

Systemeigenschaften von Robottachymetern im Nahbereich – Untersuchungen am Beispiel von Leica-Instrumenten

M. Hennes

Erschienen in FuB
6/2003, Seite 300-310

Zusammenfassung: In diesem Beitrag werden für den Nahbereich wesentliche Systemeigenschaften von Robottachymetern wie das Auflösungsvermögen und die Invarianz der Ziellinie der Zielerfassungseinheit vorgestellt. Im Hinblick auf den zukünftig steigenden Permanentbetrieb werden thermische Einflüsse auf die Ziellinie und den Neigungssensor (Kompensator) untersucht. Weiterhin werden Effekte diskutiert, die wegen der Optimierung der Messgeschwindigkeit die Performance bei der permanenten Positionsbestimmung langsam bewegter Objekte beeinflussen.

Abstract: Important properties for the close-range performance of robot tacheometers are both the resolution and the collimation error's variation of the target recognition unit. Additionally, due to rising applications in permanent mode in future, temperature effects on the collimation axis and on the tilt-sensor can occur. All these effects were examined and presented in this paper. Furthermore, effects are discussed, which occur due to the optimization of the measuring rate and affect the performance in tracking slow-motion objects.

1 Einleitung

Robottachymeter zeichnen sich unter anderem durch die Fähigkeit aus, die Zielung zu bewegten Zielen nachzuführen und die Position des bewegten Ziels in Abhängigkeit von der Zeit, d.h. den Bewegungsverlauf, koordinatenmäßig zu bestimmen. Eine wesentliche Komponente derartiger Instrumente ist die Zielerfassungseinheit, die bei Instrumenten der Firma Leica auf CCD-Techniken beruht und auch mit ATR-Modul (für Automated Target Recognition) bezeichnet wird. Die Zielnachführung (Lock-Modus, ohne Messung) erfolgt über die Firmware. Beide Betriebsarten (Erfassung und Nachführung) können über die Tastatur oder durch Schnittstellenparameter (ATR on/off, lock on/off) ein- und ausgeschaltet werden.

Diese Instrumente sind prädestiniert, relativ schnell ablaufende geometrische Veränderungen zu erfassen, die durch natürliche Vorgänge oder künstliche Eingriffe an Objekten entstehen. Weil Robottachymeter die Automatisierung von Messabläufen einschließlich der Zielerfassung zulassen, sind sie prinzipiell hervorragend für Permanent- und Deformationsmessungen geeignet. Sie sind diesbezüglich dem Menschen, d.h. der visuell-manuellen Beobachtung, überlegen.

Als Beispiel für die Leistungsfähigkeit der ATR im mittleren Distanzbereich möge eine Netzmessung mit fünf Punkten und einer Ausdehnung von 120 m * 100 m dienen. Dieses Netz wurde als kombiniertes Strecken- und Richtungsnetz mit einem Robottachymeter (TCA 2003) und zum Vergleich mit der Kombination Mekometer ME 5000 und T 3000 beobachtet (alle Instrumente der Firma Leica) [Knöpfler, 2003]. In diesem Netz streuen die mit dem Robottachymeter gemessenen Distanzen um ± 0.3 mm bezüglich der mit dem Mekometer ME 5000 gemessenen Distanzen. (Bei Verwendung von Präzisionsrundprismen anstelle von Mekometerprismen beträgt die Streuung ± 0.6 mm.) Im tachymetrisch gemessenen kombinierten Strecken- und Richtungsnetz ergibt sich die Punktlagegenauigkeit zu ± 0.14 mm. Für die automatisierte Deformationsmessung ist die durch polares Anhängen erzielbare

Genauigkeit von Bedeutung: Bezogen auf die Referenzmessung mit dem ME 5000 und T 3000 wurde ein mittlerer Punktlagefehler von 0.5 mm erreicht. Die Höhenkomponente wurde im Vergleich zum Feinnivellement und zur gegenseitig-gleichzeitigen Zenitwinkelmessung jeweils im Mittel um 0.8 mm zu hoch bestimmt, wobei bei einer Standardabweichung von 0.7 mm bzw. 1 mm aufgrund der Messanordnung und des Messablaufs eher refraktive Ursachen als eine instrumentell bedingte Systematik vermutet werden können.

Im Nahbereich sind insbesondere solche Instrumenteneigenschaften in Betracht zu ziehen, die auf größeren Distanzen außer Acht gelassen werden können, weil sie aufgrund distanzabhängiger Unsicherheiten in der größeren Gesamtunsicherheit untergehen. Nun erhebt sich die Frage, inwieweit sich diese bereits recht hohen Genauigkeiten bei weiterer Reduktion des Messbereiches steigern lassen. Erste Erfahrungen liegen für optimierte Messanordnungen vor, bei der einzelne Fehlerkomponenten aufgrund von symmetrischen Punktverteilungen reduziert oder eliminiert werden [KRICKEL, 1995]. Dieser Vorteil wurde am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe bei einigen Projekten genutzt. Hier konnten mit dem TCA 2003 (unter Verwendung von Reflexfolie zur Zielmarkierung) nach der Ausgleichung Punktgenauigkeiten von wenigen Zehntel Millimetern erreicht werden, wobei es sich immer um rein statische Anwendungen im Nahbereich handelte. Um die Frage zu beantworten, inwieweit die symmetrische Punktanordnung oder die Leistungsfähigkeit des Instrumentariums ausschlaggebend ist, werden im vorliegenden Beitrag einzelne Untersuchungen vorgestellt.

Weil die Herstellerangaben für die Instrumentengenauigkeit zwar alle (oder zumindest die meisten) Unsicherheiten für spezifizierte Umgebungsbedingungen gesamthaft abdecken, aber keinen Aufschluss über einzelne Unsicherheitskomponenten geben, ist die detaillierte Kenntnis des Systemverhaltens des verwendeten Instrumentariums unter bestimmten Einsatzbedingungen (hier: Nahbereich) in Bezug auf die für die spezielle Anwendung geforderte Messtoleranz (bzw. Genauigkeit) von Bedeutung. Das Systemverhalten der verschiedenen in einem Robottachymeter auf komplexe Weise kooperierenden Sensoren ist demzufolge sowohl im Einzelnen als auch bezüglich ihres Zusammenwirkens zu analysieren. Dazu ist es erforderlich, schrittweise vorzugehen und zunächst Kenntnisse über fundamentale Eigenschaften zu gewinnen.

In diesem Aufsatz werden insbesondere diejenigen Unsicherheitskomponenten der Zielerfassung analysiert, die für Messungen im Nahbereich von Bedeutung sind. Dies sind vor allem das Auflösungsvermögen und der Ziellinienverlauf der ATR sowie Aspekte, die mit der automatisierten Permanent- oder Deformationsmessung in Zusammenhang stehen. Langsame Bewegungsvorgänge, die ohne Informationsverlust im „Stop-and-go-Modus“ beobachtet werden können, werden also eingeschlossen. Weiterhin werden erste Erkenntnisse über das Temperaturverhalten vorgestellt. Des Weiteren wird auf Besonderheiten in der Systemperformance hingewiesen, die im Hinblick auf die konstruktive Maximierung der Messgeschwindigkeit auch bei langsamen Messprozessen auftreten. Aussagen über die dynamische Leistungsgrenze sollen erst getroffen werden, wenn die Erkenntnisse über das Verhalten langsam bewegter Objekte gesichert sind, kinematische Betrachtungen sind also nicht Gegenstand dieses Beitrags.

