

# Leistungsfähigkeit eines „Reflektor 160“ in Kombination mit einem Lasertracker

## Performance of a “Reflektor 160” Used in Combination with a Laser Tracker

Franziska Bernhart, Maria Hennes

Die effiziente Nutzung des großen Messvolumens von Lasertrackern ist in seitlicher Richtung hauptsächlich durch den begrenzten Einfallswinkel der Art der verwendeten Reflektoren eingeschränkt. Für das nachführende Laserinterferometer (LaserTRACER) ist neuerdings ein Reflektortyp verfügbar, welcher einen besonders großen Einfallswinkel aufweist, jedoch nur für geringe Weiten spezifiziert ist. Mit der Untersuchung dieses Reflektors werden die Möglichkeiten der Arbeitsbereichserweiterung bei der Anwendung mit einem Lasertracker getestet.

**Schlüsselbegriffe:** Kugelreflektor, Lasertracker, großer Messbereich

*The efficient use of the large measurement volume of lasertrackers is laterally mainly restricted by the type of the employed reflectors due to their limited incidence angle. For the self tracking laser interferometer (LaserTRACER) a reflector type is newly available, which exhibits a large incidence angle but a low range specification. With the examination of this reflector, the possibilities of expanding the working area using it with a lasertracker will be tested.*

**Keywords:** Spherical mounted reflector, laser tracker, large-range measurement

### 1 MOTIVATION

Zur hochgenauen Bestimmung von Objekten im dreidimensionalen Raum werden zunehmend Lasertracker eingesetzt. Die Anwendungsfelder der Lasertracker sind jedoch wesentlich durch die verwendeten Reflektoren bestimmt. Durch den geringen Einfallswinkelbereich von  $\pm 30^\circ$  herkömmlicher Corner-Cube-Reflektoren (CCR) ist der mögliche Arbeitsbereich stark limitiert. Eine wesentliche Erweiterung des Einfallswinkelbereiches solcher Reflektoren kann durch das am Geodätischen Institut (GIK) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) entwickelte nachführende Reflektorsystem, dem Active Hub, erreicht werden. Mittels des Active Hubs kann ein sich beliebig bewegendes Reflektor derart nachgeführt werden, dass keinerlei Strahlabbrüche während des Messvorganges aufgrund des Überschreitens des Ein-

fallswinkelbereichs verursacht werden. Reflektoren mit größerem Einfallswinkelbereich sind durch den Tooling Ball Reflektor (TBR) mit einem Einfallswinkel von  $\pm 50^\circ$  und den Cat-Eye-Reflektor ( $\pm 60^\circ$ ) gegeben. Durch den speziellen mehrschaligen Aufbau aus Glaskörpern erhält der Cat-Eye-Reflektor jedoch unhandliche Dimensionen und weist zudem fast das fünffache Gewicht eines CCR auf. Die ETALON AG bietet seit kurzem einen „Reflektor 160“ an, welcher in Kombination mit nachführenden Laserinterferometern (LaserTRACER) zum Einsatz kommt. Dieser Reflektor kann als spezieller Cat-Eye-Reflektor angesehen werden, bei welchem aufgrund physikalischer Eigenschaften des verwendeten Glases der mehrschichtige Aufbau der Glaskörper durch eine Vollkugel aus Glas ersetzt werden kann. Dieser Reflektor weist einen Einfallswinkelbereich von  $\pm 80^\circ$  auf und verfügt über geringere Abmessungen als ein her-

kömmlicher CCR. Er ist bei der Verwendung mit einem LaserTRACER ( $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ ) für einen Entfernungsbereich von 2,5 m spezifiziert. Die Verfügbarkeit dieser Reflektoren ist bisher gering. Die Verwendung eines solchen Reflektors in Kombination mit Lasertrackern als messendes System würde den Anwendungsbereich von Lasertrackern jedoch wesentlich erweitern. Demzufolge sind die Eigenschaften eines „Reflektor 160“ im Hinblick auf die Nutzung mit Lasertrackern zu untersuchen.

## 2 ANFORDERUNGEN

Der „Reflektor 160“ wird in Kombination mit Laser TRACERn zur hochgenauen Kalibrierung (im  $\mu\text{m}$ -bis  $\text{sub-}\mu\text{m}$ -Bereich) von Koordinatennormmaschinen eingesetzt. Der große Einfallswinkelbereich von  $\pm 80^\circ$  bietet hierbei wesentliche Vorteile. Die spezifizierte Reichweite liegt hierbei bei 2,5 m. Zur zweckgebundenen Anwendung des „Reflektor 160“ wird eine erhöhte Reichweite in Kombination mit Lasertrackern erhofft. Der „Reflektor 160“ verfügt in seiner Originalfassung über eine Vorrichtung zur Montage des Reflektors in Maschinenmessköpfen (siehe *Abb. 1*). Für zahlreiche Anwendungen in der Ingenieurgeodäsie ist eine Fassung in dieser Weise ungeeignet. Eine Realisierung des „Reflektor 160“ als Kugelreflektor würde die großen Vorteile des Einfallswinkelbereiches in Kombination mit der Möglichkeit, antastend zu messen, weiter verbessern. Realisiert wurde daher eine Fassung, welche den Außenmaßen eines handelsüblichen 1,5" CCR gleicht, um eine problemlose Verwendung in für CCR entwickelten Halterungssystemen zu erreichen (siehe *Abb. 2*). Die Reflektorkugel aus Glas wird hierbei in eine schützende Halbschale eingefasst. Durch diese neue Fassung ist es möglich, den Reflektor auch antastend zu verwenden. Der Reflektor erhält folgende Bezeichnung: „Reflektor 160A“ (R160A), wobei der Zusatz A für die Möglichkeit der antastenden Messung steht. Der „Reflektor 160A“ weist etwa die Hälfte des Gewichtes eines herkömmlichen CCR auf und wird somit auch für Anwendungen, in welchen das Reflektorgewicht eine wesentliche Rolle spielt, interessant. Durch den – bedingt durch den Erhalt des großen Einfallswinkels – schmal gehaltenen äußeren Aufbau des Reflektors verfügt dieser nur über eine sehr geringe Kugelschalenfläche, unter welcher die Handhabbarkeit des Reflektors leidet. Ein Abfahren von Oberflächen von Hand gestaltet sich hierdurch schwieriger als mit einem CCR und schränkt den Vorteil des großen Einfallswinkelbereichs wieder ein. Mögliche Anwendungen sind aber in der Verfolgung des fest installierten Reflektors oder der Anzielung einzelner Punkte aus stark unterschiedlichen Richtungen zu suchen. Mit der angepassten Kugelhalbschale ist die Kompatibilität zu herkömmlichen Reflektoraufnahmen gegeben, was die Flexibilität erhöht.



