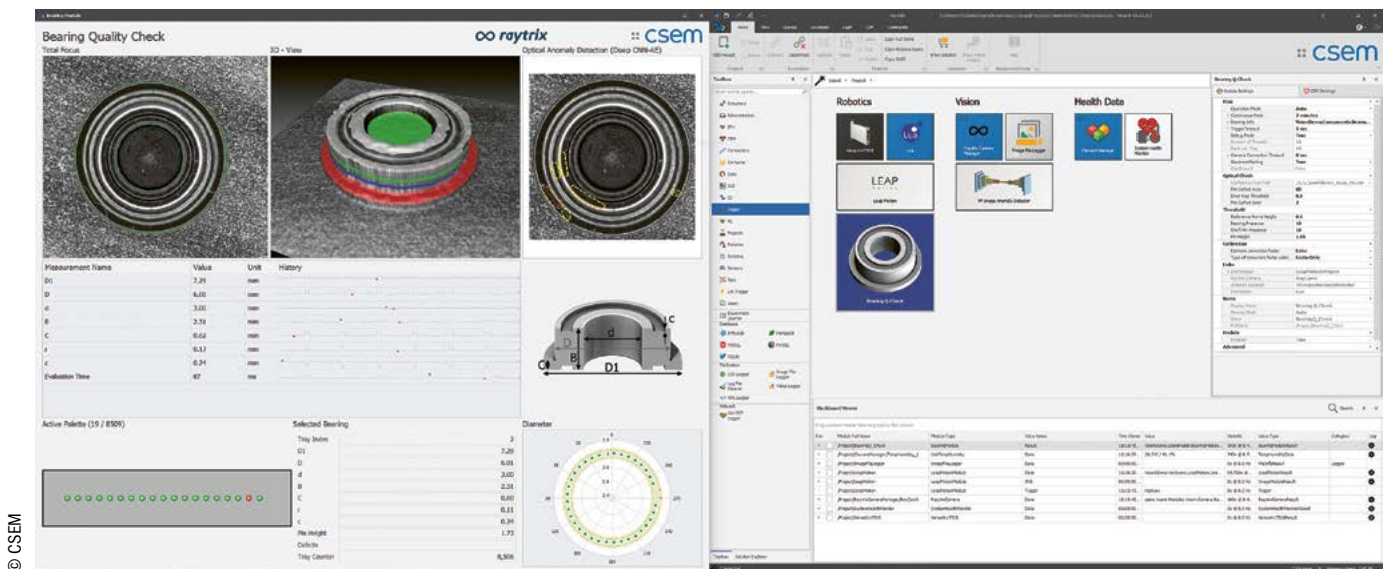


Abbildung 6: CSEM Visard mit integrierter Lichtfeldkamera, 3D-Auswertung und Deep-Learning-Inspektion.

die geometrische Auswertung sowie die Prüfung durch ein neuronales Netzwerk. Das ist ein Industrierekord!

**Abschattung:** Die gängigsten 3D-Industrielösungen basieren auf Triangulationsprinzipien. Ein Winkel zwischen Laserlinie und Kamera oder unterschiedliche Perspektiven zweier Kameras bilden die Grundlage. Dadurch entstehen Bereiche mit einer Abschattung, unzugängliche Stellen, bei welchen keine 3D-Information vorliegt. Dank dem Lichtfeldprinzip lässt sich eine abschattungsfreie Messung in nur einer Aufnahme realisieren (Single-Shot-Technologie). Dadurch sind 3D-Messungen entlang senkrechter Flächen oder in Sacklöchern ohne Abschattungen möglich (vgl. Abb. 3). Ein Vorteil, welcher sonst nur durch komplexe optische Aufbauten oder zusätzliche mechanische Bewegungen erzielt werden könnte.

**Tiefenschärfe:** Gerade bei hohen Vergrößerungen ist die Tiefenschärfe von klassischen Bildsystemen stark einschränkend. In der Lichtfeldkamera kommen deshalb beim Mikrolinsenarray drei verschiedene Linsentypen zum Einsatz. Jeder Typ hat eine unterschiedliche Brennweite, welche für einen nahtlosen Übergang vom Nah- in den Fernbereich optimiert wurde. Eine Lichtfeldkamera erreicht deshalb eine bis zu sechsfach höhere Tiefenschärfe als eine vergleich-

bare 2D-Ausführung (vgl. Abb. 5). Bei industriellen Anwendungen kann somit oft eine zusätzliche z-Achse für die Nachfokussierung eingespart werden.

### Hard- und Software zur Analyse sowie Nutzerschnittstelle

Das Computersystem besteht aus verschiedenen Komponenten: ein Subsystem zur Steuerung der Kameras und zur Datenakquisition sowie der Rekonstruktion der 3D-Bilddaten. Ein weiterer Prozess übernimmt die Auswertung der Bilddaten und übermittelt die Resultate an die Hauptsteuerung. Für die aufwendigen Berechnungen sind moderne Grafikprozessoren notwendig, welche dank dem Hype der künstlichen Intelligenz seit Längerem den Sprung in die Industrie geschafft haben. CSEM hat die Integrationssoftware Visard (Vision Automation and Robot Designer) entwickelt, die eine übergeordnete Steuerung des Prüfsystems, dynamische Verwaltung der Rechenleistung sowie die Anbindung an das Leitsystem realisiert (vgl. Abb. 6). Visard ist eine PC-basierte Software und enthält verschiedene Module für die industrielle Qualitätskontrolle. Das 3D-Auswertesystem lässt sich bequem über OPC-UA an SPS anbinden. Das komplette Datenlogging und die lückenlose Rückverfolgbarkeit können ebenfalls integriert werden.

Die Analyse der 3D-Daten erfolgt mit unterschiedlichen Verfahren, darunter auch einem Deep-Learning-Ansatz für ästhetische Merkmale. Geometrien und Masshaltigkeit der Teile werden in der Punktwolke bestimmt, Abweichungen erkannt und auch ungewöhnliche Fehlerbilder zuverlässig nachgewiesen.

### Ausblick

Die Autoren sind davon überzeugt, dass die Lichtfeldtechnologie in Kombination mit intelligenter Datenanalyse eine wichtige Rolle in der industriellen Qualitätskontrolle für dreidimensionale Prüfaufgaben spielen wird. Sie erreicht bereits heute Echtzeitfähigkeit, kann über klassische Objektive von Makroskopie bis Mikroskopie eingesetzt werden, ist benutzerfreundlich, wartungsarm und vermeidet bestimmte Einschränkungen herkömmlicher 3D-Verfahren, wie etwa Abschattungen. Erste Systeme mit Geschwindigkeitsrekorden sind bereits im validierten industriellen Einsatz. In Verbindung mit modernen Verfahren der Datenanalyse wie Deep Neural Networks für Qualitätsinspektion ergibt sich ein mächtiger Werkzeugkasten für die Industrie: ein weiterer Schritt zur erhöhten Effizienz in der Produktion und nicht zuletzt zur Standortsicherung in entwickelten Industrieländern. ■