

# **Untersuchungen zur Wiederholgenauigkeit eines geregelten Winkelmesssystems am Beispiel eines Lasertrackers LTD 500**

Manfred JURETZKO

## **Zusammenfassung**

In diesem Beitrag wird am Beispiel des Leica LTD 500 die Wirkungsweise eines geregelten Winkelmesssystems dargestellt. Aufgrund des bestimmenden Einflusses der Winkelmessgenauigkeit auf die Koordinatenmessgenauigkeit dieser Systeme sind Aussagen zur Winkelmessgenauigkeit bedeutsam. Es wird gezeigt, dass Unstimmigkeiten im Regelungsprozess bei der Verfolgung eines Reflektors zu aperiodischen Eigenbewegungen des Trackerkopfes führen und damit die Wiederholgenauigkeit der Winkelmessung limitieren.

## **1 Einleitung**

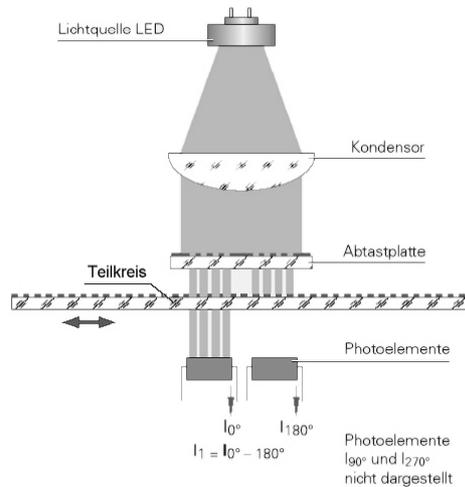
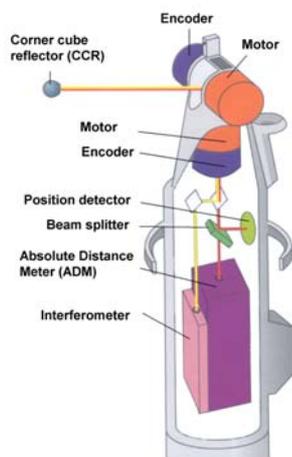
Lasertracker sind hochgenaue polare Messsysteme zur Bestimmung von Raumkoordinaten mit einem Messradius von bis zu 35 m. Die Koordinatenmessgenauigkeit des in diesem Beitrag untersuchten Lasertrackers Leica LTD500 wird vom Hersteller mit  $\pm 10$  ppm ( $2\sigma$ ) für statische und  $\pm 40$  ppm ( $2\sigma$ ) für bewegte Ziele angegeben. Da zur Distanzmessung das sehr genaue Verfahren der Interferometrie eingesetzt wird, hängt die Koordinatenmessgenauigkeit in erster Linie von der – vergleichsweise weniger genauen – Winkelmessgenauigkeit ab. Somit besteht ein großes Potenzial zur allgemeinen Genauigkeitssteigerung, wenn zum einen Störeinflüsse auf die Winkelmessung vermieden, und zum anderen systematische Fehler bei der Winkelmessung aufgedeckt und bei der Weiterverarbeitung der Messdaten berücksichtigt werden.

## **2 Lasertracker**

### **2.1 Funktionsweise**

Der Aufbau eines Lasertrackers erinnert an den einer Totalstation: Er verfügt über zwei Teilkreise und (mindestens) eine elektrooptische Entfernungsmesseinrichtung. Anstelle eines Zielfernrohrs wird durch eine automatische Zieleinrichtung gewährleistet, dass der Messkopf der Richtung eines sich bewegenden Reflektors folgt und diese kontinuierlich erfasst. Der aus dem Interferometer austretende Messstrahl wird mit Hilfe eines um zwei Achsen drehbaren Spiegels auf den Reflektor gerichtet (Abbildung 1). Der reflektierte Strahl wird zu einem Teil auf einen positionsempfindlichen Detektor (PSD) gelenkt, zum anderen Teil zur Streckenmessung in die Interferometereinheit. Die dabei auftretenden Bewegungen der Spiegel werden von den Winkelencodern fortlaufend erfasst. Bei einer Bewegung des Reflektors entsteht ein paralleler Versatz zwischen gesendetem und reflek-

tiertem Strahl, der auf der PSD als zweidimensionale Ablage detektiert wird. Diese Größe findet dann Eingang in einen Regelkreis mit dem Ziel, die Ablagen dauerhaft zu minimieren. Dies geschieht beim LTD 500 mit einer Taktrate von 3000 Hz. Die Ablagen müssen nicht notwendig vollständig zurückgestellt werden, da die vier gemessenen Richtungsrohre (horizontale und vertikale Encoderwerte und die X- und Y-Position auf der PSD) unter Berücksichtigung von Kalibrierparametern in zwei Richtungswerte (Hz und V) umgewandelt [LEICA 2001] werden. Dem Anwender stehen verschiedene Messmodi zur Verfügung. Im Messmodus „kontinuierliche Messung“ werden Daten mit einer Taktrate von bis zu 1000 Hz aufgezeichnet. Im Messmodus „Einzelpunktmessung“ trifft der Anwender die Entscheidung, über welchen Zeitraum und mit welcher Taktrate Daten erfasst und zu einem einzigen Messwert gemittelt werden. Bei den nachfolgenden Untersuchungen wurde bei „Einzelpunktmessungen“ die Standardeinstellung von 100 einzelnen Messungen über einen Zeitraum von einer Sekunde gewählt.



**Abb. 1:** Aufbau Lasertracker [LEICA] **Abb. 2:** Photoelektrische Abtastung [HEIDENHAIN]

Die im Leica LTD 500 eingesetzten inkrementellen Winkelmesssysteme der Firma HEIDENHAIN verfügen über 18.000 Teilstriche (Abbildung 2) [HEIDENHAIN 2006]. Ein Interpolationsintervall beträgt somit 22,2 mgon. Leica gibt die Auflösung der Winkelmesssysteme mit 0,14“ (0,043 mgon) und die  $2\sigma$ -Genauigkeit mit 2,1“ (0,65 mgon) an.

## 2.2 Kalibrierung

Das Kalibriermodell eines Lasertrackers ähnelt entfernt dem einer Totalstation, wobei hier nach Bedarf bis zu 15 instrumentelle Parameter kalibriert werden. Der Hersteller empfiehlt regelmäßige Überprüfungen bzw. (Teil-) Kalibrierungen unterschiedlichen Umfangs. Die bedeutendsten Änderungen in der Geometrie erfahren normalerweise die Lagerung der Querachse und des Spiegels sowie der Vertikalindex [LEICA 2001]. Diese Änderungen können mit Hilfe von Messungen in zwei Lagen entsprechend eines vom Hersteller vorgeschlagenen Messprogramms aufgedeckt und kalibriert werden. Im Fokus dieses Beitrags ist bedeutsam, dass sich ein Richtungswert aus Encoderablesung und PSD-„Ablesung“ zu-

sammensetzt, die jeweils ein eigenes Kalibriermodell aufweisen. Die Kombination beider Kalibrierwerte ergibt den Richtungskalibrierwert, wobei wegen der Variabilität der Regelabweichung grundsätzlich unterschiedliche Kombinationen für eine definierte Richtung möglich sind. Die unabhängige empirische Ermittlung beider Kalibriermodelle wäre durch eine Entkopplung des Regelkreises möglich. Weil aber die Anwendung nur bei bekanntem Regelverhalten möglich ist, wird hier darauf verzichtet und lediglich der Gesamteffekt in Form der Wiederholgenauigkeit untersucht.

### 3 Untersuchung des Winkelmesssystems

#### 3.1 Problemstellung

Die folgenden Untersuchungen dienen in erster Linie dazu, die Größenordnung der zufälligen Abweichungen der Richtungsmessung zu statischen Zielen zu bestimmen und das Zusammenspiel von PSD und Winkelencodern zu erkennen. Untersuchungsschwerpunkte bilden dabei die zeitliche Richtungsstabilität, die räumliche Wiederholgenauigkeit sowie ein Sollwinkelvergleich.

#### 3.2 Richtungsstabilität

Wie oben beschrieben, setzt sich eine mit dem Tracker gemessene Richtung aus dem Abgriff des Richtungencoders, der Ablage auf der PSD und Kalibrierparametern zusammen. Die mehrfache Zielung zu einem unbewegten Reflektor sollte bei stabilen atmosphärischen Verhältnissen theoretisch unveränderte Werte liefern.