Abb. 1 | Reflektor 160

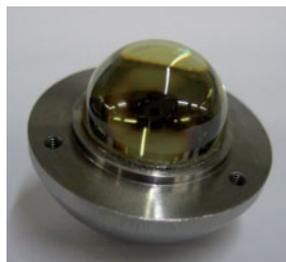


Abb. 2 | Reflektor 160A

## 3 OPTISCHE GRUNDLAGEN UND KONSEQUENZEN

Der wichtigste Bestandteil des Reflektors stellt die Glaskugel mit ihren besonderen physikalischen Eigenschaften dar. Sie weist einen Durchmesser von  $21 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$  auf und verfügt über eine optische Rundheit in einem Bereich von 100 nm bis 200 nm. Das Glas weist bei einer Wellenlänge des Lichtes von 632,8 nm einen Brechungsindex von  $n = 1,99613$  auf und liegt somit im optimalen Brechungsindexbereich, wie er durch YANG/FRIEDSAM, (1999) in einer Untersuchung für Vollwinkelreflektoren ermittelt wurde. Die Glaskugel ist halbseitig mit einer hochreflektierenden metallischen Spiegelbeschichtung versehen, um bestmögliche Reflexionseigenschaften zu erhalten. Die beschichtete Kugel ist mittels eines Polyurethan-Klebers in die am GIK in Kooperation mit ETALON entwickelte Kugelhalbschale aus rostfreiem magnetischem Stahl eingebracht. Der innere Bereich der Außenschale ist als konkave Schale ausgebildet und verfügt über keine weiteren zentrierenden Elemente (siehe Reflektoraufbau *Abb. 3*). In der bisherigen Anwendung des „Reflektor 160“ ist eine zentrische Lagerung der Kugel in ihrer Außenschale irrelevant. Erst durch die Ausformung des Reflektors als Kugelreflektor entstand der Wunsch einer zentralen Lage der Kugel in ihrer Außenschale. Die Klebeschicht verfügt über eine vorgesehene Schichtdicke von  $100 \mu\text{m}$ . Aufgrund von Schwinden des PU-Klebers im Aushärtprozess kommt es zu Verzug und somit zur Lageänderung der Glaskugel in Bezug zur Außenschale. Eine vollständige zentrische Klebung (mit geringerer Toleranz) kann in dieser Anordnung nicht erreicht werden, für erste Untersuchungen wurde dies jedoch in Kauf genommen. Besonders bei antastenden Anwendungen mit dem Reflektor ist diese exzentrische Lage der Kugel in der Messunsicherheitsbetrachtung zu berücksichtigen.

Für den in den Reflektor einfallenden Messstrahl ergibt sich, dass lediglich der Strahlenteil, welcher den Mittelpunkt der Glaskugel durchdringt, eine Reflexion parallel zum einfallenden Strahlenteil erfährt. Für Strahlenteile, welche den Mittelpunkt der Glaskugel nicht durchlaufen, kommt es an den Übergängen Luft-Glas, Glas-Luft zu Brechung und somit zur Ablenkung des Lichtstrahles. Aufgrund der unterschiedlichen entstehenden Brechungswinkel beim Glasübergang kommt es zu sphärischer Aberration, was wiederum für unterschiedlich vom Mittelstrahl entfernte Strahlenteile (mit einem Auftreffwinkel  $\Phi$ ) unterschiedliche Austrittswinkel  $\Phi_1$  hervorruft (siehe *Abbildung 4*). Der Zusammenhang zwischen den so genannten Divergenzwinkeln  $\chi$  und der Einfallshöhe  $h$  des betrachteten Strahlanteiles bezogen zum Mittelstrahl ergibt sich zu YANG/FRIEDSAM (1999):

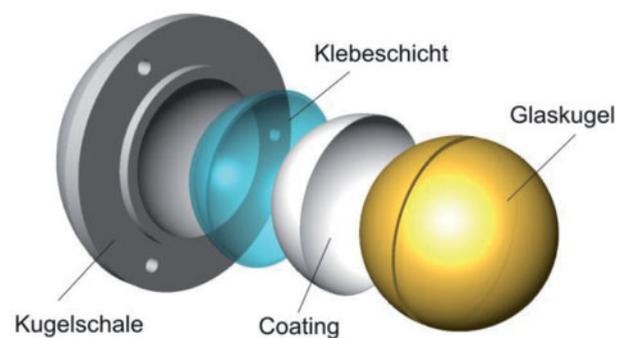


Abb. 3 | Reflektor 160A – Aufbau

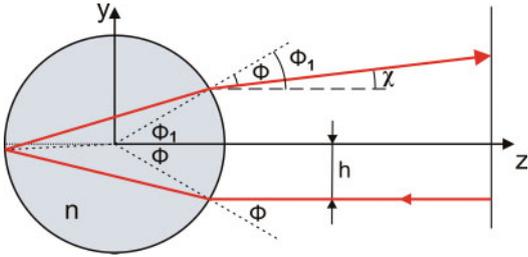


Abb. 4 | Strahlengang im Reflektor 160 bzw. 160A

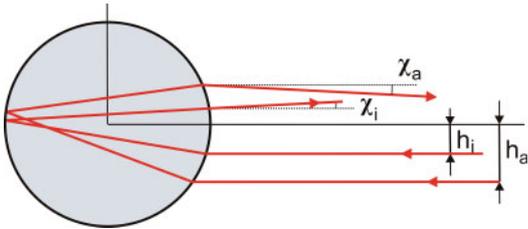


Abb. 5 | Konvergente und divergente Strahlenteile

$$\chi = 4 \cdot \sin^{-1} \left( \frac{\sin \Phi}{n} \right) - 2\Phi \quad (1)$$

Für Strahlenteile, welche nahe dem Mittelstrahl liegen, ergeben sich divergierende Strahlenteile. Dies führt zu einer Aufweitung des reflektierten Strahles. Weiter außen liegende Strahlenteile (üblicherweise im äußeren Bereich des Strahlquerschnitts), verlassen den Reflektor mit einem konvergierenden Winkel (siehe *Abb. 5*). Hierdurch kommt es im Nahbereich zu einer Verringerung des Strahlquerschnitts, bis die divergenten Anteile in einer gewissen Entfernung die konvergenten Anteile schneiden und zu einer Strahlaufweitung führen.

Für den Reflektor 160 bzw. 160A zeigen die einzelnen Strahlenteile das in *Abb. 6* dargestellte Verhalten. Für den betrachteten Strahldurchmesser des Leica Absolute Tracker AT901-LR von 2,5 mm ( $1/e$ ) ergeben sich somit im Bereich von 0 bis 1,25 mm Einfallshöhe lediglich divergierende Strahlenteile bis zu 0,2 mrad.

Durch die über den Strahldurchmesser unterschiedlichen Divergenzwinkel kommt es beim Durchlaufen des Strahles durch den Reflektor zu einer Deformation der einfallenden Wellenfront des Messstrahles. Dies führt zu einer ringförmigen Intensitätsverteilung des reflektierten Lichtes. Zusätzlich wird dessen Verteilung von der Entfernung des Reflektors von der Lichtquelle beeinflusst. Hierbei spielen sowohl der Strahlengang im Reflektor als auch die natürliche Strahlaufweitung des gaußverteilten Laserstrahles mit der Entfernung eine wesentliche Rolle.

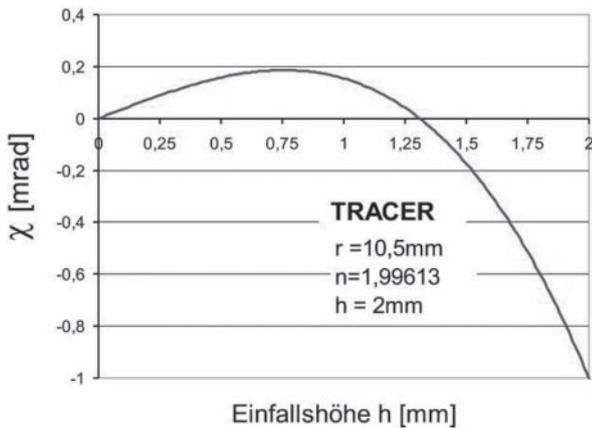


Abb. 6 | Ausfallwinkel (Divergenzwinkel) in Abhängigkeit von der Einfallshöhe für HeNe-Laser bei 632,8 nm

## 4 INTERFEROMETRISCHE UNTERSUCHUNG

Aufgrund der theoretischen Kenntnisse über den Strahlengang wurde untersucht, in wie weit der veränderte Strahlquerschnitt mit ungleichmäßigen Intensitätsverhältnissen Einfluss auf die interferometrische Messung besitzt. Erste Aufschlüsse über die Intensitätsverteilung des reflektierten Lichtes sowie das interferometrische (Phasen-)Verhalten der Lichtwelle konnten mittels interferometrischer Untersuchungen gewonnen werden. Der Reflektor 160A wurde hierzu in ein Michelson-Interferometer derart eingebracht, dass dieser den beweglichen Spiegel ersetzt und der Strahl seinen Weg über den Reflektor findet. Das vom Reflektor reflektierte Licht wird mit dem über den Referenzspiegel laufenden Licht überlagert. Aus ersten interferometrischen Untersuchungen ergab sich bei einer Bestrahlung über den gesamten Reflektorquerschnitt mit einem Laser der Messwellenlänge (632,8 nm), dass sich ein intensitätsstarker Ring an der Außenseite des Strahles bildet (siehe Abb. 7). Durch die Überlagerung des vom Reflektor reflektierten Licht mit dem Licht, welches über den Referenzspiegel verläuft, kann der Strahlengang im Lasertracker simuliert werden und es ergibt sich, dass im mittleren Bereich des Strahles ein Interferenzmuster erkennbar ist (Wechsel von Hell-Dunkel-Streifen; schräg verlaufend). Das Bestehen dieser Interferenzstreifen ist Voraussetzung für die Realisierbarkeit der interferometrischen Streckenmessung, denn das Interferenzmuster bestätigt, dass die vom Laser ausgesandte Wellenfront im mittleren Strahlenbereich als eine ebene Welle vom Reflektor zurück reflektiert wird und so auf den Detektor trifft. Das Interferometer erhält somit ein Signal mit brauchbarer Phaseninformation, welches es zur Auswertung der Streckendifferenzen erwartet.

