Autokollimationszielungen mit dem Leica Absolute Tracker AT401

Autocollimation with Leica Absolute Tracker AT401

Stefan Hauth, Martin Schlüter

Autokollimationszielungen ergänzen die hochgenaue 3D-Koordinatenmesstechnik und ermöglichen die präzise Festlegung von Richtungen im Raum auch unter beengten räumlichen Verhältnissen. Exemplarisch untersuchen wir die Durchführung von Autokollimationzielungen mit einem Lasertracker. Um die neuartige Vorgehensweise mit dem Leica Absolute Tracker AT401 dem klassischen Prozedere mit Industrietheodolit und Autokollimationsokular vergleichend gegenüber stellen zu können, vermessen wir einen verspiegelten Prüfkörper dreimal unabhängig voneinander mit unterschiedlichen Gerätesystemen.

Schlüsselwörter: Autokollimation, Lasertracker, Theodolit, Planspiegel, Referenzwürfel

Autocollimation complements the high-precision 3D-coordinate measurement technology and enables the precise determination of directions in space even in narrowness. We study the implementation of autocollimation with a laser tracker exemplarily. To compare the new approach with the Leica Absolute Tracker AT401 and the classical way using an industrial theodolite and an autocollimation eyepiece, we measure a mirrored reference cube three times independently of each other with different hardware systems.

Keywords: Autocollimation, laser tracker, theodolite, plane mirror, reference cube

1 HINTERGRUND

In der industriellen Messtechnik haben sich Lasertracker als mobile 3D-Messsysteme höchster Genauigkeit mit Reichweiten bis über 100 m etabliert. Aus Sicht des Anwenders dienen sie heute primär zur Lösung statischer Messaufgaben, wie z.B. dem Aufmaß von Bolzen für eine großtechnische Einrichtung /Juretzko 2009/, kommen aber zunehmend auch bei kinematischen Fragestellungen erfolgreich zum Einsatz /Juretzko et al. 2008/. Grundsätzlich sind Lasertracker polare Messsysteme, welche einzelne 3D-Koordinaten durch lasergestützte Zielung auf einen Retroreflektor gewinnen. Herstellerübergreifend werden von den Lasertrackern der Anbieter Automated Precision, Faro und Hexagon Metrology in der Regel Tripelspiegelreflektoren in Kugelfassung mit Durchmessern von 1,5" oder 0,5" als Retroreflektoren genutzt.

Bei aller Flexibilität der computerunterstützten 3D-Koordinatenmesstechnik gilt stets, dass sich aus 3D-Punkten nur dann eine präzise Richtung im Raum berechnen lässt, wenn die beteiligten Punkte einen ausreichend großen räumlichen Abstand zueinander aufweisen. Für klassische Autokollimationszielungen mit Autokollimationstheodoliten oder elektronischen Tachymetern mit Autokollimationsokular gilt diese Einschränkung nicht: Hier kann bereits mit einer einzigen Zielung auf einen Planspiegel die Richtungsmessgenauigkeit des Messinstruments auf das Messobjekt übertragen werden. Von daher ist es als technologischer Quantensprung zu werten, dass der Leica Absolute Tracker AT401 zukünftig mit einer Option für hochgenaue Autokollimationszielungen auf einen Planspiegel aufgewertet sein wird, zumal der AT401 in punkto Winkelmessgenauigkeit den aktuellen Industrietachymetern nicht nachsteht /Gassner et al. 2011/.

Zukünftige Anwendungsfelder für autokollimierende Lasertracker werden u.a. aus Nischenbereichen erwachsen, die heute von Autokollimationstheodoliten bedient werden. Ein Feld sind die diversen Fertigungsstufen beim Satellitenbau, wo die geometrische Referenzierung der Komponenten zum übergeordneten Satellitenkoordinatensystem über einen verspiegelten Referenzwürfel vorgenommen wird (*Abb. 1*). Diese Anwendung bildet den Hintergrund für die im Folgenden dargestellten Untersuchungen.

Weitere Anwendungsfelder liegen voraussichtlich bei Ausrichtearbeiten an räumlich unzugänglichen Komponenten von großtechnischen Anlagen. Ein typisches Beispiel sind die exponierten Sekundärspiegel von Radioteleskopen, wo Autokollimationszielungen auch zukünftig sinnvoll zum Einsatz kommen werden.