Die Untersuchungen wurden an den Instrumenten TCRA 1103 und TCA 2003 des Geodätischen Instituts der Universität Karlsruhe (GIK) und an einem vom Hersteller zu Testzwecken leihweise für wenige Tage zur Verfügung gestellten TDA 5005 durchgeführt. Wenn nicht anders erwähnt, wurden die Messungen über die RS232-Schnittstelle mit Geocom-Befehlen gesteuert. Für die Leistungsfähigkeit des EDM-Moduls und des Richtungssensors sei auf die Literatur verwiesen, zum Beispiel [GOTTWALD et al, 1998], [ZEISKE, 1999]. Als Richtwerte sind die Herstellerspezifikationen des ATR-Moduls in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

	TCRA 1103	TCA 2003	TDA 5005
Positioniergenauigkeit	bis 300 m: 3 mm ab 300 m: 1 mgon ¹	bis 200 m: 1 mm ab 400 m: 0.15 mgon	Messvolumen 20 m: < 0.3 mm
Minimale Zielweite ATR (ohne Lock-Modus)	1.5 m	5 m	5 m
Zielliniengenauigkeit	Keine Angabe	0.1 ... 0.2 mgon	Keine Angabe

2 Auflösungsvermögen

Unter Auflösungsvermögen wird die kleinste, gerade noch mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit vom Messsystem bestimmbare Veränderung der Messgröße verstanden. Sind die Messungen zu benachbarten Positionen jeweils mit der Messunsicherheit u behaftet, ergibt sich das Auflösungsvermögen für die Wahrscheinlichkeit von 95% zu $u \cdot 1.96 \cdot \sqrt{2}$. Die Wiederholgenauigkeit unter verschiedenen Randbedingungen wird auch mit „innerer Genauigkeit“ bezeichnet und trägt wesentlich zur Messunsicherheit u bei. Wenn die aus Mehrfachmessungen abgeleitete Wiederholgenauigkeit mit zunehmend größerer Auflösung der Anzeige (im Vergleich zur Sensorgenauigkeit) bei bestimmten Messpositionen (Realisierungen) gegen Null zu gehen scheint, muss die Wiederholgenauigkeit an verschiedenen bekannten Messpositionen innerhalb der kleinsten Anzeigeeinheit ermittelt werden. Für die Ermittlung des Auflösungsvermögens ist dann die Messunsicherheit als Standardabweichung aus diesem relativen Soll-Ist-Vergleich abzuleiten.

Das Auflösungsvermögen eines Robottachymeters lässt sich bestimmen, indem der Reflektor in kleinen, übergeordnet genau messbaren Schritten verschoben wird. Dies kann als Simulation kleiner Deformationen bekannter Größe verstanden werden. Das Auflösungsvermögen ist für Bewegungen in allen drei Koordinatenachsen von Bedeutung. In dieser Untersuchung wurde die Querkomponente durch Verschiebung eines Reflektors mittels eines Verschiebeschlittens realisiert, dessen Position quer zur Zielrichtung mittels einer Mikrometerschraube mit einer 0.01-mm-Teilung schrittweise geändert wurde. Für die vertikale Verschiebung wurde der Vertikalkomparator des Geodätischen Instituts eingesetzt, wobei jede Reflektorposition interferometrisch erfasst wird (vgl. Abb. 1). Gleichzeitig geben diese Versuchsanordnungen Hinweise über das Zusammenwirken der ATR-Einheit, des Richtungsabgriffs und des Regelalgorithmus zur Zielnachführung. Aussagen über das Auflösungsvermögen lassen sich aber auch durch scheinbare Positionsänderungen treffen, wie beispielsweise durch die Untersuchung der Orientierungsabhängigkeit der Additionskorrektur von 360°-Reflektoren. Die Änderung der Additionskorrektur simuliert eine Distanzänderung. Aus derartigen Untersuchungen lässt sich das Auflösungsvermögen eines einfachen Robottachymeters (TCA 1100L) zu 0.2 mm ableiten [FAVRE, HENNES, 2000].

¹ Nur Angabe für TCA1102 verfügbar

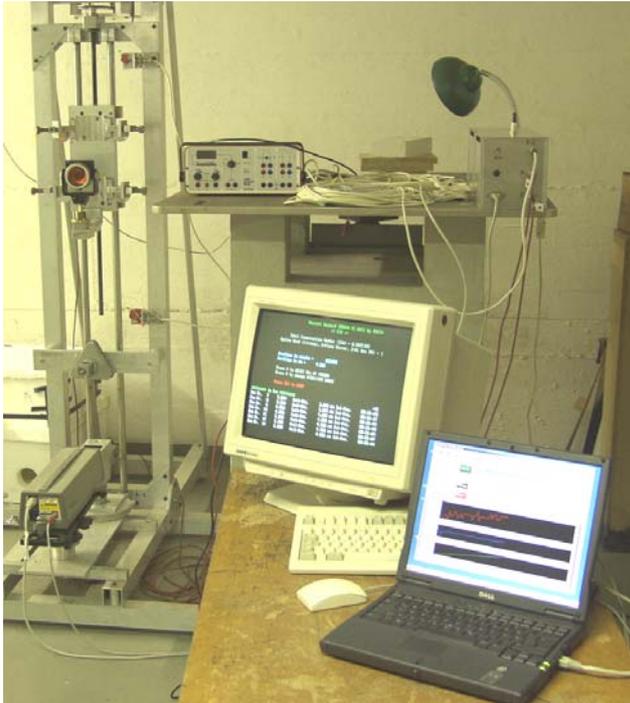


Abb. 1: Vertikalkomparator des GIK

ten ($1 \cdot 10^{-15}$ rad = ca. $6 \cdot 10^{-14}$ gon). Bei längeren Messepochen (ab ca. eine Minute) zeigen sich jedoch in unregelmäßigen Abständen Ausreißer in der Größenordnung von 0.2 mgon und mehr, die möglicherweise mit Aktionen des Distanzmessteils korreliert sind (vgl. Abschnitt 5). Über einen längeren Zeitraum gesehen führt dies zu einer Wiederholgenauigkeit von besser 0.1 mgon, wobei bei einem länger als 30 Minuten eingeschalteten Instrument mit einem etwas kleineren Betrag zu rechnen ist und unmittelbar nach dem Einschalten bei niedrigen Temperaturen im Betriebsmodus „lock on“ mit einem deutlich größeren. Trotz dieser Erscheinungen kann aus [HOLLENSTEIN, 1999], abgeleitet werden, dass die innere Genauigkeit der Zielerfassungseinheit weder von der Voreinstellung noch vom Typ des verwendeten Prismas abhängt. Deswegen erscheint es gerechtfertigt, das Auflösungsvermögen mit einem Prismentyp (Standardreflektor) in einer Distanz von typischerweise 10 m mit Schrittweiten der lateralen Verschiebung von 0.01 mm, 0.02 mm und 0.05 mm zu untersuchen, was Richtungsschritten von etwa 0.06 mgon, 0.13 mgon bzw. 0.32 mgon entspricht. Bei diesen Versuchen traten die oben erwähnten Ausreißer nicht auf, allerdings wurden diese Messungen nicht als Dauermessung, sondern im „Stop-and-go-Modus“ durchgeführt.

Es zeigt sich für den TCA 2003 ein horizontales Auflösungsvermögen von 0.1 mgon (vgl. Abb. 2). Dieser Wert ergibt sich aus der Standardabweichung einer Einzelmessung bei der linearen Regression bezüglich der Positionsänderung. Die durch die lineare Regression implizit erfolgende Korrektur um einen eventuell vorhandenen Maßstabsfehler ist vertretbar, weil es nicht um die Verifizierung eines großen Punktabstandes geht, der durch Maßstabsfehler verfälscht sein könnte, sondern um das Auflösungsvermögen, das die Fähigkeit beschreibt, zwei nahe beieinander liegende Punkte zu unterscheiden. Die Einstellunsicherheit am Schiebeschlitzen von schätzungsweise maximal 0.01 mgon ist in diesem Fall bei der Angabe des Auflösungsvermögens vernachlässigbar.

Bereits die in [HOLLENSTEIN, 1999] präsentierten Ergebnisse lassen vermuten, dass die Wiederholgenauigkeit der Zielerfassungseinheit von den Randbedingungen abhängig ist. Dies wurde am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe näher analysiert. Zunächst sei eine optimale Situation betrachtet: die Bestimmung der Wiederholgenauigkeit für nahezu horizontale Zielungen, d.h. quasi ohne Einwirkung von Kompensatoreffekten, bei Zimmertemperatur und nach einer Instrumenteneinlaufzeit von mindestens fünf Minuten. Bei kurzer Messzeit (< 10 s) ohne störende Nebeneinflüsse liegt die Wiederholgenauigkeit im besten Fall bei 0.01 mgon, sie entspricht der kleinsten am Display angezeigten Stelle und dem 160-millionenfachen Betrag der kleinsten über die Schnittstelle übertragenen Einheit bei Richtungswerten

Allerdings liefert die Zielerfassungseinheit nur diese hohe Genauigkeit, wenn mit der Richtungswertermittlung die Auslösung einer Distanzmessung verbunden wird. Unterbleibt diese, repräsentieren die nach dem Befehl „fine adjust“ ausgelesenen Werte die Querverschiebung lediglich mit einer Standardabweichung von 0.6 mgon (vgl. Abb. 2: die Punkte stellen die Messergebnisse nach „fine adjust“ dar).

