

Zum Einfluss der geometrischen Ausrichtung von 360°-Reflektoren bei Messungen mit automatischer Zielerfassung

360°-Reflektoren können aus allen Richtungen angemessen werden. In Kombination mit Tachymetern mit ATR dienen sie nicht nur zur Distanz- sondern auch zur Richtungs- und Höhenfestlegung. Aufgrund ihrer optisch-geometrischen Eigenschaften ergeben sich spezifische Ablagen, die sich jeweils als Funktion der Reflektororientierung modellieren lassen. Mittels einer am *geomETH* (Geodätische Messtechnik, ETHZ) entwickelten automatisierten Einrichtung wurden diese Kalibrierfunktionen von fünf Exemplaren des Reflektortyps GRZ4 reproduzierbar ermittelt; eine Abhängigkeit von der Distanz und von der Visursteilheit wurde ebenfalls untersucht.

Les réflecteurs à 360° peuvent être visés à partir de toutes les directions. En combinaison avec des tachéomètres munis d'un ATR, ils servent à mesurer des distances, des directions et des angles verticaux. Pour les applications nécessitant une précision élevée, il s'agit cependant d'apporter des corrections à ces trois grandeurs. Ces corrections sont liées aux propriétés optiques et géométriques des réflecteurs et se laissent modéliser en fonction de leur orientation. Une procédé automatisé, développé à geomETH (Geodätische Messtechnik, ETHZ), a permis de déterminer les fonctions de calibration de cinq réflecteurs de type GRZ4. L'influence de la distance et de l'inclinaison de visée a également été analysée.

Riflettori a 360° possono essere mirati da tutte le direzioni. In combinazioni con tachimetri con ATR servono per misurare non solo distanze, ma anche direzioni e angoli verticali. Per applicazioni che richiedono una precisione elevata, bisogna però effettuare delle correzioni a questi tre valori. Queste correzioni si basano sulle caratteristiche ottiche e geometriche dei riflettori e si fanno modellare secondo l'orientamento dei riflettori. Un procedimento automatizzato - sviluppato nell'ambito della *geomETH* (Geodätische Messtechnik, ETHZ) - permette di determinare le funzioni di calibrazione dei 5 riflettori tipo GRZ4. Inoltre, l'influsso della distanza e dell'inclinazione della visuale è stato analizzato.

C. Favre, M. Hennes

1. Einleitung

360°-Reflektoren kommen vorwiegend dort zum Einsatz, wo unabhängig von ihrer geometrischen Ausrichtung Distanz- und auch Richtungsmessungen ermöglicht werden sollen. Vor dem Aufkommen der Tachymeter mit automatischer Zielerfassung (Robottachymeter) waren dies hauptsächlich Anwendungen mit geringen Genauigkeitsanforderungen (im Dezimeterbereich) wie zum Beispiel in der

Navigation. Weil die Leistungsfähigkeit heutiger Tachymetersysteme (vor allem durch die automatische Zielerfassung) gegenüber der terrestrischer Navigationsinstrumente erheblich gestiegen ist, ist die Verwendung derartiger 360°-Reflektoren auch bei einer Reihe weiterer Messaufgaben (Aufnahme, Absteckung, Baumaschinensteuerung, ggf. auch Deformationsmessung [Flach, Naterop, 1999]) vorteilhaft. Für diese Anwendungen müssen Genauigkeiten bis in den Millimeterbereich sichergestellt werden. Dies gilt nunmehr nicht nur für die Distanzmessung, sondern auch für die Richtungsmessung, weil sich letztere

ebenfalls auf das vom Prisma reflektierte Signal bezieht. Bisher bietet nur die Firma Leica einen eigens für Robottachymetrie entwickelten 360°-Grad Reflektor in quasi monolithischer Bauweise an (Typ GRZ4, vgl. Abb. 1). Er besteht aus sechs verschachtelten Prismen, die mit verschiedener Ausrichtung möglichst nah um die Stehachse gruppiert sind, während andere Hersteller dabei geblieben sind, mehrere kleine Einzelprismen krantzförmig um die Stehachse anzuordnen. Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung wurde die mit dem Typ GRZ4 erreichbare Genauigkeit evaluiert. Ein inzwischen modifizierter Prototyp des GRZ4 (Abb. 1b) wurde einbezogen.

Wie bereits von der elektrooptischen Distanzmessung bekannt, gilt eine Additonskorrektur nicht nur für einen bestimmten Reflektortyp, sondern für eine Instrumenten-Reflektorkombination. Das grundsätzliche Verhalten ist zwar typabhängig [Schmidt, 1995]; die Beschreibung des Exemplarverhaltens erfordert jedoch spezielle Untersuchungen. Obwohl sich der variable Anteil der Additonskorrektur überwiegend auf die Eigenschaften der Sendediode und der dadurch bedingten Phaseninhomogenitäten zurückführen lässt, hat sich ein lediglich fehlerbeschreibendes Modell, das auf physikalische Parameter verzichtet, als geeignet erwiesen. Den Ausbreitungs- und Reflexionseigenschaften des Signals in bzw. an den verschiedenen Medien (Luft, Glas, Metall) wurde bisher lediglich bei Präzisionsinstrumenten, die Polarisationsmodulation verwenden, Rechnung getragen: Man verwendet zusammen mit dem Mekometer ME5000 Prismen, die hinsichtlich der weitgehenden Erhaltung der Polarisationszustände optimiert sind, und achtet auf eine gleichartige Stellung in Bezug auf die Verdrehung um die Zielachse (Y- und Anti-Y-Stellung). Allen Anwendungen gemeinsam ist jedoch, dass die Verschwenkung quer zur Zielrichtung möglichst gering gehalten wird, um systematische Fehler unterhalb einer Toleranzgrenze zu halten. Diese Bedingung beschränkt jedoch den effizienten Einsatz von Robottachymetern.