Abb. 1 | Verspiegelter Referenzwürfel an einer Satellitenkomponente (Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG)

2 FUNKTIONSWEISEN

2.1 Kollimation und Autokollimation

Bei der Kollimation wird ein Kollimationsfernrohr (auch Kollimator genannt) als Ziel für eine Richtungsbeobachtung verwendet. Der Kollimator ist ein auf unendlich fokussiertes Fernrohrsystem, dessen Strichkreuz okularseitig beleuchtet wird. Die Lichtstrahlen verlaufen somit ausgehend vom Kollimatorobjektiv parallel zur Zielachse. Das Kollimatorstrichkreuz kann mit einem auf unendlich fokussierten Messfernrohr beobachtet werden. Die Strichkreuze von Kollimator und Messfernrohr koinzidieren, wenn die Zielachsen beider Fernrohre zueinander parallel stehen. Sind die beiden Achsen zueinander nicht streng parallel, so fallen auch die beiden Strichkreuze nicht zusammen und die Verschiebung der beiden Marken entspricht der Richtungsdifferenz beider Zielachsen zueinander, vgl. /Schwarz 1995/.

Bei der Autokollimation wird der Kollimator durch einen Planspiegel ersetzt. Nun muss das Strichkreuz des Messfernrohrs beleuchtet sein, damit sein Spiegelbild beobachtet werden kann. Im Idealfall wird beim Autokollimationstheodolit ein zweites, negatives Strichkreuz in den Strahlengang des Messfernrohrs eingespiegelt. Das vom Strichkreuz ausgehende Licht verlässt das auf unendlich fokussierte Fernrohr als paralleles Strahlenbündel und wird vom Planspiegel reflektiert. Steht der Planspiegel exakt rechtwinklig zur Zielachse, so fallen das Strichkreuz des Messsystems und das reflektierte negative Strichkreuz zusammen, wie in *Abb. 2* dargestellt. Ist der Planspiegel um einen Winkel α geneigt, so werden die reflektierten Strahlen um 2 α abgelenkt. Das projizierte Strichkreuz verschiebt sich somit entsprechend, vgl. erneut /Schwarz 1995/.

Mit Kollimations- und Autokollimationszielungen können sehr hohe Richtungsgenauigkeiten erreicht werden. Die wesentlichen Gründe dafür sind:

- Es wird eine ideal einstellbare Zielmarke anvisiert,
- es ist kein Umfokussieren notwendig; dadurch entfällt ein eventueller Gang der Fokussieroptik als potenzielle Fehlerquelle,
- der Lichtweg durch die Atmosphäre kann beliebig kurz sein und stellt in der Regel keine Störungsquelle dar.

2.2 Kollimation und Autokollimation mit Laserstrahlen

Bei Laserlicht handelt es sich im Idealfall ebenfalls um ein paralleles Strahlenbündel; hier trifft die Modellannahme eines Strahlenbündels mit geringer Divergenz gut zu. Laserlicht eignet sich deswegen gut für Kollimations- und Autokollimationsbeobachtungen. /Schlüter et al. 2009/ zeigen die Nutzung von Kollimationszielungen auf einen Laserstrahl bei der Montage von Satellitenbauteilen. Der Laserstrahl zielt dabei auf einen Präzisionstheodoliten mit Okularkamera und bildet sich in der Strichkreuzebene als Leucht-



Abb. 2 | Koinzidenz der Strichkreuze beim Blick durch das Okular des Autokollimationstheodolits Leica TM5100A während der Zielung auf einen Planspiegel

punkt ab. Aus der Verschiebung zwischen Laserpunkt und Strichkreuzmittelpunkt lässt sich die Richtungsdifferenz zwischen der Zielachse des Theodolits und dem Laserstrahl automatisiert berechnen.

Der Leica Absolute Tracker AT401 nutzt zur Autokollimation auf einen Planspiegel ebenfalls einen Laserstrahl. Dabei wird, wie auch bei den Retroreflektoren, das ATR-System (Automatic Target Recognition) zur automatischen Anzielung verwendet: Ein infraroter Strahl wird koaxial in Richtung Ziel ausgesendet und der reflektierte Strahl trifft im Gerät auf einen CMOS-Sensor. Aus der Bildposition des reflektierten Strahls auf den CMOS-Sensor, der Brennweite und der Größe eines Pixels kann die Richtung zum Ziel berechnet werden. Dadurch reicht es auch für den Fall der Autokollimationszielung aus, wenn Planspiegel und Lasertracker im Bereich des Blickfelds FOV (Field of View) des ATRs zueinander ausgerichtet werden /Leica Geosystems 2010/.

