Der Laser-Tracker LTD 800 – eine neue Generation in der Industriemesstechnik

M. Möser
S. Wallstab-Freitag
J. Herrmann

In der Ingenieurgeodäsie hat sich in den letzten 20 Jahren die Industriemesstechnik als spezielles Aufgabengebiet für hochpräzise Messungen im Maschinen- und Anlagenbau etabliert. Ausgehend von der technischen Entwicklung in der Fertigungsmesstechnik und in der geodätischen Messtechnik wird der Laser-Tracker von Leica Geosystems mit der T-Cam und T-Probe als ein mobiles 3D-Koordinaten-Messsystem vorgestellt. Der Beitrag zeigt wie im Rahmen einer Diplomarbeit Algorithmen für Laboruntersuchungen zu den Systemparametern entwickelt wurden.

1 Zur Entwicklung mobiler 3D-Industriemesssysteme

Im Maschinen- und Anlagenbau werden das „Optische Ausrichten“ (Optical Tooling) von Werkzeugmaschinen mit Theodolit, Nivellier und speziellen Lehren sowie das „Ausmessen“ von Werkstücken und Prüflingen mit einem Koordinatenmessgerät (KMG) im Bereich der Fertigungsmesstechnik ausgeführt. Für die Qualitätssicherung und Prüfdokumentation vor, während und am Ende des Fertigungsprozesses existieren dazu seit Jahrzehnten mechanische und optische Verfahren. Die Einteilung der Koordinatenmessgeräte erfolgt entsprechend der geforderten Dimensionen (x, xy, xyz).

Zu den Einkoordinatenmessgeräten gehören Längenmessgeräte (Messschieber, Messuhren), Höhenmessgeräte (vertikale Maßstäbe) und Winkelmessgeräte (Universalwinkelmesser, Neigungsmesser). Um die Prüfungen in kurzer Zeit und mit einer großen Anzahl von Messwerten durchzuführen, sind mittlerweile elektronische, optoelektronische und rechnergestützte Systeme zum Standard in den Prüfanweisungen geworden. Pneumatische und elektronische Längenmessgeräte (Laserinterferometer) werden ergänzt durch Zweikoordinatenmessgeräte (Werkzeugmikroskop) und Dreikoordinatenmessgeräte (Koordinatenmessmaschine). In der Koordinatenmesstechnik wird die Istgeometrie des Werkstücks punktweise zur Ableitung von Maß-, Form- und Lagetoleranzen bestimmt. Die schaltenden oder messenden 3D-Taster ermöglichen auch die Arbeitsweisen des Scannens entlang einer festgelegten Bahn und das Digitalisieren netzartig verteilter Messpunkte auf dem Prüfling. Für diesen Messvorgang werden dreidimensionale Längenmessunsicherheiten von 9 µm/m angegeben.

Da der Geodät bereits in seiner Ausbildung ein Gefühl für Präzision, Fehlereinwirkungen und Genauigkeit erwirbt, ergab sich in den 80er Jahren die Frage „Ist auch der Maschinenbau ein Arbeitsfeld für den Vermessungsingenieur“ [1]. Zu dieser Zeit waren die instrumentellen Voraussetzungen für Messaufgaben im Maschinen- und Anlagenbau für den Geodäten bereits vorhanden. Mit einem elektronischen Theodolit, einem kalibrierten Maßstab (Basislatte), dem räumlichen Vorwärtseinschnitt bei freier Standpunktwahl und einer online Datenverbindung zu einem PC mit Echtzeitsoftware wurden Messungen mit einer Genauigkeit von 10^{-6} (1 ppm oder 0,01 mm auf 10 m) durchgeführt.

Bereits 1980 wurden (geodätische) Messsysteme vorgestellt, die für die berührungslose Vermessung großer Werkstücke mit Genauigkeiten von wenigen Hundertstel-Millimetern in den drei Raumkoordinaten eingesetzt wurden. Eines der ersten Triangulationssysteme war das Kern ECDS1 (Electronic Coordinate Determination System), bei dem die Verbindung von elektronischen Theodoliten E2 mit einem IBM kompatiblen Personalcomputer realisiert wurde. Verschiedene Instrumentenhersteller setzten diese Technologie mit ihren Präzisionstheodoliten und ähnlicher Software ein, z.B. Zeiss IMS 100, Geodimeter UPM 400, Monmos von Sokkia. Mit Axyz von Leica wurde 1996 mit der 4. Generation [2] ein integriertes System verschiedener Sensoren unter einheitlicher Softwareplattform eingeführt.