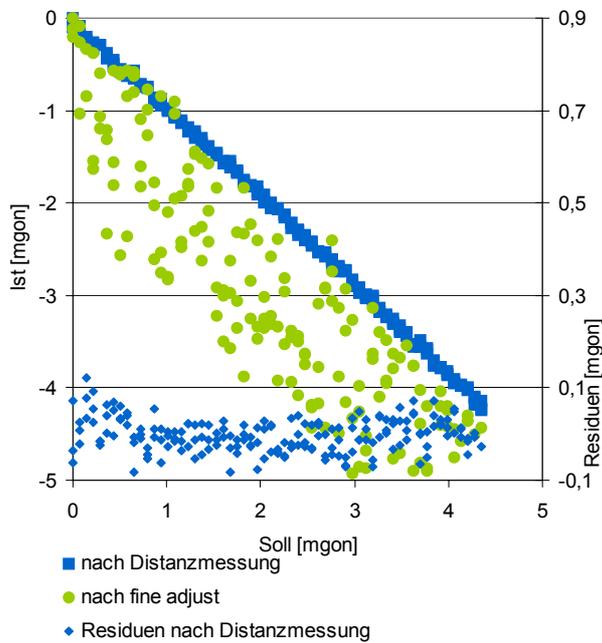


Abb. 2: Auflösungsvermögen horizontal TCA 2003,
 Distanz 8.7 m
 Quadrat: Ausgabewert nach Distanzmessung;
 Raute: zugehöriges Residuum in Bezug zur Regressionsgerade;
 Punkt: Ausgabewert nach Befehl „fine adjust“, zugehörige Residuen nicht dargestellt

Die Kommunikationssoftware des TDA 5005 erlaubt die Einstellung einer Toleranz für die Feinpositionierung. „fine-adjust“-Messungen mit der kleinsten Toleranzvorwahl (0.5 mgon) lassen deutlich erkennen, dass keine erneute Detail-Auswertung des Zielerkennungsmoduls vorgenommen wird, solange der Toleranzwert für die Feinpositionierung unterschritten wird (vgl. Abb. 3); die Standardabweichung einer Einzelbeobachtung entspricht mit 0.13 mgon etwa dem durch die Toleranzvorgabe erwarteten Quantisierungsfehler. Inwieweit das Auflösungsvermögen (hier 0.4 mgon) in Kombination mit einer Distanzmessung noch zu steigern ist, müssen weitere Untersuchungen zeigen.

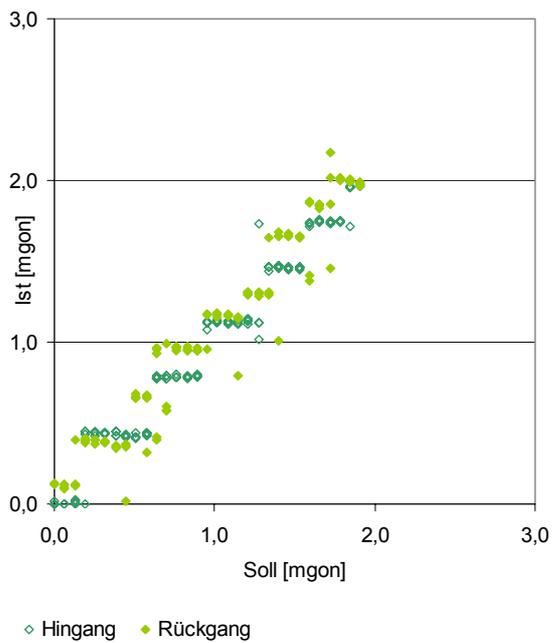
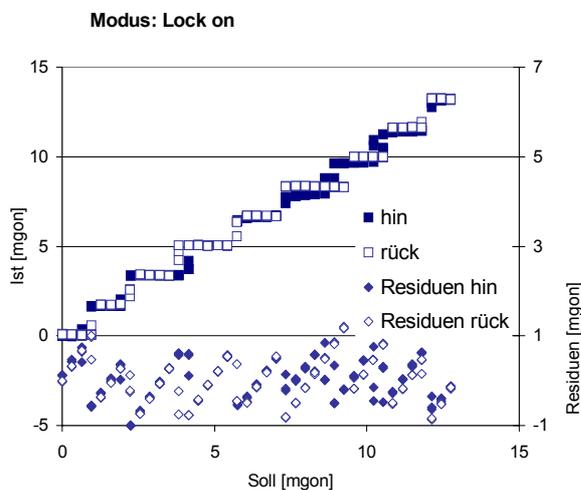


Abb. 3: Auflösungsvermögen horizontal TDA 5005, Distanz 10 m, Ausgabewert nach „fine adjust“.

Das vertikale Auflösungsvermögen des untersuchten TCA 2003 wurde auf zwei Distanzen untersucht (10 m und 30 m). Es ergibt sich zu 0.4 mgon bzw. 0.06 mm bei 10 m und 0.3 mgon bzw. 0.12 mm bei 30 m. Auch hier wird eine vorhergehende Distanzmessung benötigt. Dabei ist der EDM-Mode (Exact single, standard single oder fast single) für die erreichbare Genauigkeit unerheblich, allerdings lässt sich mit „fast single“ die Messzeit um mehr als Faktor zwei verkürzen. An der folgenden Abbildung (Abb. 4) wird sehr anschaulich deutlich, welcher Einfluss der gewählte Messmodus hat: Sobald die Lock-Funktion ausgewählt ist (d.h. ein bewegtes Ziel soll verfolgt werden), wird offensichtlich die Kapazität des ATR-Moduls hauptsächlich für die Zielnachführung verwendet, weswegen die Positionsabstimmung in größeren Schritten erfolgt und sich das Auflösungsvermögen um Faktor fünf auf 1.5 mgon reduziert. Dieses Verhalten konnte auch für kürzere Distanzen nachgewiesen werden (kürzeste Messanordnung in diesem Fall: 10 m).



3 Ziellinienverformung

Die Zielachse ist – im Gegensatz zur optischen Achse – definiert als diejenige Gerade der Schar paralleler Geraden bei der Abbildung des Strichkreuzes auf unendlich, die den objektseitigen Brennpunkt schneidet. Unter Ziellinie wird die vom Objektiv bei Bewegungen der Fokussierlinse im Objektraum entworfene Bildkurve des festen Strichkreuzes verstanden, die durch die Strichkreuzexzentrizität Hyperbelanteile enthält. Der Zielachsfehler hängt also von der Distanz ab und kann im Nahbereich nicht zu vernachlässigende Beträge annehmen. Für die Zielerfassungseinheit gilt Entsprechendes, wobei „Strichkreuz“ durch „Referenzpunkt des Zielerfassungssystems“ zu ersetzen ist. Weiterhin ist zu

berücksichtigen, dass die Abbildung des Prismas auf den CCD-Array mit einer festen Fokuseinstellung (100 m) erfolgt; gleichwohl ist eine Exzentrizität des Referenzpunktes von der optischen Achse anzunehmen, die letztendlich ebenfalls zu einem hyperbelförmigen Verlauf der Ziellinie führt. Einfache Modellrechnungen auf der Basis der Gesetze der geometrischen Optik liefern folgende Größenordnung: Unter der Annahme einer Abweichung des Referenzpunktes von der optischen Achse von beispielsweise lediglich 0.1 mm entstehen distanzabhängig hyperbelförmige Abweichungen, die bis zu 10 mgon erreichen (Wert für die kürzeste Messdistanz von 0.6 m).

Optische und ATR-Zielachse sind nicht notwendigerweise kollinear. Die Kenntnis dieser Abweichung beider Ziellinien voneinander ist von besonderem Interesse, wenn visuelle und ATR-Beobachtungen ohne Messung in zweiter Fernrohrlage innerhalb eines Satzes gemischt werden, wie es beispielsweise bei Absteckungen geschehen kann. Deswegen bieten die Instrumente eine menügeführte Routine an, die zur Bestimmung und Abspeicherung der horizontalen und vertikalen Komponente des ATR-Zielachsfehlers dient. Herstellerseitig wird empfohlen, hierfür eine Distanz von 100 m zu wählen. Im Hinblick auf die oben beschriebenen Aspekte ist sie für Anwendungen im Nahbereich auf den vorgesehenen Messbereich anzupassen. Der Anwender sollte sich darüber im Klaren sein, dass bei stark variierenden Zielweiten im Nahbereich die Verwendung des so bestimmten konstanten Wertes zu Genauigkeitseinbußen führen kann.

Die Ziellinie des TDA 5005 verläuft innerhalb der Spezifikation, wenn der Winkelspiegel-Reflektor (CCR = Corner Cube Reflector) in Verbindung mit der empfohlenen Versatzblende AP31 verwendet wird. In Abbildung 5 ist der hyperbolische Verlauf noch gut erkennbar. Die hellen Balken geben die aus der für 20 m spezifizierten Punktgenauigkeit (0.3 mm) abgeleitete Richtungsgenauigkeit wieder. Ihre Ableitung erfolgt gemäß dem Varianzfortpflanzungsgesetz, wobei für alle drei (polaren) Koordinatenachsen dieselbe Unsicherheit postuliert wird und von der (getrennt) spezifizierten Distanzmessgenauigkeit von 0.2 mm im Nahbereich² ausgegangen wird. Die in Abbildung 5 auftretende konstante Komponente der gemessenen Ziellinienverformung von etwa 1 mgon ist als Anteil an der Höhenindexabweichung zu bewerten, der allein aus der optischen Abbildung des Zieles auf die ATR in Bezug auf ihre „Referenzmarken“ resultiert. Der horizontale Ziellinienverlauf weist etwas geringere Abweichungen auf als die Vertikalkomponente. Ohne Verwendung der Vorsatzblende zeigen sich bei diesem Instrument – sowohl auf Rund- als auch auf 360°-Prismen – Ziellinienverformungen, die außerhalb der Spezifikation liegen. Es sei darauf hingewiesen, dass auch die Justierung der ATR der Exemplarstreuung unterliegt. Laut Mitteilungen des Herstellers sollte die Mehrzahl der auf dem Markt befindlichen Instrumente besser als das untersuchte Instrument justiert sein. In kritischen Anwendungsfällen empfiehlt sich also für den Benutzer die Überprüfung der Ziellinienverformung. Diese Überprüfung ist einfach und schnell durchzuführen und benötigt keine Spezialausrüstung.

Die ATR des TCA 2003 erweist sich auch unterhalb der spezifizierten Grenze von 5 m noch als funktionsfähig, allerdings werden die Herstellerangabe bezüglich der Zielliniengenauigkeit von 0.1 mgon bis 0.2 mgon auch oberhalb von 5 m deutlich überschritten. Für das untersuchte Instrument scheint sich die oben angenommene Dejustierung von 0.1 mm zu bestätigen. Allerdings kann von einer Reproduzierbarkeit der Ziellinie in der Größenordnung von wenigen Zehntel mgon ausgegangen werden, weswegen sich auch hier eine Kalibrierung abgestimmt auf die Anwendung im Nahbereich empfiehlt. Wahrscheinlich lässt sich auch hier durch eine Vorsatzblende weitgehend Abhilfe schaffen.

² Untersuchungen an einem TDA 5005 am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETHZ zeigen, dass diese Spezifikation eher optimistisch ist [INGENSAND, 2001].

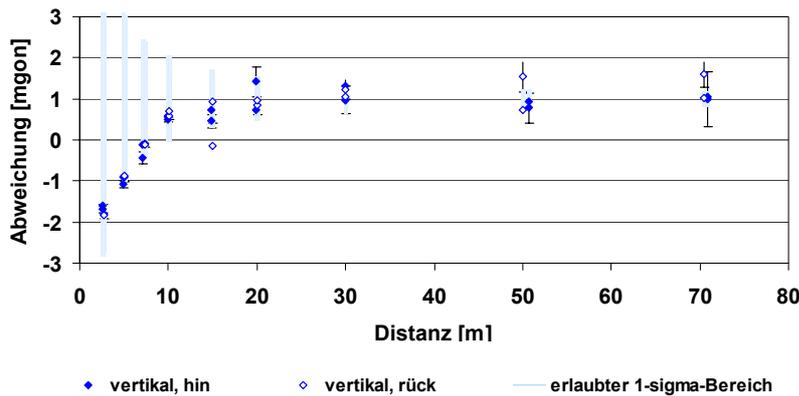


Abb. 5: ATR-Ziellinienverformung: TDA 5005 mit Vorsatzblende AP31 auf Winkelspiegel (CCR).

4 Thermische Stabilität

Thermische Instabilitäten können bedingt sein durch thermische Verformungen von mechanischen Komponenten, zu denen auch optische Bauteile und insbesondere deren Halterungen

zählen, durch Änderungen physikalischer Parameter (z.B. Viskosität der Flüssigkeit des Neigungssensors) und durch Drifterscheinungen elektronischer Komponenten. Beispielsweise wird der thermisch bedingten Nullpunktdrift des EDM-Moduls durch gezielte Bestimmungen einer inneren Referenzstrecke entgegengewirkt, und bekanntlich wird der Maßstabsfehler, der aufgrund thermisch bedingten Driftens des Quarzoszillators entsteht, softwaremäßig durch eine aus interner Temperaturmessung resultierenden Maßstabskorrektur reduziert. An diesen beiden Beispielen lässt sich der besondere konstruktive Anspruch an Robottachymeter leicht verdeutlichen: Bedingt durch die gewünschten kurzen Messzeiten muss auch die interne Temperaturmessung kurzen Ansprechzeiten genügen, was unter Umständen die komponentennahe Implementation von mehreren Temperatursensoren erfordert. Weiterhin sind interne Messabläufe zur Driftreduktion zeitlich zu optimieren. Da diesen Forderungen nur bedingt nachgekommen werden kann, werden Restsystematiken verbleiben.

Abbildung 6 verdeutlicht beispielhaft zunächst die Problematik der Temperaturanpassung eines Instrumentes anhand der durchgezogenen Linien mit Bezug zur rechten Skalenachse. Die dicke Linie repräsentiert die mit einem aufgeklebten Fühler gemessene Außentemperatur des Instrumentes, die dünne Linie die ausgelesene Innentemperatur. Während der gesamten Zeit führte das Instrument Satz winkelmessungen mit Hilfe der Zielerfassungseinheit aus. Es wird deutlich, dass die Innentemperatur, bedingt durch den Aufheizeffekt der Elektronik, zunächst um einige Grad höher liegt als die Außentemperatur, dass die Akklimatisierungszeit bei Abkühlung etwa 30 Minuten beträgt und bei Erwärmung kürzer ist und dass, folgerichtig, sprunghafte, kurze Temperaturänderungen (wie gegen 10:55)

nicht vom inneren Temperatursensor wahrgenommen werden. Die Ansprechzeit dieses Sensors selbst liegt wahrscheinlich in der Größenordnung von einer Minute, was aber im Hinblick auf die Akklimatisierungszeit bedeutungslos zu sein scheint. Allerdings ist zu vermuten, dass innerhalb des Instrumentes lokale Temperaturgradienten auftreten, weswegen die ausgegebenen Temperaturen um wenige Grad von der Temperatur einzelner Baugruppen abweichen können. Deswegen ist die Korrektur eventueller Systemabweichungen allein aufgrund der zur Verfügung stehenden internen lokalen Temperatur schwierig.

