

Matthias Fuhrland, Gunnar Neumann und Jan Schmidt, Geodätisches Institut der TU Dresden

Kalibrierung eines Orthogonalspiegels

***Zusammenfassung:** Ein Orthogonalspiegel kann dazu verwendet werden, die Strecke zu einem verdeckten Zielpunkt direkt zu messen. Regelmäßige Prüfung des Orthogonalspiegels ist notwendig, um gleichbleibend hohe Genauigkeit zu gewährleisten. In diesem Beitrag werden verschiedene Feldverfahren zur Überprüfung des Orthogonalspiegels vorgestellt, die in Zusammenarbeit mit Argus GeoTech und FPM Holding GmbH an der TU Dresden entwickelt wurden. Neben der Bestimmung des vertikalen und horizontalen Justagefehlers wird auch eine Konstantenbestimmung gezeigt.*

***Abstract:** An Orthogonal-Mirror can be used to measure directly the distance to a hidden point. Steady inspections of the Orthogonal-Mirror are necessary to keep the high accuracy. In this article different calibration methods are introduced, developed at the Dresden University of Technology in cooperation with Argus GeoTech and FPM Holding GmbH. Beside the determination of vertical and horizontal adjustment error also a determination of the constant is shown.*

Hintergrund

Genau wie ein Pentaprisma hat der Orthogonalspiegel die Eigenschaft, einen auftreffenden Zielstrahl um exakt 100 gon auszulenken, allerdings wurde der Prismenkörper mit den zwei nach innen gerichteten Spiegelflächen durch zwei Einzelspiegel ersetzt [1]. Der Orthogonalspiegel hat gegenüber dem Pentaprisma deutliche Vorteile in puncto Gewicht und Genauigkeit. Zudem sind die optischen Eigenschaften für den Einsatz bei der elektrooptischen Streckenmessung wesentlich besser [2]. Zur definierten Auslenkung eines tachymetrischen Zielstrahles ist der Orthogonalspiegel bestens geeignet, allerdings muss sichergestellt sein, dass die Spiegelflächen parallel zur Stehachse verlaufen und einen Winkel von exakt 50 gon einschließen. Abweichungen von diesen Bedingungen werden durch den vertikalen bzw. horizontalen Justagefehler beschrieben. Diese sollten zwar ab Werk höchstens eine Bogensekunde betragen, aber nachträgliche Dejustage durch Stoß oder extreme Temperaturschwankungen kann nicht ausgeschlossen werden. Für den alltäglichen Einsatz ist es deshalb ratsam, den Orthogonalspiegel in regelmäßigen Abständen zu überprüfen und gegebenenfalls nachzujustieren.

Die Justage beim Hersteller erfolgt mit Hilfe eines Sextantenprüfgerätes. Da dies beim Anwender im Regelfall nicht zur Verfügung steht, sollen hier verschiedene Feldverfahren zur

Überprüfung des Orthogonal spiegels vorgestellt werden, die in Zusammenarbeit mit Argus GeoTech und FPM Holding GmbH an der TU Dresden entwickelt wurden.

Die gegenseitige Orientierung

Zur Bestimmung der Justagegenauigkeit wurde zunächst das Verfahren der gegenseitigen Orientierung zweier Theodoliten angewandt [3], wobei die gegenseitige Anzielung einmal direkt und einmal über den Orthogonal spiegel erfolgte. Dazu wurden zwei Theodoliten T3000 mit internen Zielmarken von Leica verwendet, die eine Vertikalwinkel- und Richtungsgenauigkeit von je 0,15 mgon aufweisen. Die Theodoliten und der Orthogonal spiegel wurden in einem gleichschenkligen rechtwinkligen Dreieck mit 5m Kathetenlänge aufgestellt, die Kippachsen der Theodoliten und der Orthogonal spiegel wurden auf gleiche Höhe gebracht. Hier ergeben sich nun zwei verschiedene Ansätze zur Bestimmung des horizontalen Justagefehlers, d.h. der Abweichung δ_{Hz} vom Sollwinkel 50 gon.