3 MESSAUFBAU UND AUSWERTUNG

Zur Überprüfung der Messgenauigkeit des Leica Absolute Trackers AT401 bei einer Autokollimationszielung wird ein Messaufbau zu Grunde gelegt, welcher ansonsten bei der Vermessung von verspiegelten Referenzwürfeln Verwendung findet, wie in *Abb.* 1 dargestellt. Dabei wird ein Prüfkörper von zwei Standpunkten aus beobachtet, siehe *Abb.* 3 und 4. Der Prüfkörper ist ein rechtwinkliges Prisma mit einer Aluminium-Spiegelbeschichtung auf den Außenseiten der beiden Katheten und einer unbeschichteten Hypotenuse. Die verspiegelten Flächen sind 25 mm x 25 mm groß und simulieren hier zwei Planflächen eines Referenzwürfels. Der Hersteller gibt eine Toleranz der Prismenwinkel von $\pm 2^{\circ}$ (entspricht ± 37 mgon) und eine Oberflächengenauigkeit von 1/8 λ (Wellenlänge) an. Bei einer Wellenlänge von 635 nm beträgt die Abweichung von einer Ebene 79 nm und somit im Bezug auf die Größe der Spiegelfläche 0,2 mgon (wenn



Abb. 3 | Zielung mit dem Leica Absolute Tracker AT401 auf den rechtwinkligen Prüfkörper

man davon ausgeht, dass sich die Herstellerangaben auf die Spiegelenden beziehen (dieser Sachverhalt konnte auch nach wiederholter Rücksprache mit dem Anbieter Edmund Optics GmbH nicht eindeutig geklärt werden)).

Als Referenzziel für die Autokollimationsbeobachtungen wird ein Planspiegel mit einem Durchmesser von 25 mm verwendet. Der Hersteller gibt für diesen Spiegel eine Oberflächengenauigkeit von 1/10 λ an, dies entspricht 64 nm bzw. 0,16 mgon.

Von den Standpunkten A und B werden stets die Richtungen zu dem Referenzziel und zur jeweiligen Spiegelfläche gemessen (*Abb. 4*). Die Beobachtungen erfolgen stets in beiden Fernrohrlagen und werden in mehreren Vollsätzen wiederholt.

Eine zweite unabhängige Vermessung des Prüfkörpers wird mit einem Motortheodolit Leica TM5100 samt Autokollimationsokular GOA2 durchgeführt, bei der dritten Messung kommt ein Kern E2 Autokollimationstheodolit zum Einsatz (*Abb. 5*). Als Referenzziel wird bei den Theodolitmessungen mit dem Leica TM5100 ein Kollimator Möller-Wedel K300/65 anstelle des Planspiegels verwendet.

Alle Messgeräte sind horizontiert und der Kompensator aktiviert, somit beziehen sich alle Zenitdistanzen auf die horizontierte Stehachse und können so direkt verwendet werden. Die Horizontalrichtungen auf die Spiegelflächen werden auf die Referenzrichtung reduziert. Da der Prüfkörper nicht horizontiert ist, wird der Raumwinkel



Abb. 4 | Messaufbau für die Genauigkeitsuntersuchungen

zwischen den Spiegelflächen berechnet. Dazu ist zunächst der 3D-Richtungsvektor der Spiegelnormalen von beiden Standpunkten aus zu bestimmen.

HzHorizontalwinkel zwischenReferenzrichtung und SpiegelflächeZdZenitdistanz auf die Spiegelfläche

$$\vec{r_A} = \begin{bmatrix} \sin Hz_A \cdot \sin Zd_A \\ \cos Hz_A \cdot \sin Zd_A \\ \cos Zd_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$
(1)

Richtungsvektor der Spiegelnormalen vom Standpunkt A

$$\vec{r_{B}} = \begin{bmatrix} \sin Hz_{B} \cdot \sin Zd_{B} \\ \cos Hz_{B} \cdot \sin Zd_{B} \\ \cos Zd_{B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$
(2)

Richtungsvektor der Spiegelnormalen vom Standpunkt B

Der Schnittwinkel α zwischen beiden Richtungsvektoren ergibt sich aus dem Skalarprodukt:

$$\cos \alpha = \overrightarrow{r_A} \cdot \overrightarrow{r_B} \quad \text{mit} \quad \left| \overrightarrow{r_A} \right| = 1 \quad \text{und} \quad \left| \overrightarrow{r_B} \right| = 1$$
 (3)

Schnittwinkel α der Spiegelnormalen

4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

4.1 Identische Auftreffpunkte des Lasers

Bei dem Messaufbau nach Abschnitt 3 werden die Trackerstandpunkte so gewählt, dass der Laser des Leica Absolute Trackers AT401 von beiden Standpunkten aus den nahezu gleichen Auftreffpunkt auf den Referenzspiegel nutzt. Diese Bedingung wird durch Zwangszentrierungen auf beiden Standpunkten mit ausreichender Genauigkeit sichergestellt.

Die Autokollimationszielungen mit dem Leica Absolute Tracker AT401 erfolgen automatisch in zwei Lagen. Pro Trackerstandpunkt werden jeweils 3 Vollsätze registriert und ausgewertet. Die Zielungen mit den Theodoliten Kern E2 und Leica TM5100 erfolgen ebenfalls in beiden Fernrohrlagen und mit jeweils vier Vollsätzen pro Standpunkt. Die Herstellerangaben für die Genauigkeit der Winkelmessung nach DIN 18723 des AT401 und des TM5100 beträgt 0,15 mgon. Dieser Zahlenwert entspricht auch der Herstellerangabe für die Genauigkeit der Horizontalwinkelmessung des Kern E2. Da die Kippachshöhen der Messgeräte und die Spiegelflächen jeweils auf nahezu gleicher Höhe liegen, wirken sich zufällige Messfehler in den Zenitdistanzen nicht signifikant auf den resultierenden Schnittwinkel α der Spiegelnormalen aus. Die zu erwartende Standardabweichung für den Schnittwinkel der Spiegelnormalen liegt damit bei 0,2 mgon.

Aus den drei unabhängigen Messungen ergibt sich für den Prüfkörper ein Schnittwinkel α der Spiegelnormalen von 99,9982 gon (*Tabelle 1*). Die Differenzen der Ergebnisse je nach eingesetztem Messgerät betragen maximal 0,1 mgon, diese Abweichungen sind zulässig. Die Standardabweichungen σ für die Schnittwinkel α liegen mit 0,1 mgon bzw. 0,15 mgon sogar ein wenig unter den zu erwartenden Standardabweichungen.



Abb. 5 | Zielung mit dem Kern E2 samt Digitalkameraaufsatz auf den rechtwinkligen Prüfkörper

4.2 Abweichende Auftreffpunkte des Lasers

Der zweite Messaufbau ist prinzipiell identisch mit dem aus Abschnitt 4.1, lediglich die Positionen der Standpunkte sind geringfügig verändert. Dadurch stimmen die Auftreffpunkte des Laserstrahls auf den Referenzspiegel von den beiden Standpunkten aus nicht mehr überein, sondern weichen um ca. 10 mm auf dem Referenzspiegel voneinander ab. Während die Standardabweichung aus vier Vollsätzen des Leica Absolute Tracker AT401 pro Standpunkt auf den rechtwinkligen Prüfkörper entsprechend dem veränderten Messaufbau mit $\sigma = 0,13$ mgon erneut den Erwartungen entspricht, resultiert mit $\alpha = 99,9990$ gon ein um 0,8 mgon von den Ergebnissen aus den ersten Messserien abweichendes Ergebnis. Für die Theodolitmessungen ergeben sich von den neuen Standpunkten aus keine signifikanten Änderungen gegenüber den in *Tabelle 1* dargestellten Ergebnissen.

Welche Ursache kommt für die beobachteten Abweichungen in Frage? Die Autokollimation mit dem Laserstrahl nutzt im Vergleich zur klassischen Autokollimation nur einen eng begrenzten Teil der verspiegelten Fläche. Weichen die Auftreffpunkte auf der Spiegelfläche voneinander ab, so bewirken eventuelle Unebenheiten der Spie-

	lpha [gon]	σ [mgon]
Leica AT401	99,9982	0,10
Leica TM5100	99,9983	0,10
Kern E2	99,9982	0,15

 Tabelle 1
 Ergebnisse der einzelnen Messsysteme f
 ür den rechtwinkligen Pr
 üfkörper

gelfläche entsprechend deutlichere Abweichungen in der Richtungsmessung. Da bei der "klassischen" Autokollimationszielung visuell über einen wesentlich größeren Teil der gesamten Spiegelfläche integriert wird, ist zu erwarten, dass sich lokale Unebenheiten auch nur entsprechend geringfügiger auswirken. Die Herstellerangaben für die Planfläche des Referenzspiegels lassen zwar zunächst eher geringere Abweichungen erwarten, schließen aber nicht alle Fehlerquellen ein: Neben Fertigungsfehlern könnte auch die Planspiegelhalterung eine Quelle für Unebenheiten des Referenzspiegels darstellen, Verspannungen könnten durch Unebenheiten oder Staubpartikel zwischen Vorschraubring und Spiegelfläche bedingt sein.