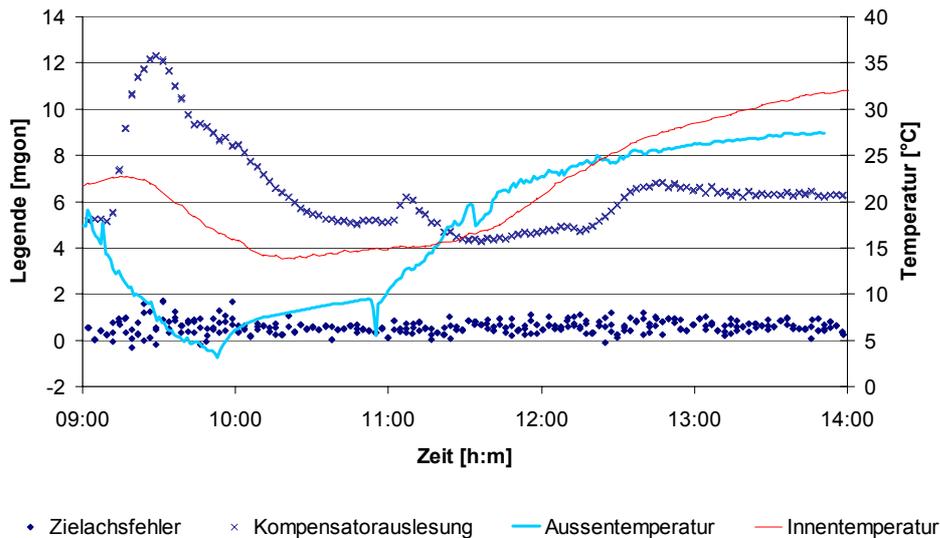


Abb. 6: Temperaturverhalten des TCA 2003

Das Temperaturverhalten einzelner Tachymeterkomponenten wurde untersucht, indem fortlaufend Satzmessungen zu fünf Zielen in beiden Lagen durchgeführt wurden. Aus räumlichen Gründen mussten sowohl Prüfling als auch die Ziele (Reflektoren unterschiedlicher Ausführung) in der Klimakammer

untergebracht werden, weswegen die Ziele unter Ausnutzung der maximal möglichen Distanzen (ca. 5 m) lediglich in einem horizontalen Sektor von knapp 25 gon positioniert werden konnten. Die Zenitwinkel unterschieden sich um bis zu 20 gon. Die Messzeit eines Vollsatzes bei jeweils drei Wiederholungszielungen unterschritt bei allen untersuchten Instrumenten drei Minuten. Die induzierten Temperaturänderungen wurden auf die Satzmesszeit abgestimmt, so dass innerhalb eines Satzes nahezu konstante äußere Bedingungen postuliert werden können. Insgesamt wurde die Umgebungstemperatur in unterschiedlichen großen Intervallen zwischen 3°C bis 27°C variiert. Da Auswirkungen eventueller temperaturbedingter Positionsänderungen der Ziele und eine eventuelle Orientierungsänderung des Stativs durch Verwindung ausgeschlossen werden sollen, werden die polaren Beobachtungselemente nicht unmittelbar analysiert, sondern auf invariante Größen zurückgeführt.

Dies bedeutet im Einzelnen Folgendes: Eine Variation des Zielachsfehlers deutet unter der Annahme eines temperaturunabhängigen Richtungsabgriffs eine Drift der Horizontalkomponente der ATR-Zielachse an. Analog ist für die Vertikalkomponente der Höhenindexfehler zu betrachten, für den ja bereits Flach und Naterop [1999] aus Dauermessungen im mittleren Distanzbereich bei unterschiedlichen Witterungsverhältnissen eine Temperaturabhängigkeit postuliert haben. Allerdings ist der Höhenindexfehler neben eventuellen Drifterscheinungen des Richtungsabgriffes auch von Abweichungen des Neigungssensors überlagert. Letztere könnten bereits aus den Messungselementen selbst eliminiert werden, indem lediglich rohe Vertikalwinkelmessungen ohne Stehachsneigungskorrektur übertragen und abgespeichert werden. Andererseits lässt die Messung mit „eingeschaltetem Kompensator“ bei zusätzlicher Abspeicherung aktueller Neigungswerte sowohl Rückschlüsse auf das Kompensatorverhalten als auch auf den Höhenindexfehler zu: Das Kompensatorverhalten zeigt sich nämlich in der Stabilität bzw. Variabilität des Kompensatorspielpunktes, der aus den Neigungsmessungen in beiden Fernrohrlagen abgeleitet werden kann. Der um den Kompensatorspielpunkt reduzierte Höhenindexfehler gibt so eine Information über die Drift des Abgriffsystems und über die thermische Stabilität der Vertikalkomponente der ATR-Zielachse, d.h. in diesem Fall auf die Ziellinie bei 5 m.

In Abbildung 6 kennzeichnen Kreuze (x) die durch den Kompensator erfasste Stehachsneigung in Richtung des ersten Zieles in Lage 1 der fortlaufenden Satzmessung mit dem TCA 2003. Aus der Zwei-Lagen-Messung kann abgeleitet werden, dass diese Daten hauptsächlich eine Kippung des Instrumentes wiedergeben. Dies wird durch die Analyse der Daten zu den übrigen vier Zielen bestätigt. Der Kompensatoreinspielfehler liegt in der Größenordnung von 0.1 mgon mit steigender Tendenz unmittelbar nach dem Einschalten (nicht dargestellt). Eine Kompensator drift des TCA 2003 lässt sich nicht gesichert ableiten, weil sich für alle durchgeführten Messreihen kein plausibler unmittelbarer funktionaler Zusammenhang in Abhängigkeit der Temperatur formulieren lässt. Weitere Untersuchungen müssen zeigen, inwieweit die thermische Vorgeschichte entscheidend ist. Der Höhenindexfehler, der eine allfällige Vertikalkomponente der Ziellinie einschließt, zeigt eine deutlichere Drifterscheinung, die mit 0.08 mgon/°C sowohl bei Erwärmung als auch bei Abkühlung über den untersuchten Bereich von (14°C ... 33°C) signifikant in Erscheinung tritt. Diese Laboruntersuchungen an einem TCA 2003 auf kurzer Distanz bestätigen die aus der Analyse von Testmessungen mit einem TCA 1800 über mittlere Distanzen gezogenen Vermutungen von Flach und Naterop [1999]. Die Horizontalkomponente der Ziellinie ist temperaturunabhängig, lediglich zeitliche – und damit wohl auch räumliche – Temperaturgradienten vergrößern ihre Unsicherheit (vgl. Abb. 6, Zielachsfehler).