Variante 1: Beide Theodolite zielen zunächst die Stehachse des Spiegels an. Theodolit 1 fokussiert dann über den Spiegel auf die Zielmarke von Theodolit 2, ohne die Hz-Richtung zu verändern. Je nach Stellung und Justagefehler des Spiegels wird die Peilung mehr oder weniger von der Zielmarke abweichen (siehe Abb. 2). Dies wird nun durch Drehung des Spiegels kompensiert. Bei diesem Verfahren gleicht die durch den Ausrichtungsfehler α verursachte horizontale Exzentrizität des Ziellinienschnittpunktes e_{Hz} einen möglichen Justagefehler δ_{Hz} aus. Nun fokussiert Theodolit 2 auf die Zielmarke von Theodolit 1, zunächst ohne die Hz-Richtung zu verändern. Wenn $\delta_{\text{Hz}} \neq 0$ ist, dann wird die Zielmarke nicht genau im Fadenkreuz liegen, sondern rechts oder links daneben. Die nun durch exakte Anvisierung der Zielmarke messbare Richtungsdifferenz entspricht dem doppelten Justagefehler.

Abb. 1 verdeutlicht den Zusammenhang von Ausrichtungsfehler und horizontaler

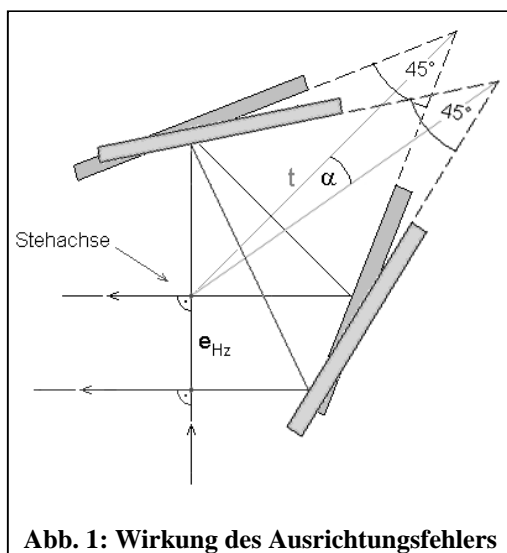


Abb. 1: Wirkung des Ausrichtungsfehlers

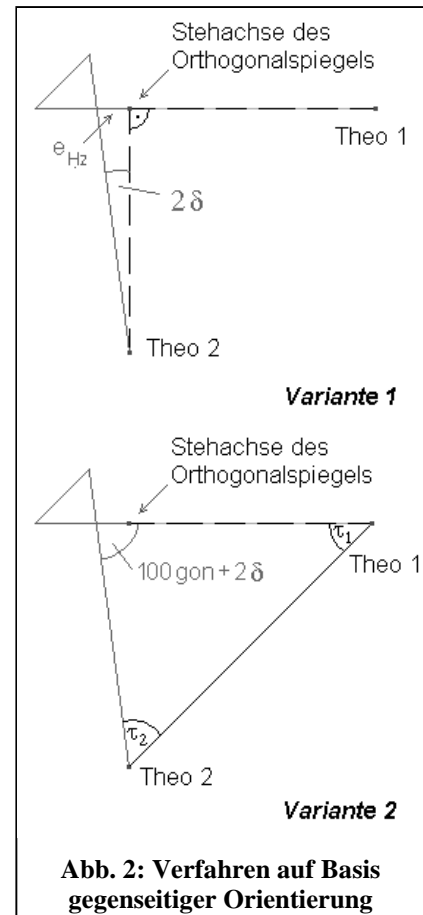
Exzentrizität. Unter der Annahme, dass die Visur zur Stehachse erfolgt, liegt auch der Strahlenschnittpunkt bei korrekter Ausrichtung des Orthogonal spiegels in der Stehachse (schwarzer Strahl). Bei horizontaler Verschwenkung um den Winkel α (blauer Strahl) verschiebt sich der Strahlenschnittpunkt um den Betrag der Exzentrizität e_{Hz} . Sollte $\delta_{\text{Hz}} \neq 0$ sein, dann verlaufen die ausfallenden Strahlen auch parallel, allerdings nicht mehr rechtwinklig zum einfallenden Strahl,

sondern um $2 \cdot \delta_{\text{Hz}}$ abweichend davon.

