

Zur Leistungsfähigkeit eines zeitreferenzierten Dreharms als Prüfmittel für 4D-Messsysteme in Hochgeschwindigkeitsanwendungen

C. Depenthal und M. Barth



ALLGEMEINE VERMESSUNGS-NACHRICHTEN

Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung als
PEER REVIEWED PAPER
angenommen.

Tag der Einreichung: 15. Mai 2007

Kinematische Messtechniken erfordern die Berücksichtigung der Zeit aufgrund der Bewegung des Objekts. Am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe wird zur Prüfung kinematischer Sensorsystem wie z.B. Robottachymeter oder iGPS ein zeitreferenzierter Dreharm entwickelt. Es werden erste Untersuchungsergebnisse des Dreharms mit einem Lasertracker vorgestellt.

1 Einleitung

Kinematische Messtechniken erfordern die Berücksichtigung der Zeit aufgrund der Bewegung des Objektes. Somit muss eine zeitliche Zuordnung zwischen dem aufnehmenden Sensor und bewegten Objekt geschaffen werden, die in ihrer Qualität der räumlichen Erfassung entspricht. Für die Prüfung solcher zielverfolgender Sensoren wie das Robottachymeter oder iGPS wird am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe (GIK) ein zeitreferenzierter Dreharm entwickelt. Die Stabilität und Rotationsgenauigkeit wird sowohl statisch als auch kinematisch mit einem Lasertracker überprüft, da die Spezifikationen des verwendeten Lasertrackers Leica LTD500 (Herstellerangabe statisch ± 10 ppm) diejenigen der Prüflinge (z.B. Tachymeter Tracking Mode $5 \text{ mm} \pm 2$ ppm) ausreichend

übertreffen. Für die Prüfung muss eine Synchronisation zwischen den Messwerten des Lasertrackers und den Encoderwerten des Dreharms hergestellt werden.

2 Zeitreferenzierter Dreharm

Der Dreharm verfügt über unterschiedliche Aufnahmen für Reflektoren am Ende des Rotors, wobei ein Radius von etwa 1m entsteht. Der Antrieb erfolgt über einen Motor in Form eines rotativen Direktantriebs mit einem Rundlauf und Höhenschlag $< 10 \mu\text{m}$ [IDAM]. Solche Direktantriebe zeichnen sich durch eine hohe Zuverlässigkeit, gleichförmige Bewegung und stabile Regelung aus [IDAM]. Das im Motor verwendete Messsystem besteht aus einem Abtastkopf und einer Rasterscheibe als Maßverkörperung und arbeitet nach dem inkrementalen Messverfahren, wobei sich für den Anschluss an ein absolutes Winkelbezugssystem eine Referenzmarke auf der Rasterscheibe befindet [NUMERIK JENA]. Das Messsystem verfügt über eine Auflösung von $0,36''$. Die Genauigkeit der Winkelpositionsmessung wird u.a. durch die Teilungsgenauigkeit der Rasterscheibe, die Exzentrizität der Teilung zur Lagerung, die Lageabweichung zwischen Rasterscheibe und Messmodul und durch den Interpolationsfehler beeinflusst. Um die Winkelabweichung möglichst klein zu halten wurde eine Kalibrierfunktion über das Verfahren "eingehängte Messreihe" mit einem Spiegelpolygon bestimmt [DEPENTHAL, C. 2006]. Die kombinierte Messunsicherheit des Direktantriebs setzt sich aus der Positionsabweichung, bestimmt aus wiederholtem Anfahren des Referenzpunktes, und der Standardunsicherheit der Schätzung der Kalibrierfunktion zu $u_c = 2,4''$ zusammen. Eine erweiterte Messunsicherheit ergibt sich mit dem Erweiterungsfaktor 2 zu $\pm 4,8''$. Wird der schwenkbare Dreharm in einer Stellung betrieben, die einen aus der Horizontalen abweichenden Kreis erzeugt, macht sich das Gewicht des Reflektors und sein Gegengewicht an den Enden des Rotors in Form einer orientierungsabhängigen Armbiegung bemerkbar. Diese Verformung ist statisch mit dem Leica Lasertracker LTD500 bestimmt worden und wird als weitere Kalibrierfunktion angebracht. Der Dreharm kann Geschwindigkeiten bis zu 10 m/s erreichen.