Abb. 1: 360°-Prismen: GRZ4 standard und modifiziert (Leica), RMT-Reflektor (Spectra Precision)

Möglicherweise ergeben sich aber auch für 360°-Reflektoren zusätzliche spezielle Anwendungsvorschriften, wenn eine Genauigkeitsgrenze unterschritten werden soll. Durch die unterschiedlichen Konstruktionsmerkmale bedingt, gilt auch für die Instrumente mit automatischer Zielerfassung (ATR= Automated Target Recognition), dass sich instrumenten- und exemplarabhängige Korrekturen ergeben können. Weil die Anwendung derartiger Instrumente auch die Benutzung typfremder Reflektoren wirtschaftlich erscheinen lassen mag, ist auch das Verhalten bei der Kombination verschiedener Fabrikate zu untersuchen. Dieser Aufsatz soll - neben der Vorstellung eines automatisierten Testverfahrens - einen ersten Überblick über mögliche funktionale Zusammenhänge geben. Diese sind für Distanz, Richtung und Höhe getrennt zu betrachten. Im Hinblick auf den Einsatz mit automatischer Zielerfassung werden die Reproduzierbarkeit, die Exemplarstreuung, die Abhängigkeit von der Distanz und von der Steilheit der Visur, jeweils sowohl für die Distanz-, als auch für die Richtungs- und die Höhenkomponente untersucht. Die Reproduzierbarkeit wurde an vier Prismen des Typs GRZ4 und einem modifizierten GRZ4 untersucht. Zeigen sich Abweichungen, die von der Ausrichtung des Reflektors abhängen, als systematisch und signifikant, werden sie mit Reflektorkorrektur bezeichnet.

2. Anforderungen der ATR an die geometrische Ausrichtung

2.1 Aspekte aufgrund der automatischen Zielerfassung

Wirtschaftliche Aspekte, die zur Entwicklung und zum Einsatz von Tachymetern mit automatischer Zielerfassung geführt haben bzw. führen, bedingen ebenfalls die Verwendung eines angemessenen Reflektortyps. Da auch die Richtungsmessung auf das reflektierte Signal basiert, sollte dieses ausreichend gebündelt und intensitätsbalanciert wieder am Instrument eintreffen. Dies bedeutet, dass die Reflexionseigenschaften über den gesamten von der ATR genutzten Strahlkegel homogen sein sollten. Werden - bei grossen Distanzen - Prismenbäume benutzt, müssen die Einzelprismen symmetrisch zur Horizontal- (Quer-) als auch zur Vertikalachse angeordnet sein, da sonst aufgrund inhomogener Intensitätsverteilung Richtungsfehler erwartet werden müssen.

Das Potential eines Robottachymeters lässt sich erst im kinematischen Modus voll ausschöpfen. Hier wird allerdings die Genauigkeit eingeschränkt, wenn der Reflektor nicht ausreichend zur Station ausgerichtet ist (vgl. Kap. 2.2). Anwendungsbeispiele sind Absteckungsarbeiten und die topographische Geländeaufnahme, bei denen effizienteres Arbeiten

möglich ist, wenn nicht auf die Ausrichtung des Reflektors geachtet werden muss. Deformationsmessungen, bei denen von mehreren Stationen derselbe Reflektor angemessen werden sollte, können ebenfalls Genauigkeitseinbussen durch mangelnde Reflektorausrichtung erleiden. Da auch die Richtungsmessung zum Reflektor stattfindet, muss auch die resultierende Querabweichung bei der Bestimmung der notwendigen Ausrichtegenauigkeit berücksichtigt werden. Wie im folgenden Abschnitt gezeigt, ist diese ausserdem von der Position p des Prismas bezüglich der Stehachse abhängig (vgl. Abb. 2 und Gleichungen (1) und (2)). Um die aufwendige Nachführung des Reflektors zu umgehen, werden vorteilhaft 360°-Reflektoren eingesetzt, die von allen Seiten aus mit der ATR anzielbar sind. Diese machen erst eine sinnvolle Baumaschinensteuerung möglich, da sonst Signalunterbrechungen zu nicht vertretbaren Positionsausfällen führen. Hier ist jedoch zu prüfen, inwieweit die Orientierung des Reflektors tatsächlich keinen Einfluss auf die Richtungs- und Distanzmessung hat: Seine optischen Eigenschaften sollten die hohe Genauigkeit des Tachymeters nicht reduzieren.

2.2 Funktionales Modell

Bei Feldarbeiten üblicherweise verwendete Prismen bestehen aus Glas. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer in den Glaskörper mit dem Brechungsindex n eintretenden elektromagnetischen Welle wird verlangsamt, weswegen scheinbar die gemessene Distanz verlängert wird. Dieses Offset wird in der Additionskonstante berücksichtigt. Falls die Welle nicht exakt senkrecht auf die Prismenoberfläche trifft, verlängert sich der Strahlweg im Prisma zusätzlich, der resultierende Distanzfehler Δd lässt sich für übliche Prismen anhand der folgenden Formel berechnen (z.B. [Rüeger, 1990]).

$$\Delta d = h(n - \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}) + p(1 - \cos \alpha) \quad (1)$$

Neben der Reflexion an den Rückwänden erfolgt auch eine Strahlbrechung

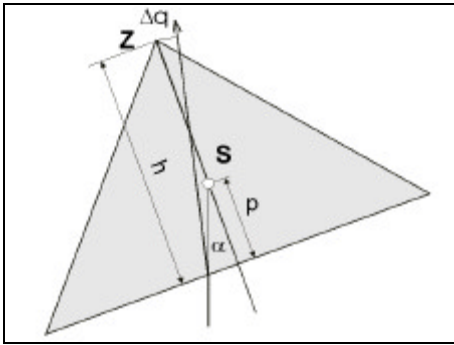


Abb. 2: Querabweichung bei verschwenktem Prisma (Prinzipskizze)

beim Ein- und Austritt in den Glaskörper, die den Strahl bei nicht exakt senkrechtem Eintreffen, d.h. verschwenktem Prisma, ablenkt. In Abb. 2 wird ein Strahl betrachtet, der bei exakt ausgerichtetem Prisma die Stehachse S schneiden würde. Infolge der Verschwenkung um α wird er gebrochen und verfehlt das Prisma um die Ablage Δq . Diese lässt sich berechnen, zum Beispiel nach [Rüeger, 1990].

$$\Delta q = (h - p) \sin \alpha - h \sin(\alpha - \beta) / \cos \beta$$

$$\text{mit } \beta = \arcsin\left(\frac{1}{n} \sin \alpha\right) \quad (2)$$

Durch geeignete Wahl der Parameterkombination h und p lässt sich das Prisma hinsichtlich der Robustheit gegen Verschwenkung optimieren, Beispiele zeigt die Abbildung 3 für herkömmliche Prismen: das sich seit einigen Jahren auf dem Markt befindliche GPR1 (Leica) weist deutlich geringere Querfehler auf als das GDR11 (Wild).

Dieser Zusammenhang gilt allerdings nur, wenn auch die Gesetze der geometrischen Optik anwendbar sind. Da in Verbindung mit der automatischen Zielerfassung die Intensitätsverteilung über den gesamten Strahlquerschnitt massgebend ist und die Konstruktionsmerkmale der ATR zu berücksichtigen sind, sollen die hier dargestellten Zusammenhänge lediglich die Schwierigkeiten bei der Optimierung eines Prismas verdeutlichen und einen Eindruck der zu erwartenden Grössenordnung geben.

Bei kranzförmigen 360°-Reflektoren werden mehrere Einzelprismen vom Signal getroffen, verschiedene Fehleranteile überlagern sich, wobei jeweils die Orientierung des Einzelprismas zu berücksichtigen ist. Hinzu kommt noch, dass mit zunehmender Fehlausrichtung auch die scheinbare Apertur des Prismenkörpers abnimmt, weswegen inhomogene – und nicht unbedingt symmetrische – Reflexionen erfolgen. Die Übertragung der oben angegebenen geometrisch-optischen Zusammenhänge auf ein 360°-Prisma des Typs GRZ4 gestaltet sich noch schwieriger, weil der Strahl von Prismenkörpern reflektiert wird, die ausserdem eine unterschiedliche vertikale Orientierung zur Ausbreitungsrichtung aufweisen. Auch hier ist die wirksame Apertur eines jedes Teilkörpers ebenfalls von der Orientierung abhängig und äusserst variabel. Eine theoretische Herleitung der in Abhängigkeit von der Prismenorientierung zu erwartenden Abweichungen anhand der *physikalisch-geometrischen* Parameter würde um ein mehrfaches komplizierter als für ein Standardprisma, weswegen an dieser Stelle ein plausibles *fehlerbeschreibendes* Modell angegeben wird, das auf die Einbeziehung bauformbeschreibender Parameter weitgehend verzichtet. Es hat den Vorteil, dass es auch ohne spezielle Kenntnis der Reflektorgeometrie

verwendet werden kann und somit auch auf verschiedene Fabrikate übertragen werden kann. Die in dieser Untersuchung gemachten Aussagen beziehen sich alle auf Beobachtungen mit automatischer Zielerfassung.

Allen 360°-Reflektoren ist gemeinsam, dass sie Rotationssymmetrie aufweisen. Deswegen ist zu vermuten, dass sich Abweichungen periodisch in Abhängigkeit der Reflektororientierung wiederholen. Die Periode wird dabei in erster Linie durch die Anzahl der Einzelprismen bestimmt. Beim GRZ4 sind zweimal drei Einzelprismen ineinander verschachtelt (vgl. Abb. 1b), weswegen als Frequenzen ganzzahlige Vielfache von drei zu erwarten sind. Zusätzlich könnte eine Periodenlänge von 360° auftreten, die aus der exzentrischen Lagerung bezüglich der Stehachse herrührt. Dies trifft sowohl für die Abweichung der Distanz- (y_d) als auch für die der Richtungs- (y_r) und – mit Ausnahme Grundschiwingung - der Höhenkomponente (y_h) zu. Für jede ist eine separate Fourierreihe gemäss (1) anzusetzen, wobei die Amplituden A_k die Grösse des Fehlers und j_k die zugehörige Phasenlage der einzelnen Schwingungskomponente beschreiben. j_k bezieht sich auf eine am Reflektorkörper festgelegte Ausrichtung; beim GRZ4 wurde der aufgeprägte Pfeil gewählt. Von dort aus wer-

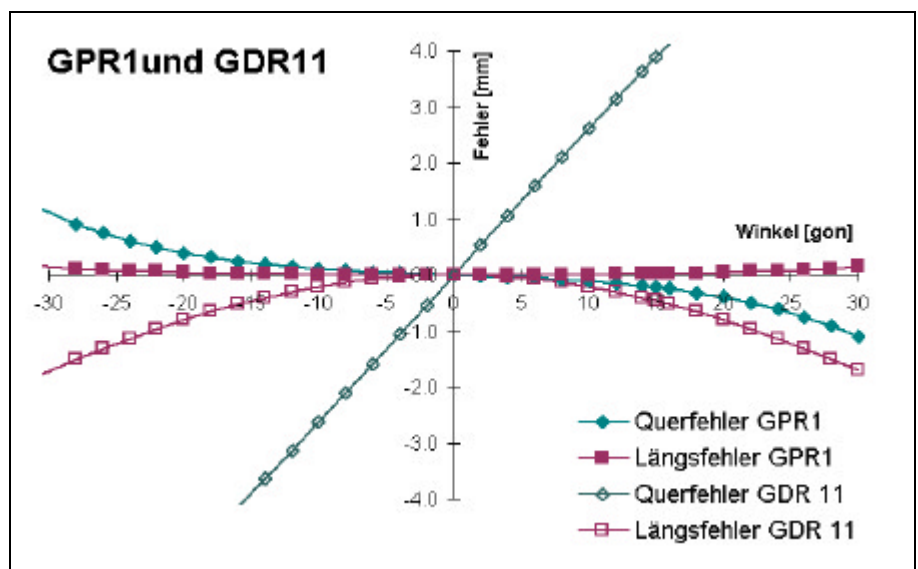


Abb. 3: Theoretischer Längs- und Querfehler

den die Reflektorverschwenkungen nach rechts (beim Betrachten von oben) positiv gezählt. Unter Beachtung dieser Konvention kann die ermittelte Funktion auch als Korrektur benutzt werden.

$$y_i + e_i = \sum_{k=0}^{k'} A_k \sin(w_k t_i + j_k) \quad (3)$$

w_k : Kreisfrequenz

t_i : Orientierung des Prismas [gon]

e_i : Residuum an der Stelle t_i [m bzw. gon]

Die unbekannt Parameter A_k und j_k werden in einer Ausgleichung bestimmt, wobei aus rechentechnischen Gründen sinnvollerweise eine Linearisierung nach dem Additionstheorem vorgenommen wird. Bei der automatischen Bestimmung der Reflektorkorrektur ist es problemlos möglich, die Beobachtungen an *gleichmässig* über den Vollkreis verteilten Stützstellen vorzunehmen. In diesem Fall lassen sich alle unbekannt Koeffizientenpaare unabhängig voneinander bestimmen, d.h., dass sich das Ergebnis nicht beim Hinzufügen oder Weglassen einzelner Schwingungsanteile ändert. Ohne Genauigkeitsverlust können also allein die sinnvoll erscheinenden Koeffizienten (für das GRZ4: w_1 und w_k als ganzzahlige Vielfache von 3) geschätzt werden, andererseits bleibt das Ergebnis gleich, unabhängig davon, ob nicht-signifikante Unbekannte im Ansatz enthalten sind oder nicht. Die Prüfung der Schwingungskomponenten auf Signifikanz erfolgt nach einem einfachen t-Test, wobei allein die Signifikanz der Amplitude A_k (und nicht der Phase) über das Vorliegen der Schwingung mit der Kreisfrequenz w_k entscheidet (vgl. [Hennes, 1991]).

3. Automatisierte Untersuchung Ausrichtungsabhängiger Fehlerkomponenten

Zur Bestimmung der unbekannt Koeffizienten der Reflektorkorrekturfunktion müssen Beobachtungen über eine



Abb. 4: Montierung des Reflektors

ausreichende Anzahl von Reflektororientierungen vorgenommen werden. Erste Untersuchungen gaben den Hinweis, dass beim GRZ4 signifikante Schwingungen bis zur Kreisfrequenz 18 auftreten können, weswegen nach dem Nyquist-Theorem mehr als 36 Beobachtungen für die eindeutige Bestimmung vorliegen müssen. Dies legt eine Automatisierung der Untersuchung nahe. Hierzu wurde ein motorisiertes Tachymeter als Drehgeber „zweckentfremdet“: Der Traggriff wurde entfernt, womit auf einfache Weise die zentrische Befestigung des zu untersuchenden Reflektors gewährleistet werden konnte (vgl. Abb. 4). Das Instrument ist sorgfältig zu horizontalieren, um Taumelfehler auszuschliessen. Die aufgrund von Fertigungstoleranzen auftretende Exzentrizität, die sich der w_1 -Schwingung überlagert, liesse sich rechnerisch nur durch die Wiederholung der Versuchsreihen mit jeweils unterschiedlicher Ausgangsorientierung von der reflektorbedingten Fehlerkomponente trennen. Um den Messaufwand gering zu halten, wurden die Exzentrizität und ihre Orientierung vorab

mit optischen Mitteln mit einer Genauigkeit von 0.1 mm bestimmt und die nachfolgenden Messungen entsprechend korrigiert.

Die Steuerung des Messablaufes und der Datenerfassung geschieht über die serielle Schnittstelle von einem PC aus. Es wurden zwei Software-Konzepte eingesetzt: Das erste basiert auf Excel und ruft Visual-Basic-Makros auf [Favre, Flach, 1999]. Diese kommunizieren mittels Befehlen der Geocom-Bibliothek mit den beiden verwendeten Leica-Tachymetern und stellen die ermittelten Daten direkt in einem Excel-Arbeitsblatt zur Verfügung. Das zweite Software-Konzept benutzt die graphische Programmiersprache Labview, die als vielseitiges Werkzeug zur Steuerung von Messabläufen konzipiert ist. Es ist hinsichtlich der Erweiterung auf weitere Hardware-Komponenten als wesentlich flexibler anzusehen. Für die Steuerung und Datenerfassung wird für das Leica-Instrument auf die GSI-Kommandos zurückgegriffen, die als grundlegender Kommunikationsbefehlssatz auch der Geocom-Bibliothek zugrunde liegen. Da TOPCON und Spectra-Precision einer ähnlichen Kommunikationsphilosophie folgen, kann das Untersuchungsverfahren leicht auf Instrumente dieser Hersteller erweitert werden. Die Untersuchungen wurden nach einem einheitlichen Standard durchgeführt. Prinzipiell wurden bei einer Distanz von 15 m und horizontaler Visur zwei aufeinanderfolgende Messreihen jeweils in Hin- und Rückgang durchgeführt, wobei der Reflektor jeweils um 2° verdreht wurde. Innerhalb von etwa zwei Stunden entstand so ein Datensatz von jeweils 720 Beobachtungen. Da die Positionierung auf wenige mgon genau erfolgte, konnten aus jeweils vier zu einer Orientierung gehörenden Messungen Rückschlüsse über die Reproduzierbarkeit und die Stabilität des Versuchsaufbaus gewonnen werden. Da auf stabile Versuchsbedingungen (so weit wie möglich im Labor in ungestörter Atmosphäre, Beobachtung auf Pfeilern) geachtet wurde und den Instrumenten eine Einlaufzeit gewährt wurde, zeigten sich keinerlei Driften.

Als Beobachtungsinstrument diente ein TCA1100, der nach Untersuchungen am geomETH (Professur für Geodätische Messtechnik, ETH Zürich) die gleiche innere Genauigkeit aufweist wie Vergleichsinstrumente des Typs TCA1800.

4. Ergebnisse

4.1 Reproduzierbarkeit und Exemplarstreuung

Die Reproduzierbarkeit kann zunächst aus denjenigen Wiederholungsmessungen abgeleitet werden, für die die Positionierung des Primas als identisch angesehen werden kann. Für die Distanzmessung ergibt sich für alle fünf untersuchten Reflektoren mit 0.06 mm für die Reproduzierbarkeit der doppelte Quantisierungsfehler (kleinste ausgegebene Einheit 0.1 mm). Die Richtungs- und Höhenmessung erfolgt mit einer Wiederholgenauigkeit zwischen 0.3 mgon und 0.6 mgon (entsprechend 0.07 mm und 0.14 mm) für verschiedene Exemplare des GRZ4, wobei die Höhengenaugigkeit geringfügig, aber nicht signifikant besser erscheint. Ein unabhängig durchgeführter zweiter Versuch, bei dem das Prisma mit der besten Wiederholgenauigkeit verwendet wurde, ergab zwar etwa 20% schlechtere Ergebnisse, bezeugt aber die Stabilität des Versuchsaufbaus während der Messung und das Vorhandensein einer Exemplarstreuung bezüglich der Richtungserfassung. Mit dem modifizier-

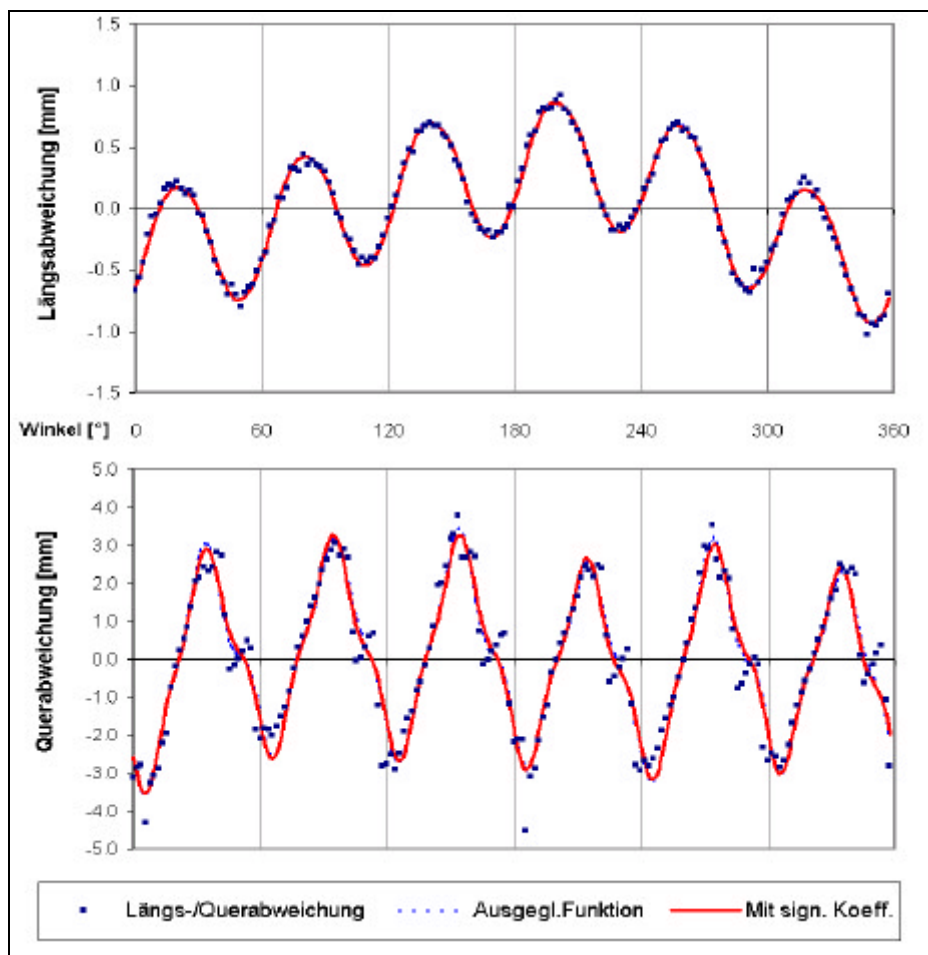


Abb. 5: Ergebnisse der Fourieranalyse für ein GRZ4

ten GRZ4 lassen sich Winkelangaben mit doppelter Genauigkeit reproduzieren. Die kleine Schrittweite der Prismenverdrehung schuf bei einzelnen Exemplaren offensichtlich auch Situationen mit extremen Reflexionsverhältnissen, wodurch vereinzelt Abweichungen zu den benachbarten Messwerten im Bereich mehrerer Millimeter (d.h. bis zu einem Vielfachen der Reflektorkorrektur) auftraten, die sich im Rahmen der Doppelmess-

reihe sehr signifikant reproduzierten. Diese Differenzen zeigten sich sowohl für die Richtung als auch für die Distanz, relativ häufig gleichzeitig, weswegen die Vermutung bestärkt wird, dass dieser Effekt von der Prismenorientierung abhängig ist. Trotz ihrer Grösse störten diese Ausreisser die Ermittlung der Reflektorkorrekturen kaum, weil sie die Koeffizienten der Fourierreihe um nur wenige Prozent beeinflussen. Im Hinblick auf eine zuver-

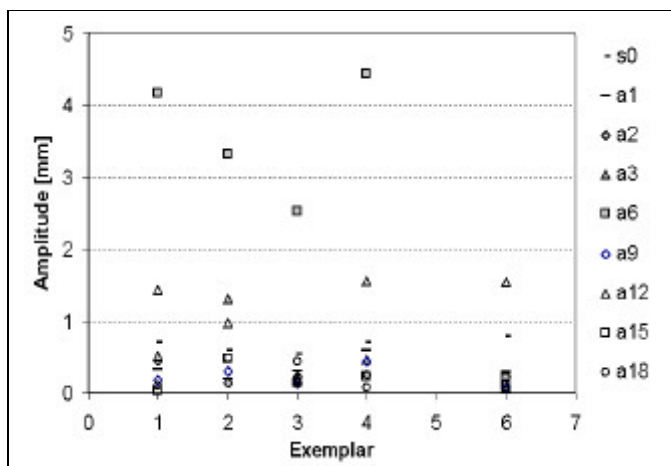


Abb. 6: Reflektorkorrekturkoeffizienten für die Querabweichung, # 1-4: GRZ4, # 6: modifiziertes GRZ4

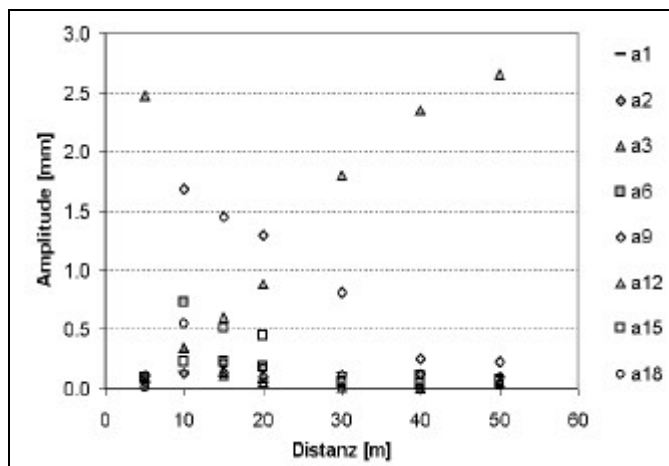


Abb. 7: Distanzabhängigkeit der Höhenkomponente

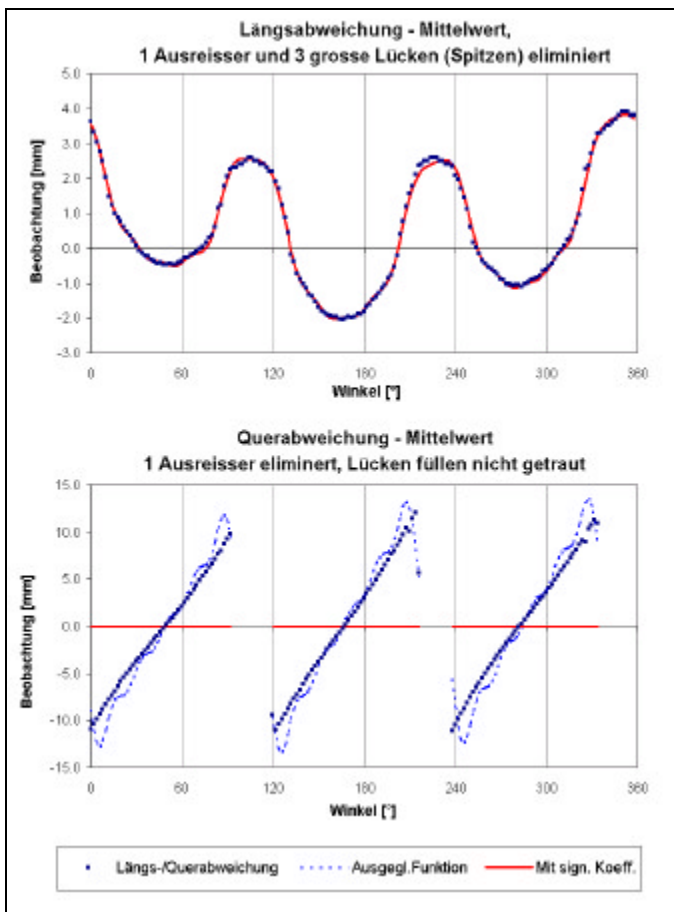


Abb. 8: Querabweichung in Abhängigkeit der Prismenorientierung bei einer Visur unter 50°

lässige Anwendung der Reflektorkorrektur für *alle* Prismenorientierungen sollten diese „Ausreisser“ zusätzlich in einem look-up-table geführt werden. Um die Gültigkeitsbereiche festzulegen, sind für jeden Reflektor noch weitere Untersuchungen in kleineren Schrittweiten notwendig. Dies lohnt sich aber lediglich dann, wenn auch tatsächlich Anwendungen vorliegen, in denen Reflektorkorrekturen vorgenommen werden, weswegen an dieser Stelle auf detailliertere Angaben verzichtet wird.