Verglichen mit dem Interferenzbild eines Rot Ring Reflektors (RRR) (siehe Abb. 7) werden die reflektierten Strahlen sehr stark gebündelt. Beim RRR verlaufen die einfallenden und reflektierten Strahlen parallel, daher erscheint über den ganzen Bestrahlungsbereich ein durchgehendes Interferenzmuster. Über die Güte, die Genauigkeit oder das Verhalten bei der Messabfolge kann noch keine Aussage getroffen werden. Jedoch berechtigt dieses Ergebnis, begründete Untersuchungen zur Distanzmessgenauigkeit durchzuführen.

## 5 ADDITIONSKORREKTION

Durch die Verwendung von Glaskörpern im Reflektoraufbau muss bei Messungen auf den Reflektor 160A eine Additionskorrektur berücksichtigt werden. So werden Messungen mit Laserlicht aufgrund der geringeren Ausbreitungsgeschwindigkeit im Glaskörper um einen konstanten Wert zu lang bestimmt und müssen um diesen Wert korrigiert werden. Da auch bei Kugelreflektoren das Reflektorzentrum

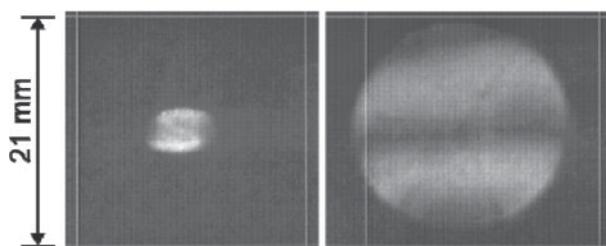


Abb. 7 | Interferenzbild R160A und RRR

und das Zentrum der Außenschale in einem Punkt liegen, muss für die gesamte Additionskorrektur noch ein geometrischer Anteil berücksichtigt werden. Eine Streckenverfälschung erfolgt für Abolutdistanzmessungen (ADM) wie auch interferometrische Messungen (IFM). Für interferometrische Messungen muss der Korrekturterm jedoch nicht explizit bestimmt werden, da aufgrund der relativen Streckenmessung dieser nicht relevant ist. Auf Grundlage der physikalischen Zusammenhänge kann die theoretische Additionskorrektur unter Berücksichtigung unterschiedlichster Parameter (Luftdruck, Temperatur und Feuchte bei der Brechungsindexbestimmung des Glases, Brechungsindex des Glases, Glastemperatur und Wellenlänge des Messstrahles) bestimmt werden. Für den Reflektor 160A ergibt sich bei Verwendung in Kombination mit einem Leica Absolute Tracker AT901 eine theoretische ADM-Additionskorrektur von 32,259 mm  $\pm$  0,007 mm. Diese Korrektur bezieht sich auf einen optimal zentrisch gelagerten Reflektor bei einer verwendeten ADM-Wellenlänge von  $\lambda = 795$  nm.

Mittels unterschiedlicher Messaufbauten konnte die ADM-Additionskorrektur praktisch ermittelt werden. Über das Reflektordefinitionstool der Lasertrackerbedieneroberfläche sowie einem Verfahren, welches auf Anmessung des Reflektors aus unterschiedlichen Richtungen (Drehteller) beruht und einem Direktvergleich mit einem CCR konnte die ADM-Additionskorrektur bestimmt werden. Die praktisch ermittelten Werte (siehe Tab. 1) weichen je nach Bestimmungsverfahren vom theoretischen Wert von 2  $\mu$ m bis 26  $\mu$ m ab. Mit Hilfe des Drehtellerversuches konnte zusätzlich der Einfallswinkelbereich des Reflektors von  $\pm 80^\circ$  bestätigt werden.

Aus technischen Gründen konnte in der Datenerfassungssoftware zum weiteren Verfahren lediglich der über die Reflektordefinition ermittelte Wert verwendet werden. Dieser ist jedoch verbunden mit einer im Verlauf der Reflektordefinition durchgeführten Bestimmung der IFM-Referenzstrecke zu einer definierten Reflektorhalterung (Vogelbad) am Lasertracker. Der Drehtellerversuch gibt somit den unabhängigsten ADM-Korrekturwert wieder, da hierbei die exzentrische Lage des R160A am geringsten ins Gewicht fällt, auch wenn dieser Aufbau insgesamt eine größere Messunsicherheit aufweist.