3 Lasertracker Leica LTD500

Lasertracker als hochgenaue polare Messsysteme zeichnen sich nicht nur im statischen Bereich, sondern auch im kinematischen Einsatz aus. Der Leica LTD500 kann bewegte Ziele mit Geschwindigkeiten bis zu 6 m/s mit einer Messrate von 3000 Hz erfassen und mit maximal 1000 Hz Koordinaten ausgeben, wobei die Koordinatenmessgenauigkeit vom Hersteller mit ± 20 bis 40 ppm (2σ) angegeben wird. Für statische Ziele wird sie mit $\pm 10 \mu\text{m} \leq 1 \text{ m}$ oder ± 10 ppm angegeben (2σ). Untersuchungen des Winkelmesssystems des LTD500 ergaben Wiederholgenauigkeiten unterhalb von 0.2 mgon bzw. $3 \mu\text{m/m}$ (1σ) [JURETZKO, M. 2007].

Der Lasertracker verfügt über je einen Winkelencoder für die beiden Winkelmessungen (Hz,V), einen in zwei Richtungen beweglich gelagerten Spiegel (3) und einen zweidimensionalen Positiondetektor (PSD) (4). Das vom Laserinterferometer (1) ausgesandte Licht gelangt über den Spiegel (3) zum Zielreflektor (5) und als parallel reflektierter Strahl wiederum über den Spiegel (3) zurück in den Messkopf, wo anschließend ein Teil des reflektierten Laserstrahls mit Hilfe eines halbdurchlässigen Spiegels (2) auf den PSD umgeleitet wird, während der restliche Anteil zur Auswertung der Distanz dient. Der Versatz des Laserstrahls auf dem PSD dient als Eingangsgröße in den Regelalgorithmus und somit zur Steuerung der Spiegelbewegung und wird mit den jeweils an den Encodern abgelesenen Winkelwerten verrechnet. Die automatische Reflektorverfolgung wird hauptsächlich durch die Winkelencoder und die direkt angetriebenen Motoren in beide Richtungen gewährleistet. Damit der Messablauf perfekt funktioniert ist eine exakte Abstimmung von Winkelencodern, Motoren und PSD erforderlich [LOSER, R. 2004].

Die interne Abfrage der Sensorwerte benötigt 1 bis $2 \mu\text{s}$ und beschränkt zusammen mit der Bewegungsgeschwindigkeit und den übrigen Messunsicherheiten die erreich-

bare Messgenauigkeit. Ein wichtiger Bestandteil der Systemfunktionalität ist der Regelalgorithmus. So zeigt LOSER, R. (2004) auf, dass ein optimal eingestelltes Regelsystem einen definierten Störimpuls bereits nach 90 ms kompensiert hat, während kritisch eingestellte Regelparameter über 300 ms zum Ausgleich des Störimpulses benötigen.

4 Synchronisation

Für die getriggerten Messungen wurde ein „LT Controller Base“ eingesetzt. Naturgemäß unterscheiden sich die Zeitsysteme verschiedener Erfassungssysteme, so dass Zeitdriften entstehen. Sollen jedoch Messwerte und gemessene Positionen verzögerungslos einander zugeordnet werden, ist ein identischer Zeitpunkt der Erfassung unumgänglich. Die interne Zeit des Controllers basiert auf einer Auflösung von $1 \mu\text{s}$. Ein externes Triggersignal liefert einen so genannten „Point of Interest“, dem eine Zeit und eine Messung zugeordnet werden. Da der LTD500 eine interne Messrate von 3 kHz aufweist, werden Sensorwerte zu diesem „Point of Interest“ interpoliert und anschließend zusammen mit dem Zeitstempel ausgegeben, wobei hier beim LTD500 eine Beschränkung auf 1 kHz besteht [LEICA MANUAL, 2005]. Somit können die Koordinaten zwar „nur“ mit 1 kHz registriert werden, aber durch den Zeitstempel besteht eine Positionszuordnung innerhalb einer Mikrosekunde.

Der Dreharm wird über einen PMAC (Programmable Multi-Axes Controller) gesteuert, der die Encoderposition des Direktantriebs zum Zeitpunkt des Triggersignals in ein spezielles Register schreibt, das am Ende des gesamten Messvorgangs ausgelesen wird. Die Registrierung erfolgt somit hardwaremäßig und die einzige Verzögerung entsteht durch das Eingangsgatter, das den Trigger auslöst, und ist kleiner als 100 ns.