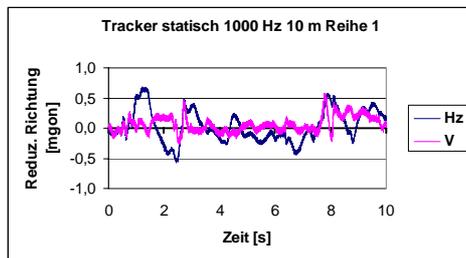


Abb. 3: Exemplarische Richtungsstabilität

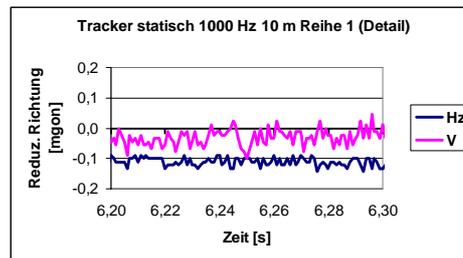
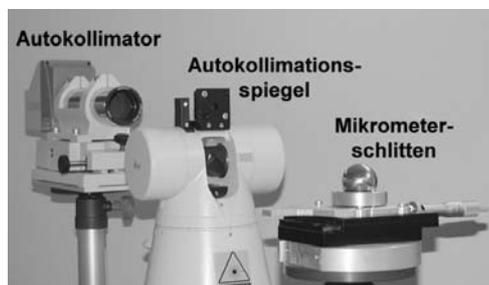


Abb. 4: Detailvergrößerung

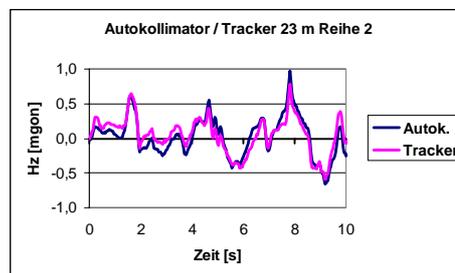
Kontinuierliche Messungen mit einer Taktrate von 1000 Hz bei Entfernungen von 3 m, 10 m und 23 m zeigten nichtreproduzierbare scheinbare Reflektorbewegungen mit einer variablen Schwingungsdauer von ca. 0,5 bis 2 Sekunden in einer Bandbreite von  $\pm 0,7$  mgon. Die empirische Standardabweichung eines einzelnen Messwerts betrug dabei (entfernungsunabhängig) 0,13 mgon für die Vertikal- und 0,22 mgon für die Horizontalrichtungen. Diese niederfrequenten Bewegungen wurden von hochfrequenten Bewegungen mit Schwingungsdauern von wenigen Millisekunden und Amplituden von bis zu 0,05 mgon überlagert. Dieses hochfrequente Rauschen ist für Horizontalrichtungen etwas kleiner als für Vertikalrichtungen und nimmt bei zunehmender Distanz ab. Abbildungen 3 und 4 zei-

gen ein typisches Messergebnis (Distanz 10 m). Werden die einzelnen Messwerte über jeweils eine Sekunde zu „Einzelpunktmessungen“ gemittelt, so beträgt die aus den entstehenden 10 Werten empirisch ermittelte Standardabweichung 0,08 mgon für Vertikal- und 0,17 mgon für die Horizontalrichtungen

Eine mögliche Ursache für diese Schwankungen stellt der Regelkreis bei der Detektion der Reflektormitte dar. Die Kanten des verwendeten Tripelspiegels bilden ein „blindes Zentrum“, das einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Intensitätsverteilung des detektierten Laserstrahls hat. Da somit das Zentrum des Reflektors nicht genau detektiert werden kann, werden auf der PSD ständig kleine „Regelabweichungen“ gemessen. Als Reaktion erfolgen Ausrichtungsbewegungen des Trackerkopfes [MARKENDORF 2006]. Daher wurde untersucht, inwieweit der Trackerkopf durch diesen Regelkreis mechanisch bewegt wird. Dies erfolgte mit Hilfe des Autokollimators ELCOMAT 3000, der Richtungswerte mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,08$  mgon [MÖLLER-WEDEL 2005] liefert. Mit der maximalen Messrate des Autokollimators von 25 Hz wurden die Horizontalrichtungen als kontinuierliche Messung zu einem ruhenden Reflektor in 3 m, 10 m und 23 m erfasst.



**Abb. 5:** Überwachung des Trackerkopfes



**Abb. 6:** Drehungen des Trackerkopfes

Genau wie bei der Erfassung mit 1000 Hz betrug auch hier die Standardabweichung einer einzelnen Horizontalrichtung 0,22 mgon und bei Integration über eine Sekunde 0,17 mgon. Abbildung 6 zeigt exemplarisch die gute Übereinstimmung zwischen den Messwerten von Autokollimator und Lasertracker, insbesondere in den Extremwerten. Da die Bandbreite dieser Schwankungen nicht entfernungsabhängig ist, erscheinen meteorologische Einflüsse als Ursache unwahrscheinlich. Der Trackerkopf führt also bei ruhendem Reflektor tatsächlich Drehungen in der Größenordnung bis zu 0,7 mgon durch. Die weitreichende Übereinstimmung der Messreihen lässt vermuten, dass die Integration der PSD-Werte in den Regelkreis eine nicht gerechtfertigte Ausrichtungsbewegung des Trackerkopfes verursacht.