## 6 EXZENTRUMSBESTIMMUNG

Auf die Herausforderung einer zentrischen Klebung der Kugel wurde bereits hingewiesen. Durch die Anwendung eines Autokollimationsmikroskops konnte die exzentrische Lage der Kugel des R160A in Bezug zu ihrer Außenschale bestimmt werden. Hierbei wird der Reflektor auf einer Dreipunktaufgabe unterhalb des Mikroskops positioniert und Kollimation zwischen dem über den Reflektor projizierten Fadenkreuz und der festen Strichkreuzplatte des Kollimationsmikroskops hergestellt. Durch eine anschließende Drehung des Reflektors um  $180^\circ$  kann die exzentrische Lage der Kugel durch die Verschiebung des projizierten Fadenkreuzes bezogen auf die Mikroskopstrich-

Bestimmungsverfahren	ADM-Additionskonstante
Reflektordefinition	32,270 mm $\pm$ 0,015 mm
Drehteller	32,261 mm $\pm$ 0,028 mm
Direktvergleich	32,233 mm $\pm$ 0,040 mm

Tab. 1 | ADM-Additionskonstante aufgelistet nach Bestimmungsverfahren

kreuzplatte abgelesen werden. Zur Angabe der Exzentrumslage der Kugel wurde ein reflektorinternes Koordinatensystem definiert, welches sich auf die Kugelaußenschale bezieht. Abb. 8 zeigt die Lage des definierten Koordinatensystems sowie die schematisch dargestellte Lageexzentrizität der Glaskugel in ihrer Kugelschale. Für den R160A ergibt sich eine exzentrische Lage der Kugel in x- zu  $-20\ \mu\text{m}$  und in y-Richtung zu  $-30\ \mu\text{m}$ . Hierdurch ergibt sich ein radialer Versatz der Kugel von  $36\ \mu\text{m}$  zur Zentrumssolllage. Ein CCR weist im Vergleich eine Zentriergenauigkeit von weniger als  $10\ \mu\text{m}$  auf. Die Messunsicherheit betrug etwa  $10\ \mu\text{m}$ .

Besonders bei antastenden Messungen bringt die exzentrische Lage der Kugel Probleme mit sich. Vernachlässigt man in dieser Betrachtung die Additionskonstante und geht von einer exakten Messung zum Kugelmittelpunkt aus, so beschreibt der Kugelmittelpunkt bei Rotation um die Reflektor z-Achse einen Kreis. Somit ist besonders bei antastenden Messungen die Lage des Antastpunktes bezogen zum Kugelmittelpunkt zu beachten. Der Reflektor sollte daher immer mit gleicher Orientierung verwendet werden, um mögliche Einflüsse durch die Exzentrumslage zu vermeiden.

Abb. 9 zeigt die Auswirkungen der exzentrischen Lage der Glaskugel für kleine und große Einfallswinkel. So ergibt sich für einen kleinen Einfallswinkel ein sehr geringer Einfluss der exzentrischen Lage auf Grund der geringen Abweichungen von  $3\ \mu\text{m}$  in der Tiefe. Das Exzentrum d1 unterliegt somit nur geringen Auswirkungen der Exzentrizitätslage. Für große Einfallswinkel schlägt sich die exzentrische Lage der Kugel in Lagerichtung zusätzlich in der Streckenmessung nieder. Je nach Reflektorlage wird die Strecke zu kurz oder zu lang bestimmt. Für den dargestellten Fall wird die Strecke zu kurz bestimmt. Abstand d2 kann maximal auf  $136\ \mu\text{m}$  (Soll ist  $100\ \mu\text{m}$ ), also auf einen Lagefehler von  $36\ \mu\text{m}$ , anwachsen. Eine Betrachtung in dieser Weise ist lediglich im Schnittprofil möglich, welches Kugelmittelpunkt und Koordinatenursprung beinhalten. Für alle anderen Betrachtungen gestaltet sich die exakte Bestimmung der Exzentrumslage wesentlich komplexer, wobei die Korrekturer-

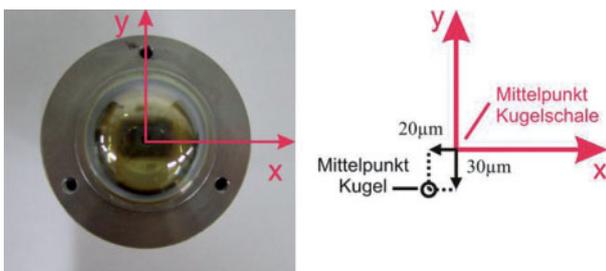


Abb. 8 | Reflektorinternes Koordinatensystem

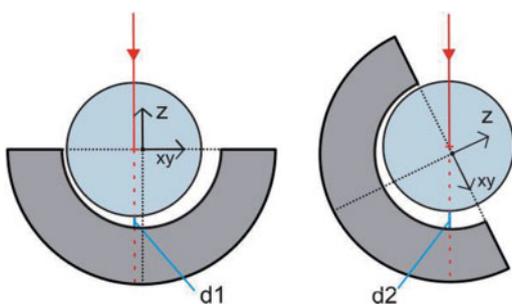


Abb. 9 | Schnittprofile

gebnisse sich im Rahmen der Unsicherheit der Exzentrumslagenbestimmung nicht signifikant von der vereinfachten Betrachtung unterscheiden.

## 7 INTENSITÄTSUNTERSUCHUNG

Über die Datenerfassungssoftware des Lasertrackers besteht die Möglichkeit einen internen Intensitätswert für das vom Reflektor rückstrahlende Licht auszulesen. Abbildung 10 zeigt die Untersuchung des Intensitätswertes für den R160A in Abhängigkeit von der Entfernung im Vergleich zu den Intensitätswerten eines Bruchresistenten Reflektors (BRR) mit einem Leica Absolute Tracker AT901-MR. Der Untersuchungsbereich erstreckt sich hierbei von „0 m“ bis 24 m, wobei die angegebenen Werte bei 0 m Entfernung die ermittelten Intensitätswerte in der Vogelbadposition anzeigen.