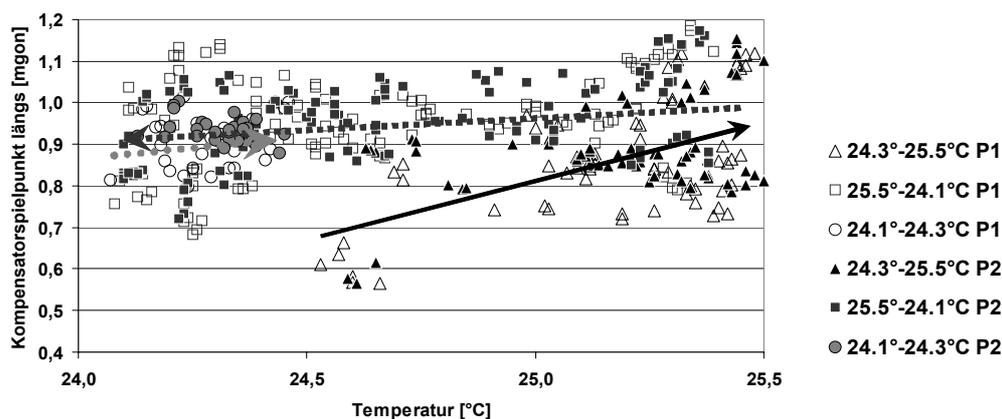


Abb. 7: Stabilität des Kompensatorspielpunktes TDA 5005

Die Vermutung hinsichtlich der Existenz lokaler Temperaturgradienten zwischen Fühler und temperaturabhängiger Komponente (hier Kompensator), die sich durch die Erwärmung von Baugruppen aufbauen können, wird gestützt durch ein mit dem TDA 5005 erzieltes Ergebnis: Hier zeigt sich unmittelbar nach dem Einschalten eine größere Kompensator drift (von knapp $0.3 \text{ mgon}/^\circ\text{C}$, durchgezogener Pfeil in Abb. 7) als bei einem darauffolgenden Abkühlungs- und Erwärmungszyklus (gepunktete Pfeile). Dieses Verhalten bestätigt sich für alle fünf in diesem Satz verwendeten Ziele (gekennzeichnet exemplarisch für Ziel 1 mit „+“ und für Ziel 2 mit „-“ Signatur) und durch einen weiteren Versuch mit einer Starttemperatur von ca. 19°C , bei dem die Kompensator drift nach einer Stunde auf etwa $0.1 \text{ mgon}/^\circ\text{C}$ zurückgeht. Auch hier kann eine Korrektur des temperaturabhängigen Kompensatorspielpunktes nur unter Einbeziehung der Temperaturvorgeschichte erfolgen. Da diese Vorgehensweise zu aufwändig erscheint, wird empfohlen, Präzisionsmessungen in einer Lage nur mit einem Instrument durchzuführen, dessen Innentemperatur sich stabilisiert hat. Beim TDA 5005 konnte keine signifikante Temperaturabhängigkeit der Ziellinie nachgewiesen werden.

Zielachsfehler und Höhenindexfehler des untersuchten TCRA 1103 streuen sehr stark. Die Standardabweichung über alle Sätze beträgt etwa 1.7 mgon und liegt etwa um Faktor drei höher als bei den vorgenannten Instrumenten. Im Gegensatz zu ihnen lässt sich bei gemeinsamer Betrachtung aller Ziele keine einheitliche Korrelation erkennen. In Relation zum hohen Messrauschen muss die Ziellinie als

temperaturunabhängig angesehen werden. Die innere Genauigkeit des Kompensators ist etwa um Faktor acht höher als diejenige der Vertikalwinkel. Deswegen lässt sich aus den ursprünglichen Neigungsmessungen insbesondere beim Einlaufen des Instrumentes kurzzeitig eine Drift des Kompensators beobachten, die jedoch im Rahmen der inneren Genauigkeit des Messsystems vernachlässigbar gering ist.

5 Messgeschwindigkeit

Die Anzahl vollständiger Datensätze, die innerhalb eines festgelegten Zeitintervalls gemessen und abgespeichert werden können, bestimmt die Messgeschwindigkeit. Da die Technologie der Robottachymeter für praktische Anwendungen mit komplexen Steueraufgaben prädestiniert ist, werden diese Instrumente mehr und mehr in vielschichtige Steueralgorithmen eingebunden. Diese können in der Regel nicht auf dem Robottachymeter selbst ablaufen, sondern sind von externen Rechnern umzusetzen, so dass im Hinblick auf die Erzielung hoher Messgeschwindigkeiten die maximal mögliche Datenübertragungsrate ebenfalls von entscheidender Bedeutung ist. Folgende Abschätzung soll die maximal übertragbare Informationsmenge verdeutlichen: Unter der Annahme, dass die integrierte RS232-Schnittstelle mit der maximalen Datenrate von 19200 baud benutzt wird, könnten bei unidirektionaler „Kommunikation“ (d.h. fortlaufendem Datenempfang am Steuerrechner ohne Austausch von Steuerzeichen) 60 Datensätze pro Sekunde übertragen werden, wenn der Datensatz 32 Zeichen enthält. Wenn weder Dezimalkomma noch Vorzeichen verwendet werden, wäre damit räumlich mm-Auflösung und Eindeutigkeit über 10 km für ein geometrisches Koordinatentripel gegeben; würden von den restlichen elf Zeichen zwei für einen Fehlercode verwendet, wäre zusätzlich eine zeitliche Auflösung von 1 ms über 30 Stunden garantiert. Soll bei einem bewegten Objekt die durch die zeitliche Unsicherheit gegebene räumliche Unsicherheit der geometrischen Auflösung entsprechen, darf die Objektgeschwindigkeit 1 m/s nicht übersteigen, wobei vorausgesetzt werden muss, dass die Zeitverzögerung zwischen den einzelnen Messelementen des Koordinatentripels im Rahmen der auftretenden Beschleunigung klein und a priori bekannt ist. In der Regel kann aber auf eine bidirektionale Kommunikation nicht verzichtet werden, zumindest muss ein gesichertes Verlassen der Routine für den fortlaufenden Empfang, d.h. ein kontrolliertes Beenden dieser „Tracking-Routine“, ermöglicht werden. Eine sinnvolle Anzahl von Steuerzeichen reduziert also die oben abgeleitete Datenrate um etwa 20%. Im Hinblick auf die extreme Anforderung auf der Zeitachse sollte der Messprozess und die Übertragung des im vorhergehenden Zyklus ermittelten Datensatzes zeitgleich ablaufen und die Anzahl der übertragenen Zeichen auf ein Minimum beschränkt werden. Deswegen ist es sinnvoll, dem Benutzer verschiedene Datenformate anzubieten, die sich im Umfang der Zusatzinformationen unterscheiden.

Diese Forderung wird durch die Struktur der oben erwähnten Geocom-Befehle unterstützt. Beispielsweise liefern die Befehle „TMC_GetSimpleMea“ (ASCII-Code 2108) die drei polaren Messelemente und „TMC_GetAngle5“ (ASCII-Code 2107) die beiden Richtungswerte, wobei „TMC_GetSimpleMea“ mit insgesamt etwa 65 Zeichen antwortet und somit eine maximale Datenübertragungsrate von maximal etwa 25 Hz garantiert, während „TMC_GetAngle1“ (ASCII-Code 2003) durch die Zusatzinformation über die intern bestimmte Richtungsmessgenauigkeit, den Zeitpunkt der Richtungsmessung, beide Stehachsneigungskomponenten mitsamt ihrer intern abgeschätzten Genauigkeit sowie ihrem Messzeitpunkt und die verwendete Fernrohrlage mit etwa 135 Zeichen den Übertragungsprozess um Faktor 2 verlangsamt. Jeder dieser Datensatztypen enthält eine maximal vierstellige kodierte Zustands- bzw. Fehlermeldung, deren Länge als ausreichend erachtet wird, um die Mitteilungen strukturiert zu verschlüsseln. Die Wortlänge von mindestens 17 Zeichen für jeweils einen Richtungs- bzw. einen Dis-

tanzmesswert erscheint jedoch im Hinblick auf die Forderung nach kurzen Übertragungszeiten unverhältnismäßig hoch.

Die Mess- und Übertragungszeiten wurden für verschiedene Befehle untersucht. Dabei wurde eine sehr einfache Programmiersprache (Quick-Basic) und eine im Hinblick auf mess- und steuerungstechnische Anwendungen mächtige Programmierumgebung (Labview) getestet. Hierbei zeigte sich kein Unterschied bezüglich der maximal erzielbaren Datenrate. Auch die drahtlose Verbindung über Bluetooth verlangsamte die Datenübertragung nicht. Die Auslesung des Neigungssensors verzögert die Messung in der Regel um 0.2 s. Auch wenn lediglich bereits geräteintern vorliegende Daten angefordert werden, ergeben sich unterschiedlich lange Messzeiten für die Ausführung desselben Befehls (vgl. Abb. 8: Befehle: TMC_GetAngle1 (ASCII-Code 2003), aber auch TMC_GetAngle5 (ASCII-Code 2107) und TMC_GetSimpleMea (ASCII-Code 2108): Diese Befehle übertragen lediglich Daten, wobei bei TMC_GetAngle1 und TMC_GetAngle5 und möglicherweise auch bei TMC_GetSimple_Mea noch die Richtungssensoren abgegriffen werden). Sobald eine Distanzmessung integriert ist, kann sich die Messzeit bis zum Fünffachen ihrer kürzesten möglichen Zeit verlängern (z.B. bei TMC_QuickDist, ASCII-Code 2117). Die Übertragung eines Polarkoordinatentripels dauert sowohl beim TCRA 1103 als auch beim TCA 2003 größenordnungsmäßig 0.4 s.