### 3.3 Vergleich mit Soll-Winkeln

Die Ableitung von Genauigkeitsmaßen aus der Gegenüberstellung von gemessenen Richtungen und Sollrichtungen erfordert die Realisierung von Winkeln mit übergeordneter Genauigkeit. Diese Sollwinkel wurden durch Querverschiebung eines Reflektors (in interferometrisch gemessener Distanz) mittels eines Mikrometerschlittens realisiert, dessen Genauigkeit ( $\sigma = \pm 0,005$  mm) interferometrisch überprüft worden ist. Gleichzeitig wurde die durch die Querverschiebung verursachte Drehung des Trackerkopfes wie zuvor beschrieben mit Hilfe des Autokollimators erfasst. Für die bei Entfernungen von 3 m, 10 m und 23 m

durchgeführten Messreihen (Modus „Einzelpunktmessung“) mit Schrittweiten von 0,1 mm über einen Bereich von 25 mm ergeben sich die in der folgenden Tabelle aufgelisteten Winkelwerte. Sie zeigt außerdem die empirische Standardabweichung einer einzelnen Richtungsdifferenz von Mikrometerschlitten gegen Lasertracker ( $s_{M-L}$ ), Autokollimator gegen Lasertracker ( $s_{A-L}$ ) und Mikrometerschlitten gegen Autokollimator ( $s_{M-A}$ ), sowie in Klammern die jeweiligen Unsicherheiten des Versuchsaufbaus. Bei  $s_{M-L}(b)$  und  $s_{A-L}(b)$  handelt es sich um die jeweils unter Annahme der Unkorreliertheit um die a priori Genauigkeiten aus dem jeweiligen Versuchsaufbau bereinigten Standardabweichungen. Wegen der Korrelation zwischen PSD- und Encoderwerten kann erst die Analyse der Standardabweichungen zeigen, inwieweit die Bestimmung systematischer Abweichungen möglich ist.

Die Standardabweichungen  $s_{M-L}$  der Differenzen von Sollrichtung (Mikrometerschlitten) und Lasertracker liegen, zumindest für die Untersuchungsdistanzen von 10 m und 23 m, signifikant über der a priori Genauigkeit des Versuchsaufbaus. Somit ist  $s_{M-L}(b)$  ein Maß für die Nachbarschaftsgenauigkeit der Richtungsmessung. Die Differenzen M-A zeigen an, dass die Stellung des Trackerkopfes nicht der durch den Mikrometerschlitten vorgegebenen Sollrichtung entspricht. Dies kann sowohl an den Eigenbewegungen liegen, als auch daran, dass der Kopf des Lasertrackers den Bewegungen des Mikrometerschlittens nicht exakt folgt, was ja wegen des geregelten Richtungsabgriffs zunächst zulässig ist. Diese Abweichung kann durch die hier in Kauf zu nehmende Asynchronität bei der Erfassung der Messwertpaare in Kombination mit den oben erwähnten Eigenbewegungen des Trackerkopfes erklärt werden. Die Differenzen A-L zeigen, dass auch der vom Lasertracker ausgegebene Richtungswert nicht exakt mit der vom Autokollimator ermittelten Stellung des Trackerkopfes übereinstimmt. Der Widerspruch (auch von  $s_{A-L}(b)$ ) zu den Ergebnissen in Abschnitt 3.2 lässt sich ebenfalls durch asynchrone Datenerfassung erklären. Deswegen kann nicht auf ein spezielles (systematisch wirkendes) Encoderfehlverhalten geschlossen werden, obwohl nach Abb. 6 von einer guten Nachregelung ausgegangen werden kann.

**Tabelle1:** Standardabweichungen aus Vergleich mit Sollwinkeln

Dist. [m]	Schrittw. [mgon]	Bereich [mgon]	$s_{M-L}$ [mgon]	$s_{A-L}$ [mgon]	$s_{M-A}$ [mgon]	$s_{M-L}(b)$ [mgon]	$s_{A-L}(b)$ [mgon]
3	2,12	530	0,19 (0,11)	0,26 (0,08)	0,24 (0,13)	0,15	0,20
10	0,63	159	0,16 (0,03)	0,20 (0,08)	0,21 (0,09)	0,16	0,19
23	0,28	70	0,17 (0,01)	0,22 (0,08)	0,23 (0,08)	0,17	0,22

### 3.4 Wiederholgenauigkeit nach großen Messkopfbewegungen

Große Messkopfbewegungen wurden durch Messung in zwei Lagen erzwungen. Dabei erfolgt nach jedem Lagewechsel eine automatische Detektion der Reflektormitte. Zur Untersuchung der Streckenabhängigkeit wurde ein Zielzeichen, das sich in Höhe der Kippachse des Trackers befand, bei 10 verschiedenen Entfernungen zwischen 1 m und 25 m jeweils 10 Mal in zwei Lagen angezielt. Die empirischen Standardabweichungen einer Einzelpunktmessung (bei jeweils 10 Wiederholungen) in einer Lage betragen im Durchschnitt 0,25 mgon für die Horizontalrichtungen und 0,20 gon für die Vertikalrichtungen.

Der Einfluss der Raumrichtung auf die Richtungsmessgenauigkeit wurde dadurch untersucht, dass ein Reflektor unter jeweils 5 verschiedenen Vertikalrichtungen ( $57^\circ$ ,  $78^\circ$ ,  $102^\circ$ ,  $123^\circ$  und  $137^\circ$ ) 5 Mal in zwei Lagen angemessen wurde. Der Tracker wurde danach um jeweils  $45^\circ$  weitergedreht. Die empirische Standardabweichung einer Einzelpunktmessung (bei jeweils 5 Wiederholungen) in einer Lage beträgt im Durchschnitt  $0,30$  mgon für die Horizontalrichtungen und  $0,19$  mgon für die Vertikalrichtungen. Bei Zielungen zu sehr tief gelegenen Reflektoren waren dabei z. T. deutlich größere Standardabweichungen zu beobachten als zu den höher gelegenen.

#### 4. Ergebnisse und Ausblick

Anhand der Untersuchungen wurde festgestellt, dass der Kopf des Lasertrackers aperiodische, nicht reproduzierbare Bewegungen mit Bandbreiten bis zu  $\pm 0,7$  mgon durchführt. Diese Eigenbewegungen wären zwar prinzipiell zulässig, wenn sie vollständig rechnerisch korrigiert würden. Die Untersuchungen legen nahe, dass der hierzu eingesetzte Sensor zwar die Daten richtig erfasst aber dass die variable Intensitätsverteilung des Laserstrahls den limitierenden Faktor für die Wiederholgenauigkeit darstellt. Deswegen empfiehlt sich eine längere Messzeit, obwohl die geringeren Standardabweichungen der Einzelpunktmessung anderes vermuten lassen. Es können folgende Aussagen zu den Richtungsgenauigkeiten gemacht werden: Kontinuierliche Messungen liefern Wiederholgenauigkeiten ( $1\sigma$ ) einer einzelnen Messung von  $0,22$  mgon für Horizontalrichtungen und  $0,13$  mgon für Vertikalrichtungen. Bei Einzelpunktmessungen (bzw. über eine Sekunde gemittelten Dauermessungen) sinkt die Standardabweichung auf  $0,17$  mgon (Hz) und  $0,08$  mgon (V). Wird der Reflektor (nach einer großen mechanischen Bewegung) komplett neu angezielt, so beträgt die Wiederholgenauigkeit einer Einzelpunktmessung im Durchschnitt  $0,27$  mgon (Hz) und  $0,20$  mgon (V). Alle Ergebnisse sind weitgehend entfernungsunabhängig. Da nur sehr kleine Winkel untersucht worden sind, haben Unsicherheiten aus der Kalibrierung des Gesamtsystems so gut wie keine Auswirkung. Globalere Aussagen zur Richtungsmessgenauigkeit bedürfen weiterer Untersuchungen. So könnten z. B. langperiodische Teilungsfehler des Horizontalkreises mit Hilfe eines aufgesetzten Spiegelpolygons [analog DEPENTHAL 2006] oder in Teilbereichen mit Hilfe einer Interferometerbahn ermittelt werden.

#### Literatur

- Depenthal, C. (2006): Automatisierte Kalibrierung von Richtungsmesssystemen in rotativen Direktantrieben. AVN 8-9/2006, 305 - 309
- Heidenhain (2006): Produktkatalog Winkelmessgeräte. Dr. Johannes Heidenhain GmbH, Traunreuth
- Leica (2001): Axyz Trainingshandbuch für Tracker, Ausgabedatum Dezember 2001. Leica Geosystems AG, Unterentfelden
- Markendorf, A. (2006): Persönliche Mitteilung. Leica Geosystems AG
- Möller-Wedel (2005): Gebrauchsanweisung ELCOMAT 3000 Version 09/02/2005. Möller-Wedel Optical GmbH, Wedel