Für den R160A ist mit zunehmender Entfernung eine stetige Abnahme des Intensitätswertes zu verzeichnen. Dieser unterschreitet die von der Datenerfassungssoftware für gute Streckenmessung empfohlene untere Intensitätswertgrenze von 600 Werteeinheiten bei einer Entfernung von ca. 20 m. Aufgrund des Intensitätswertes sollte daher eine Messentfernung von 20 m nicht überschritten werden.

Die sich ergebenden Intensitätswerte über die Variation des Einfallswinkels (von  $-80^\circ$  bis  $80^\circ$ ) des Reflektors und zusätzlich in Abhängigkeit der Entfernung (bei 3 m, 6 m und 12 m) sind in Abb. 11 dargestellt. Es zeigt sich für den gesamten Einfallswinkelbereich von  $\pm 80^\circ$  in den unterschiedlichen Entfernungen ein konstanter Intensitätswert, welcher im Grenzeinfallswinkelbereich von  $80^\circ$  teilweise flach aber auch stark absinkt.

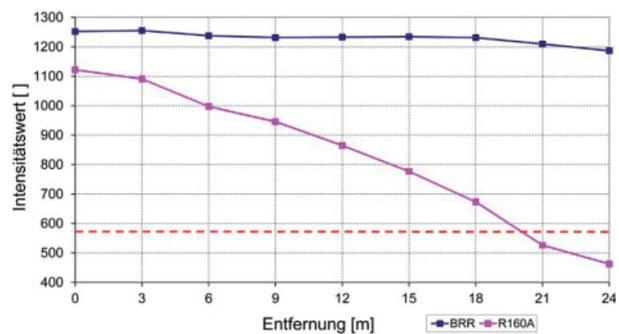


Abb. 10 | Intensitätswert in Abhängigkeit der Entfernung

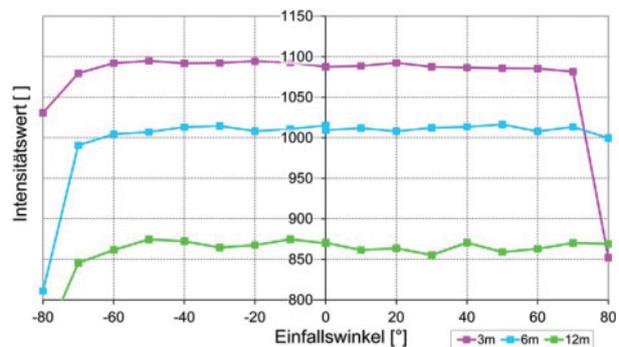


Abb. 11 | Intensitätswert in Abhängigkeit der Entfernung und des Einfallswinkels

Das teilweise starke Abfallen der Intensitätswerte lässt sich auf eine nicht optimale Ausrichtung des Reflektors 160A in der 0°-Stellung zurückführen. Aus der Betrachtung des Intensitätswertes über den Einfallswinkel ergibt sich, dass die empfangene Intensität lediglich durch die Entfernung zum Lasertracker beeinflusst wird.

### 8 DISTANZMESSUNG

Zur Prüfung der mit dem R160A erreichbaren Distanz wurden mit einem Leica Absolute Tracker AT901-MR interferometrische Distanzmessungen im Messbereich von 3 m bis 24 m auf den R160A und einen BRR in derselben Reflektorhalterung durchgeführt und die Streckendifferenzen verglichen. Abb. 12 zeigt die ermittelten Differenzen in Abhängigkeit der Entfernung. Als mittlere Differenz ergibt sich ein Wert von  $13,7 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ . Über den gesamten betrachteten Entfernungsbereich bleibt die radiale Differenz relativ konstant und es zeigt sich keine Verschlechterung der Messgenauigkeit auf den R160A mit zunehmender Entfernung. Messungen in 24 m Entfernung konnten problemlos erfolgen auch wenn der Intensitätswert an dieser Stelle den unteren Grenzwert schon unterschritten hat.

Der Entfernungsbereich dieser Untersuchung wurde durch den verwendeten Lasertracker begrenzt, daher bleibt eine Ermittlung der tatsächlich möglichen maximalen Distanzmessung mit dem R160A in Kombination mit einem Lasertracker mit größerer IFM-Reichweite (bspw. Leica Absolute Tracker AT901-LR) noch offen.

### 9 MESSUNGEN AUF A-TOM

Erste Eindrücke über das Messverhalten des Reflektors 160A in Kombination mit einem Lasertracker konnten mittels des am Geodätischen Institut des KIT entwickelten Systems zur 6DOF-Bestimmung dem A-TOM (HENNES/RICHTER (2008)) gewonnen werden. A-TOM führt einen Reflektor auf einer mechanisch sehr stabilen Kreisbahn (ca.  $40 \mu\text{m}$  ptp, vgl. HENNES/RICHTER (2008)). Für diesen Anwendungsfall kann die Exzentrumslage der Kugel in ihrer Außenschale vernachlässigt werden, da lediglich eine Kreisbewegung detektiert wird. Eine Untersuchung in diesem Anwendungsfall setzt die Anbringung der bestimmten Additionskorrektur voraus, um Abweichungen zur Kreisbahn aufgrund eines unzureichend bestimmten Additionskonstantenwertes zu unterbinden. Der Lasertracker wurde in Normalenrichtung zur Kreisebene durch den Kreismittelpunkt ausgerichtet. Betrachtet wird im Folgenden die radiale Abweichung der