Die ersten Einsatzgebiete dieser Triangulations- bzw. Theodolitmesssysteme (TMS) waren Geometriekontrollen im Fahrzeug-, Flugzeug- und Waggonbau, wobei insbesondere die Flexibilität der Konfiguration und der große Messraum überzeugten. Tabelle 1 gibt hierzu einen vergleichenden Überblick der geodätischen Messtechnik zur Koordinatenmesstechnik.

Es war nahe liegend, die Aufgabenfelder in der industriellen Messtechnik, die mit geodätischer Sensorik bearbeitet werden konnten, auch begrifflich festzuschreiben. Im Beitrag von [Schlemmer und Welsch, 1989] werden berührungslose geodätische Messsysteme und ihre Verfahren der „Industrievermessung“ zugeordnet. Heute kann die Industriemesstechnik in die vier Sensorsysteme eingeteilt werden:

– die Triangulation mit zwei oder mehreren Theodoliten,
– die polare Punktbestimmung mit Präzisionstachymeter,

Tab. 1: Vergleichende Betrachtungen mobiler und stationärer Messtechnik

	Theodolitmesssystem, Tracker	**KMG**
Sensoren	mobil	stationär
Anordnung	freie Konfiguration	zwangsweise
Bezugssystem	global	lokal
Messraum	Umkreis 40 m	12 m × 3,5 m × 2,4 m
Messunsicherheit	10^{-5} bis 10^{-6}	10^{-6} bis 10^{-8}

– die interferometrische Punktbestimmung mit Laser-Tracker und
– die Nahbereichsphotogrammetrie mit Digitalkameras.

Die Grenzen der Triangulation mit TMS zeigten sich unter beengten räumlichen Bedingungen, bei der zumeist notwendigen Zwei-Mann-Bedienung und der Beachtung der üblichen Systemunsicherheiten der Theodolite. Automatisierte Präzisionstachymeter bieten als Ein-Mann-Station eine besondere Flexibilität bei der Standpunktwahl und ermöglichen eine kinematische Verfolgung von bewegten Objekten (z.B. Roboterkalibrierung). Dabei wird die Positionsgenauigkeit durch die Distanzmessung bestimmt. Deutlich höhere Genauigkeiten werden erreicht, wenn die Laserlichtwellenlänge als Differenzmessung verwendet wird. Interferometer werden im Maschinenbau auf fest vorgegebenen Führungsschienen, z.B. zur Positionierung von Schlitten an Werkzeugmaschinen oder für Geradlinigkeitsprüfungen (Alignement), verwendet. In der Geodäsie dienen sie zur Kalibrierung von Distanzmessern oder zur Prüfung von Nivellierlatten.
Ein bewegliches Interferometer mit Winkelencodern kam Anfang der 90er Jahre mit dem Laser-Tracker SMART 310 (1. Generation) als zielverfolgendes Polarmesssystem nach dem Tracking-Prinzip zum Einsatz. Die 2. Generation von Laser-Trackern wurde durch Einbau eines Absolutdistanzmessers zum LTD erweitert. Die Laser-Tracker werden als Alternative zur Koordinatenmessmaschine auch als mobile Koordinatenmessgeräte bezeichnet. Von einem Standpunkt aus können Objekte in einem Umkreis bis 40 m bei einem Genauigkeitspotenzial von 10 μm/m als Einzelpunkte oder als Oberfläche gemessen werden. Die dreidimensionale Koordinatenbestimmung kann dabei statisch oder kinematisch (2 m/sek.) bei einer Messrate bis 3000 Punkte/Sekunde erfolgen.
Dieser Beitrag stellt das Laser-Tracker-System der 3. Generation (ab 2004) vor, deren Innovation die dynamische und lokale Positionierung mit einer Kamera darstellt. Es werden Untersuchungen zu den Systemkomponenten beschrieben.

2 Systembeschreibung Laser-Tracker LTD 800

Der Laser-Tracker LTD 800 von Leica Geosystems besteht aus einem Laserinterferometer höchster Genauigkeit und einem hochpräzisen Absolutdistanzmesser (Abb. 1). Zum System gehören Reflektoren (Abb. 2), die Hochgeschwindigkeits-Messkamera T-Cam, der frei bewegliche Messtaster T-Probe (Artefakt), der Controller und ein Applikationsrechner mit der Mess- und Auswertesoftware Metrolog XG. Das System wird komplettiert durch den T-Scan, einen Handscanner zum Digitalisieren von Oberflächen [4].
Mit dem Laser-Tracker werden die 3D-Koordinaten (x, y, z) des Reflektors auf der T-Probe bestimmt. Die Orientierung der T-Probe im Raum (i, j, k) erfolgt mit zehn Infrarot-LEDs photogrammetrisch mit der T-Cam. Damit sind die 6 Freiheitsgrade (Degree of Freedom DOF) bestimmt (Abb. 3). Über die bekannte Geometrie des Tasters werden die 3D-Koordinaten der Tastspitze ermittelt.
Das Messprinzip des Laser-Trackers ist die polare Punktbestimmung. Die Koordinatenunsicherheit setzt sich aus den Systemkomponenten der Distanzmessung, der Winkelbestimmung und der Punktsignalisierung mittels Präzisionsreflektor oder T-Probe zusammen. Für die interferometrische Distanzmessung wird der absolute Bezug zum Reflektor durch eine Bezugsstrecke zu einem am Tracker

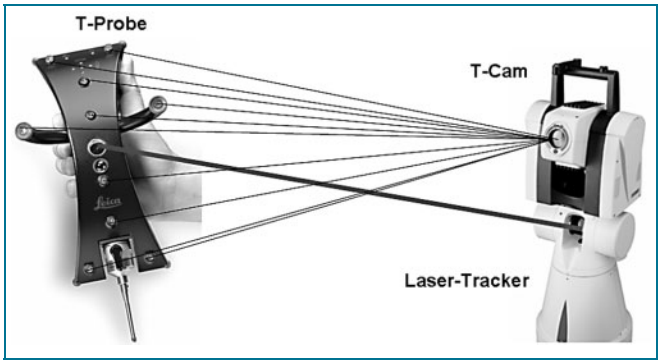

Abb. 1: LTD 800 mit T-Cam, T-Probe

Abb. 2: Corner Cube Reflektor CCR 0,5 Zoll

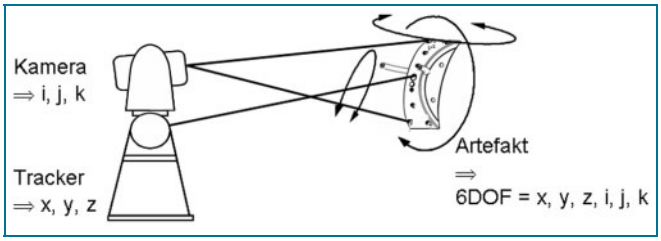

Abb. 3: Bestimmung der 6DOF aus Position und Orientierung

festgelegten Homepoint (auch Vogelbad genannt) definiert. Da bei der Unterbrechung des Zielstrahls eine erneute Initialisierung den Messablauf stören würde, ist zusätzlich ein Absolutdistanzmesser (ADM) integriert.

3 Systemuntersuchungen

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurden mit dem im Ingenieurbüro Herrmann eingesetzten Laser-Tracker LTD 800 Untersuchungen zu den vorgegebenen Messunsicherheiten von 3D-Punkten und Raumlängen durchgeführt. Dafür wurden Prüfalgorithmen entwickelt, die im Folgenden vorgestellt werden. Im Einzelnen wurde untersucht:

- die Antastunsicherheit mit CCR 0,5″ und 1,5″ Reflektoren und verschiedenen Taststiftlängen und Tastkugelradien der T-Probe,
- die entfernungsabhängige Winkelmessunsicherheit bis 30 m,
- die Nullpunktfehlerbestimmung der Distanzmessung,
- die Winkelbereichsmessunsicherheiten und
- die absolute und relative Distanzmessgenauigkeit bis 30 m.

Für die Laboruntersuchungen wurde der 3D-Prüfkörper tetronom®2000 der Mainzer Firma metronom AG verwendet. Das tetronom®2000 besteht aus 4 Chromstahlkugeln, die mit 6 karbonfaserverstärkten 2000 mm langen Stäben einen tetraederförmigen spannungsfreien Körper bilden. Die karbonfaserverstärkten Verbindungsstäbe (CFK-Stäbe) verfügen an ihren Enden über magnetische Kugelaufnahmen zur einfachen Fixierung der Stahlkugeln. Die Stablängen wurden einzeln von einer vom deutschen Kalibrierdienst nach DIN EN ISO 17025 akkreditierten Stelle kalibriert. Als Stablänge ist der Abstand der beiden Kugelmittelpunkte definiert. Jeder Stab verfügt über eine eigene Seriennummer und ist somit auch einzeln als Längenmaßstab nutzbar.

Für die Stäbe wird eine Kalibrierunsicherheit von $\pm$ 4,5 μm angegeben. Sie liegt eine Größenordnung unter der zu erwartenden Messunsicherheit des Laser-Trackers. Das Material und der Aufbau der Stäbe wurden so gewählt, dass sie nur sehr geringen Längenänderungen infolge thermischer Einflüsse unterliegen. Laut Kalibrierprotokoll ist ein thermischer Ausdehnungskoeffizient von Null anzunehmen. Als Auflage für das tetronom® kommt eine 3-2-1-Halterung zur Anwendung, die eine zwangsfreie und stabile Lagerung des Prüfkörpers gewährleistet (Abb. 4).

Für die Bestimmung der entfernungsabhängigen Winkelmessunsicherheit wurde als Genauigkeitsmaß die jeweils ermittelte Längenmessunsicherheit des 2000 mm CFK-Stabs herangezogen. Zur Horizontalwinkelmessung wurde der Längenmaßstab horizontal in Höhe der Kippachse des Laser-Trackers auf einer 3-2-Auflage mit zwei Industriestativen senkrecht zum Laserstrahl positioniert (Abb. 5). Die 3-2-Auflage fixiert das eine Ende des Maßstabs in 3 Freiheitsgraden und das andere Ende in 2 räumlichen Freiheitsgraden. Für die Vertikalwinkelmessung wurde der CFK-Längenmaßstab vertikal an der Wand mit mehreren magnetischen Kugelhaltern arretiert (Abb. 6).

Für die Winkelbereichsmessung wurde der horizontale Vollkreis des Laser-Trackers in 45°-Bereiche eingeteilt, wobei die Nullrichtung willkürlich auf die Richtung des Vogelbades festgelegt wurde (Abb. 7). Im Abstand von ca. 3 m wurde ein 2000 mm CFK-Längenmaßstab positioniert. Danach erfolgte die Längenbestimmung des Maßstabes im ersten Richtungsausschnitt des Laser-Trac-

Abb. 4: 3D-Prüfkörper tetronom®2000

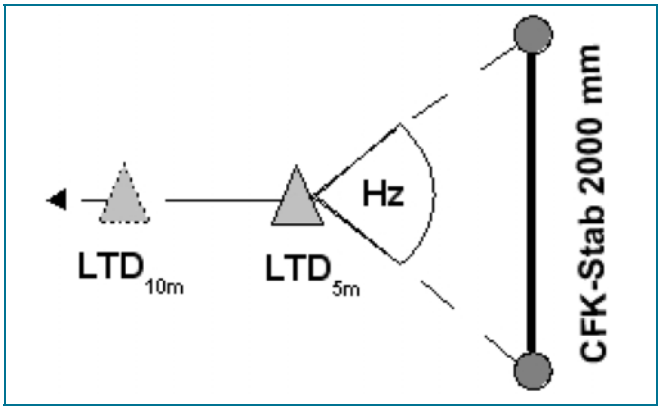

Abb. 5: Messanordnung für die Horizontalwinkelmessung

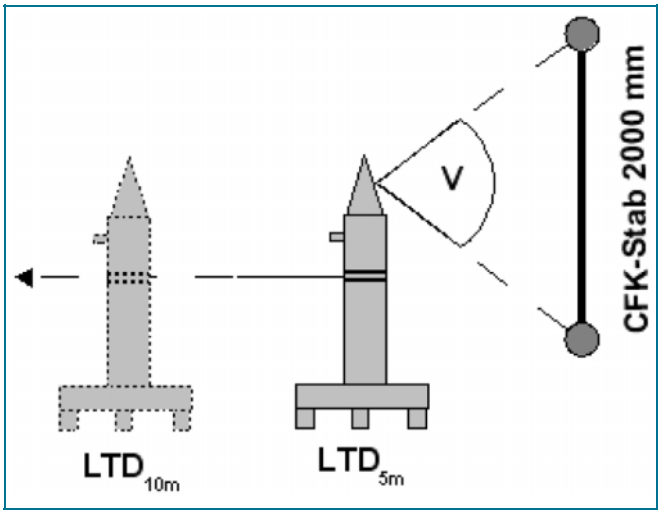

Abb. 6: Messanordnung für die Vertikalwinkelmessung

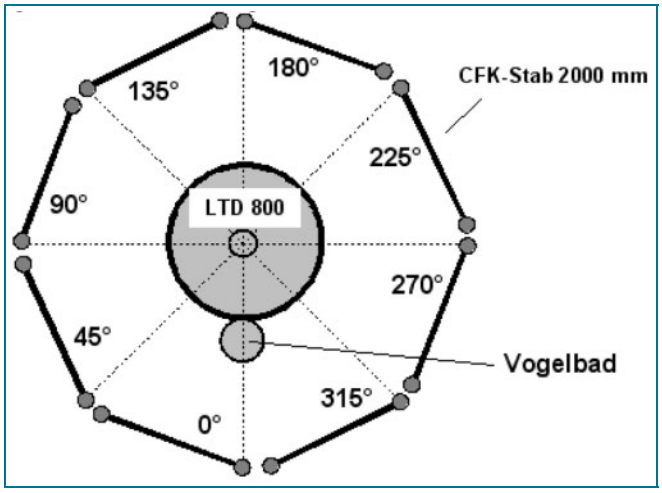

Abb. 7: Messanordnung horizontale Winkelbereichsmessung

Abb. 8: Laboraufbau Laser-Tracker und 3D-Prüfkörper

kers. Anschließend wurde der Tracker jeweils um 45° gedreht und die Länge des Maßstabes bestimmt.
Die Distanzmessgenauigkeit wurde aus einem Soll-Ist-Vergleich in einer Flucht mit dem CFK-Längenmaßstab ermittelt. Die Bestimmung des Nullpunktfehlers der Streckenmessung ließ sich durch die Beobachtung zweier Punkte jeweils aus der Mitte und von der Seite realisieren. Für die Prüfung zur Gesamtmessunsicherheit wurde der eingangs beschriebene 3D-Prüfkörper tetronom®2000 verwendet (Abb. 8). Dieser Prüfkörper ist aufgrund seiner Geometrie verschiedenen Bauteilen und Werkstücken sehr ähnlich. Die Stäbe haben zum Instrument unterschiedliche Orientierungen und die Geometrie kann als Soll festgelegt werden. Abbildung 9 zeigt die Messungsanordnung zur Koordinatenmessung sowie die Seriennummern der Stäbe (C0093 bis C0098) und die Auflagepunkte der 3-2-1-Auflage. Die Messungen erfolgten mit einem Corner Cube Reflektor 0,5″ und einer T-Probe mit 110 mm Taststiftlänge und einem Tastkugelradius von 3 mm.
Die Untersuchungen zur Gesamtmessunsicherheit bestätigten die vom Hersteller [4] angegebenen Punktmessunsicherheiten (Tab. 2).
Die Systemprüfungen zeigen Einlaufeffekte des Systems, die sich als Nullpunktabweichung auswirken. Bei entsprechender Kalibrierung des Systems und dem Erreichen der mittleren Betriebstemperatur entfällt die Nullpunktabweichung. Dieses Verhalten wird vom Hersteller angegeben und ist zu beachten. Für die T-Probe wurde keine entfernungsabhängige Messunsicherheit festgestellt. Des Weiteren zeigten die verschiedenen Prüfalgorithmen den besonderen Einfluss der Antastmethode und der Taststiftlänge der

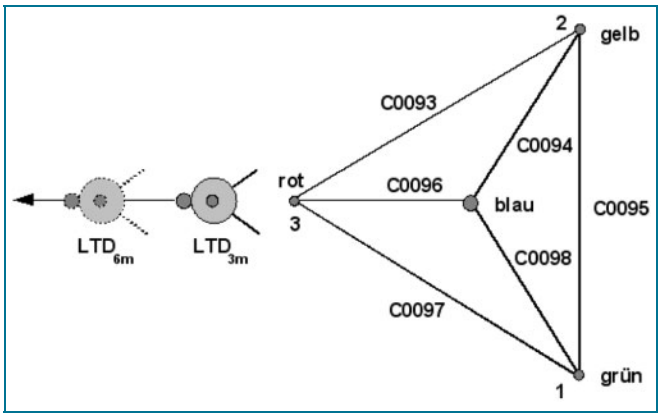

Abb. 9: Messaufbau zur Prüfung der Gesamtmessunsicherheit

T-Probe. Besonders nach längeren Transporten oder stark veränderten Umfeldbedingungen (Temperaturschwankungen) sind zusätzliche Systemprüfungen durchzuführen.

4 Geometrieprüfung an einem Schiffsmotor

Als Schiffsantriebe werden immer häufiger frei bewegliche Elektromotoren eingesetzt, die sehr viele Vorteile für die Navigation des Schiffes besitzen. Um einen hohen Wirkungsgrad zu erzielen, ist es von Bedeutung, dass die Spaltmaße zwischen Rotor und Stator des Motors so klein wie möglich gehalten werden (Abb. 10). Dabei darf es jedoch nicht zu einem Schleifen kommen, da die-

Tab. 2: Messunsicherheiten

	Laser Tracker	**T-Probe mit 110 mm Taster**
	Messunsicherheit (2σ) für Raumlängen bis 6 m	
3D-Punkte	$U_{ADM} = \pm\ (8\ \mu m + 14\ \mu m/m)$	$U = \pm\ (70\ \mu m + 10\ \mu m/m)$
Raumlängen	$U_{IFM} = \pm\ (4\ \mu m + 14\ \mu m/m)$ $U_{ADM} = \pm\ (10\ \mu m + 14\ \mu m/m)$	$U = \pm\ (55\ \mu m + 10\ \mu m/m)$

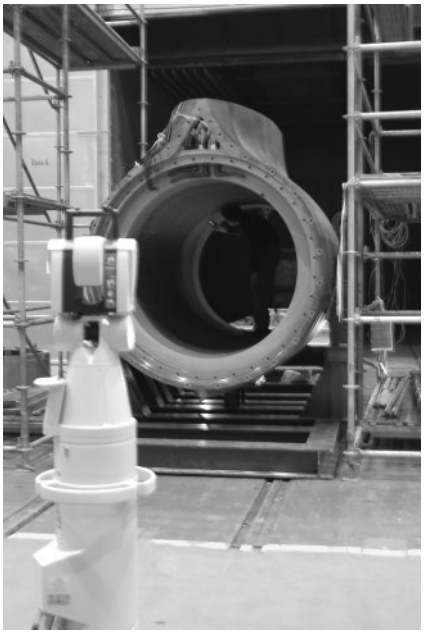

Abb. 10: Stator eines Elektromotors für den Schiffsantrieb

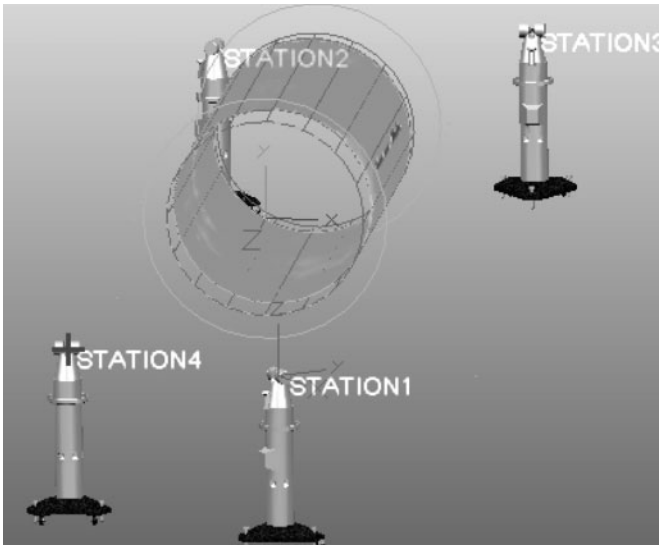

Abb. 11: Visualisierung der Messung eines Elektromotors mit Standpunkten

ses erhöhten Materialverschleiß oder gar die Zerstörung des Motors zur Folge hätte. Das angestrebte Spaltmaß lag bei 1 mm.
Das Ziel der Untersuchung bestand in der Ermittlung der wahren Geometrie des Stators. Dazu sollten im Stator die Bereiche des kleinsten Radius in Bezug zur zukünftigen Rotorachse bestimmt und dokumentiert werden. Die lichte Weite des zu prüfenden Zylinders betrug etwa 1540 mm. Die innere Oberfläche wurde in 170 Bahnen von ca. 2800 mm Länge aufgeteilt und bei Verwendung eines CCR 0,5″-Reflektors im kontinuierlichen Messmodus mit einem Punktabstand von 50 mm abgefahren (Abb. 11). Die ca. 9500 gemessenen Punke wurden in Bezug zur späteren Mittelachse des Rotors gesetzt und daraus ein grafisches Modell generiert, welches die Lage jedes Messpunktes veranschaulicht. Die exakte Bestimmung der Ist-Geometrie des Stators dient als Grundlage für die individuelle und präzise Fertigung des Rotors.

Literatur

[1] Werner, H. (1987): Ist auch der Maschinenbau ein Arbeitsfeld des Vermessungsingenieurs? In: Vermessungstechnik 35, Heft 1, S. 8–9
[2] Gottwald, R. (1996): Industriemesssysteme in der 4. Generation – Leica Axyz. In: Vermessungswesen und Raumordnung 58, Heft 7, S. 356–362
[3] Schlemmer, H.; Welsch, W. (1989): Berührungslose geodätische Messsysteme für die Industrievermessung – ein Überblick. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 96, Heft 11–12, Karlsruhe, S. 397–411
[4] Leica Geosystems (2004): Technische Spezifikationen Laser Tracker und T-Probe

Anschrift der Verfasser:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. M. Möser,
Technische Universität Dresden, Geodätisches Institut,
Mommsenstr. 13, 01062 Dresden,
E-mail: michael.moeser@tu-dresden.de

Dipl.-Ing. Stephan Wallstab-Freitag,
Technische Universität Dresden, Geodätisches Institut,
Mommsenstr. 13, 01062 Dresden,
E-mail: stephan.wallstab-freitag@tu-dresden.de

Dipl.-Ing. Jörg Herrmann, Vermessungsbüro,
Breitenweg 58, 39218 Schönebeck,
E-mail:herrmann@ing-herrmann.de

Zusammenfassung

Die geodätische Messtechnik im industriellen Umfeld hat in den letzten beiden Jahrzehnten eine beeindruckende Entwicklung bis zur mobilen 3D-Koordinatenmessmaschine als Laser-Tracker-System genommen. Das Messprinzip wird an Hand des LTD 800 von Leica Geosystems erläutert. Für die Untersuchung der einzelnen Systemkomponenten wurden Prüfalgorithmen entwickelt. Ein Praxisbeispiel aus dem Schiffsmotorenbau bestätigt die hohe Präzision und Zuverlässigkeit des Laser-Trackers.

In the last decades the geodetic metrology is characterised of a strong innovation in the industry. On the basis of the Laser Tracker System LTD 800 of Leica Geosystems it is shown a description of the measurement concept. Special algorithms are developed to test the system components of the Laser Tracker. The article closes with the report of the measurement of an ship engine.