

# **PHOENIX – ein optischer 3D-Sensor für Koordinatenmessmaschinen**

Prof. Dr. Hartmut Ernst, Dipl.-Phys. Bernhard Roither und Dr. Helge Moritz  
in-situ GmbH & Co. KG  
82054 Sauerlach / München  
[www.in-situ.de](http://www.in-situ.de)

**In der Fertigungstechnik werden häufig 3D-Portalmeßmaschinen mit taktilen Sensoren eingesetzt. Taktile Sensoren erlauben präzise Messungen, doch steht dem ein hoher Zeitaufwand bei der Erfassung komplexer Werkstücke entgegen. Durch einen neuartigen optischen Sensor können die Messzeiten bei vergleichbaren Messunsicherheiten deutlich reduziert werden. Dabei wird ein Triangulationsverfahren mit zehn gekreuzten Laserlinien und zusätzlicher Graubildanalyse verwendet.**

## **Messmaschinen in der Fertigungstechnik**

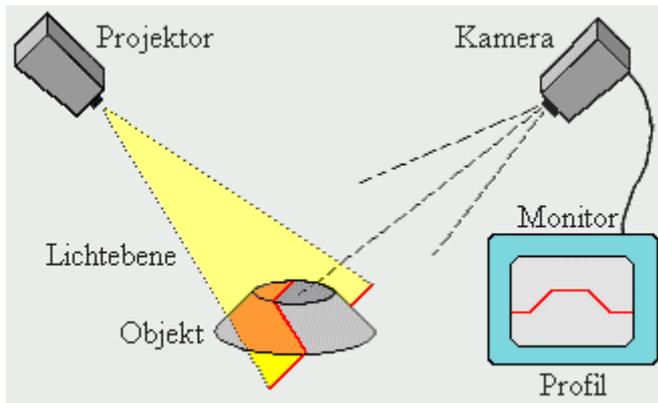
In der Fertigungstechnik und Qualitätssicherung, so etwa in der Automobilindustrie, gehören heute 3D-Koordinatenmeßmaschinen zur Standardausrüstung. Moderne Portalsysteme (siehe Bild 1) mit Luftführungselementen in allen Achsen und Führungsbalken aus Naturstein bieten einen Meßbereich in X-, Y- und Z-Richtung von mehreren Metern. Bei der punktwisen Antastung von Werkstückoberflächen mit taktilen Sensoren erreicht man dreidimensionale Meßunsicherheiten von typisch 5 µm. Durch Dreh-Schwenk-Einrichtungen für den Taster sowie unterschiedliche Tastelemente in Verbindung mit automatischen Tasterwechseleinrichtungen läßt sich eine hohe Flexibilität auch bei der Vermessung komplexer Werkstücke erreichen. In Verbindung mit einer softwaremäßigen Analyse der erfassten Punktwolken stehen zahlreiche Auswertemöglichkeiten zur Verfügung. Damit können nahezu alle in der Fertigungsmesstechnik auftretenden geometrischen Parameter wie Winkel, Abstände, Lagebeziehungen, und Formmerkmale normgerecht ermittelt werden.



**Bild 1:** Links: Portalmessmaschine.  
Oben: Detailansicht eines in der Messmaschine  
verwendeten Tasters.  
(Bildquelle: Wenzel Präzision, [www.wenzel-cmm.com](http://www.wenzel-cmm.com)).

## Optische Sensoren in der Messtechnik

Problematisch bei der taktilen Antastung ist der hohe Zeitbedarf bei der Erfassung von Oberflächen mit zahlreichen Details so wie die Vermessung nachgiebiger oder empfindlicher Werkstücke. In solchen Fällen bieten optische Sensoren eine Alternative. In Verbindung mit Messmaschinen kommen allerdings nur Systeme in Frage, die in Größe und Gewicht mit taktilen Sensoren vergleichbar sind. Nach dem Stand der Technik wird dabei hauptsächlich das Triangulationsverfahren eingesetzt. Im einfachsten Fall projiziert man mit Hilfe eines Lasers ein Lichtpunkt auf das Werkstück. Das dort diffus reflektierte Laserlicht wird mit einer Kamera aufgenommen. Da die Positionen von Laserprojektor und Kamera exakt bekannt sind, können durch einfache geometrische Analyse die 3D-Koordinaten des Messpunktes auf dem Werkstück ermittelt werden. Damit ist dann – in Analogie zu einem taktilen Sensor – ein punktweises Antasten der Werkstückoberfläche möglich. Eine Erweiterung bietet die Lichtschnitt-Technik, die durch Projektion einer Laserlinie anstelle eines Punktes die simultane Vermessung eines größeren Bildbereichs erlaubt. Das Messprinzip ist in Bild 2 dargestellt. Die Lichtschnitt-Technik bieten einen erheblichen Zeitvorteil im Vergleich zur taktilen Antastung, allerdings bei einer erhöhten Messunsicherheit. Einschränkungen gibt es ferner bei den so messbaren geometrischen Parametern sowie bei spiegelnden oder durchsichtigen Oberflächen.