Hinsichtlich der absoluten Abweichungen zeigen sich für die Distanz die kleinsten Beträge (maximal 0.6 mm), die deutlich von den Richtungskomponenten übertroffen werden (gut 6 mm für Querabweichung und knapp 5 mm für die Höhenkomponente). Diese erweisen sich als signifikant in der Fourieranalyse nach (3), wobei die Amplituden für die Frequenz $\omega = 6$ sowohl für Distanz (0.5 mm bis 0.6 mm) als auch für die Querkomponente (2 mm bis 4 mm) und für die Frequenz $\omega = 9$ für die Höhe (1.5 mm bis 3 mm) jeweils mit Abstand die grössten sind. Diese variieren deutlich mit dem untersuchten Exemplar (vgl. Abb. 6); bei-

spielhaft ist die Darstellung der Korrektionsfunktion des Exemplars #3 in Abb. 5 gegeben. Aufgrund der hohen Redundanz und der geringen Standardabweichung der Gewichtseinheit s_0 , die für eine aus den beiden Doppelmessreihen gemittelten Beobachtung gilt und deutlich im Submillimeterbereich liegt, lassen sich die Koeffizienten mit hoher Zuverlässigkeit bestimmen; für die Genauigkeit der Querkomponentenamplituden ergeben sich durchschnittlich etwa 0.05 mm, die Höhenkomponente liegt etwas und die Distanzkomponente liegt deutlich darunter. Betrachtet man alle durchgeführten Messreihen, übertreffen die grössten Koeffizienten ihre Standardabweichung im Mittel etwa um das 40- bis 50-fache, womit die Aussagekraft der Reflektorkorrektur bestätigt wird. Es kann eine Exemplarstreuung baugleicher GRZ4 nachgewiesen (# 1-4 in Abb. 6) und die Wirkung der Modifikation des GRZ4 gezeigt werden (# 6 in derselben Abbildung).

4.2 Distanzabhängigkeit

Um die Distanzabhängigkeit zu untersuchen, wurde der Versuch mit einem Standard-GRZ4 auf den Distanzen 5 m,

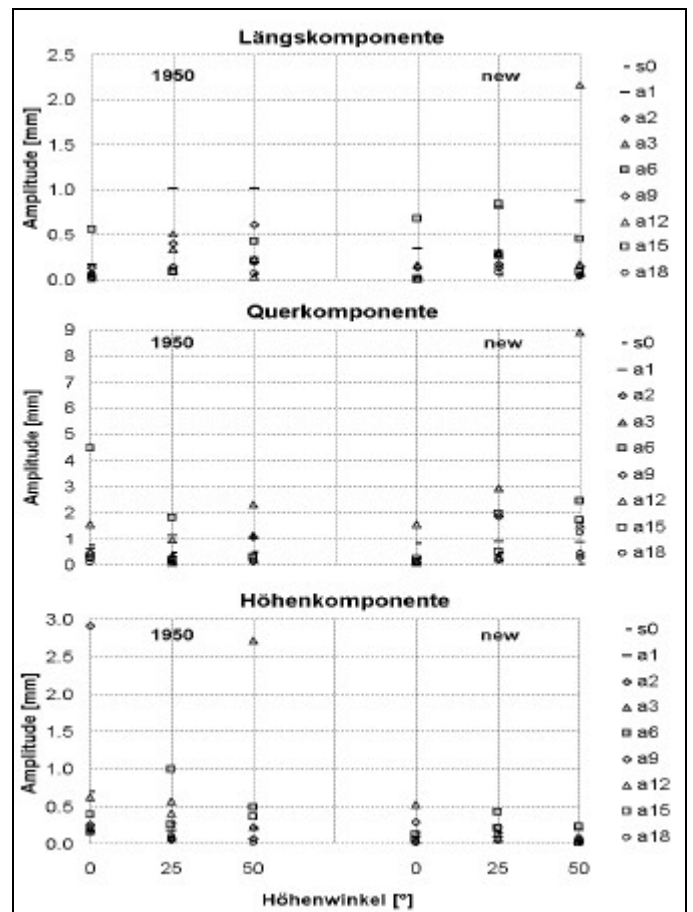


Abb. 9: Fourierkoeffizienten in Abhängigkeit vom Höhenwinkel

10 m, 15 m, 20 m, 30 m, 40 m und 50 m wiederholt. Es wurde darauf geachtet, dass alle Messreihen mit derselben Prismenorientierung begonnen wurden. Die *Reproduzierbarkeit* einer Beobachtung während einer Doppelmessreihe für die Distanz zeigt sich als nicht entfernungsabhängig und bestätigt den in Kapitel 0 erhaltenen Wert von 0.06 mm. Hingegen erweist sich die Reproduzierbarkeit für beide Richtungskomponenten erwartungsgemäss als distanzabhängig: bei 5 m beträgt sie sowohl für die Quer- als auch für die Höhenkomponente 0.02 mm und wächst bei 50 m auf 0.18 mm (quer) bzw. 0.11 mm (Höhe) an.

Der grösste *systematische* Reflektorkorrektionsanteil der Längskomponente übersteigt zwar die Reproduzierbarkeit um Faktor 10, bleibt aber ebenfalls erwartungsgemäss entfernungsunabhängig. Für die Querkomponente nimmt der grösste Schwingungsanteil (mit der Kreisfrequenz $\omega = 6$) mit zunehmender Distanz deutlich ab: von 3 mm bei 10 m auf 0.5 mm bei 40 m und 1.2 mm bei 50 m. Alle übrigen Koeffizienten bleiben unter 1 mm. Für die Höhenkomponente haben die Kreisfrequenzen 3 und 9 den

grössten Einfluss, wobei sie mit der Entfernung variieren (vgl. Abb. 7). Dies deutet darauf hin, dass das funktionale Modell (2) bei der Verallgemeinerung auf 360°-Reflektoren zusätzlich um den Parameter „Distanz“ oder eine distanzabhängige Grösse erweitert werden müsste. Ignoriert man die systematisch wirkenden Anteile, erhöht man die durch den Reflektor bedingte Unsicherheit der Richtungsmessung von $s_0 < 0.7$ mm auf 2.5 mm und der Höhenmessung von $s_0 < 0.5$ mm auf 1.8 mm im Entfernungsbereich von 5 m bis 50 m, wobei Spitzenwerte in der Grössenordnung von 4 mm bzw. 6 mm auftreten können.

4.3 Einfluss der Visursteilheit

Im Hinblick auf praktische Anwendungen mit steilen Visuren wurde dieser Aspekt ebenfalls untersucht, indem der Reflektor unter Höhenwinkeln von ca. 25° und 50° positioniert wurde, wobei die Räumlichkeiten lediglich eine Horizontalabstand von etwa 7.5 m ermöglichten. In diese Untersuchung wurde der modifizierte GRZ4 Höhenunterschied (etwa 3.1 m) noch einwandfreie Messungen möglich waren, gelang es dem Distanzmessmodul des Tachymeters bei einer Visur unter 50° nicht immer, innerhalb von fünf Sekunden (gewähltes time-out für die automatisierte Messwerverfassung) eine Messung durchzuführen. Somit kam es für beide Prismen innerhalb von jeweils drei kleinen Verschwenkungsbereichen zu Datenausfällen (vgl. Abb. 8). Für alle drei Komponenten entspricht die Reproduzierbarkeit derjenigen bei horizontaler Visur, allerdings treten höhere Abweichungen zum Sollwert auf. Diese verhalten sich zwar noch periodisch, sind aber wegen der Datenlücken und der Sägezahnstruktur, die einen deutlich höheren Entwicklungsgrad der Fourierreihe erfordern würde, nur mit begrenzter Aussagekraft mittels der bisher benutzten Fourierreihe zu modellieren. Beispielhaft sei anhand der Querabweichung für 50° gezeigt, dass durchaus ähnliche Strukturen bei beiden Exemplaren auftreten, aber der modifizierte Reflektor nur für horizontale Visuren und für die Höhenkom-

ponente optimiert zu sein scheint (vgl. Abb. 9). Es empfiehlt sich, auch hier die systematischen Anteile als Korrektur zu berücksichtigen, da hiermit eine Genauigkeitssteigerung von bis zu Faktor 10 und somit der Submillimeterbereich erreicht werden kann.

5. Abschließende Bemerkungen

Mit dem am geomETH entwickelten Verfahren zur automatisierten Bestimmung der Reflektorkorrektur lässt sich mit relativ geringem Beobachtungsaufwand (weniger als zwei Stunden) ausreichend Datenmaterial sammeln, um die Eigenschaft eines Reflektors unter gegebenen Randbedingungen zu testen. So konnten in mehr als 20 Messreihen Aussagen für verschiedene Aspekte abgeleitet werden. Zunächst ist festzuhalten, dass die meisten Messungen innerhalb der Herstellerangaben (3 mm + 3 ppm) bleiben und innerhalb der ein- bis zweifachen Winkelmessgenauigkeit nach DIN 18723 für visuell mit dem TCA 1100 durchgeführte Richtungsmessungen liegen. Es muss jedoch betont werden, dass die hohe innere Genauigkeit der automatischen Zielerfassung durchaus den Aufwand der Bestimmung der Reflektorkorrektur rechtfertigt, um in Präzisionsanwendungen nicht durch Vernachlässigen systematischer Effekte Genauigkeitseinbussen in Kauf nehmen zu müssen. Deutlich bestätigt sich die für herkömmliche Prismen bekannte Tatsache, dass diese nicht hinsichtlich *aller* Anforderungen optimiert sein können. So ist der modifizierte GRZ4 offensichtlich für horizontale Visuren und die Höhenkomponente optimiert, wodurch er sich zum Beispiel für die Baumaschinensteuerung besonders eignet; für automatisierte Deformationsüberwachungen in stark verknüpften dreidimensionalen Netzen kommen diese nur in Frage, wenn wirklich die Reflektorkorrektur angebracht wird. Aufgrund von zusätzlichen Einflüssen durch z.B. Phasen- und Intensitätsinhomogenitäten im Sende- und Empfangssystem der ATR ist

diese jedoch immer nur für eine spezielle Instrumenten-Reflektorkombination anzunehmen. Erst nach weiteren Untersuchungen können Aussagen über die Exemplarstreuung des Instruments gemacht werden, wobei hier noch weitere Effekte wie Driften sowohl im Entfernungsbereich als auch im Richtungsbereich berücksichtigt werden sollten. Auch spezielle Aspekte, wie das Verhalten bei extrem beeinflussten Reflektionsverhältnissen (z.B. Ausreisser bei speziellen Orientierungen) oder das Verhalten bei herkömmlichen Prismen können mit dem automatisierten Verfahren zur Reflektorkorrektur leicht untersucht werden.

Literatur:

- FAVRE, C.; FLACH, PH. [1999]: Stations totales motorisées: Etat de la technique et perspectives d'avenir. VPK 3/99, S. 96-100.
- FLACH, PH.; NATEROP, D. [1999]: Neue Analysetechniken für Deformationsmessungen in permanenten Robotertachymeter-Netzen. AVN 8-9 / 1999.
- HAAG, R.; BAYER, G.; ZIMMERMANN, M.; SCHERRER, R. [1997]: Vermessen mit der automatischen Feinzielung des TCA 1800 von Leica. VPK 7/97, S.466-471.
- HEISTER, H. [1988]: Zur Fehlausrichtung von Tripelprismen. ZfV, S. 249-258.
- HENNES, M. [1991]: Simultane Selbstkalibrierung periodischer Fehleranteile von Theodoliten. In: VR 5/1991, S.218-228.
- RÜEGER, J.M. [1990]: Electronic Distance Measurement. 3rd Ed., Springer-Verlag, Berlin.
- SCHMIDT, H. G. [1995]: Die Kalibrierung elektrooptischer Distanzmesser am Geodätischen Institut der RWTH Aachen - eine Bilanz aus 14 Jahren. VR, S.320-334.

Dipl.-Ing. C. Favre
Dr.-Ing. M. Hennes
Institut für Geodäsie und
Photogrammetrie
ETH Zürich
CH-8093 Zürich
e-mail: favre@geod.baug.ethz.ch
e-mail: hennes@geod.baug.ethz.ch