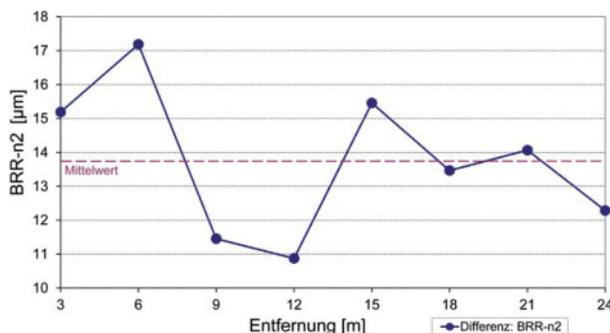


Abb. 12 | Streckendifferenzen - IFM

Kreisbahn zu einem mittels der Messpunkte ausgeglichenen Kreis. Hierbei weisen Messungen mit dem R160A Abweichungen von bis zu  $100 \mu\text{m}$  zum ausgeglichenen Kreis auf. Abb. 13 zeigt den Abweichungsverlauf über sechs gemessene Runden, aufgetragen über den einzelnen Kreispositionen bei einer Entfernung des A-TOMs vom Lasertracker von ca. 3,5 m. Der Bahnverlauf weist signifikante und reproduzierbare periodische Anteile über den gesamten Kreisverlauf auf. Bei unabhängiger Wiederholung des Versuches zeigen sich ähnliche periodische Anteile mit leicht abweichender Frequenz, Phase und Amplitude BERNHART (2010). Die CCR-Messungen (siehe Abb. 14) weisen zwar wesentlich geringere Abweichungen (max.  $20 \mu\text{m}$ ) zum ausgeglichenen Kreis auf, die Wiederholgenauigkeit der CCR-Messungen ist jedoch vergleichsweise schlechter als bei Messungen mit dem R160A. Trotzdem liegen die Ergebnisse in der Spezifikation von 20 ppm ( $k=2$ , für kinematische Messungen). In planarer Richtung (quer zur Kreisebene) ergibt sich für den R160A eine maximale Abweichung zum ausgeglichenen Kreis von ca.  $10 \mu\text{m}$  (siehe Abb. 15). Der Abweichungsverlauf der CCR-Messungen in planare Richtung ist in Abb. 16 dargestellt. Er gleicht dem des R160A sehr und weist ebenfalls eine maximale Abweichung zum ausgeglichenen Kreis von ca.  $10 \mu\text{m}$  auf. Aus diesem unterschiedlichen Verhalten in radialer und planarer Ebene lässt sich ein allgemein schlechteres Richtungsmessverhalten des Lasertrackers auf den R160A feststellen.