Durch die verschiedenen Kombinationen der Fernrohrlagen beider Theodolite und der Umkehrung des Prinzips erhält man 8 verschiedene Messwerte, deren Mittel frei von den Achsfehlern der Theodoliten und dem Einfluss unterschiedlich langer Zielweiten sein dürfte. Voraussetzung für diese Variante ist, dass man vorab mit einem der Theodoliten den rechten Winkel des Stehachsendreieckes hochgenau absteckt. Beim getesteten Orthogonalspiegel wurde nach *Variante 1* ein horizontaler Justagefehler von 0,28 mgon ermittelt.

Alternativ kann nach Variante 1 auch die von [4] zur Kalibrierung von Pentaprismen vorgestellte gegenseitige Kollimation eines Theodoliten und eines Kollimationsfernrohres verwendet werden. Theodolit 1 wäre hierbei durch das Kollimationsfernrohr zu ersetzen.

Variante 2: Beide Theodolite werden zunächst gegeneinander orientiert, d.h. direkte wechselseitige Anzielung der Zielmarken und Messung der Hz-Richtungen (siehe Abb. 2). Dann werden beide Theodolite indirekt gegeneinander orientiert, d.h. exzentrische Anzielung des jeweils anderen Theodoliten über den Orthogonalspiegel und Messung der Hz-Richtungen. Hilfreich ist hier die Verdrehung des Spiegels wie in *Variante 1*. Die Differenz der Richtungen pro Standpunkt ergeben die spitzen Innenwinkel τ_1 und τ_2 des Zielstrahldreieckes. Die negative Abweichung deren Summe von 100 gon ergibt den doppelten Justagefehler.



Bei dieser Variante muss das Stehachsendreieck nicht exakt rechtwinklig sein und der Ausrichtungsfehler α ist zumindest für die Messung des Justagefehlers unerheblich. Durch Kombination der Fernrohrlagen beider Theodolite erhält man 4 verschiedene Messwerte, die zu mitteln sind.

Die Richtungsdifferenz zwischen direkter und indirekter Anzielung nach *Variante 2* betrug bei dem einen Theodolit 50,0414gon und beim anderen Theodolit 49,9592gon. Damit ergibt sich ein horizontaler Justagefehler der Reflexionsplatten von 0,3 mgon, was die Herstellerangabe und das Ergebnis nach *Variante 1* bestätigt. Das heißt erst bei einem Abstand von mehr als 100m zwischen Zentrum und Exzentrum übersteigt der aus δ_{Hz} resultierende Koordinatenfehler den Wert von 1 mm.

Über dieselbe Konstellation wie in *Variante 1* wurde die Spiegelkonstante sv_{soll} bestimmt, die dem einfachen Weg des horizontalen Zielstrahles innerhalb des Orthogonal spiegels - vom Strahlenschnittpunkt über die Spiegel zum Strahlenschnittpunkt - entspricht. Hierfür musste lediglich ein Theodolit gegen einen Tachymeter TC2002 und der andere Theodolit gegen ein Reflexionsprisma ausgetauscht werden. Als Mittelwert aus 20 Messungen wurde die Konstante mit 141 mm bestimmt. Daraus ableitbar ist der konstruktiv bedingte Abstand t zwischen Stehachse und Schnittgerade der Spiegelflächen, der Grundlage für weitere Berechnungen ist. $sv_{\text{soll}} = \sqrt{2} \cdot t$

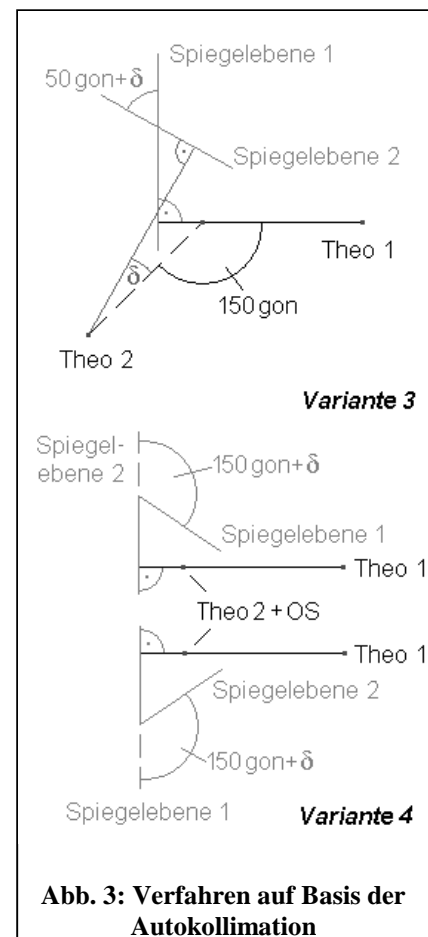
Als problematisch erwies sich hier die horizontale Ausrichtung des Orthogonal spiegels, da die tatsächliche Winkelhalbierende der Spiegelflächen schwer zu bestimmen ist. Für grobe Überprüfungen ist hier das Diopferkreuz des Orthogonal spiegels ausreichend. Unter der Annahme, dass der Justagefehler δ sehr klein ist, kann man auch die Ausrichtung des Orthogonal spiegels iterativ so lange ändern, bis die exzentrische Orientierung eines Theodoliten zum anderen mit der durch die drei Stehachsen repräsentierten Sollage übereinstimmt. *Variante 2* ist zur Bestimmung der Konstanten nicht geeignet.

Wird der Orthogonal spiegel nicht mit $V = 100$ gon angezielt, vergrößert sich der Signalweg innerhalb des Orthogonal spiegels. Die Bezeichnung „Spiegelvariable“ wird diesem Umstand gerecht. Die Berechnung der Spiegelvariablen sv in Abhängigkeit von V und α ist ausführlich in [2] dargestellt.

Autokollimation

Alternativ zur gegenseitigen Orientierung bei rechtwinkliger Aufstellung kann auch das Verfahren der Autokollimation [5] mit zwei Theodoliten wiederum in zwei Varianten angewandt werden. Benötigt wird hierfür mindestens ein Autokollimationsokular. Ist dies nicht vorhanden, kann beim T3000 die Autokollimation notfalls auch auf die Zielmarken erfolgen.

Variante 3: Das o.g. Stehachsendreieck ist so einzurichten, dass der Innenwinkel am Orthogonal spiegel exakt 150 gon beträgt (siehe Abb. 3). Beide Theodolite werden zunächst auf die Stehachse des Orthogonal spiegels ausgerichtet.



Nun dreht man den Spiegel so lange, bis der erste Theodolit bei Fokussierung auf Unendlich zu sich selbst kollimiert ist, d.h. eine Spiegelfläche wird senkrecht zum Zielstrahl gestellt. Nun müsste der Fehler am Theodolit 2 mit doppeltem Betrag sichtbar sein und kann durch Autokollimation auf die zweite Spiegelfläche bestimmt werden. Die aus zwei Fernrohrlagen gemittelte Differenz der Richtungen vor und nach der Autokollimation ergibt δ_{Hz} .

Variante 4: Bei Verwendung eines Theodoliten, der eine Adaption des Orthogonalspiegels auf dem Griff des Theodoliten zulässt (z.B. Theo010B von Zeiss), muss kein Stehachsendreieck abgesteckt werden. Man zielt zunächst mit Theodolit 1 die Stehachse des Orthogonalspiegels an und autokollimiert diesen dann mit einer Spiegelfläche durch Drehung des Theodoliten 2, welcher den Orthogonalspiegel trägt. Hat man die Richtung an Theodolit 2 gemessen, dreht man den Horizontalkreis, bis Theodolit 1 zur zweiten Spiegelfläche autokollimiert ist und liest erneut die Richtung ab. Die Differenz der Richtungen beträgt nach Mittelung mit dem Ergebnis der zweiten Fernrohrlage $150 \text{ gon} + \delta_{\text{Hz}}$. Nach beiden Varianten konnten die Ergebnisse der gegenseitigen Orientierung bestätigt werden.

Zur Bestimmung des vertikalen Justagefehlers δ_v reicht die indirekte Anzielung aus. Bei der Zenitwinkelmessung nach dem Prinzip der gegenseitigen Kollimation werden keine Zielmarken, sondern direkt die Fadenkreuze mit Fokus auf Unendlich anvisiert. Bei Reichweiten über 10m und / oder ungünstigen Lichtverhältnissen empfiehlt es sich hier, das Fadenkreuz der Theodoliten von der Okularseite aus zu beleuchten und so für die Gegenseite besser sichtbar zu machen. Durch die Fokussierung auf Unendlich stehen die kollimierten Strahlengänge parallel zueinander, was theoretisch bei jedem beliebigen Vertikalwinkel funktioniert. Die Differenz der abgelesenen Vertikalwinkel ergibt den doppelten vertikalen Justagefehler. Auch hier erhält man durch Kombination der Fernrohrlagen beider Theodolite 4 verschiedene Differenzen, die zu mitteln sind.

Die Differenz der aus 4 Kombinationen gemittelten Vertikalwinkel betrug bei der direkten Anzielung 0,2 mgon. Bei der indirekten Anzielung betrug diese Differenz 0,05 mgon. Der Zielstrahlverlauf wird also hinsichtlich seines Vertikalwinkels durch den Orthogonalspiegel um 0,15 mgon verfälscht. Die Herstellerangabe beträgt auch hier 0,3 mgon.

Die Ebenheit der Spiegel wurde vom Hersteller mit $1,2 \mu\text{m}$ angegeben. Da eine Überprüfung dieser Angabe den Ausbau zumindest eines Spiegels erfordert hätte, wurde darauf verzichtet. Statt dessen wurde die Überprüfung von δ_v und δ_{Hz} an verschiedenen Stellen des Spiegels vorgenommen. Eine signifikante Abweichung vom oben genannten Ergebnis war dabei nicht festzustellen.

Justage

Sollte eine Justage des Spiegels notwendig sein, so ist dies mit Hilfe der Stellschrauben und eines mitgelieferten Schlüssels leicht möglich. Um δ_v zu eliminieren, bietet sich die Autokollimation mit einem Theodoliten in zwei Fernrohrlagen an, wobei sicherzustellen ist, dass sowohl der Zielstrahl des Theodoliten als auch die Adapterplatte des Orthogonal spiegels bestmöglich horizontalisiert sind. Um δ_{Hz} zu eliminieren, muss außerdem gewährleistet werden, dass nach der Justage die Winkelhalbierende der Spiegelflächen die Stehachse des Orthogonal spiegels schneidet. Am einfachsten lässt sich dies nach *Variante 3* oder *4* realisieren, wobei vorab der Diopter samt Spiegel auf den Sollwinkel auszurichten ist. Hierfür ist ein entsprechender Anzielpunkt abzustecken, was natürlich mit *Variante 4* einfacher geht.

Da nicht jeder Nutzer eines Orthogonal spiegels zwangsläufig über zwei Präzisionstheodoliten oder -tachymeter verfügt, wurde am Geodätischen Institut der TU Dresden ein Prüf- und Justagestand für Orthogonal spiegel eingerichtet. Das Institut ist damit in der Lage, neben der bereits seit längerem angebotenen Kalibrierung von Nivellierlatten auch die Prüfung von Pentaprismen und Orthogonal spiegeln als Dienstleistung auszuführen.

Literatur :

- [1] www.argus-geotech.de
- [2] Fuhrland, M. : *Das passive Exzentrum- Streckenmessung um die Ecke*,
Vermessungsingenieur Heft 6 / 2004
- [3] Möser, M. et al.: *Handbuch Ingenieurgeodäsie, Band: Maschinen- und Anlagenbau*,
Wichmann Verlag Heidelberg, 2002, S.143 ff.
- [4] Brandstätter, G.: *Die Richtungsgenauigkeit von Pentaprismen*, Österreichische Zeitschrift für
Vermessungswesen und Photogrammetrie 62 (1974) S. 16 -24
- [5] Deumlich/Staiger: *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik*, 9. völlig neu bearbeitete und
erweiterte Auflage, Wichmann Verlag Heidelberg, 2002, S.240

Anschriften der Verfasser : Dipl.-Ing. Matthias Fuhrland
Hermsdorfer Str.2
01159 Dresden
email : Matthias.Fuhrland@mailbox.tu-dresden.de

<p>Dipl.-Ing. Gunnar Neumann Wormser Str. 84 01309 Dresden email : Gunnar.Neumann@mailbox.tu-dresden.de</p>	<p>Dipl.-Ing. Jan Schmidt Gohrischstr. 13 01237 Dresden email : Jan.Schmidt2@mailbox.tu-dresden.de</p>
---	--