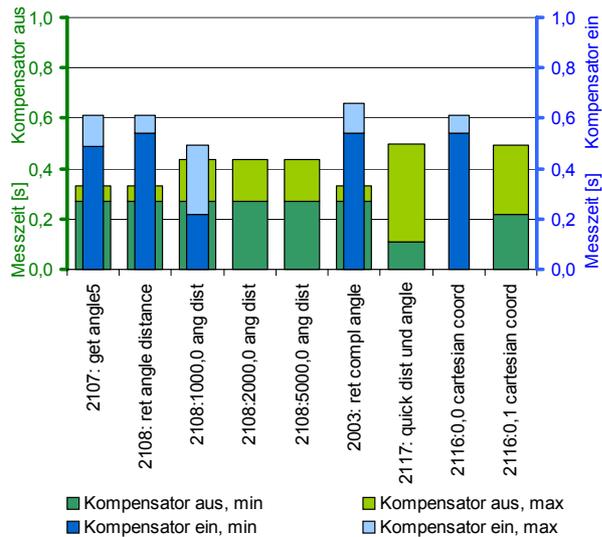


Abb. 8: Unterschiedliche Messzeiten bei ausgewählten Befehlen am Beispiel TRCA1103

Legende zu den Befehlen, soweit im Hinblick auf intuitive Verständlichkeit nicht die Originalbegriffe verwendet wurden

2108: TMC_GetSimpleMea (die Zahl hinter dem Befehl gibt die für die Distanzmessung vorgesehene Wartezeit in ms an)

2003: TMC_GetAngle1

2117: TMC_QuickDist

Umklappen eines Spiegels nicht verzichtet werden kann. Demzufolge wird bei den Leica-Instrumenten die Anzahl der inneren Referenzmessungen optimiert, indem unmittelbar nach dem Einschalten des Instrumentes derartige Referenzmessungen in dichter Folge stattfinden als nach etwa 30 s. Die zeit-

Im Hinblick auf die Minimierung der erforderlichen Messzeit sind jedoch herstellerseitig konstruktive Vorkehrungen getroffen worden, von denen zwei Maßnahmen näher betrachtet werden sollen. Da durch Drehen des Oberbaus die Flüssigkeitsoberfläche des Neigungssensors aus ihrer allein schwerkraftbezogenen Ruhelage ausschlagen kann, wird sein Messwert realistischer, wenn vor seiner Auslesung auf sein erneutes Einschwingen gewartet wird. Um diese Zeitverzögerung zu umgehen, kann alternativ durch Setzen eines Steuerparameters eine vor dem Drehvorgang bestimmte Stehachsneigung³ verwendet werden. Leider ist am Datensatz nicht unmittelbar ersichtlich, welcher Modus gewählt wurde – obwohl ja eine Vielzahl von Zeichen übertragen wird. Der Status kann allerdings mit einem speziell dafür vorgesehenen Befehl abgefragt werden.

Außerdem wurde der Distanzmessprozess optimiert. Zunächst kommt der Beschleunigung der Distanzmessung entgegen, dass bei der neuen Gerätegeneration durch die gleichzeitige Aufmodulation von Grob- und Feinmaßstab und Analyse einer Serie von Augenblicksamplituden des Empfangssignals auf die klassische, zeitintensive serielle Phasenvergleichsmessung verzichtet werden kann. Weiterhin beansprucht die Messung der inneren Referenzstrecke, die in gewissen Zeitabständen zur Elimination der Nullpunktdrift durchgeführt werden muss, einen nicht zu vernachlässigenden Anteil an der Distanzmesszeit. Die Verkürzung dieser Aktion durch konstruktive Maßnahmen ist schwierig, solange auf das mechanische

³ Dies sind die zum Zeitpunkt des Setzen des Steuerparameters vorliegende Stehachsneigungskomponenten

liche Abfolge ist allerdings einheitlich festgelegt, es erfolgt keine Optimierung unter Berücksichtigung der aktuell festgestellten Nullpunktdrift. Abbildung 9 verdeutlicht dies: Sie zeigt drei Tracking-Messungen auf ein feststehendes Prisma, wobei das Instrument bei der ersten Messung auf 5°C abgekühlt und bei den übrigen ausgehend von Zimmertemperatur vorher unterschiedlich lange (5 min bzw. 30 min) eingeschaltet war. Bei allen Distanzmessungen sind die Nullpunktdrift und die Wirkung der Messung der inneren Referenzstrecke deutlich zu erkennen. Es wird auch deutlich, dass die zeitliche Abfolge für ein aufgewärmtes Instrument durchaus sinnvoll ist, während bei einem gekühlten Instrument erst eine größere Anzahl Referenzmessungen innerhalb der ersten 5 min eine gleichbleibende innere Genauigkeit garantieren würde. Es wäre herstellenseitig angebracht, die Abweichung der Referenzmessungen bei der Angabe der inneren Genauigkeit im ausführlichen Datensatz zu berücksichtigen und die Zeitpunkte der Referenzmessungen zu markieren. Dies würde nachträgliche Filterprozesse wesentlich vereinfachen.

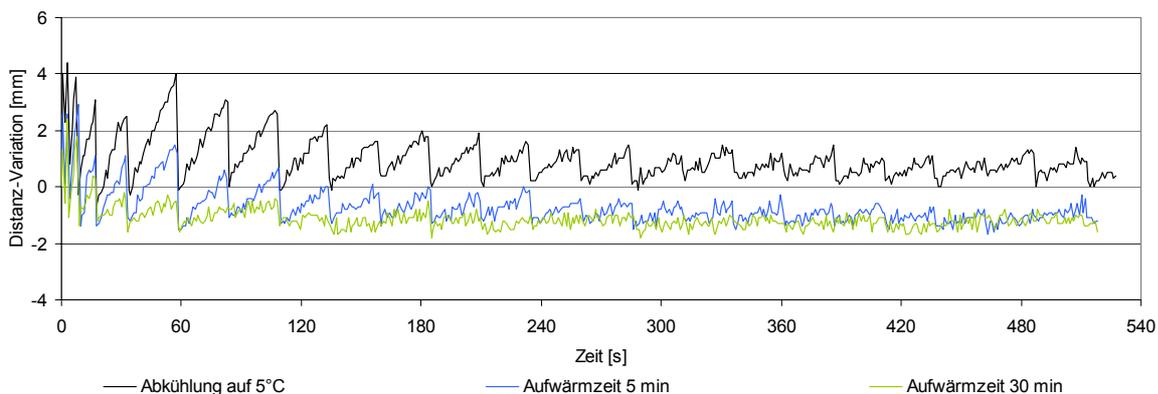


Abb. 9: Temperaturabhängige Offsets bei permanenter Distanzmessung zu festem Prisma: TCA 2003
Daten reduziert auf den jeweils ersten Messwert der jeweiligen Messreihe

Grundsätzlich stellt sich die Frage, inwieweit die innere Genauigkeit mit zunehmender Messgeschwindigkeit abnimmt. Wie bereits mehrfach erwähnt, sind für das Systemverhalten nicht nur die aktuell gewählten Messbefehle von Bedeutung, sondern auch die jeweils gewählten Voreinstellungen (z.B. Lock on/off, Kompensator on/off, Zieleinstellung durch fineadjust oder durch Auslösen einer Distanzmessung, ...). Da hierzu eine Vielzahl von Untersuchungen notwendig ist, kann diese Frage an dieser Stelle nicht abschließend beantwortet werden. Aus dem vorliegenden Datenmaterial kann trotzdem bereits jetzt die im Datensatz wahlweise übertragene Genauigkeit bewertet werden. Zunächst soll darauf hingewiesen werden, dass die Befehle, die Daten mit zusätzlicher Genauigkeitsangabe übertragen (GetAngle1, GetAngle5), absolut identische Werte wie kurze „Get“-Befehle liefern.