Infolgedessen ist sichergestellt, dass sich die Koordinaten des LTD500 und die Encoderwerte des Dreharms innerhalb $1 \mu\text{s}$ auf die gleiche Position beziehen. Als Triggersignal wurde eine Taktrate von 40 Hz mit einem Frequenzgenerator erzeugt.

5 Ergebnisse

Für die Beobachtung wurde ein Corner Cube Reflector (CCR 1.5" centering of optics $< \pm 0,006 \text{ mm}$) am Ende des Rotors fixiert. Bei einem Vergleich der kalibrierten Encoderwerte des Dreharms mit den entsprechenden Winkeln aus den Koordinaten des LTD500 müssen diese in das Dreharmsystem überführt werden. Dazu wird an jedem Standpunkt des LTD500 zuerst eine statische Messung mit Schrittweiten von 30° durchgeführt. Eine anschließende Kreisausgleichung liefert den Mittelpunkt, den Radius und eine Aussage über das planare und radiale Verhalten des Dreharms in Bezug zur Dreharmebene, sowie die Abweichungen zwischen Encoderwerten und den entsprechenden LTD-Winkelwerten. Gleichzeitig werden aus den statischen Messungen Transformationsparameter zwischen LTD- und Dreharmkoordinatensy-

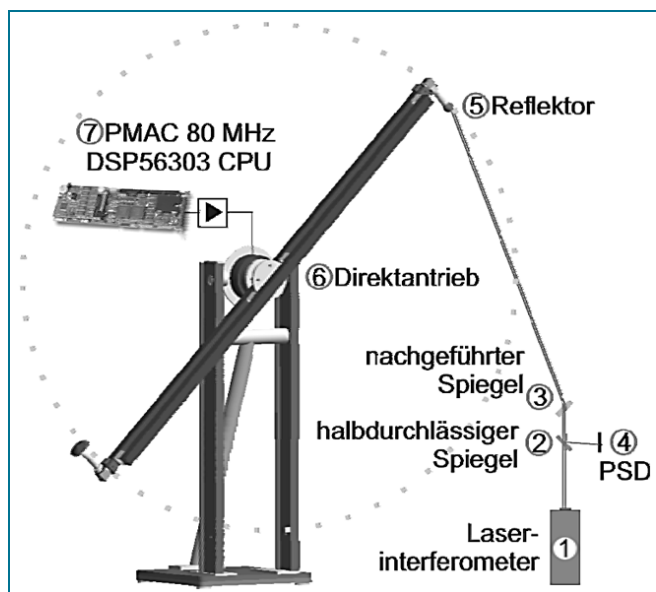


Bild 1: Schematische Darstellung Lasertrackerelemente und Dreharm

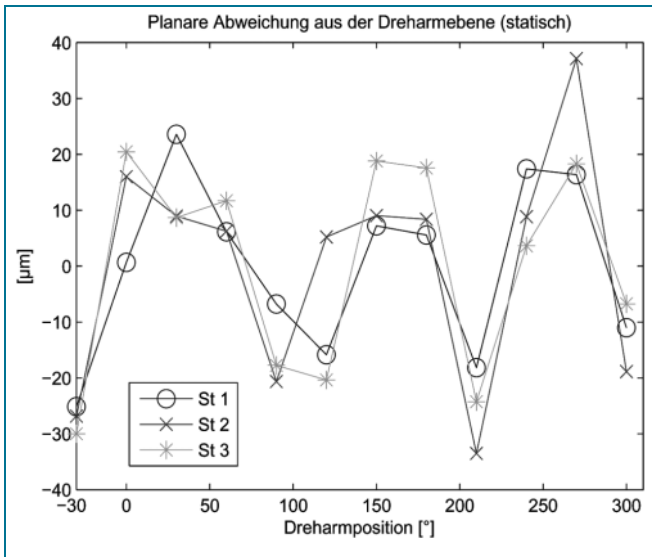


Bild 2: Planare Abweichungen aus der Dreharnebene (statisch)

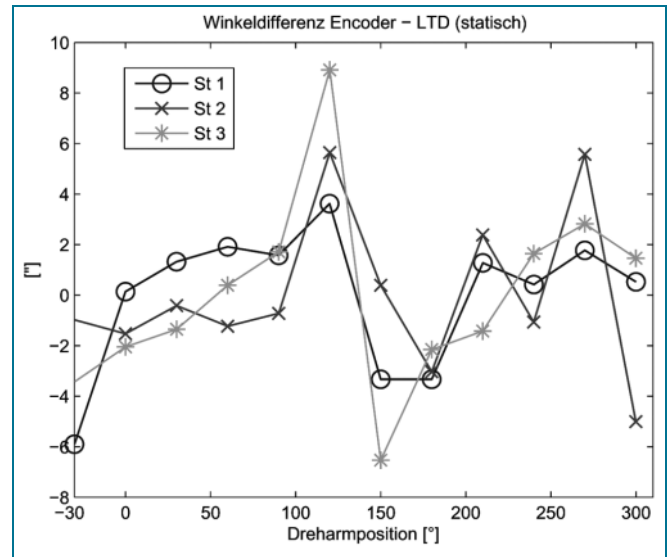


Bild 3: Winkeldifferenz Dreharm-Encoder – LTD (statisch)

stem bestimmt, um die Koordinaten der statischen und kinematischen Messung in das Dreharmsystem überführen zu können.

Das Messlabor in dem der Dreharm aufgebaut ist wurde auf Temperaturstabilität mit einem am GIK entwickelten Temperatursensorsystem untersucht. Die Temperaturgradienten erwiesen sich dabei als stabil auch in Bodennähe. Mit der maximalen Gradientendifferenz im Dreharmbereich von $0,7\text{ }^{\circ}\text{C/m}$ ergibt sich bei einer Entfernung von 6 m eine Abweichung von $0,04\text{ mgon}$ zwischen dem Refraktionswinkel für den höchsten und den niedrigsten Zielpunkt am Rotor [ESCHELBACH, C. 2007]. Für die hier durchgeführten Messungen liegt die Abweichung unterhalb der Messgenauigkeit.

Für die Untersuchung wurden drei Standpunkte gewählt. Standpunkt 1 und 2 in ungefährer Verlängerung der Drehachse, mit einer Entfernung von 2,9 m und 5,5 m. Standpunkt 3 mit einem Abstand von 4,5 m zum Dreharm und etwa 3 m seitlich zur Drehachse versetzt, um eine größere Streckenvariation zu erhalten. Dreharmposition Null entspricht der vertikalen Dreharmstellung, mit CCR im Zenit (vergl. Bild 1), entsprechend verläuft der CCR bei 180° sehr bodennah. Bild 2 zeigt die planaren Abweichungen zur geschätzten Dreharnebene aller drei Standpunkte und weist mit $\pm 25\text{ }\mu\text{m}$ (Standpunkt 1) auf ein sehr gutes statisches Verhalten hin. Die radialen Abweichungen fallen mit $\pm 15\text{ }\mu\text{m}$ erwartungsgemäß kleiner aus. Die Reproduzierbarkeit liegt bei $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$.

Die Winkeldifferenzen zwischen den kalibrierten Encoderwerten des Dreharms und den aus Koordinaten berechneten Winkeln des LTD500 zeigen max. Abweichungen von $\pm 8''$ ($\pm 40\text{ }\mu\text{m}$ auf den Kreis bezogen) (Bild 3), wobei hier bei Standpunkt 1 mit einer Abweichung von $-6''$ bis $+4''$ die Messunsicherheitsgrenze des Dreharm-Encoders schon fast erreicht ist. Ein Vergleich der Start- und Endposition im Referenzpunkt des Dreharms weist für alle drei Standpunkte LTD-Koordinatendifferenzen unterhalb von $20\text{ }\mu\text{m}$ auf. Auch die Restklaffungen nach der Transformation liegen für Standpunkt 1 mit maximal

$\pm 20\text{ }\mu\text{m}$ im Bereich der statischen Messunsicherheit des LTD500, ebenso entsprechend für beide anderen Standpunkte. Somit sind die Transformationsparameter zur Überführung von kinematischen Messungen in das Dreharmsystem mit der zu erwartenden Genauigkeit von $< \pm 10\text{ ppm}$ bestimmt.

Diese ersten hier dargestellten Untersuchungen beschränken sich auf eine gleichmäßige Bewegung. Daher wird der Dreharm von der Referenzposition aus langsam beschleunigt, bis die Endgeschwindigkeit erreicht ist. Erst ab diesem Zeitpunkt erfolgt der Start der Triggerung durch den Frequenzgenerator, wobei je nach Geschwindigkeit mehrere Runden erfasst werden. Die langsamste Tangentialgeschwindigkeit lag bei $0,2\text{ m/s}$ und die schnellste bei $5,5\text{ m/s}$, also fast an den Grenzen des LTD500. Für jede Geschwindigkeit wurde der Dreharm neu gestartet, so dass voneinander unabhängige Messungen vorliegen. Im Folgenden werden exemplarisch die Ergebnisse dreier Geschwindigkeiten vorgestellt ($0,5, 2,8, 5,5\text{ m/s}$).

Für eine erste Beurteilung werden pro Umdrehung Kreisparameter geschätzt und das planare und radiale Verhalten bezüglich der einzelnen Runden überprüft. Bild 4 zeigt die planaren Abweichungen aus der Dreharnebene für Standpunkt 1 mit allen drei Geschwindigkeiten und allen gefahrenen Runden. Bei $0,5\text{ m/s}$ betragen die Abweichungen maximal $\pm 50\text{ }\mu\text{m}$ und werden erst bei steigenden Geschwindigkeiten größer, jedoch bleiben sie immer innerhalb der Spezifikationen des LTD500. Insgesamt weisen die Ergebnisse auf ein sehr ruhiges Verhalten des Dreharms hin.

Der weitaus interessantere Anteil bezüglich des Verhaltens des Dreharms bezieht sich auf die Genauigkeit der Drehwinkel bei größeren Geschwindigkeiten. Maßgeblich ist hierbei der Standpunkt 1 mit einer kurzen Entfernung, da hier der LTD500 die höhere Genauigkeit aufweist. Bild 5 bis Bild 7 zeigen die Winkeldifferenzen zwischen dem kalibrierten Dreharm-Encoder (kurz: Encoder) und dem LTD500 (kurz: LTD) bei allen drei Geschwindigkeiten. Die Winkeldifferenzen sind in Altsekunden angege-

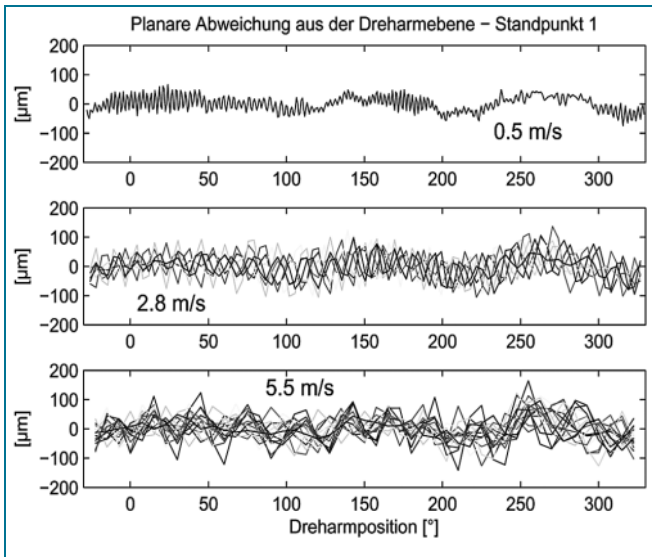


Bild 4: Planare Abweichungen aus der Dreharebene bei verschiedenen Geschwindigkeiten (Standpunkt 1)

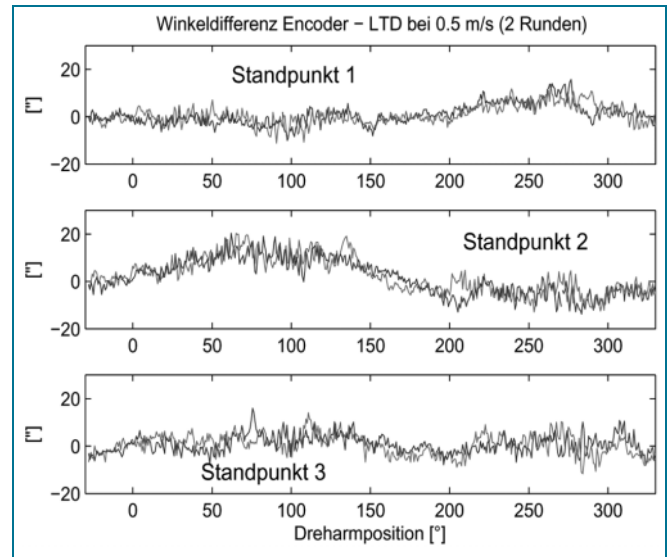


Bild 5: Winkeldifferenz Drearm-Encoder – LTD bei 0,5 m/s:

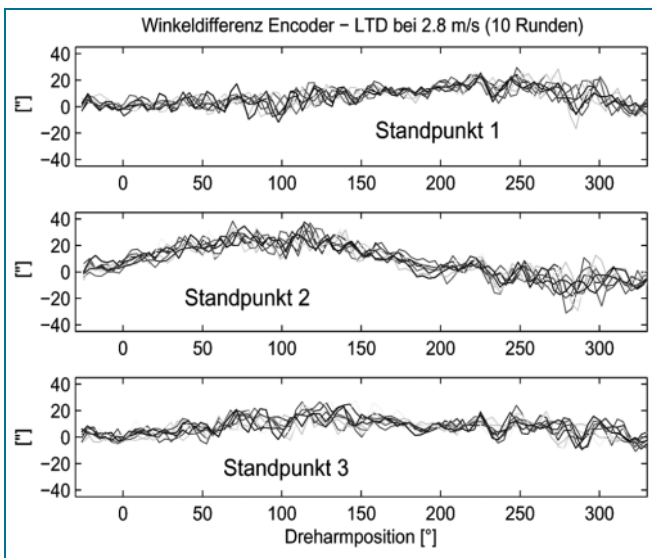


Bild 6: Winkeldifferenz Drearm-Encoder – LTD bei 2,8 m/s

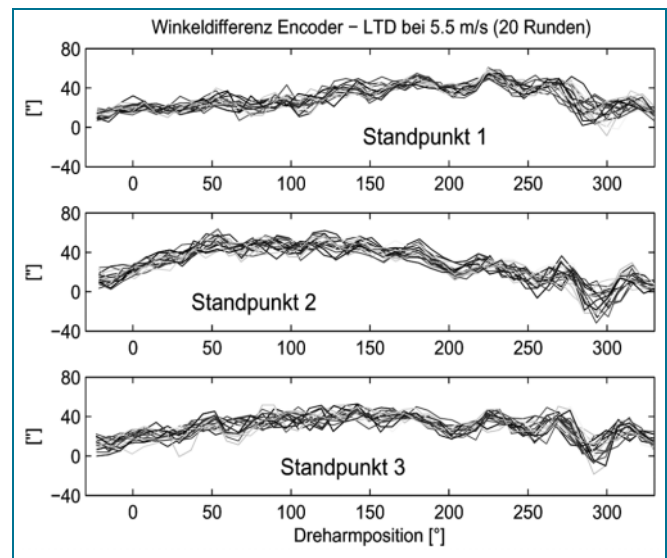


Bild 7: Winkeldifferenz Drearm-Encoder – LTD bei 5,5 m/s

ben, wobei $10''$ umgerechnet auf die Trajektorie etwa $50\ \mu\text{m}$ entsprechen. Bei $0,5\ \text{m/s}$ liegen die Winkeldifferenzen unterhalb von $\pm 10''$ im Standpunkt 1 und zeigen erst im Bereich von 220° – 270° Abweichungen bis $+ 20''$. Selbst bei $2,8\ \text{m/s}$ steigen sie bis 200° nicht über $\pm 10''$ und erst danach sind Variationen von $\pm 20''$ vorhanden. Bei $5,5\ \text{m/s}$ liegen die Differenzen im Bereich von 280° – 120° unterhalb von $+ 25''$ ($120\ \mu\text{m}$) und steigen auf $+ 50''$ an. Bild 8 verdeutlicht dieses positionsabhängige Verhalten für die gemittelten Winkeldifferenzen im Standpunkt 1, wobei während der Mittelbildung ein durch die Triggerung entstehender Versatz zwischen den einzelnen Runden von max. $0,6^\circ$ (bei $5,5\ \text{m/s}$) vernachlässigt wurde. Standpunkte 3 präsentiert ähnliche Ergebnisse wie Standpunkt 1, lediglich Standpunkt 2 weist höhere Abweichungen auf (siehe auch Bild 9). Ebenso zeigt Bild 8 für Standpunkt 1 im Bereich von 120° – 280° bei $5,5\ \text{m/s}$ Abweichungen von durchschnittlich $+ 40''$

($+ 200\ \mu\text{m}$), die als einzige die Spezifikationen überschreiten. Bei einer Entfernung von knapp $3\ \text{m}$ ist der Lasertracker durch den größeren Winkelbereich stark gefordert und die Winkelbeschleunigung des LTD liegt in den Umkehrpunkten bereits außerhalb der Spezifikation von $2\ \text{g}$. Auffällig ist, dass die Winkeldifferenz hierbei immer positiv ist, d.h. die berechneten Winkel aus den LTD-Koordinaten laufen hinterher. Für Standpunkt 2 verschieben sich die Bereiche der größten Abweichungen auf 20° – 180° (Bild 9), wobei die Differenzen innerhalb der Spezifikationen liegen. Hier könnte eine Korrelation bestehen zwischen der größeren Entfernung, den kleineren Winkelbereichen und dem Effekt, dass der Dreharmmittelpunkt und LTD Standpunkt (Koordinatensprung) einen Höhenversatz von $25\ \text{cm}$ aufweist.

Bezüglich der Wiederholbarkeit der einzelnen Runden zeigt sich für alle Standpunkte und Geschwindigkeiten ein ähnlich gutes Bild. Es konnten keine Ausreißer fest-

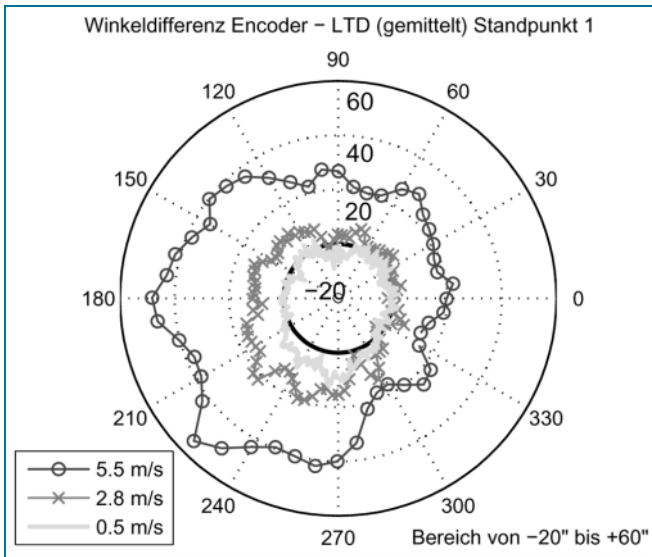


Bild 8: Winkeldifferenz Encoder – LTD für Standpunkt 1 (gemittelt)

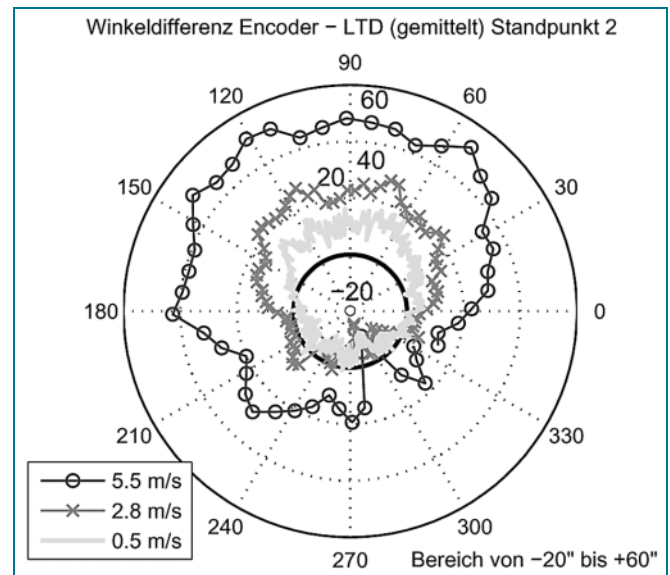


Bild 9: Winkeldifferenz Encoder – LTD für Standpunkt 2 (gemittelt)

gestellt werden und die maximalen Differenzen zwischen den einzelnen Runden liegen bei 20'' bis 40'' je nach Standpunkt, was umgerechnet innerhalb der Genauigkeit des LTD500 bei schnellen Bewegungen liegt (Bild 5 bis Bild 7).

Obwohl die meisten Ergebnisse innerhalb der Messunsicherheit des LTD500 liegen, deuten diese auf eine Möglichkeit hin, die eine Trennung zwischen Dreharm und LTD Effekten möglich macht. Um hier jedoch gesicherte Aussagen zu treffen, sind weitere Messungen bzw. Untersuchungen nötig. Hierbei werden dann nicht nur die Ergebnisse in Bezug auf den Dreharmwinkel beurteilt, sondern direkt die Horizontal- und Vertikalrichtungen des LTD den aus der Transformation berechneten Sollrichtungen des Encoders gegenübergestellt. Aus einer Beurteilung der Winkeldifferenzen gegenüber den Winkelgeschwindigkeiten bzw. Beschleunigungen sollten sich Rückschlüsse auf das Verhalten des Regelkreises und der PSD-Ablage des LTD ziehen lassen. Um den Einfluss von Verbiegungen des Dreharms auszuschließen, müssen auch gegenläufige Messungen durchgeführt werden. Ebenso kann bei einem entsprechenden Verhältnis zwischen Distanz zum Dreharm und Dreharmgeschwindigkeit in den einzelnen Standpunkten eine gleiche Winkelgeschwindigkeit bzw. Beschleunigung erreicht werden, die dann wiederum Rückschlüsse auf das Verhalten des Dreharms und des LTD500 zulässt.

6 Zusammenfassung

Zur Prüfung kinematischer Sensorsysteme wie Robottachymeter oder iGPS wird am GIK ein zeitreferenzierter Dreharm entwickelt. Der Lasertracker als genauestes und schnellstes optisches Sensorsystem eignet sich zur Überprüfung der Stabilität und Rotationsgenauigkeit des Dreharms. Für die Überführung der unterschiedlichen Bezugssysteme werden statische Messungen durchgeführt, so dass mit einer anschließenden Transformation

und Winkelberechnung in der Drehebene die Möglichkeit besteht, diese Winkel direkt mit den Positionen des kalibrierten Dreharm-Encoders zu vergleichen. Es wurden konstante Geschwindigkeit bis zu 5,5 m/s gefahren, bei Entfernungen bis zu 6 m. Planare Abweichungen aus der Drehebene bei langsamen Geschwindigkeiten von $\pm 50 \mu\text{m}$ und $\pm 100 \mu\text{m}$ bei 5,5 m/s zeigen, dass der Dreharm selbst bei hohen Geschwindigkeiten ein sehr ruhiges Verhalten aufweist. Die Winkeldifferenzen zwischen Dreharm-Encoder und berechneten LTD500 Winkeln liegen in den überwiegenden Bereichen mit Abweichungen unterhalb von 30'' innerhalb der Messunsicherheit des LTD500. Lediglich bei 5,5 m/s und einer Entfernung von 3 m zeigen sich einige Differenzen bis zu + 50'', wobei hier die Winkelbeschleunigung in den Umkehrpunkten bereits $> 2 \text{ g}$ ist und somit außerhalb der Spezifikation. Die bisherigen Ergebnisse zeigen auch, dass mit weiteren genau definierten Untersuchungen die Möglichkeit besteht eine Trennung der Effekte zwischen Dreharm und LTD500 zu erreichen. Dieses wird in weiteren Untersuchungen zu beurteilen sein. Insgesamt zeigt sich, dass der Dreharm bei Geschwindigkeiten von rund 6 m/s Positionen im Bereich von $< 0,2 \text{ mm}$ sicher bestimmen kann und somit für die Prüfung kinematischer Sensoren über eine zeitliche Zuordnung bestens geeignet ist.

Literatur

- [1] DEPENTHAL, C. 2006: Automatisierte Kalibrierung von Richtungsmesssystemen in rotativen Direktantrieben. AVN 8–9/2006 S. 305–309
- [2] ESCHELBACH, C. 2007: Störanfälligkeit geodätischer Präzisionsmessungen durch lokale Temperaturschwankungen. In: Brunner, F. (Hrsg): Ingenieurvermessung 07, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 169–180
- [3] JURZTKO, M. 2007: Untersuchungen zur Wiederholgenauigkeit eines geregelten Winkelmesssystems am Beispiel eines Lasertrackers LTD500. In: Brunner, F. (Hrsg): Ingenieurvermessung 07, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 181–186