**Bild 2:** In der Lichtschnitttechnik wird unter einem definierten Winkel eine Laserlinie auf ein Werkstück eingestrahlt. Aus der Form der mit Hilfe einer Kamera aufgenommenen reflektierten Linie kann nach dem Triangulationsprinzip das Werkstück dreidimensional erfasst werden.

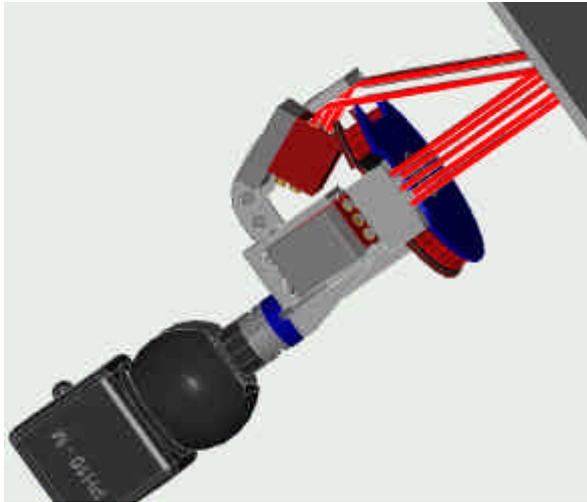
## PHOENIX – ein neuartiger optischer Sensor für Messmaschinen

Es liegt auf der Hand, dass sich durch Verwendung mehrerer Laserlinien genauere Ergebnisse als mit der Lichtschnitt-Technik mit nur einer Laserlinie erzielen lassen. Daher wurde zur Verbesserung der Messgenauigkeit und der Messgeschwindigkeit der neuartige optische 3D-Sensor PHOENIX nach diesem Prinzip der Multiliniens-Triangulation entwickelt. In PHOENIX sind zwei Laserpakete aus jeweils fünf Miniaturlasern integriert, die orthogonal zueinander angeordnet sind. Damit können bis zu zehn gekreuzte Laserlinien auf eine Oberfläche projiziert und unter Verwendung einer Kamera nach dem Triangulationsprinzip analysiert werden. Auf diese Weise lässt es sich bei der Vermessung linearer Merkmale wie Profilen, Kanten und Spalten ohne aufwendige Drehung des Sensors immer erreichen, dass entweder die Linien von Laserpaket 1 oder die dazu orthogonalen Linien von Laserpaket 2 die zu vermessenden Konturen in einem Winkel zwischen  $45^\circ$  und  $90^\circ$  schneiden. Diese „virtuelle Drehachse“ ermöglicht präzisere Auswertungen und führt wegen des Wegfalls der mechanischen Rotation zu einer Reduktion der Messzeiten.

In einem zweiten Schritt wird von den Lasern auf eine homogene, ringförmige LED-Beleuchtung umgeschaltet. In dem so aufgenommenem Graubild können nun durch Blob-Analyse sowie Konturverfolgungs- und Mustererkennungs-Algorithmen komplexere geometrische Merkmale erfasst und mit der zuvor aus der Multiliniens-Triangulation ermittelten Fläche in Beziehung gebracht werden.

Phoenix ist damit nicht nur schneller als taktile Sensoren, er bietet ferner im Vergleich mit bekannten optischen Sensoren eine größere Flexibilität hinsichtlich der erfassbaren Geometriemerkmale. Der Arbeitsabstand des Sensors beträgt 100 mm. Mit 550 g ist PHOENIX deutlich schwerer als taktile Sensoren, aber dennoch an übliche Adapter (beispielsweise Renishaw PH10) ankoppelbar. Die Messunsicherheit liegt bei ca.  $20 \mu\text{m}$ . Bild 3 zeigt eine schematische Darstellung des Sensors, Bild 4

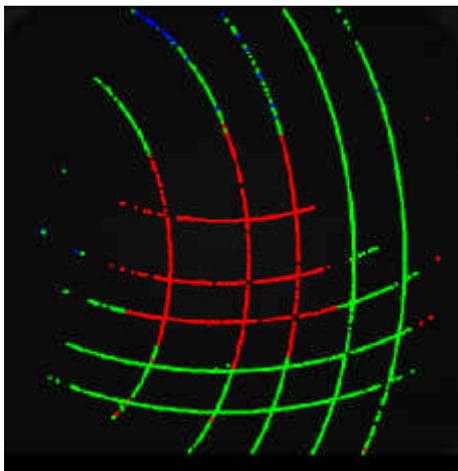
ein Anwendungsbeispiel aus der Automobilindustrie. In den Bildern 5 und 6 sind zwei Messbeispiele dargestellt.



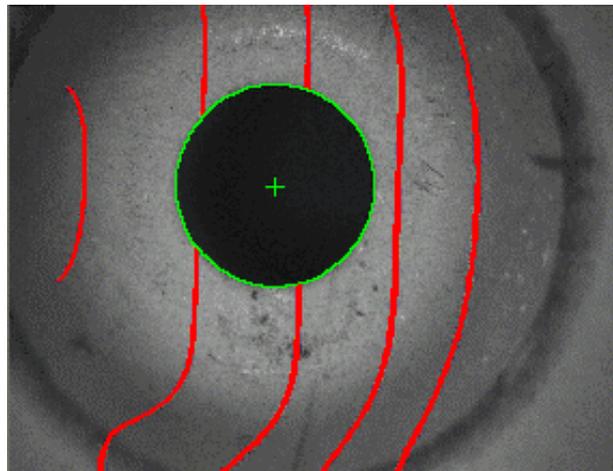
**Bild 3:** Schematische Darstellung des an eine Renishaw-Aufnahme (PH10) angekoppelten optischen 3D-Sensors PHOENIX. Man erkennt die beiden gekreuzt angeordneten Laserpakete und das Ringlicht.



**Bild 4:** Beispiel für eine typische Anwendung des optischen 3D-Sensors PHOENIX zur Vermessung einer Automobilkarosserie. Der Sensor ist an die Standard-Aufnahme (Renishaw) einer Messmaschine des Herstellers Wenzel Präzision montiert.



**Bild 5:** Zehn orthogonal zueinander auf eine Kalibrierkugel projizierte Laserlinien. Die unterschiedlichen Farben symbolisieren die Abweichungen von der idealen Oberfläche.



**Bild 6:** Auf eine Werkstückoberfläche mit Bohrung wurden fünf Laserlinien projiziert. An das Graubild der Bohrung wurde eine Kreiskontur angepasst. Radius und räumliche Lage der Bohrung ergeben sich durch Kombination der Kreiskontur mit der aus den Laserlinien ermittelten Fläche.

## Details zur Multilinien-Triangulation

Ein wesentliches Problem bei dieser im PHOENIX-Sensor verwendeten Multilinien-Triangulation ist die korrekte Zuordnung der mit der Kamera aufgenommenen Laserlinien zu den projizierten Linien. Dies gilt insbesondere bei stark gebogenen Werkstücken mit Durchbrüchen und Stufen. Die Zuordnung gelingt durch sequentielle, mit der Bildaufnahme synchronisierte Projektion, flexible Belichtungszeiten, Speicherung von Zwischenbildern und darauf zugeschnittene bildanalytische Methoden. Außerdem können auf diese Weise kurze Aufnahme- und Auswertzeiten von einigen 100 Millisekunden realisiert werden. Die Auswertung erfolgt dabei zeitoptimiert teilweise während der Bewegung des Sensors zur jeweils nächsten Messposition.

Die verwendeten, nur 5 mm durchmessenden Miniaturlaser emittieren im roten Wellenlängenbereich um 630 nm mit einer Leistung von ca. 1 mW. Genau dieser Wellenlängenbereich wird auch im LED-Ringlicht verwendet. Dieses Rotlicht ist wegen seiner kürzeren Wellenlänge und der daraus resultierenden höheren Ortsauflösung dem sonst häufig in der optischen Messtechnik eingesetzten Infrarotlicht (NIR) vorzuziehen. Außerdem kann so die mit nur geringen Auflagen verbundene Laserschutzklasse 2 zur Anwendung kommen. Zur Reduktion von Fremdlichteinflüssen werden aus zwei Komponenten bestehende Filter verwendet. Dies ist zum einen ein schmalbandiges Interferenzfilter mit 10 nm Halbwertsbreite und einer maximalen Transmission bei 630 nm sowie außerdem ein Polarisationsfilter zur Unterdrückung störender Reflexe. Dadurch ist eine robuste Arbeitsweise auch unter ungünstigen Umgebungsbedingungen gewährleistet.

Die orthogonale Anordnung der beiden Laserpakete erfordert jedoch noch weitere Maßnahmen. Laserdioden besitzen eine elliptische Abstrahlcharakteristik, wobei die Polarisationsrichtung von der Orientierung dieser Ellipse abhängt. Daher ist die Auswahl der Laser und der Zylinderoptiken zur Erzeugung eines Lichtvorhangs nicht trivial. Damit auch bei der orthogonal gekreuzten Laseranordnung die oben erwähnten Polarisationsfilter verwendet werden können, muss bei einem der beiden Laserpakete die Polarisation um 90° gedreht werden. Dies geschieht durch Vorsetzen einer  $\lambda/2$ -Scheibe. Ferner ergeben sich in Abhängigkeit von der Orientierung der Emissionsellipsen Abweichungen von dem erwünschten Gauß-Querschnitt der Profillinien sowie Unterschiede in der Linienbreite und Intensität der beiden Lasergruppen. Dies muss bei der bildanalytischen Auswertung berücksichtigt werden.

## **Details zur bildanalytischen Auswertung: Approximation und Relaxation**

An die durch die Analyse der Laserlinien ermittelte Punktwolke werden zur Modellierung der erfassten Werkstückoberfläche mit Hilfe von Approximationsverfahren nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate Flächen im Raum angepasst. Damit diese Flächenanpassung robust arbeitet, ist eine Unterdrückung von fehlerhaften Messpunkten, sog. „Ausreißern“ erforderlich. Gerade in der Bildverarbeitung kommt es vor, dass einige Datenpunkte aufgrund irgendwelcher Störungen (z. B. durch Reflexe oder lokale Verschmutzung) aus dem Rahmen fallen und bei gleichgewichtiger Analyse das Ergebnis verfälschen würden. Zur Lösung dieses Problems werden nach der ersten Anpassung der gewünschten Funktion Ausreißer anhand ihres vergleichsweise großen Abstandes zur angepassten Fläche identifiziert. In einer nachfolgenden Iteration werden die Stützwerte mit zwischen 0 (eliminiert) und 1 (voll berücksichtigt) liegenden Gewichtungsfaktoren multipliziert, die aus der Güte der Anpassung nach Maßgabe einer Gaußverteilung hergeleitet werden. Dieses Relaxationsverfahren wird dann so oft iteriert, bis eine optimale Lösung erreicht ist. Auf diese Weise können bei einem Bildausschnitt von ca. 30 ? 40 mm<sup>2</sup> einfache Flächen wie Ebenen und Kugeln mit einer Messunsicherheit von ca. 10 µm angepasst werden.

Ist beispielsweise eine Bohrung in einem ebenen Blechteil zu vermessen, so wird zunächst mittels Multilinien-Triangulation eine Ebene an die Umgebung der Bohrung angepasst. Im zweiten Schritt wird die Bohrung, die sich im Graubild in der Regel als Ellipse darstellt, lokalisiert und in Konturpunkte aufgelöst. An diese Konturpunkte wird dann durch Approximation nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate sowie nachfolgende Relaxation eine Ellipse bzw. ein Kreis angepasst. Bild 6 zeigt dafür ein Beispiel. Aus der Kenntnis der Flächennormale und des Aufpunktes der Ebene können schließlich die tatsächlichen 3D-Koordinaten des Mittelpunktes sowie der Radius des in die Ebene projizierten Kreises errechnet werden. In analoger Weise wird bei der 3D-Vermessung komplexerer Muster vorgegangen; dies können beispielsweise Sechskantstanzungen, Langlöcher oder Bolzen in Ebenen, aber auch gekrümmten Oberflächen sein.

in-situ GmbH & Co. KG  
vision & sensor system

Dr. Helge Moritz

Mühlweg 2a

D-82054 Sauerlach

Tel./Fax: 08104 6482-30 / -43

Email: [vision@in-situ.de](mailto:vision@in-situ.de)

Web: [www.in-situ.de](http://www.in-situ.de)