Weiterhin ist bemerkenswert, dass die übertragenen Genauigkeitsangaben in der Regel für die gesamte Messreihe bis auf die letzte Nachkommastelle (d.h. auf $1 \cdot 10^{-14}$ rad)⁴ vollkommen identisch bleiben, obwohl die Herstellerspezifikation $2.35 \mu\text{rad} = 0.15 \text{ mgon}$ für die Winkelmessung lautet. Bei den oben beschriebenen Dauermessungen im Modus „lock on“ wurden alle Richtungsmesswerte mit einer Genauigkeit von $2.35 \mu\text{rad}$ klassifiziert, ungeachtet der äußeren Untersuchungsbedingungen (getestet wiederum bei 5°C , 5 min und 30 min eingelaufen). Da die Messungen zu einem festen Ziel stattfanden, können die tatsächlich erreichten inneren Genauigkeiten leicht aus den zugehörigen Standardabweichungen der Messreihe abgeleitet werden. Da die Richtungsmessung des gekühlten Instrumentes um etwa 3 mgon während der ersten Minute wegdriftete, ergibt sich hierfür eine recht geringe innere Genauigkeit von 0.7 mgon. Ohne Berücksichtigung der Driftanteile streut analog der oben aufgeführten Untersuchungsreihenfolge die Horizontalrichtung um $0.54/0.1/0.08$ mgon und der Vertikalwinkel um $0.54/0.03/0.03$ mgon. Dies macht deutlich, dass die Einlaufeffekte eines kalten Instrumentes von der instrumenten-intern bestimmten Genauigkeit nicht erfasst werden, dass aber andererseits bei optimalen Bedingungen diese Genauigkeitsangabe realistischer ist, weil sie Anteile der äußeren Genauigkeit abzudecken versucht. Allerdings informiert die Befehlsdokumentation nicht ausreichend über den Gehalt der angegebenen Genauigkeiten. Zu bemerken ist noch, dass die Wiederholungsmessungen nicht normalverteilt sind, sondern einseitig Ausreißer aufweisen, deren Auftreten bis zu einem gewissen – aber nicht signifikanten – Grad mit dem Zeitpunkt der Distanzreferenzmessungen korreliert ist. Eine Erklärung wäre darin zu suchen, dass das Umklappen des Spiegels zur Realisierung von innerem und äußerem Lichtweg kleine Erschütterungen hervorruft, die den Richtungsmessprozess beeinflussen. Interessanter Weise zeigt sich in diesen Phasen meistens ein Ziffernwechsel bei den beiden letzten übertragenen Nachkommastellen der Distanz, die – ähnlich wie bei den Richtungsdaten – ebenfalls eine nicht aussagekräftige Wertigkeit (μm und $\text{sub-}\mu\text{m}$) haben und üblicherweise mit gleichbleibenden Ziffern besetzt sind. Es bleibt weiterhin zu untersuchen, inwieweit sich ungünstige atmosphärische Bedingungen, die sich im Bildflimmern zeigen, von der intern bestimmten Genauigkeitsangabe berücksichtigt werden. Allerdings wird dieser Effekt im Nahbereich klein sein.

6 Resümee

Unter optimalen Voraussetzungen, d.h. unter Laborbedingungen mit einem eingelaufenen Instrument können von einem festen, bekannten Standpunkt aus sehr kleine lokale Deformationen nachgewiesen werden: Aus der Bestimmung des Auflösungsvermögens ergibt sich, dass die Deformation in Querrichtung größer als 0.03 mm sein muss, um in 20 m Distanz mit einem TCA 2003 nachgewiesen werden zu können. Eine Deformation in vertikaler Richtung ist auf 20 m ab 0.1 mm nachweisbar. Liegen die Objektpunkte unterhalb von 20 m und sind Absolutkoordinaten abzuleiten, kann aufgrund der Zieliniendeformation auf eine 2-Lagen-Messung oder eine Kalibrierung nicht verzichtet werden. Danach verbleibt eine Unsicherheit von 0.1 mm, wenn der Arbeitsbereich klein ist. Beim Einsatz eines TDA 5005 ist in diesem Fall die Verwendung der Vorsatzlinse unbedingt erforderlich. Zieht sich die Deformationsmessung über eine längere Zeit hin, während der Temperaturschwankungen auftreten, sollte beim TCA 2003 der Drift der Vertikalkomponente durch eine 2-Lagen-Messung entgegen gewirkt werden. Beim TDA 5005 konnte eine Kompensatorspielpunktdrift von etwa $0.2 \text{ mgon}/^\circ\text{C} \dots 0.3 \text{ mgon}/^\circ\text{C}$ festgestellt werden, die nach etwa einer Stunde auf 30% des Betrages zurückgeht. Auch ohne symmetrische Punktverteilung sollten sich also bei stabilen Temperaturverhältnissen und akklimatisiertem

⁴ Richtungswerte werden mit 15 Nachkommastellen, Genauigkeitsangaben mit 14 Nachkommastellen übertragen

und gut kalibriertem Instrument im Nahbereich Punktgenauigkeiten im Zehntel-mm-Bereich erzielen lassen.

Hinsichtlich der Messzeiten fällt auf, dass die Datenübertragungszeiten durch Einsparung von bedeutungslosen Nachkommastellen erheblich beschleunigt werden könnte. Begrüßenswert ist, dass herstellerseitig konstruktive Maßnahmen zur Beschleunigung der Messzeit getroffen worden sind, die teilweise vom Anwender fallorientiert ausgewählt werden können. Allerdings eröffnet sich hier für den Hersteller noch Optimierungspotential. Außerdem sollte das gewählte Set-up mit einem codierten Zeichen im Ergebnisdatensatz enthalten sein, um alle Voreinstellungen nachträglich sicher rekonstruieren zu können – oder werden gar jetzt schon einzelne Informationen in den letzten, für das geometrische Ergebnis nicht relevanten Nachkommastellen verschlüsselt?

Die vorgestellten Untersuchungen sollen speziell Eigenschaften von Robottachymetern bei Anwendungen im Nahbereich analysieren und auf gegebenenfalls bestehende systematische Anteile hinweisen ohne den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Es kann und soll nicht Ziel dieses Beitrags sein, aus dem Verhalten einzelner Exemplare Kalibrierfunktionen abzuleiten. Die Verfasserin dankt der Firma Leica für die Leihgabe eines TDA 5005.

7 Literatur

FAVRE, C.; HENNES, M. [2000]: Zum Einfluss der geometrischen Ausrichtung von 360°-Reflektoren bei Messungen mit automatischer Zielerfassung. VPK 2/00, S. 72-78.

FLACH, Ph.; NATEROP, D. [1999]: Neue Analysetechniken für Deformationsmessungen in permanenten Robottachymeter-Netzen. AVN, 8-9/1999, pp. 284-291.

GOTTWALD, R.; MÜLLER, I.; OBRIST, M. [1998]: Leica TDA 5000 – Distanzmessung und automatische Zielerfassung im Nahbereich, AVN, S.50-57.

HOLLENSTEIN, C. [1999]: Leistungsmerkmale der trackenden Tachymeter der TPS1000-Serie von Leica am Beispiel des TCA 1800. Vertiefungsblock WS 1998/99, IGP, ETH Zürich, S. 1-17, unveröffentlicht.

INGENSAND, H. [2001]: pers. Kommunikation.

KNÖPFLER, A. [2003]: Erste vergleichende Beurteilung des Robottachymeters Leica TCA 2003 aufgrund von Erfahrungen bei Messungen im Linach-Staumauernetz während der HVÜ 3A 2002. Interner Bericht, Geod. Inst. Karlsruhe, unveröffentlicht.

KRICKEL, B. [1995]: Zur erreichbaren Genauigkeit der freien Standpunktwahl mit Tachymetern niederer Genauigkeit. Diplomarbeit, Geod. Inst., Univ. Bonn, unveröffentlicht.

ZEISKE, K. [1999]: TPS 1100 Professional Series - Eine neue Tachymetergeneration von Leica. VR, S.82-90.

N.N.: Prospekte, Bedienungsanleitungen und Internetseite www.leica-geosystems.com des Herstellers.

Anschrift der Verfasserin: Prof. Dr.-Ing. Maria Hennes, Englerstr.7, D-76128 Karlsruhe, Tel.: 0721/608-2300, Fax: 0721/608-6552, e-mail: hennes@gik.uni-karlsruhe.de