

Das passive Exzentrum

Streckenmessung um die Ecke

Zusammenfassung

Die direkte Messung eines verdeckten Zielpunktes per Tachymeter ist mit Hilfe eines Orthogonalspiegels möglich. Der Einsatz eines Orthogonalspiegels kann auch dazu genutzt werden, die Reichweite der reflektorlosen Streckenmessung zu erhöhen. Der von Argus GeoTech und FPM Holding entwickelte Orthogonalspiegel wurde an der TU Dresden getestet. Gegenstand des Beitrages sind das Messprinzip, die geodätische Anwendung, Fehlertheorie und die Testergebnisse.

Abstract

The direct measurement of a hidden point using a tachymeter can be done with an orthogonal mirror. The entry of an orthogonal mirror can increase the range of a reflectorless EDM. The orthogonal mirror, developed by Argus GeoTech and FPM Holding, was tested at the Dresden University of Technology. The article involves the measurement principle, the geodetic use, the instrument errors and the test results.

Historie

Der um 1740 erstmals von dem Londoner Mechaniker Adams gebaute Winkelspiegel hat in der Geodäsie seine Bedeutung nahezu verloren. Lediglich beim Prinzip des variablen Winkelspiegels, wie z.B. in den Freiburger Sextanten, kommen tatsächlich noch Spiegel zum Einsatz. Neben Wollastonschen Prismen und Sphenoiden werden heute in der Geodäsie vorwiegend Pentaprismen eingesetzt, wenn es darum geht, einen optischen Zielstrahl oder Laser um 100 gon auszulenken [1]. Die Funktion, einen parallel zu den Flächennormalen der Grenzflächen einfallenden optischen Strahl unabhängig vom Einfallswinkel α um exakt 100 gon in der Einfallsebene auszulenken, erfüllen allerdings nur fehlerfrei geschliffene Prismen. In der Regel besitzt jedes Pentaprisma, auch Fünfseitprisma oder Pentagonalprisma genannt, einen Schlifffehler δ , um den der Anstellwinkel der

Reflexionsflächen von 50 gon abweicht. Der Ablenkungswinkel innerhalb des Prismas wird dadurch um 2δ verfälscht. Aus dem Schlifffehler der Prismen resultiert ein zusätzlicher, vom Einfallswinkel α_1 und vom Brechungsindex n_{Prisma} des Prismenmaterials abhängiger Auslenkungsfehler γ , hervorgerufen durch unterschiedliche Brechungswinkel an Ein- und Austrittsfläche des Prismas. Unter der Annahme $n_{\text{Luft}} = 1$ ergibt sich der Auslenkungswinkel φ aus

$$\varphi = 100\text{gon} + 2\delta + \gamma \quad \text{mit} \quad \gamma = \alpha_1 - \arcsin\left(n_{\text{Prisma}} \cdot \sin\left(2\delta + \arcsin\left(\frac{\sin\alpha_1}{n_{\text{Prisma}}}\right)\right)\right)$$

Bei großen Pentaprismen muss die von α und δ abhängige Exzentrizität e des Strahlenschnittpunktes gegenüber der Solllage (Stehachse) berücksichtigt werden (siehe auch Bild 4). Überlagert werden diese Effekte noch durch einen möglichen Fehler des Anstellwinkels von Ein- und Austrittsfläche (nominell 100 gon), der die Brechungswinkel an den Grenzflächen beeinflusst. Gänzlich unübersichtlich wird diese Fehlerbetrachtung, wenn dann zusätzlich zur Längsauslenkung α auch noch eine Querauslenkung β des einfallenden Zielstrahles gegenüber der Solllage stattfindet (Bild 1).

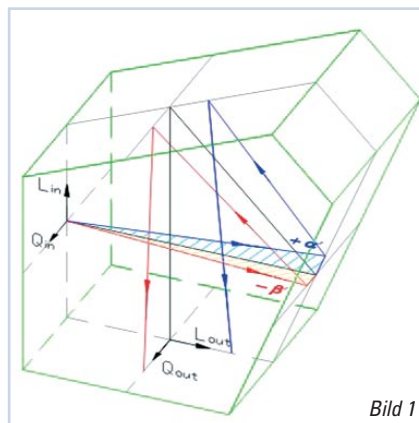


Bild 1

Aufgrund der Vielzahl der möglichen Fehlerquellen geben Hersteller der Einfachheit halber oft nur eine Toleranz für die Gesamtablenkung des Zielstrahles bei $\alpha = 0$ und $\beta = 0$ an. Prismen mittlerer Genauigkeit weisen eine Toleranz des Ablenkungswinkels φ

von bis zu $\pm 1'30''$ auf, bei Prismen höherer Genauigkeit beträgt die Toleranz bis zu $\pm 30''$. Kombiniert man mehrere Pentaprismen in einem Strahlengang, summieren sich die Einzelfehler auf. Allenfalls durch günstige Kombination von Prismen mit Unterschliff und Prismen mit Überschliff kann der Gesamtfehler minimiert werden [2]. Für kleinräumige Anwendungen, wie z. B. bei der Seespiegelfixierung [3] oder bei der Gestaltung des Lichtweges innerhalb geodätischer Instrumente und Kame-

ras, hat dies eher untergeordnete Bedeutung. Jedoch für die in diesem Beitrag erläuterten großräumigen Einsatzfälle mit $\alpha \geq 0$ und $\beta \geq 0$ können Prismen mit Schliff Fehlern im Bereich von $30''$ und mehr den Anforderungen nicht gerecht werden. Der deshalb in Zusammenarbeit von Argus GeoTech GmbH und FPM Holding GmbH entwickelte Orthogonalspiegel ist die hochpräzise Realisierung eines historischen Winkelspiegels, dessen Visurfenster zumindest in der optionalen Halbspiegel-Ausführung wiederzufinden ist. Der Begriff „Orthogonalspiegel“ wurde u. a. deshalb eingeführt, weil die Bezeichnung „Winkelspiegel“ mittlerweile auch für diverse andere Spiegelanordnungen verwendet wird, die nicht in den Bereich der Geodäsie fallen. Der Orthogonalspiegel wurde im Rahmen einer Studienarbeit an der TU Dresden hinsichtlich seiner Verwendbarkeit bei der tachymetrischen Vermessung getestet.

Die Motivation

Bild 2 zeigt einen solchen Orthogonalspiegel, hier in der Halbspiegel-Ausführung. Genau wie ein Pentaprisma hat der Orthogonalspiegel die Eigenschaft, einen auftreffenden Zielstrahl um exakt 100 gon auszulenken, allerdings wurde der klassische Vollkörper mit den zwei nach innen gerichteten Spiegelflächen durch zwei Einzelspiegel ersetzt. Der Orthogonalspiegel hat gegenüber dem klassischen Pentagonal-



Bild 2

prisma mehrere entscheidende Vorteile, die seinen universellen Einsatz in Geodäsie, Optik und Photophysik begründen :

- Der Orthogonalreflektor wiegt nur einen Bruchteil dessen, was ein Pentaprisma auf die Waage bringt und ist damit besonders bei großer Apertur leichter in optische Systeme einzubauen.
 - Im Gegensatz zum Pentaprisma kann der Orthogonalreflektor justiert werden. Während die Pentaprismen nach der Serienfertigung durch die Qualitätskontrolle in Genauigkeits- und damit auch Preisklassen eingeteilt werden, wird jeder Orthogonalreflektor schon ab Werk auf $5\mu\text{rad}$ ($1''$) genau justiert. Eine solche Genauigkeit wird bei der Fertigung der Prismenflächen nur zufällig und sehr selten erreicht und schlägt sich dann in einem extrem hohen Preis nieder.
 - Der Orthogonalreflektor besteht aus zwei oberflächenverspiegelten separaten Glasträgern. Die beim Pentaprisma optisch wirksame Ein- und Austrittsfläche ist hier nicht vorhanden. Damit entfallen Reflexion und Brechung des Lichtstrahles an diesen Grenzflächen und stellen für die Messung keine Fehlerquelle mehr dar. Aufwändige Entspiegelung der Grenzflächen entfällt und der im Zusammenhang mit Schliff Fehlern beim Pentaprisma wichtige Brechungsindex des Glases spielt beim Orthogonalreflektor keine Rolle.
 - Der optische und der geometrische Lichtweg sind beim Orthogonalreflektor identisch. Beim Pentaprisma ist der optische Lichtweg länger, weil die Lichtgeschwindigkeit im Glaskörper um den Faktor des Brechungsindex langsamer ist als in Luft.
 - Während Schäden an Grenz- oder Spiegelflächen ein Pentaprisma meist wertlos machen, kann jeder Teil eines Orthogonalreflektors ausgetauscht werden.
- Ein Nachteil des Orthogonalreflektors gegenüber dem Pentaprisma ist, dass bei

gleicher Apertur durch die wegfallende Brechung an der Ein- und Austrittsfläche der mögliche Schwenkbereich eingeschränkt wird, d. h. der Bereich, in dem man einen vertikal stehenden Orthogonalreflektor horizontal zum einfallenden Zielstrahl verschwenken kann, ohne die Funktionalität einzuschränken. Dieser Nachteil wird dadurch aufgewogen, dass die Spiegel in Größe und Form variabel sind und der jeweiligen Anwendung optimal angepasst werden können.

Die geodätische Anwendung

Das Exzentrums hat bei der polaren Aufnahme- und Messmethode teilweise an Bedeutung verloren, da das Einrichten eines neuen Standpunktes dank der modernen Tachymeter nur einen geringen Mehraufwand bedeutet. Die geodätisch präzise Realisierung eines aktiven Exzentrums, wie z. B. beim System KiLas der Firma Bohnenstingl bedingt, wenn die Strecke zwischen Exzentrum und Objektpunkt nicht mit Messband gemessen werden kann, einen elektronischen Distanzmesser (z. B. Disto von Leica) und optional einen Neigungsmesser. Im Exzentrum wird dann optisch mit Hilfe eines Doppelpentaprismas oder einer Kreuzscheibe ein rechter Winkel realisiert [4].

Die Realisierung eines passiven Exzentrums wurde bislang (nach Kenntnis des Autors) nicht publiziert. Allenfalls wird bei der Messung mit Tripelprisma das Exzentrum verwendet, um eine Näherungstrecke zu bestimmen und für die Messung der Horizontalrichtung wird näherungsweise zum Objektpunkt „abgedreht“. Hierbei muss das Tripelprisma per Augenmaß so platziert werden, dass die Strecke zwischen Prisma und Tachymeter der Strecke

zwischen Tachymeter und Objektpunkt entspricht. Auch bei der reflektorlosen Streckenmessung ist dieses Hilfsmittel möglich, wenn ein Gegenstand wie z. B. der Feldbuchrahmen das Tripelprisma ersetzt.

In beiden Fällen ist aber auch die Verwendung eines passiven Exzentrums in Form eines Orthogonalreflektors denkbar, was besonders bei großen Exzentren gegenüber der Methode des „Abdrehens“ deutliche Genauigkeitsverbesserungen bringen kann. Die Messung der Zielstrahlauslenkung im Exzentrum entfällt, da der Orthogonalreflektor den Winkel von 100 gon bereits vorgibt.

Das Einsatzprinzip ist in Bild 3 dargestellt. Die Strecke S_2 zwischen Tachymeter und Exzentrum und deren Richtung werden durch Messung auf das Tripelprisma bestimmt. Bei Anvisierung des Zielpunktes über den Orthogonalreflektor liefert die anschließende Streckenmessung die Summe der Teilstrecken S_1 , S_2 und S_3 . Letztere entspricht der Spiegelvariablen s_v , deren Betrag in Abhängigkeit vom Vertikalwinkel berechnet werden kann. Zieht man nun S_2 und S_3 von der gemessenen Strecke ab, erhält man die Schrägstrecke S_1 , welche über den Vertikalwinkel auf eine Horizontalstrecke reduziert werden kann. Die Höhendifferenz zwischen Tachymeterkippachse und Zielpunkt erhält man, wenn man die Summe der Teilstrecken mit dem Kosinus des Vertikalwinkels multipliziert. Einen erheblichen Vorteil bringt diese Konstellation bei der reflektorlosen Streckenmessung, wenn dadurch ein schleifender Schnitt zwischen Zielstrahl und Objektsoberfläche vermieden werden kann. Der für eine Signalauswertung notwendige Mindestremissionswert wird bei schleifenden

Schnitten oft nicht erreicht, besonders bei spiegelnden oder dunklen Objektsoberflächen, obwohl die Streckenlänge noch unter der Maximalreichweite des Tachymeters liegt. Durch Verwendung des Orthogonalreflektors kann der Auftreffwinkel des Zielstrahles auf die Objektsoberfläche auf bis zu 100 gon erhöht werden, was in den meisten Fällen den Remissionsgrad deutlich anhebt. So

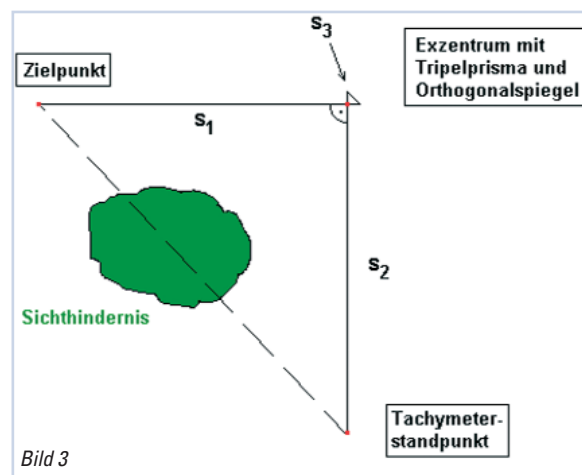


Bild 3

macht die Verwendung eines Exzentrums Sinn, auch wenn sie im klassischen Sinn gar nicht notwendig ist.

Fehlertheorie

Beim Einsatz als Exzentrum zur tachymetrischen Vermessung kommen vorwiegend zwei Abweichungen vom Idealfall in Betracht: die Winkel α und β gemäß Bild 1, um die der Zielstrahl von seiner horizontalen Solllage abweichen kann. Das Reflexionsgesetz der geometrischen Optik erlaubt eine Zerlegung des Zielstrahlvektors in eine vertikale und eine horizontale Komponente. Das heißt, beide Fälle können auch bei simultanem Auftreten getrennt betrachtet werden.

Wenn man davon ausgeht, dass die Spiegelflächen lotrecht stehen, kann Winkel β mit dem am Tachymeter messbaren Höhenwinkel (100 gon-V) gleichgesetzt werden. Die Horizontalablenkung von 100 gon bleibt erhalten. Durch die Reflexion an den vertikalen Spiegelflächen wird der Höhenwinkel nicht verändert, d. h. der Zielstrahl verlässt dann auch wieder unter dem Höhenwinkel β den Orthogonalen Spiegel. Dabei schneidet er im Falle $\alpha = 0$ wie der einfallende Zielstrahl die Stehachse, eine horizontale Exzentrizität e_{Hz} tritt nicht auf, sondern lediglich eine vertikale Exzentrizität.

$$e_v = sv_{Hz} \cdot \tan \beta \quad \text{mit} \quad sv_{Hz} = sv \cdot \sin V$$

Für den Fall $\beta = 0, \alpha \neq 0$ bleibt die Horizontalablenkung von 100 gon ebenfalls erhalten, allerdings schneidet der ausfallende den einfallenden Zielstrahl nicht in der Stehachse, sondern im Punkt A (siehe Abb. 4). Der horizontale Abstand zwischen A und der Stehachse definiert die horizontale Exzentrizität e_{Hz} .

Für den Fall $\alpha \neq 0, \beta \neq 0$ sind ausfallender und einfallender Zielstrahl windschiefe Geraden. Die vertikale Exzentrizität e_v tritt dann zusätzlich zu e_{Hz} auf und ist im Punkt A definiert, d. h. als Abstand zwischen den Schnittpunkten von einfallendem und ausfallendem Zielstrahl mit der Vertikalachse durch A.

Die Spiegelvariable sv (konstant ist nur der Idealfall sv_{Soll} bei $\alpha = 0$ und $\beta = 0$) definiert sich über den Laufweg des Signals zwischen den beiden Punkten, die die vertikale Exzentrizität definieren. Trifft man die

bei der Messung zu beachtende Konvention, dass der einfallende Zielstrahl immer durch die Stehachse geht, dann ist der Verlauf des Zielstrahles innerhalb des Orthogonalen Spiegels in Abhängigkeit von α und β festgelegt und berechenbar. Für eine exakte Visur zur Stehachse ist deshalb eine kegelförmige Markierung im Spiegelzentrum angebracht.

Es sei t der horizontale Abstand zwischen Schnittgerade der Spiegelflächen und Stehachse des Lotstabes. Gemäß des schwarzen Zielstrahlverlaufes in Bild 4 ergeben sich die geometrischen Größen des Idealfalles durch

$$\begin{aligned} a &= c = t(\sqrt{2} - 1) \\ b &= t(2 - \sqrt{2}) \\ h &= t \frac{\sin\left(\frac{\pi}{4}\right)}{\sin\left(\frac{5\pi}{8}\right)} \\ sv_{Soll} &= \sqrt{2}t \end{aligned}$$

Nun sei α der Fehler des horizontalen Einfallswinkels bzw. der horizontalen Ausrichtung des Orthogonalen Spiegels. Dann berechnen sich die geometrischen Größen des blauen Zielstrahlverlaufes in Bild 4

$$\begin{aligned} k &= \alpha \frac{\sin \alpha}{\sin\left(\frac{5\pi}{8} - \alpha\right)} \\ a' &= a \frac{\sin\left(\frac{3\pi}{8}\right)}{\sin\left(\frac{5\pi}{8} - \alpha\right)} \\ b' &= (h + k) \frac{\sin \frac{\pi}{4}}{\sin\left(\frac{3\pi}{8} - \alpha\right)} \\ c' &= b' \sin\left(\frac{\pi}{4} - 2\alpha\right) \end{aligned}$$

durch

$$e_{Hz} = b' \cos\left(\frac{\pi}{4} - 2\alpha\right) - a'$$

Die horizontale Exzentrizität e_{Hz} ergibt sich dann durch

$$sv_{Hz} = a' + b' + c' + e_{Hz} \quad sv(\alpha, \beta) = \frac{sv_{Hz}}{\cos \beta}$$

Die Spiegelvariable sv als Funktion von α und β berechnet sich mit

Auch wenn der Spiegel mit zwei Dioptern ausgestattet ist, kann man davon ausgehen, dass der Fall $\alpha = 0$ nie zu garantieren ist. Da α ohne zusätzlichen Teilkreis nicht messbar ist, gilt es also abzuschätzen, wie groß α maximal sein darf, um die Messgenauigkeit nicht zu stark zu beeinträchtigen. Bild 5 zeigt in der Draufsicht die fehlerhafte Lage des ohne Kenntnis von α berechneten Punktes.

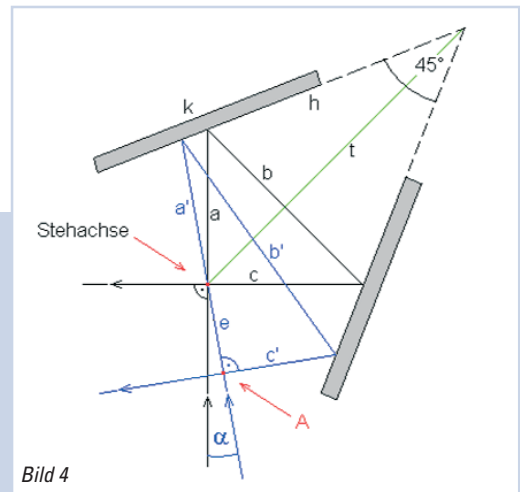


Bild 4

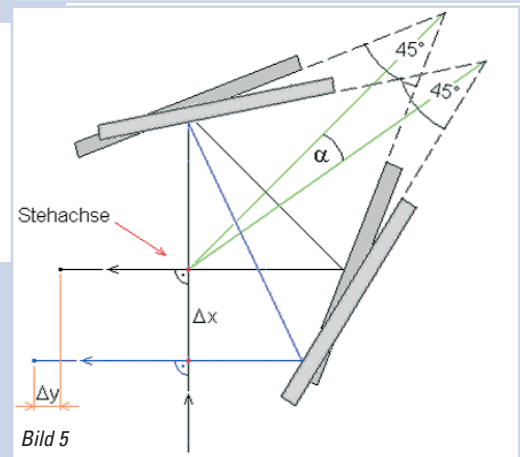


Bild 5

$$\begin{aligned} \Delta x(\alpha) &= -e_{Hz} \quad \text{und} \\ \Delta y(\alpha) &= e_{Hz} - \Delta sv_{Hz} = a' + b' + c' - \sqrt{2}t \\ \text{mit} \\ \Delta sv_{Hz} &= \sqrt{2}t - (a' + b' + c' + e_{Hz}) \end{aligned}$$

sind die theoretisch anzubringenden Korrekturen. Eine Verfälschung der z-Koordinate tritt hier nicht auf, da die Spiegelvariable nicht in deren Berechnung eingeht, sondern nur die mit dem Tachymeter gemessene Schrägdistanz zum Objektpunkt und der Vertikalwinkel.

Bild 6 zeigt die Korrekturwerte $\Delta x(\alpha)$ und $\Delta y(\alpha)$ für einen Orthogonalen Spiegel mit der Konstante $t=100\text{mm}$. Im Hinblick auf Δy ist der Ausrichtungsfehler a eigentlich ver-

nachlässigbar, jedoch bei Δx spielt er eine entscheidende Rolle. Es ist deshalb unbedingt darauf zu achten, den Diopter des Orthogonalspiegels gut auf die Stehachse des Tachymeters auszurichten.

Dieselbe Wirkung wie ein Ausrichtungsfeh-

Bogenminuten, woraus sich bei Exzentren ab 3 m und horizontaler Visur bereits Koordinatenfehler $\Delta H \geq 1$ cm ergeben. Bei steiler Visur nimmt Δy dieselben Dimensionen an. Eine beim Hersteller bereits ange-

dachte Pendellagerung des Spiegels sollte hier die Einsatzbedingungen deutlich vereinfachen und die Genauigkeit der Messung erhöhen. Für die Kombination des Orthogonalspiegels und des Tripelprismas auf einem Tachymeterstab bzw. Stativ bedarf es bei den Standardprodukten

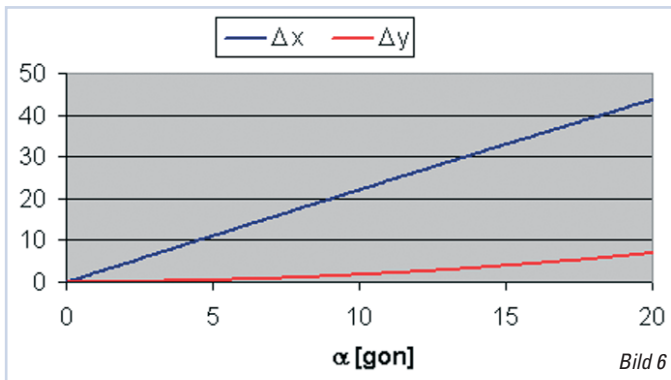


Bild 6

ler hat die gleichgerichtete Dejustage der Spiegelflächen. Wenn beide Spiegelflächen um denselben Betrag bezüglich ihrer Solllage horizontal verschwenkt sind, ist zwar der horizontale Justagefehler $\delta_{Hz} = 0$, aber die Winkelhalbierende der Spiegelflächen verläuft nicht mehr durch die mechanische Stehachse. Der resultierende Ausrichtungsfehler bei Anzielung der mechanischen Stehachse sollte aber deutlich unter 1 gon liegen, da die Stellschrauben nur sehr kleine Beträge zulassen.

Zur Konstantenbestimmung, Prüfung und Justage des Orthogonalspiegels wurden verschiedene Feldverfahren nach dem Prinzip der Autokollimation bzw. der gegenseitigen Anzielung zweier Theodoliten [5] entwickelt, für deren ausführliche Darstellung hier auf eine spätere Veröffentlichung verwiesen werden muss.

Die Testmessungen

Bei der oben stehenden Fehlertheorie wurde davon ausgegangen, dass die Spiegelflächen fehlerfrei vertikal stehen. Das heißt, der Spiegel muss vertikal und ruhig gehalten werden. Jede Verkippung des Spiegels ändert die Vertikalstellung zumindest einer Spiegelfläche, was sich durch die Reflexion mit doppeltem Betrag auf den Zielstrahl auswirkt. Bei freihändigem Halten des Tachymeterstabes mit Orthogonalspiegel schwankt vorwiegend die Höhe des Zielpunktes am Zentrum. Für die meisten Messungen wurde deshalb ein Stangenstativ verwendet. Die Horizontiergenauigkeit bei Verwendung einer Dosenlibelle liegt allerdings im Bereich weniger

verschiedener Adapter. Als Ersatz für das Tripelprisma kann das Gehäuse mit einem Reflexfolienband umklebt werden (Bild 7).



Bild 7

Die Testmessungen mit den reflektorlos messenden Tachymetern TCR1103 und TCRP1202 von Leica ergaben, dass die vom Hersteller des Orthogonalspiegels versprochene Funktionalität in jedem Fall gewährleistet ist. Es wurden Einsatzfälle gesucht mit schleifenden Schnitten zwischen Zielstrahl und Objektoberfläche, speziell bei spiegelnder (Glas, Metall und Plastik) oder dunkler Objektoberfläche, wo die direkte Anzielung mit dem Tachymeter kein Messergebnis lieferte. In allen Fällen brachte hier die Verwendung des Orthogonalspiegels als Exzentrum ein Messergebnis für die Streckenmessung. Die Genauigkeit der gemessenen Koordinaten wurde

anhand von Sollkoordinaten überprüft. Sämtliche Abweichungen bei Exzentren bis 30m lagen im Bereich der tachymetrischen Genauigkeitsangaben. Ein entscheidender Unterschied zur normalen Messung besteht darin, dass die Anzielung im Wesentlichen durch die Person vorgenommen wird, die den Orthogonalspiegel hält. In Fällen, wo wegen der Sichtbedingungen mit Exzentrum gearbeitet werden muss, ist die reflektorlose Feinanzehlung des Objektpunktes wegen der begrenzten Spiegelfläche oft nur bei Einweisung des Instrumentenbedieners durch den Träger des Tachymeterstabes möglich. Steht im Zentrum ein Reflexionsprisma, ist dessen Zentrum für den Beobachter auch bei indirekter Anzielung gut zu lokalisieren. Der Versuch, die automatische Zielerfassung über den Orthogonalspiegel zu realisieren, gelingt nur, wenn der Spiegel bereits gut positioniert ist. Nichtsdestotrotz funktioniert die Messung mit passivem Exzentrum hervorragend, wenn der Tachymeter einen sichtbaren Laserzielstrahl besitzt, der den aktuellen Anzielpunkt markiert. Auch hochgelegene Punkte können so gut angezielt werden. Deshalb kann abschließend konstatiert werden, dass die Realisierung eines passiven Exzentrum mit Hilfe eines Orthogonalspiegels den Anforderungen der Praxis gerecht wird und dort sicher künftig seinen Platz findet. Aus diesem Grund wurde am Geodätischen Institut der TU Dresden ein Prüf- und Justagestand für Orthogonalspiegel eingerichtet, an dem natürlich auch Pentaprismen geprüft werden können.

Literatur

- [1] Deumlich/Staiger: *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik*, 9. völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Wichmann Verlag Heidelberg, 2002, S.45 f.
- [2] Zschocke, K.: *Untersuchungen zum Einsatz eines Tachymeteraufsatzes*, Diplomarbeit TU Dresden 2004
- [3] Bienert A.: *Auswertung von Höhenmessungen und Automatisierung der Seespiegelfixierung*, Studienarbeit TU Dresden 2003
- [4] Bohnenstingl: www.bohnenstingl.de, Stand Juli 2004
- [5] Möser, M. et al.: *Handbuch Ingenieurgeodäsie, Band: Maschinen- und Anlagenbau*, Wichmann Verlag Heidelberg, 2002, S.143 ff.

Autor

Dipl.-Ing. Matthias Fuhrland
Hermsdorfer Str. 2, 01159 Dresden
E-Mail: Matthias.Fuhrland@mailbox.tu-dresden.de