

## Neue Laser-Technologien für die Industrievermessung

JÜRGEN DOLD, Unterentfelden

**Keywords:** 3-D metrology, Laser Tracker, Laser Radar, automation, non-contact measurement

**Zusammenfassung:** Verfahren und Prozesse der industriellen Fertigung von Produkten sind in ständigem Umbruch. Neue Werkzeuge tragen zur Genauigkeitssteigerung und erhöhten Automation von Produktionsabläufen bei. Optische Messtechnik verbindet dabei das Design mit der Realität. Entweder wird mittels Messtechnik geprüft, ob ein Objekt dem ursprünglichen Design entspricht, oder die Messtechnik unterstützt die präzise Montage von Bauteilen. Zwei neue Laserbasierte Industriemesssysteme werden vorgestellt. Es handelt sich um das berührungslos messende Laser Radar und den mit einer Kamera kombinierten Laser Tracker für Handtaster und Handscanner.

**Summary:** *Novel Laser Technologies for Industrial Metrology.* Industrial manufacturing processes are continuously improving. New tools increase the manufacturing accuracy and the automation of processes. Optical measurement techniques play a key role to link the design with the reality. Either the measurement technique is used to inspect whether parts are built as designed or the measurement technique helps during the manufacturing process to build according to the design. Two new Laser-based industrial measurement systems will be described. One system is the non-contact Laser Radar and the other system combines camera and Laser Tracker technology for the use of hand held probes and scanners.

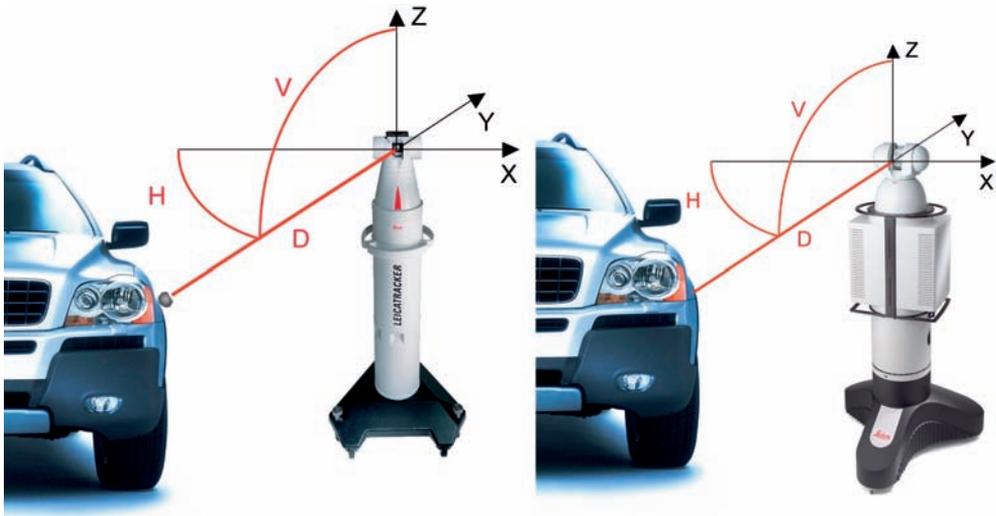
---

### 1 Einleitung

Die Laser Tracker Technologie wurde vor mehr als zehn Jahren in den verschiedensten Industriezweigen erfolgreich eingeführt. Viele Produktionsbereiche nutzen sie im Rahmen der Montage und Prüfung von Bauteilen und Werkzeugen. Die Firma Leica Geosystems stellt jetzt neue Laser-Technologien vor, die den Anwendungsbereich der Laser-Systeme signifikant erweitern. Zum einen wurde kürzlich das Laser Radar LR200 eingeführt, ein System, das in einem großen Messvolumen berührungslos Präzisionsmessungen durchführen kann. Zum anderen wurde eine funktionale Erweiterung der Laser Tracker Technologie angekündigt (DOLD & LOSER 2003). Hierbei handelt es sich um die Verbindung eines Laser Trackers mit photogrammetrischen Messmethoden. Damit kann nicht nur die Position, sondern auch die Orientierung beliebiger Objekte im Raum in Echtzeit gemessen werden.

### 2 Laser Radar und Laser Tracker

Die Messmethoden eines Laser Trackers und eines Laser Radars sind sehr ähnlich. Beide Systeme arbeiten nach dem Prinzip einer Totalstation (Winkel- und Distanzmesser). Für die Bestimmung der Koordinaten eines Messpunktes werden von einem Standpunkt aus der Horizontalwinkel (H), der Vertikalwinkel (V) und die Distanz (D) zum Messpunkt gemessen. Aus diesen Beobachtungen können die Koordinaten des Messpunktes (X,Y,Z) in Echtzeit berechnet werden (Abb. 1). Während die Distanzmess-technologie des Laser Trackers einen Reflektor am Messpunkt erfordert, kann das Laser Radar ohne Reflektor die Entfernung zum Messpunkt bestimmen. Das Laser Radar digitalisiert somit das Objekt berührungslos, was im folgenden mit „Scanning“ bezeichnet wird. Im Gegensatz hierzu bietet der Laser Tracker die Möglichkeit, den Reflektor sehr schnell zu verfolgen, im folgenden mit „Tracking“ bezeichnet.



**Abb. 1:** Laser Tracker und Laser Radar messen nach dem Prinzip der Totalstation; der Laser Tracker mit Hilfe eines Reflektors, das Laser Radar berührungslos.

## 2.1 Scanning

Das Laser Radar LR200 verwendet eine Distanzmesstechnologie, die als Frequenz-Moduliertes Kohärentes Laser Radar bezeichnet wird (engl. Frequency Modulated Coherent Laser Radar, FMCLR; Details in LEICA 2002). Die besondere Eigenschaft dieser Technik ist die hohe Messgenauigkeit bei Entfernungen bis zu 60 Meter. Messgenauigkeit und Messzeit werden im Wesentlichen durch den gewählten Messmodus bestimmt. Voraussetzung für genaue berührungslose Entfernungsmessungen ist, dass der Laserstrahl auf die Oberfläche des Messpunktes am Objekt fokussiert wird. Im sogenannten „Pseudo-Vision-Mode“ wird der Laserstrahl auf eine mittlere Entfernung des Messobjekts vom LR200 fokussiert. Damit erreicht man bei einer Messrate von bis zu 1000 Punkten pro Sekunde eine Messgenauigkeit von etwa 0.1–0.2 mm. Im „Metrology-Mode“ wird der Laserstrahl für jeden Messpunkt neu fokussiert. In diesem Mode lässt sich die Messgenauigkeit auf 0.05 mm bei einer Messrate von 20 Punkten pro Sekunde steigern. Die höchste Genauigkeit von etwa 0.01 mm wird im „Enhanced Metrology Mode“ bei rund zwei Punkten pro

Sekunde erreicht. In diesem Messmode wird nicht nur für jeden einzelnen Messpunkt fokussiert, sondern es werden weitere genauigkeitssteigernde Maßnahmen durchgeführt.

Die patentierte Entfernungsmess-Technologie des LR200 erlaubt eine Distanzmessung auch bei sehr schwach zurückkommendem Laserstrahl. Die Leistung des ausgehenden Laserstrahls beträgt 0.007 Watt und selbst bei einer Abschwächung des reflektierten Signals um den Faktor  $1 \times 10^{-9}$  (d. h. 0.000 000 000 007 Watt) kann die Distanz noch ermittelt werden. Dies hat den großen Vorteil, dass man nahezu alle Materialien mit dem Laser Radar digitalisieren kann, sei es Plastik, Metall, Spiegel, Glas, Holz, Stoff... , alles ist möglich, mit Ausnahme von Wasser.

Als Standardregel gilt, dass der LR200 innerhalb seiner Spezifikationen messen kann, solange der Winkel zwischen dem einfallenden Laserstrahl und der Flächennormalen (Abb. 2)  $45^\circ$  nicht überschreitet. Allerdings können optisch diffuse Oberflächen (nicht polierte Flächen) selbst bei einem Einfallswinkel von bis zu  $85^\circ$  hochgenau vermessen werden. Bei stark polierten Oberflächen, wie z. B. Spiegeln, sollte der Einfallswinkel nicht größer als  $20^\circ$  sein.



**Abb. 2:** Einfallswinkel ist der Winkel zwischen dem Laserstrahl und der Flächennormalen.

Das Laser Radar kann nicht nur Spiegeloberflächen vermessen, sondern ist auch in der Lage, mittels eines Spiegels „um die Ecke“ zu messen. Dazu wird die Orientierung eines fest montierten Spiegels mit dem Laser Radar ermittelt, um den optischen Pfad zu berechnen, den der Laserstrahl bei der Umlenkung des Spiegels durchläuft. Durch dieses Verfahren können Objekte von mehreren Seiten, d. h. auch von hinten, mit nur einer Aufstellung digitalisiert werden.

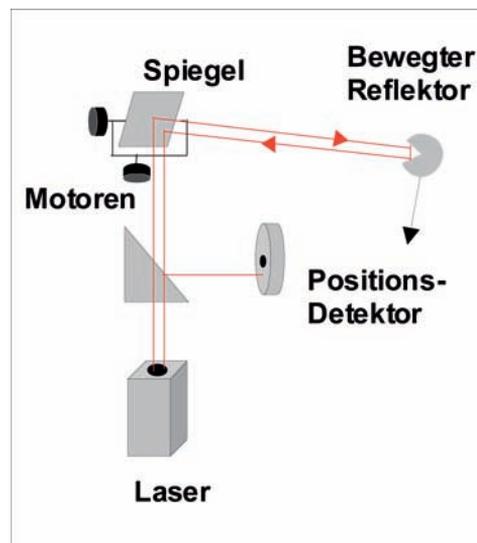
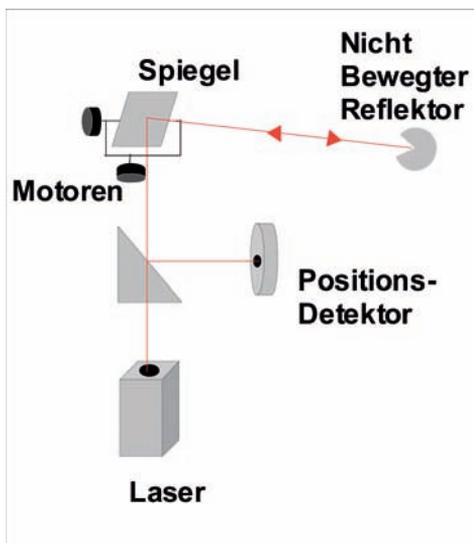
Einer der wesentlichen Vorteile der Laser Radar Technologie ist, dass sie das berüh-

rungslose Messen erlaubt. Dies ist besonders dann von Vorteil, wenn Objekte manuell nicht erreicht werden können, wenn sie nicht berührt werden dürfen oder wenn beispielsweise wiederkehrende oder zeitaufwändige Messungen automatisch effizienter durchgeführt werden sollen.

### 2.2 Tracking

Die nun schon seit über einem Jahrzehnt in der Industrie bewährte Laser Tracker Technologie weist zwei unterschiedliche Distanzmessmethoden auf. Zum einen erlaubt das Heterodyne-Laser-Interferometer sehr hohe Messraten von bis zu 3000 Messungen pro Sekunde. Zum anderen können mit dem Absolut-Distanzmesser (ADM), der auf einer Polarisations-Modulation beruht, Messungen in hohem Grad automatisiert werden. Sowohl die Interferometer-Lösung wie auch die Absolut-Distanzmesstechnik werden näher in LÖFFLER (2002) beschrieben.

Ein entscheidender Vorteil der Laser Tracker Technologie ist die Möglichkeit, sich schnell bewegende Messpunkte nicht nur verfolgen, sondern auch während der Bewegung messen zu können. Das Tracking-Prinzip (Abb. 3) lässt sich wie folgt in Kürze beschreiben: Der vom Laser ausge-



**Abb. 3:** Das Tracking Prinzip.

hende Strahl wird über einen Spiegel zum Reflektor gesendet und der zurück kommende Strahl wird auf einen Positionsdetektor geleitet. Bei einem nicht bewegten Reflektor werden die Motoren in Sekundenbruchteilen durch den Positionsdetektor so gesteuert, dass der Laserstrahl exakt in die Mitte des Reflektors zielt. Unmittelbar nach der genauen Positionierung erfolgt dann das Messen der Horizontal- und Vertikalwinkel wie auch die Distanzmessung. Bewegt sich jedoch der Reflektor, verläuft der zurück kommende Laserstrahl parallel zum ausgehenden. In einem solchen Fall misst der Positionsdetektor den Versatz und diese Information wird verwendet, um einerseits die gemessenen Horizontal- und Vertikalwinkel zu korrigieren, andererseits die Motoren des Spiegels so zu steuern, dass der Laserstrahl dem bewegten Reflektor folgt. Der Messzyklus auf dem Positionsdetektor beträgt beim Leica Laser Tracker 3000 Mal pro Sekunde. Als Resultat lassen sich 1000 Messpunkte pro Sekunde ausgeben. Der Messpunkt kann sich mit mehr als vier Meter pro Sekunde bewegen und Beschleunigungen von mehr als 2 g aufweisen.

Laser Tracker Messungen sind in einem Messvolumen von bis zu 80 Meter Durchmesser möglich. In diesem Messvolumen erreicht der Laser Tracker eine Messgenauigkeit von 10 Mikrometer pro Meter Messdistanz, dies entspricht bei 5 Meter einer Messunsicherheit von 0.05 mm.

Der Laser Tracker hat sich insbesondere im Bereich der Montage und Prüfung von Bauteilen und Bauvorrichtungen bewährt. Hier erlaubt die Tracking-Technologie, die

Abweichungen zwischen Soll und Ist in Echtzeit zu bestimmen und den Bediener des Systems zu unterstützen, den Sollzustand des Bauteils oder der Bauvorrichtung wieder herzustellen. Laser Tracker werden in zunehmendem Maße auch dazu eingesetzt, Roboter zu kalibrieren oder in Produktionsprozessen Maschinen niedriger Genauigkeit in Echtzeit in die korrekte Position zu führen.

### 2.3 Kombination von Laser Tracker und Photogrammetrie

Schon vor über einem Jahrzehnt stellte WESTER-EBBINGHAUS (1988) ein Messkonzept vor, bei dem ein motorisierter Theodolit (Winkelmessung) mit einer Videokamera kombiniert wurde. Durch die Kombination der Laser Tracker Technologie (Winkel- und Distanzmessung) mit einer digitalen Vario-Optik-Kamera wurde dieser Ansatz konsequent für die industrielle Anwendung weiterentwickelt (LOSER & KYLE 2003). Es entstand ein Messsystem, mit dem man nicht nur die Position eines Messpunktes (Reflektors), sondern auch die Orientierung eines Objektes im Raum bestimmen kann.

#### 2.3.1 Prinzip des 6 DOF Tracking

Das Prinzip basiert auf der Kombination eines Laser Trackers mit einer Hochgeschwindigkeits-Kamera (Abb. 4). Das zu messende Objekt (z. B. ein Handtaster, Handscanner, Roboterkopf) besitzt einen integrierten Reflektor und ein Diodenfeld. Die Lage des Reflektors zum Diodenfeld

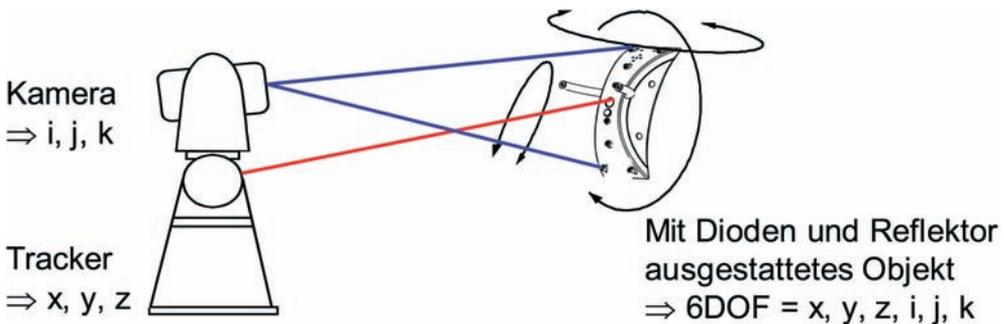


Abb. 4: Das Prinzip des 6 DOF Tracking.

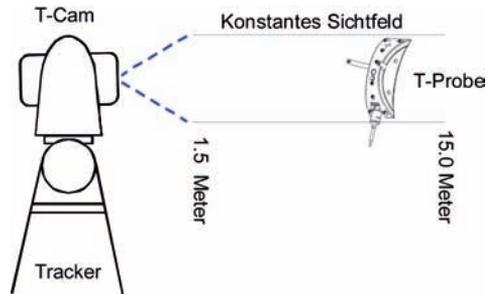


**Abb. 5:** Hochgeschwindigkeitskamera T-Cam.

wird dabei als bekannt vorausgesetzt. Während der Laser Tracker die genaue Position des Reflektors ( $x, y, z$ ) mittels Winkel- ( $H, V$ ) und Distanzmessung ( $D$ ) bestimmt, ermittelt die Kamera die Orientierung ( $i, j, k$ ) des Diodenfeldes mittels digitaler Bildmessung. Mit dieser Anordnung können nun sechs Freiheitsgrade (6 DOF = 6 Degrees of Freedom) beliebiger Objekte im Raum mit einer Echtzeitrate von mehr als 100 Hz gemessen werden.

### 2.3.2 Hochgeschwindigkeitskamera T-Cam

Speziell für diese Anwendung wurde die Hochgeschwindigkeitskamera T-Cam entwickelt (Abb. 5). Die Kamera besitzt im Inneren einen Titanrahmen, der bei geringem Gewicht hohe mechanische Stabilität garantiert. Der eingebaute Bildsensor, ein CMOS Chip mit  $1024 \times 1024$  Pixel, ermöglicht eine Bilderfassungsrate von 100 Hz und ein integrierter „Digital-Signal-Prozessor“ (DSP) wertet die Messbilder simultan zur Bilderfassung aus. Die Kamera ist mit einem Vario-Objektiv ausgerüstet, das für Entfernungen zwischen 1.5 Meter und 15 Meter ein konstantes objektseitiges Sichtfeld von  $30 \times 30$  cm garantiert (Abb. 6). Der Vorteil des



**Abb. 6:** T-Cam mit konstantem Sichtfeld zwischen 1.5 m und 15 m.

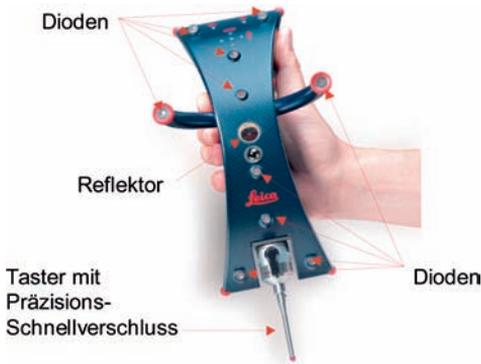
konstanten Sichtfeldes ist eine nahezu entfernungsunabhängige Genauigkeit der Orientierungswinkel ( $i, j, k$ ) von etwa 0.01 grad.

Die Kalibrierung der T-Cam basiert auf den in der Photogrammetrie üblichen Parametern digitaler Kameras, wie z. B. Kamerakonstante, Hauptpunktlage, Affinitätsparameter, radialsymmetrische und tangentielle Verzeichnung. Allerdings musste für die T-Cam ein spezielles Kalibrierverfahren entwickelt werden, um dem schmalen Öffnungswinkel bei gleichzeitig großen Entfernungen von bis zu 15 m Rechnung zu tragen. Die Kamerakalibrierung wird fabrikkseitig in einem vollautomatisierten Prozess durchgeführt. Die Vor-Ort-Kalibrierung der Kamera zum Laser Tracker wird durch eine Funktion mit 10 Parametern beschrieben.

Das System „Laser Tracker und T-Cam“ erlaubt die Verfolgung eines signalisierten Objektes, das sich mit einer Geschwindigkeit von bis zu 2 m/sec und einer maximalen Beschleunigung von 2 g bewegt. Durch diese Messtechnologie können somit in Echtzeit (100–500Hz) die sechs Freiheitsgrade bewegter Objekte bestimmt werden.

### 2.3.3 Die handgeführte Koordinaten-Messmaschine T-Probe

Die T-Probe ist ein handgeführter Messtaster, dessen Position und Orientierung im Raum durch das System „Laser Tracker und T-Cam“ bestimmt werden. Sie ermöglicht freihandgeführte Messungen in einer radialen Entfernung vom Laser Tracker von bis zu 15 Meter. Die T-Probe besteht aus einem leichten Kohlefasergehäuse, in dem sich

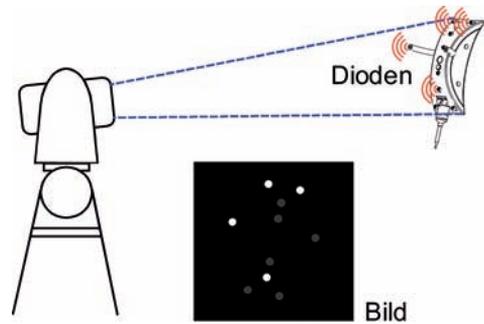


**Abb. 7:** T-Probe, die handgeführte Koordinaten-Messmaschine.

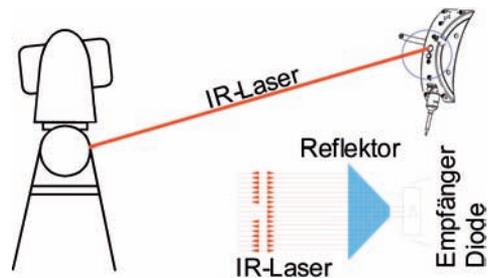
zentral ein Reflektor und räumlich verteilt 10 Dioden befinden. Zwei Präzisions-Schnellverschlüsse erlauben das Auswechseln beliebiger Messtaster, ohne dass Neukalibrierungen notwendig sind.

Um einen kabellosen Betrieb der T-Probe zu gewährleisten, erfolgt die Stromversorgung durch eine integrierte Batterie. Die Kommunikation zwischen der T-Probe und der Basisstation (Laser Tracker und T-Cam) erfolgt durch zwei verschiedene Methoden. Zum einen kommuniziert die T-Probe mit der T-Cam durch eine spezielle Helligkeitsansteuerung der Dioden, die mittels Bildverarbeitung in ein Kommunikationsprotokoll gewandelt wird (Abb. 8). Die Kommunikation von der Basisstation zur T-Probe wird über den IR-Laserstrahl des Entfernungsmessers realisiert (Abb. 9). Hierfür wird dem Laserstrahl ein Signal aufmoduliert, das durch einen Empfänger hinter dem Reflektor in der T-Probe empfangen wird.

Mit diesen Kommunikationsmethoden wird eine Vielzahl von Operationen automatisiert. Bringt man beispielsweise die T-Probe in das Sichtfeld der T-Cam, so wird automatisch erkannt, welche T-Probe mit welchem Taststift verwendet wird. Mit der handgeführten T-Probe können somit hoch automatisierte Messungen in einem Messvolumen von bis zu 30 m durchgeführt werden. Die Längenmessunsicherheit der T-Probe liegt in einem Messvolumen von 8 m unter 0.1 mm, bei 22 m unter 0.2 mm und bei maximal 30 m unter 0.3 mm.



**Abb. 8:** Kommunikation von Basisstation zur T-Probe.



**Abb. 9:** Kommunikation von T-Probe zur Basisstation.



**Abb. 10:** T-Probe und Laser Tracker.



**Abb. 11:** T-Scan und Laser Tracker.

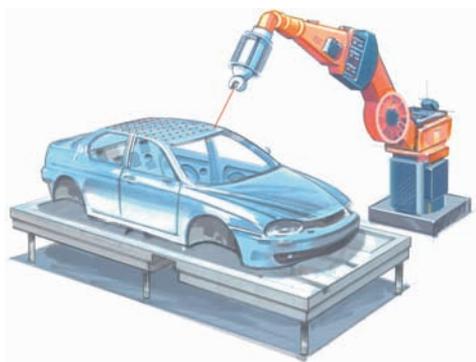
### 3 Anwendung der Systeme

Die Kombination der Laser Tracker Technologie mit der Photogrammetrie ermöglicht zwei entscheidende Funktionalitätserweiterungen des Laser Tracker Systems. Zum einen wird es möglich, mit der handgeführten T-Probe in einem großen Messvolumen auch schwer zugängliche Messstellen einfach zu vermessen. Diese Anwendungen findet man häufig bei der Vermessung von Fahrzeugen (Abb. 10) oder auch in Produktionslinien der Automobil- und Flugzeugindustrie.

Der Hersteller des Systems, Leica Geosystems, hat weiterhin angekündigt, dass – ähnlich wie die T-Probe – ein handgeführter Scanner T-Scan als Produkt auf den Markt kommen wird (Abb. 11). Mit diesem Scanner wird es beispielsweise möglich sein, in einem großen Messvolumen Oberflächen flexibel mit kurzen Vorbereitungszeiten zu



**Abb. 12:** Laser Radar zur Vermessung großer unzugänglicher Objekte.



**Abb. 13:** Laser Radar zur vollautomatischen Vermessung.

digitalisieren – eine Aufgabe, die sehr häufig in den Designabteilungen der Automobilindustrie anzufinden ist. Die vorgestellte 6 DOF-Tracking-Technologie lässt sich für eine Vielzahl anderer Anwendungen einsetzen, und zwar immer dann, wenn nicht nur die Positionen, sondern auch die Orientierungen bewegter Objekte zu messen sind. So beispielsweise bei der Kalibrierung von Robotern, Maschinen und der Montage großer Objekte (DOLD 2002).

Die Laser Radar Technologie wird zunehmend in Bereichen eingesetzt, in denen große und unzugängliche Objekte vermessen werden müssen (Abb. 12). In diesen Fällen liefert die berührungslose Messtechnik große Vorteile gegenüber allen taktilen Messmethoden. Aber auch die Möglichkeit, Messprozesse vollautomatisch zu gestalten, findet vor allem in der Automobilindustrie großes Interesse (Abb. 13). Vor allem dann, wenn in der Zukunft die 100% Kontrolle der Fahrzeuge möglich wird.

### 4 Schlussbemerkung

Die hochgenaue Scanning-Technologie des Laser Radars wurde erst vor kurzem präsentiert. Große Flugzeughersteller wie beispielsweise Airbus und Boeing haben dennoch bereits erste Integrationen dieser Messtechnik in ihre Produktionsprozesse vorgenommen. Es ist zu erwarten, dass in den nächsten Jahren die Verbreitung des Laser Radars stark zunehmen wird. Die Laser Tracker Technologie wurde schon vor über 10 Jahren in die industrielle Messtechnik eingeführt und heute werden weltweit mehr als 1500 Laser Tracker erfolgreich eingesetzt. Durch die Funktionserweiterung des Leica Laser Trackers mit der T-Probe und dem T-Scan wird diese Technologie in Anwendungsgebiete vorstoßen, in denen heute z. B. klassische Koordinatenmessmaschinen eingesetzt werden.

### Literatur

DOLD, J., 2002: Real-time 3D motion control with laser tracker technology. – Presented to Coordinate Measuring System Conference, CMSC

- 2002, <http://www.leica-geosystems.com/ims/application>.
- DOLD, J. & LOSER, R., 2003: The concept and application of real-time 6DOF tracking. – Presented to Coordinate Measuring System Conference CMSC 2003, <http://www.leica-geosystems.com/ims/application>.
- LEICA, 2002: Frequency modulated coherent laser radar technology description. – Leica Publication U1 405-0en.
- LOSER, R. & KYLE, S., 2003: Concept and components of a novel 6DOF tracking system for 3D metrology. – In: GRÜN/KAHMEN (Hrsg.): Optical 3-D Measurement Techniques VI, Vol. II. – pp. 55–62, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.
- LÖFFLER, F., GOTTWALD, R., GREENWOOD, T., HÖLTING, R., LOSER, R., LUHMANN, T., MIEBACH, R., MÜNCH, K.-H. & SCHIRMER, W., 2002: Maschinen- und Anlagenbau. – In: MÖSER, MÜLLER, SCHLEMMER & WERNER (Hrsg.): Handbuch Ingenieurgeodäsie, 2. Aufl. – pp. 169–182, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- WESTER-EBBINGHAUS, W., 1988: High resolution digital object recording by video-theodolite. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 27 (B10): V/219–223.

Anschrift des Autors:

Dr.-Ing. JÜRGEN DOLD  
Metrology Division, Leica Geosystems AG  
Mönchmattweg 5  
CH-5035 Untertentfelden  
e-mail: [juergen.dold@leica-geosystems.com](mailto:juergen.dold@leica-geosystems.com)

Manuskript eingereicht: September 2003

Angenommen: Oktober 2003