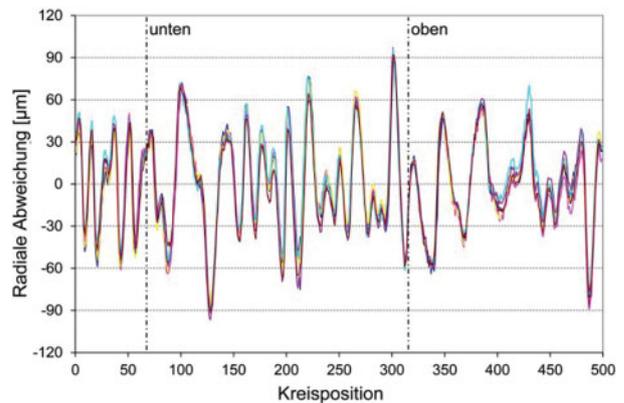


Abb. 13 | Abweichungsverlauf (radial) des R160A über sechs Runden auf A-TOM

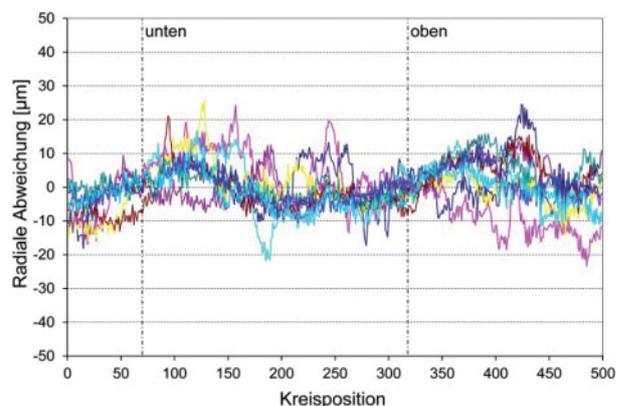


Abb. 14 | Abweichungsverlauf (radial) eines CCR über neun Runden auf A-TOM

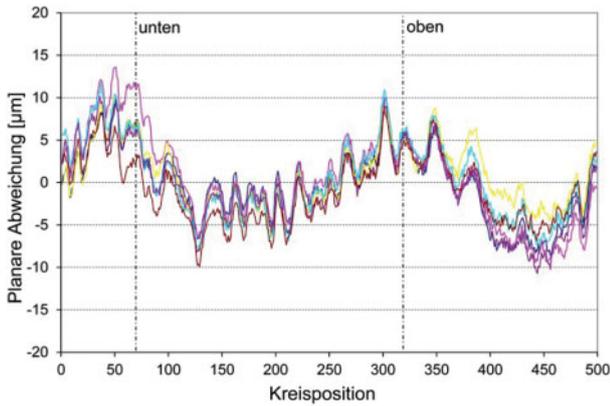


Abb. 15 | Abweichungsverlauf (planar) des R160A über sechs Runden auf A-TOM

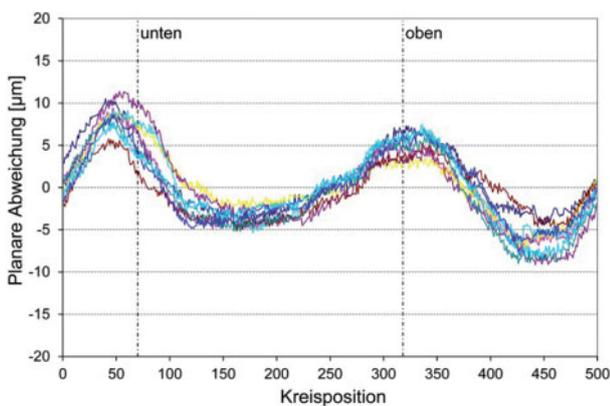


Abb. 16 | Abweichungsverlauf (planar) des CCR über neun Runden auf A-TOM

Die Ursache für dieses Verhalten wird in den nicht auf den Reflektor 160A angepassten Regelungsparametern des Lasertrackers vermutet. Mit diesem Anwendungsbeispiel wird gezeigt, dass eine Verwendung des R160A in Kombination mit einem Lasertracker im kinematischen Betrieb problemlos im Rahmen einer Messunsicherheit von etwa 35 µm möglich ist. Es konnte eine sehr gute Wiederholgenauigkeit erzielt werden. Die folgenden Untersuchungen der Ursache der großen zyklischen und reproduzierbaren Abweichungen zum ausgeglichenen Kreis wird Aussagen über die Kalibrierfähigkeit in Kooperation mit einem Lasertracker zulassen.

## 10 ZUSAMMENFASSUNG

Bei der Untersuchung des R160A konnte eine grundsätzliche Funktionstauglichkeit des Reflektors für die Kombination mit einem Leica Absolute Tracker AT901 gezeigt werden. Dieser kann stellvertretend zumindest für andere Lasertracker mit demselben ADM-Prinzip angesehen werden. Die Veränderung des Strahlquerschnitts und seines Intensitätsprofils aufgrund des Durchlaufens des Lichtes durch den R160A ist geometrisch erklärbar, beeinflusst die Arbeitsweise des Lasertrackers jedoch nicht derart, dass dieser keine Messungen vollziehen kann. Der bisher verwendete Messbereich des R160A konnte in Kombination mit einem Lasertracker auf 24 m erweitert werden, wobei diese Weite durch das Trackersystem begrenzt wurde. Der

große Einfallswinkelbereich von  $\pm 80^\circ$  wurde nachgewiesen und damit eine Erweiterung des Arbeitsbereiches im Vergleich zu CCR. Bei antastenden Messungen ist die Orientierung des Reflektors aufgrund der exzentrischen Lage der Reflektorkugel in ihrer Außenschale zu berücksichtigen. Ein Einsatz dieses Reflektors in Kombination mit Lasertrackern bei geforderten Messunsicherheiten unter 35 µm gestaltet sich momentan noch schwierig, da die Problematik der relativ schlechten Richtungsmessung nicht eindeutig geklärt werden konnte. In Anwendungen mit geringeren Genauigkeitsansprüchen kann der Reflektor jedoch jetzt schon in Kombination mit einem Lasertracker eingesetzt und die großen Vorteile durch den erweiterten Einfallswinkelbereich ausgenutzt werden. Im kinematischen Bereich kann die Spezifikation 20 ppm für  $k=2$  eingehalten werden.

## 11 AUSBLICK

Für die Zukunft gilt es das Verhalten von Lasertrackern in Kombination mit dem R160A genauer zu untersuchen. Hierzu, zählt zum einen eine Ermittlung der maximalen Reichweite sowie das Fehlerverhalten der Messwerte bei größeren Einfallswinkeln, besonders jedoch das Verhalten des Lasertrackers für die Beobachtung des Reflektors auf einfachen geometrischen Linien. Hieraus können weitere Rückschlüsse über die Kalibrierfähigkeit des Reflektors im Zusammenwirken mit einem Lasertracker gewonnen werden.

## LITERATUR

- [1] Bernhart, F. (2010): Eigenschaften von Kugelreflektoren; Diplomarbeit am Geodätischen Institut (GIK) des Karlsruher Institut für Technologie (KIT); unveröffentlicht
- [2] Hennes, M.; Richter E. (2008): A-TOM- eine neuartige instrumentelle Lösung für die hochpräzise und echtzeitnahe 6DOF-Bestimmung; AVN, 8-9:301-310
- [3] Yang, B.; Friedsam, H. (1999): Ray-Tracing Studies for a Whole-Viewing-Angle Retroreflector, Conference: International Workshop on Accelerator Alignment; Grenoble (FR), <http://www.slac.stanford.edu/econf/C9910183/papers/045.PDF>, zuletzt besucht 13.02.2011

Dipl.-Ing. Franziska Bernhart

KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT)  
GEODÄTISCHES INSTITUT

Englerstr. 7 | D-76131 Karlsruhe  
E-Mail: franziska.bernhart@kit.edu



Prof. Dr.-Ing. Maria Hennes

KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT)  
GEODÄTISCHES INSTITUT

Englerstr. 7 | D-76131 Karlsruhe  
E-Mail: maria.hennes@kit.edu



Manuskript eingereicht: 15.4.2011 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet