

Prüfung und Korrektur von Koordinatenmessgeräten mit dem Lasertracer – Einsatz und Praxiserfahrungen

Dr.-Ing. **H. Schwenke**, Etalon AG, Dipl.-Ing. **C. Neukirch**, **M. Weigel**, Volkswagen AG, Dipl.-Ing.(FH) **W. Wiedmann**, Zeiss IMT GmbH

1. Einleitung

Die geometrische Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten (KMG) ist eine wesentliche Voraussetzung für das Erreichen von geringen Messunsicherheiten. Während bis in die 80er Jahre die Genauigkeit durch mechanische Präzision hergestellt wurde, haben sich seitdem mathematische Kompensationsverfahren durchgesetzt. Dabei werden die systematischen Abweichungen eines KMG durch geeignete Messtechnik erfasst, in der Software oder der Steuerung hinterlegt und während der Messung zur Kompensation verwendet. Dadurch haben sich auch die Anforderungen an den Bau von KMG verändert: Nicht die absolute Präzision des mechanischen Aufbaus ist entscheidend, sondern Stabilität und die Wiederholgenauigkeit der Achsbewegungen. Die Genauigkeit entsteht durch die Kalibrierung der systematischen Abweichungen, die heute bei der Herstellung eines KMG einen wesentlichen und technologisch und wirtschaftlich bedeutenden Schritt in der Herstellung darstellt. Die geometrische Genauigkeit wird in der Annahmeprüfung (Übergang vom Hersteller zum Kunden) im Allgemeinen durch eine normenkonforme Prüfung sichergestellt. Idealerweise stellt der Anwender dann durch regelmäßige Prüfung der geometrischen Genauigkeit die Einhaltung der spezifizierten Genauigkeit sicher. Es ergeben sich im Bereich der Geometriemessung eines KMG also folgende Aufgaben:

1. Erfassung der systematischen geometrischen Abweichungen für die Kompensation
2. Prüfung der geometrischen Genauigkeit in der Annahmeprüfung
3. Regelmäßige Überwachung der geometrischen Genauigkeit durch den Anwender

Mit dem Lasertracer, einem räumlich automatisch nachführenden Interferometer, ergeben sich für alle 3 Schritte neue technische Möglichkeiten, die im Folgenden dargestellt werden sollen. Dazu werden zunächst die Grundzüge der rechnerischen Kompensation bei Koordinatenmessgeräten kurz beschrieben. Dann wird eine technische Einführung in die Technologie des Lasertracers gegeben und die Anwendung für die Kompensation und die Prüfung erläutert. Aus der Praxis werden dazu Beispiele gegeben.

Verfahren zeichnet sich im Vergleich zu diesen Methoden insbesondere durch folgende Eigenschaften aus: Kürzere Messzeit, geringerer Bedienerinfluss, Anwendung auf KMG beliebiger Größe.

3. Der Lasertracer als System zu Kalibrierung und Prüfung von KMG

3.1 Messprinzip und Aufbau

Der Lasertracer ist ein hochauflösendes Interferometer, das den Messstrahl einem Reflektor automatisch nachführt. Im Gegensatz zu einem Lasertracker, wie er in der mobilen Messtechnik für Großbauteile angewendet wird, verzichtet der Lasertracer auf die im allgemeinen mit großen Messunsicherheiten behaftete Auswertung der Winkel und ermittelt ausschließlich Verschiebungen entlang des Messstrahls mit einer Auflösung von 1 Nanometer. Als Besonderheit verfügt der Lasertracer über einen hochgenauen messtechnischen Drehpunkt, der durch eine spiegelnde Kugel mit einer Formabweichung unter $0,1 \mu\text{m}$ realisiert wird. Durch eine patentierte Strahlführung dient diese Kugel als Referenz für die interferometrische Verschiebungsmessung, die damit mit höchster Genauigkeit zu einem exakt definierten Referenzpunkt räumlich durchgeführt werden kann (Bild 2).

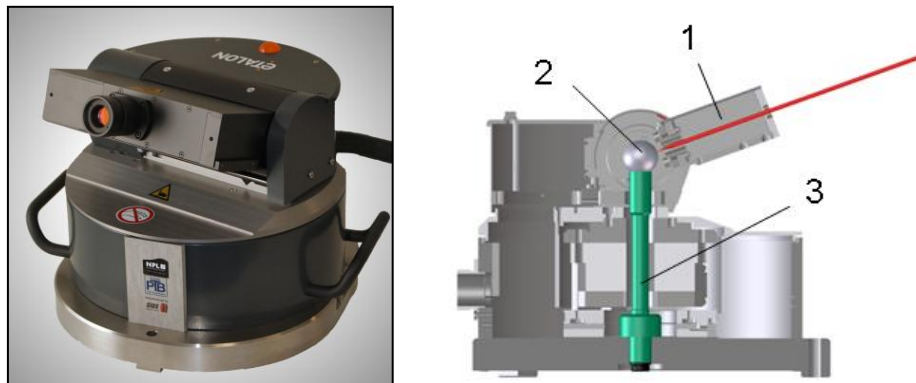


Bild 2: Grundprinzip des Lasertracers: Automatisch nachführendes Interferometer (1), optische Referenzkugel mit einer Formabweichung $<0,1 \mu\text{m}$ (2), thermisch und mechanisch entkoppelte Kugelhalterung (3).

Das Messprinzip des Lasertracers ist besonders geeignet für die sogenannte räumliche Multilateration, die im Folgenden erklärt wird.

3.2 Einsatz des Lasertracers für die Kalibrierung

Das Prinzip der Multilateration bezeichnet die Erfassung der Abstandsänderung eines Punktes zu mindestens 3 bekannten Referenzpunkten und die Berechnung der Koordinate aus diesen Messungen. Die bekannteste Anwendung dieses Messprinzips ist das Global Positioning System (GPS), bei der die Koordinaten eines Mikrowellenempfängers (GPS-Receiver) durch Laufzeitmessungen zu mindestens drei Satelliten bestimmt werden, die codierte Mikrowellensignale abstrahlen. Dadurch lassen sich heute Genauigkeiten von $U(95\%) = 8 \text{ m}$ erreichen, was bei einer Flughöhe dieser Satelliten von ca. 20.000 km einer relativen Unsicherheit von $0,4 \cdot 10^{-6}$ entspricht. Der Einsatz des Multilaterationsprinzips für die industrielle Messtechnik kann durch Einsatz des Lasertracers mit einem stabilisierten Laserinterferometer vergleichbare relative Genauigkeiten realisieren, das entspricht einer Messunsicherheit von etwa $0,4 \text{ }\mu\text{m}$ bei einer Messlänge von 1 m. Für den Einsatz bei der Messgerätekalibrierung wird das Messprinzip jedoch zur sogenannten sequentiellen Multilateration abgewandelt: Dadurch kann bei Verwendung nur eines Lasertracers durch Umsetzen des Gerätes und eine reproduzierbare Maschinengeometrie ein vergleichbarer Ansatz verfolgt werden. Eine genauere Erklärung des Verfahrens ist in [5] zu finden. Das Verfahren wird anhand eines Beispiels in Abschnitt 4 illustriert.

3.3 Einsatz des Lasertracers für die Prüfung und Überwachung

Die Prüfung der Geometrie von Koordinatenmessgeräten erfolgt normengemäß nach der ISO 10360-2 oder der VDI 2167-2. Dabei wird heute üblicherweise eine Kombination aus kalibrierten Stahl-Längenverkörperungen in mindesten 7 Positionen gemessen. Diese Positionen sollten nach der Normenempfehlung neben achsparallelen Lagen auch die Messung entlang von Raumdiagonalen enthalten. Besonders in Abweichungen entlang der Raumdiagonalen wird die geometrische Qualität eines KMG sichtbar. Die neueste Ausgabe der ISO 10360-2 erlaubt neben der Verwendung von kalibrierten Normalen (wie z.B. Stufenendmaßen, Endmaßstapeln oder Kugelstäben) auch die Verwendung von Laserinterferometern. Die Vorteile der Verwendung eines Laserinterferometers liegen auf der Hand:

- Höchste Genauigkeit und direkte Rückführbarkeit auf die Meterdefinition
- Realisierung auch großer Prüflängen mit höchster Genauigkeit
- Im Vergleich zu großen Normalen deutlich reduzierter Transportaufwand

Für die Prüfung von KMG entlang diagonaler Linien stehen bei einem konventionellen Interferometer aber auch die Schwierigkeiten der Ausrichtung und Handhabung gegenüber. Diese Schwierigkeiten kann mit dem Einsatz des Lasertracers umgangen werden. Durch ein patentiertes Verfahren wird die Position des Lasertracers im Maschinenvolumen automatisch

bestimmt und das KMG ideal entlang des Laser-Messstrahls gesteuert. Dies geschieht durch das Verfahren der Maschine in 6 Punkten im Messvolumen und Auswertung der Längenänderung des Lasers. Durch einen sogenannten „Räumlichen Rückschnitt“ wird daraus die Position des Lasers bestimmt. Bild 3 zeigt den Ablauf.

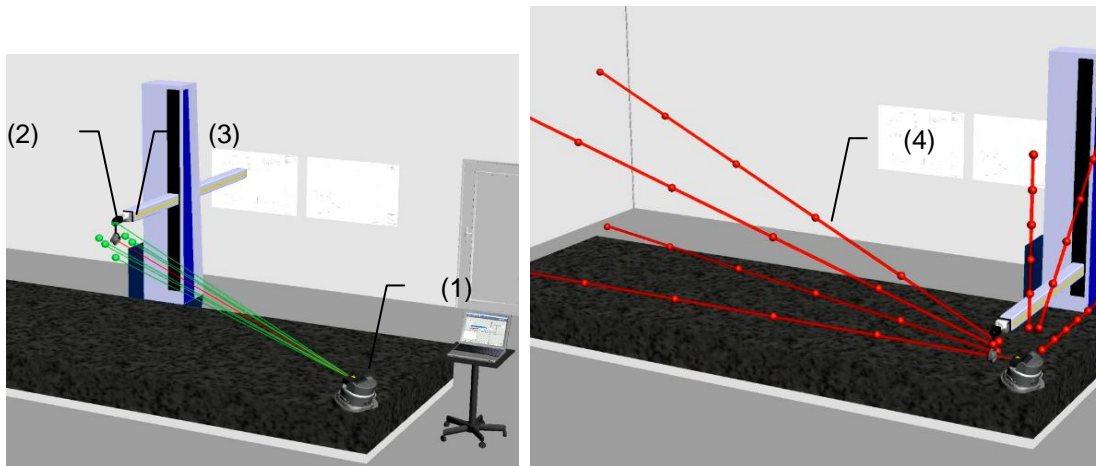


Bild 3: (1) Lasertracer, (2) Reflektor, (3) Positionen zur Einmessung des Lasertracers in das Maschinenkoordinatensystem, (4) durch die Software generierte Messlinien

Die Software TRAC-CHECK generiert die Prüfprogramme, steuert die Maschine und führt die Auswertung durch. Sie erstellt normengerechte Prüfberichte und archiviert die Messdaten. Sie bewertet das Prüfergebnis bezogen auf die Spezifikation des KMG, dabei werden Testunsicherheiten zur Konformitätsbewertung verwendet, so wie es die neuen Normen fordern. In Abschnitt 5 ist das Verfahren anhand der Prüfung von Horizontalarm-KMG bei VW dargestellt.

3.4 Schnittstellen

Ein wesentlicher Punkt für die Effektivität der beschriebenen Verfahren ist die Verfügbarkeit von Schnittstellen zur Steuerung des KMG. Idealerweise ist eine I++ Schnittstelle [6] verfügbar, die eine universelle Schnittstelle auf Softwareseite möglich macht. In Zusammenarbeit mit den KMG-Herstellern wurden aber auch spezifische Schnittstellen geschaffen, die die Verfahren unterstützen. Insbesondere mit Zeiss-Geräten ist die Kommunikation auf Basis der CMMOS-Schnittstelle im Feld erprobt und vielfältig im Einsatz. Besonderes Augenmerk ist bei der Kommunikation auf die Handhabung der Korrektur zu legen: Zur Korrekturaufnahme muss eine bestehende Korrektur deaktiviert werden, bei der Prüfung müssen die Tasterlängen korrekt verwaltet werden, um eine fehlerfreie Wirkung einer vorhandenen Korrektur zu gewährleisten. Eine weitere Schnittstelle bildet der Zugang zu den Korrekturtabellen der Messgeräte: Dieser ist meist verschlüsselt, der Zugang

erfordert die Unterstützung des KMG-Herstellers. Für Geräte der Fa. Zeiss gibt es ein Lizenzmodell, das es großen Kunden wie z.B. Volkswagen erlaubt, eigene Modifikationen an den Korrekturdaten vorzunehmen. Die Software von Etalon ist für die Übergabe der Kompensationsdaten an die entsprechende Zeiss-Service Software zertifiziert. Mit anderen Herstellern sind ähnliche Vereinbarungen in Vorbereitung.

4. Anwendungsfall 1: Kalibrierung und Prüfung von Portalmeßmaschinen bei Zeiss

Die Lasertracer Technologie wurde 2007 in der Produktion von Portalmeßgeräten erstmals erprobt. Ausschlagend für die Einführung der Technologie bei Zeiss IMT war der Zeitgewinn gegenüber den bestehenden Verfahren. Die Kalibrierung eines KMG hat heute einen gewichtigen Anteil an den Produktionskosten. Die bis dahin verwendeten Verfahren basierten auf der Verwendung von konventioneller Messtechnik: Laserinterferometer in Michelson-Anordnung für Positionsabweichungen, mit Walloston-Anordnung für Gerademessung [4] und Erfassung der Winkel mit Winkelinterferometern und Neigungsmessern. Diese Verfahren erreichten mit erfahrenen Bedienern eine hohe Genauigkeit, die benötigte Zeit betrug auch nach 15jähriger Optimierung der Prozesse immer noch durchschnittlich 2 Tage. In zahlreichen Versuchen wurde das Etalon-Verfahren mit bestehenden Kalibrierungen verglichen, um ein ausreichendes Vertrauen in die eingesetzte Technik zu erlangen. Heute kann sich das Ergebnis sehen lassen: Die Zeit für die Kalibrierung wurde auf 3 Stunden (inkl. Verifikation) gesenkt, bei gleichbleibender Genauigkeit. Bild 4 zeigt den Einsatz des Lasertracers bei Zeiss.



Bild 4: Einsatz eines Lasertracers zur Kalibrierung von Portalmeßgeräten in der Produktion von Zeiss IMT © Zeiss IMT

Mittlerweile ist in einem gemeinsamen Projekt von Zeiss und Etalon die „On-the-fly“-Kalibrierung umgesetzt worden. Dabei wird die Auslesung der Maschinenmaßstäbe mit der Lasermessung mit unter 2 μ s synchronisiert, so dass eine Messung mit hoher Frequenz während der Bewegung möglich ist. Dadurch reduziert sich die Messzeit aus einer Position auf ca. 10 min, bei einem Messintervall entlang der Achse von 0,3 mm. Neben der Messzeitreduzierung wird also außerdem noch eine Genauigkeitssteigerung durch eine höhere Abtastrate erreicht, ähnlich wie beim Scanning eines Werkstückes. Ein weiterer Grund, die Technik einzuführen, waren die reduzierten Anforderungen an das Personal: Während beim konventionellen Verfahren das Ergebnis entscheidend von der Erfahrung und der Konzentration des Ausführenden abhängt, erfolgt die Messung bei dem Etalon-Verfahren automatisiert. Eine präzise Ausrichtung des Lasertracers ist nicht notwendig, und wenn ein Messablauf für ein Gerät einmal abgespeichert wurde, wird der Bediener von der Software durch den Ablauf geführt. Durch die Software Track-Check kann das Ergebnis der Korrektur dann umgehend verifiziert werden.

5. Anwendungsfall 2: Prüfung von Horizontalarm-KMGs bei Volkswagen

Bei der Volkswagen AG in Wolfsburg sind insgesamt über 300 KMG im Einsatz. Die KMG`s sind vollständig in das Prüfmittelmanagement bei VW eingebunden, ihre regelmäßige Überwachung ist für alle Anwender im Werk verbindlich. Dazu werden ausschließlich kalibrierte Prüfkörper verwendet. Besondere Bedeutung hat hierbei der Kugelstab, der sich für die Prüfung von großen Horizontalarm-KMG etabliert hat. Bei Volkswagen haben sich in der Anwendung jedoch Schwachstellen dieser Prüfung gezeigt:

- Eine ausreichende Überdeckung des Messvolumens ist nicht immer möglich
- Die Prüfkörper selbst sind anfällig auf mechanische Beschädigung und falschen Zusammenbau
- Die Prüfkörper können nur von zwei Mitarbeitern transportiert und umgesetzt werden
- Der Überprüfung eines KMG benötigt auch bei geübtem Personal einen ganzen Tag
- Wird bei einem KMG eine deutliche Abweichung festgestellt, muss der Service des entsprechenden KMG-Herstellers gerufen werden um das entsprechende KMG zu justieren.

Daher hat man sich im Werk Wolfsburg entschieden, die Lasertracer-Technologie einzuführen. Ziel ist dabei eine aussagekräftigere und schnellere Überprüfung. Gleichzeitig soll auch die Aufnahme von neuen Kompensationsdaten durch eigene Techniker möglich werden. Die Firmen, Zeiss, Wenzel und Hexagon erklärten sich bereit, die Einführung des Lasertracers bei VW zu unterstützen.

Mittlerweile wurden erfolgreich Vergleichsmessung zwischen Kugelstab- und Lasertracer an Zeiss SMC's durchgeführt. Als Herausforderung dabei hat sich die Handhabung unterschiedlicher Schnittstellen zur KMG bzw. zu den unterschiedlichen Steuerungen erwiesen. Hauptsächlich erfolgt die Kommunikation mit den KMG im Werk Wolfsburg über CMM-OS. Diese Schnittstelle wurde in der Praxis erfolgreich getestet.

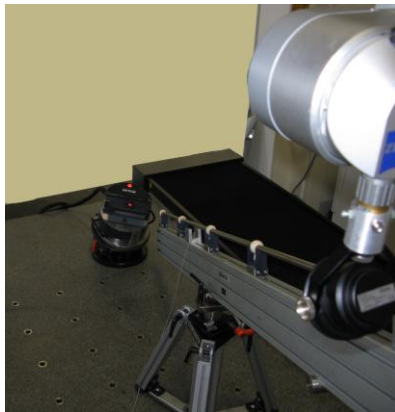


Bild 6: Lasertracer und Kugelstabsvergleichsmessungen bei Volkswagen

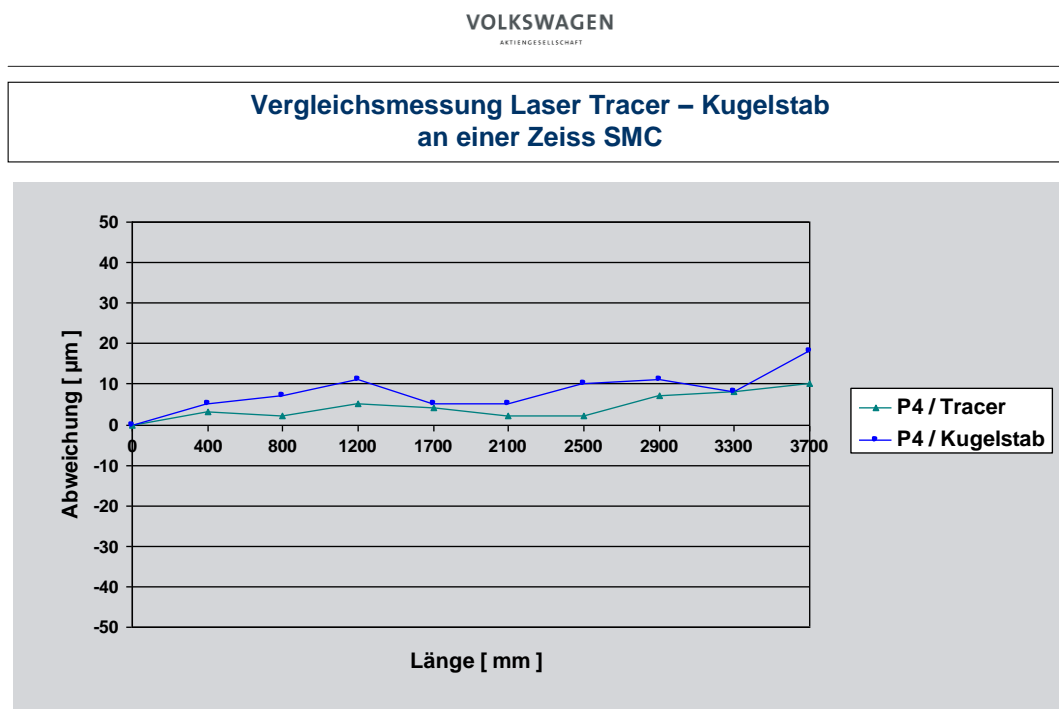


Bild 7: Vergleich von Messungen zwischen Lasertracer und Kugelstab bei Volkswagen.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde der Einsatz des Lasertracers für die Korrektur und Prüfung von Koordinatenmessgeräten beschrieben. Die Technologie bietet erhebliche Möglichkeiten, die Kalibrierung und die Prüfung von Koordinatenmessgeräten schneller, einfacher und sicherer durchzuführen. Zwei Anwendungen wurden vorgestellt: Die Aufnahme der systematischen Abweichungen für die Korrektur von Portal-KMG im Hause Zeiss und die Überwachung von Horizontalarm-KMG bei Volkswagen. Für die Koordinatenmesstechnik ist der Lasertracer ein universelles und leicht handhabbares System, das sowohl in der Herstellung, dem Service und in der Überwachung bei Anwendern zum Einsatz kommen kann. Dem gegenüber steht ein relativ hoher Systempreis, der den Einsatz des Systems erst bei angemessener Auslastung rentabel macht.

Referenzen:

- [1] Trapet, E.; Wäldele, F.: A reference object based method to determine the parametric error components of coordinate measuring machines and machine tools; Measurement 9; 1991, S. 17- 22.
- [2] Tutorial: Systematische Geometrieabweichungen, Homepage Etalon AG, Link: <http://www.etalon-ag.com/index.php/de/tutorial>
- [3] Bartscher M., Busch K., Franke M., Schwenke H., Wäldele F. New Artifacts for Calibration of Large CMMs. ASPE, Proceedings of the 5th Annual Meeting, 2000, S. 542–546.
- [4] Schwenke, H., Knapp, W., Haitjema, H., Weckenmann, A., Schmitt, R., Delbressine, F.: Geometric error measurement and compensation of machines – An update; Annals of the CIRP 57(2), 2008, S. 660-675.
- [5] Schwenke H., Franke M., Hannaford J.: Error Mapping of CMMs and Machine Tools by a Single Tracking Interferometer. Annals of the CIRP 54(1), 2005, S. 475–478.
- [6] H.H. Gläsner: Herstellerneutrale Schnittstellen I++ in der koordinatenmesstechnik – Anwendungen, Möglichkeiten und Grenzen, 2010, In diesem Tagungsband
- [7] Anwendungsbericht Maschinenfabrik Gebr. Heller GmbH, 2010, Homepage Etalon AG; http://www.etalon-ag.com/downloads/Anwenderberichte/Anwenderbericht_Heller_de.pdf
- [8] Industrieprojekt „Rückführbare maschinenintegrierte 3D-Messtechnik für anspruchsvolle Großbauteile“, Projektstart 4/2010; Projektkoordinatoren: WZL-Aachen und PTB Braunschweig.