Bestätigt wird unsere Vermutung einer geringfügigen Unebenheit der Referenzspiegeloberfläche im Nachhinein durch zusätzliche Beobachtungen mit dem Autokollimationstheodolit: Während der Zielungen bleiben die Positionen von Theodolit und Referenzspiegel unverändert. Eine Blende mit runder Öffnung wird direkt vor dem Spiegel eingesetzt, um nur einen kleinen Ausschnitt der Referenzspiegeloberfläche visuell zu nutzen. Die Richtungsbeobachtungen weichen dann um bis zu 0,5 mgon voneinander ab.

Als Fazit bleibt, dass zukünftig für die Autokollimation mit dem Absolute Tracker Leica AT401 eine ausreichende Qualität des eingesetzten Referenzspiegels vorab sicherzustellen ist. Es bietet sich an, diese Überprüfung direkt mit dem AT401 auf einem Linearschlitten (ähnlich wie in *Abb. 5* unten erkennbar) nach dem in *Abb. 6* vorgeschlagenen Aufbau durchzuführen.

Dieser Aufbau ist so umzusetzen, dass die Eigenschaften der kompletten Planspiegeloberfläche erfasst werden, also z.B. durch Höhenverstellung des AT401 auf dem Stativ und die Erfassung mehrerer horizontaler Profile oder durch Rotation des zu prüfenden Planspiegels und die Erfassung mehrerer radialer Profile.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit dem Leica Absolute Tracker AT401 werden die sehr hohen Richtungsgenauigkeiten der klassischen Autokollimationsverfahren erreicht. Bei den von uns durchgeführten Messreihen zeigt sich deutlich, dass dafür mit dem Leica Absolute Tracker AT401 nur noch etwa 1/3 der bei den Theodolitmessverfahren anzusetzenden Beobachtungszeit notwendig ist. Durch den hohen Grad an Automatisierung (z.B. ATR) ist der Absolute Tracker AT401 wesentlich einfacher zu bedienen als ein Autokollimationstheodolit und erfordert dadurch



Abb. 6 | Vorschlag eines Messaufbaus für die Planspiegelprüfung mit dem Leica Absolute Tracker AT401 einen geringeren Schulungsaufwand. Die Messdurchführung ist besonders für einen eher ungeübten Bediener weniger fehleranfällig.

Diesen Vorteilen stehen geringfügig erhöhte Anforderungen an die zu nutzenden Referenzplanspiegel gegenüber. In vielen Fällen werden vorhandene Planspiegel nach der von uns vorgeschlagenen Prüfung auch mit dem AT401 weiter verwendet werden können.

DANK

Wir bedanken uns bei Frau Steinecker und Herrn Saure von Hexagon Metrology für tatkräftige Unterstützung, freundliche Beratung und die Bereitstellung des Leica Absolute Trackers AT401 für unsere Untersuchungen.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 1777X09 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

LITERATUR

Gassner, G.; Ruland, R. (2011): Instrument tests with the new Leica AT401. SLAC-PUB-14300.

Juretzko, M. (2009): Positionsbestimmung der Elektrodenmodule des KAT-RIN-Experiments mit Hilfe eines Lasertrackers. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 116(2009)6, 220-230.

Juretzko, M.; Hennes, M.; Schneider, M.; Fleischer, J. (2008): Überwachung der raumzeitlichen Bewegung eines Fertigungsroboters mit Hilfe eines Lasertrackers. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 115(2008)5, 171-178.

Leica Geosystems (2010): Leica Absolute Tracker AT401. White Paper, Hexagon Metrology, Unterentfelden, Schweiz.

Schlüter, M.; Hauth, S.; Heß, H. (2009): Selbstkalibrierung motorisierter Digitalkameratheodolite für technische Präzisionsmessungen. In: Zeitschrift für Vermessungswesen (zfv), 134(2009)1, 22-28.

Schwarz, W. (1995): Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau. DVW-Schriftenreihe 13, Konrad Wittwer, Stuttgart.



Manuskript eingereicht: 16.05.2012 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet