



Kinematische Leistungsfähigkeit von zielverfolgenden Tachymetern – Ein Beitrag zum Stand der Technik am Beispiel des Leica TPS1200+

W. Stempfhuber,
H. Kirschner

Kinematische Messsysteme ermöglichen neue Anwendungsgebiete in der geodätischen Messtechnik. Für die präzise Echtzeiterfassung einer 3D-Trajektorie werden noch immer zielverfolgende Tachymeter eingesetzt. Mittlerweile können mit modernen Instrumenten so Bewegungsabläufe im Bereich weniger Millimeter gemessen werden.

1 Einleitung

Der Bedarf an geodätischen Messsensoren zur Bestimmung der Bewegungsparameter steigt seit vielen Jahren kontinuierlich an. Heutzutage existieren zum Erfassen von Längen-, Positions-, Höhen-, Neigungs-, Beschleunigungs- und Richtungsänderungen verschiedenste Messsensoren. Für eine genaue Echtzeitmessung von dreidimensionalen Zielpunkten im Bereich weniger Zentimeter kommen bei ingenieurgeodätischen Anwendungen gegenwärtig meist GNSS-Sensoren zum Einsatz. Natürlich dürfen bei solchen Aufzählungen Lasertracker und -scanner ggf. auch noch Range Imaging Sensoren nicht fehlen. Für kinematische Anwendungen zur präzisen 3D-Echtzeiterfassung unter einem Zentimeter werden zurzeit ausschließlich zielverfolgende Tachymeter eingesetzt (STEMPFHUBER, 2008). Dieser Fachartikel stellt am Beispiel des neuen Leica TPS1200+ (hier ein TCA1201+) die Leistungsfähigkeit der Trackingfunktion dar.

Erste Arbeiten zum Thema zielverfolgende Tachymeter entstanden in den 80er-Jahren (Ingensand, 1983 und Kahmen, 1984). In diesem Zusammenhang müssen die Arbeiten zum Projekt GEOROBOT (KAHMEN, 1988) und TOPOMAT (MATTHIAS, 1991) erwähnt werden. Weitere Instrumente universitärer Forschungsarbeiten zusammen mit der Firma Wild ergaben den TM3000V sowie mit der Firma Kern den E2-SE. Mit dem Instrument Geodimeter 4000 der Firma Geotronics kam 1990 der erste kommerzielle Tachymeter mit automatischer Zielerkennung und -verfolgung auf den Markt. Erste Arbeiten zur Leistungsfähigkeit solcher Instrumente stellt u.a. HENNES, 1992 dar.

Seit Mitte der 90er-Jahre bietet auch Leica Geosystems mit der Serie TPS1000 einen zielverfolgenden Tachymeter an. In den gleichen Zeitraum fallen auch die ersten Ansätze zur Bestimmung der 3D-Bewegungsspur von Baumaschinen, Schiffen oder einzelner Spezialanwendungen. Das kinematische Verhalten dieser Instrumente war wegen verschiedener Einflussgrößen wie der Qualität der Zielverfolgung, verschiedener Latenzzeiten bzw. mangelnder Synchronisation der einzelnen Subsysteme und der begrenzten Messfrequenz nur bedingt einsetzbar. Heute bieten alle namhaften Hersteller von geodätischen Instrumenten zielverfolgende Tachymeter an. Verschiedene Bezeichnungen wie lokales Positionierungssystem (LPS, Topcon), Tachymeter Positionierungssystem (TPS, Leica), universale Total Station (UTS, Trimble) oder Robot Total Station (RTS, Sokkia) werden verwendet und dienen gleichzeitig als Synonym für die zielverfolgenden Tachymeter. Parallel erweiterten sich konkrete Anwendungsgebiete im Straßen-, Flughafen- und im Tunnelbau.

Im nachfolgenden Artikel werden die verschiedenen Komponenten wie Zielverfolgung, Motorisierung, Reflektor und elektronische Distanzmessung genauer betrachtet und im Hinblick auf die kinematischen Anforderungen an einer Referenzbahn verifiziert. Die Ergebnisse des Leica TPS1200+ zeigen, dass die Lage- und auch die Höhenabweichungen zur geometrisch bekannten Referenz in einem Genauigkeitsbereich von wenigen Millimetern liegen.

2 Motivation und Ausgangssituation

Tachymeter werden für die verschiedensten Aufgaben im Bereich der Ingenieurgeodäsie verwendet. Dem Geodäten ist klar, dass es derzeit sowohl bei statischen als auch bei kinematischen Messaufgaben kaum Alternativen zu diesem optischen Messsystem gibt. Der größte Anwendungsbereich kinematischer Messsysteme liegt gegenwärtig im Straßenbau. Hierbei muss die Feinplanung, das Abfräsen von alten Belagsschichten, die Verdichtung und vor allem der Einbau der Straßendecken meist in einem Genauigkeitsbereich von wenigen Millimetern erfolgen. Die Definition des erforderlichen Qualitätsmaßes variiert hier

oft. Im Tunnelbau oder auch beim Bau von Flughäfen werden vergleichbare Genauigkeiten der Oberfläche gefordert. Bei der detaillierten Betrachtung solcher Anforderungen treten zur Bestimmung der 3D-Trajektorie mit zielverfolgenden Tachymetern schnell Fragen bzgl.

- der maximalen Verfolgungsgeschwindigkeiten,
- der Genauigkeit des 360°-Prismas (Einfluss der Orientierung und Verkippung),
- des dynamischen Verhaltens des integrierten Zweiachsneigungssensors,
- der Synchronisation der Winkel- und Streckenmessung sowie der Latenz- und Totzeiten,
- der Güte der kinematischen Winkel- und Streckenmessung,
- des Verhaltens der Zielverfolgung (generell bei starkem Sonnenlicht, Regen, Schneefall, Dunkelheit oder bei leichtem Nebel),
- der Konfiguration bzw. der Verwendung des Messverfahrens (z.B. bei Leica via Onboard-Applikation, GeoCom oder einem firmeninternen Binärprotokoll),
- der maximalen Reichweite und deren Auswirkung auf die Messgenauigkeit,
- der Messfrequenz,
- der Möglichkeiten einer schnellen Wiederauffindung nach einem Zielverlust,
- einer eindeutige Prismenidentifikation (Zielauswahl),
- Multipath,
- der Instrumentenkalibrierung, vor allem der Kalibrierung der Zielverfolgungseinheit oder der internen EDM-Kalibrierung und
- des Datenfunkes

auf. Der Folgenden soll am Beispiel des neuen Leica TPS1200+ Instruments (Release Herbst 2007) veranschaulichen, welche Leistungsfähigkeit und absoluten Positionsgenauigkeiten heute mit einem solchen zielverfolgenden Tachymeter erreicht werden können. Hierbei ist besonders auf die Trennung der einzelnen Einflussgrößen zu achten. Durch das komplett neu konzipierte Fernrohr im TPS1200+ ergeben sich wesentliche Verbesserungen. Darüber hinaus werden in diesem Artikel Maßnahmen zur Optimierung der kinematischen Messanordnung spezifi-

ziert. Vor der Darstellung und Bewertung der Ergebnisse erfolgt zunächst eine umfassende Beschreibung der einzelnen Subsysteme des zielverfolgenden Tachymeters TPS1200+.

3 Technische Darstellung der einzelnen Subsysteme

Ein moderner Tachymeter bestimmt aus den Messungen der verschiedenen Einzelkomponenten, auch Subsysteme genannt, die sphärischen Polarkoordinaten. Die wesentlichen Prozesse ergeben sich hierbei aus der Distanz-, der Horizontal- und Vertikalwinkelmessung, der Zielverfolgung (bei Leica ATR genannt) sowie der gesamten Steuerung der Servomotorik, des Zweiachsneigungssensors, der Datenberechnung, -speicherung und -ausgabe. Einen guten Überblick der einzelnen Hard- und Softwarekomponenten gibt das Leica GeoCom Manual. Hier sind am Beispiel der bidirektionalen Kommunikation zwischen dem TPS1200 und einem Rechner alle relevanten Subsysteme und deren Wechselwirkung aufgeführt. Alle Resultate der entsprechenden Subsysteme fließen in einen Datenpool zusammen. So können alle Messwerte und Reduktionen anschließend über eine serielle Schnittstelle ausgelesen werden. Für die Messungen mit dem GeoCom-Befehlsatz ist ausschließlich die Instrumentenfirmware verantwortlich. Im neuen Fernrohr ist die EDM-, ATR- und PowerSearch-Firmware auf einer Platine zusammengefasst (siehe Absatz 3.1), eine getrennte Firmware wie beim TPS1200 ist nicht mehr notwendig.

Die Distanzmessung (spezielles Phasennessverfahren, BAYOUD, 2007) wird von dem EDM-Modul im Fernrohrkörper ausgeführt. Gleichzeitig erfolgen die Messungen des jeweiligen Vertikal- und Horizontalwinkels mit den entsprechenden Korrekturen des Zweiachsneigungsmessers und den Instrumentenparametern bzgl. der Ziellinien-, Kippachs-, Indexfehler in Echtzeit. Die Anzielung von bewegten Zielen erfolgt automatisiert. Dabei misst ein weiteres Modul im Fernrohrkörper (ATR) die Ablagen der horizontalen und vertikalen Reflektorrichtung zur

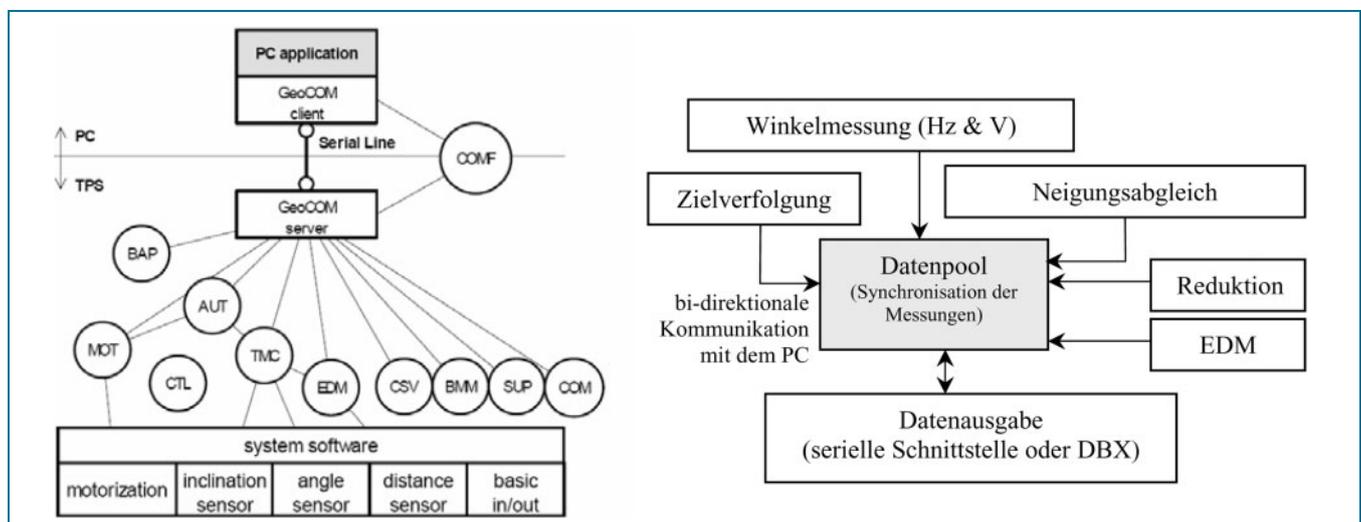


Abb. 1: Subsysteme des Leica TPS1200 (vgl. GeoCom Manual), Messdatenauswertung im Datenpool

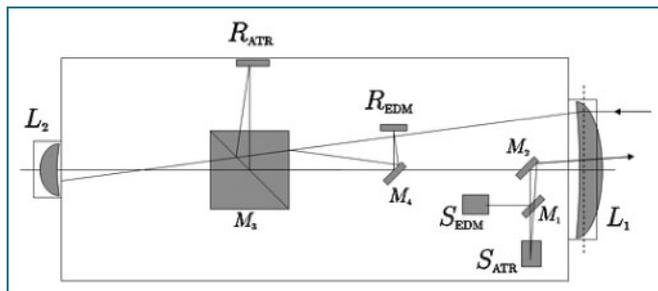


Abb. 2: Funktionsprinzip im neuen TPS1200+ Fernrohrkörper

Zielachse. Dies wird einerseits verwendet um mithilfe eines Lagereglers (AUT) die angesteuerte Motorik (MOT) auf das Ziel nachzuführen, andererseits werden die Ablagen als Korrekturen an die gemessenen Richtungen angebracht (TMC). Die Werte aus der ATR-Kalibrierung reduzieren die Fehler der Zielerfassung und -verfolgung. Die zusätzlichen Module sind für das User-Interface, die Onboard-Softwareapplikationen sowie für die serielle und interne Kommunikation und für die Kontrollfunktionen verantwortlich (vgl. Leica GeoCom Manual). Zu einer detaillierten Beschreibung der im Fernrohrkörper eingebauten Sensoren wird in der Abbildung 2 eine nicht maßstabsgetreue Darstellung der einzelnen Subsysteme skizziert. In der gewählten Übersicht sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nur die wesentlichen Bauteile aufgezeichnet.

Die Distanzmessung emittiert einen modulierten Laserstrahl (S_{EDM} = Quelle, Wellenlänge 660 nm), der über die dichroitischen Spiegel M_1 und M_2 auf die Zielachse des Fernrohrs eingekoppelt wird. Die Strahlung wird von einem – in dieser Abbildung nicht dargestellten Retro-Reflektor – zurückgesendet und durch die Objektivlinse L_1 des Fernrohrs fokussiert. Das Fernrohr dient nur der manuellen Anzielung. Es besteht neben dem Gehäuse aus einer Objektivlinse und dem Okular L_2 sowie aus (in Abb. 2 nicht dargestellt) einer Strichplatte, der Fokussiereinheit und einem Umkehrprisma. Die Strahlung des sichtbaren Spektralbereichs passiert den dichroitischen Teiler M_3 ungehindert und erzeugt das über das Okular betrachtete Fernrohrbild (vgl. Abb. 3 und 6). Im Gegensatz dazu wird die Strahlung der Sendediode des EDM's an der Vorderseite des Teilerwürfels reflektiert und gelangt durch einen Spiegel M_4 zum Empfänger der EDM. So wird im neuen Fernrohr des TPS1200+ eine zur Zielachse koaxiale EDM-Messung gewährleistet. Durch das neue opto-mechanische Fernrohrdesign wird außerdem der EDM-Messstrahl nur noch von einem Modul aus gesendet.

Die Winkelmessung bzw. die Zielverfolgung (ATR-Messung) emittiert ebenfalls aus einer Laserquelle S_{ATR} (Wellenlänge 785 nm), welche den dichroitischen Spiegel M_1 ungehindert passiert und vom Spiegel M_2 auf die Zielachse eingekoppelt wird. Die Fokussierung der vom Retro-Reflektor zurückkommenden Strahlung erfolgt wiederum durch die Objektivlinse. Diese Strahlung passiert die Vorderseite des dichroitischen Teilers ungehindert und wird an einer Schicht in seinem Inneren reflektiert und so dem ATR-Kamerasensor R_{ATR} zugeführt.

3.1 Plattform des Leica TPS1200+

Heutzutage spricht man bei vielen Systemen von einer Plattform. Hierbei versteht man das Grundlagenkonzept, auf dem die modularen Komponenten aufgebaut sind und miteinander kommunizieren. Der Vorteil ist hier vor allem dadurch gegeben, dass man einzelne Komponenten separat ersetzen, hinzufügen oder modifizieren kann. In der Praxis sieht das jedoch oft anders aus, da viele Funktionen in Wechselwirkung mit weiteren Modulen stehen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, in regelmäßigen Zeitabständen neue Plattformen zu entwickeln. Bei Leica sind das für den Bereich der zielverfolgenden Tachymeter bisher die Serien TPS1000, 1100 und 1200. Bei der Modifikation des TPS1200+ wurde vor allem das Fernrohr des TPS1200 komplett erneuert. Zusätzlich ist die im Fernrohrkörper eingebaute Sensorik (PowerSearch, EDM- und ATR-Modul) modifiziert. Dabei wurden diese drei Module auf einer gemeinsamen Platine zusammengefasst und ermöglichen somit eine schnelle Kommunikation zwischen den Modulen. Die Verbesserungen des neuen EDM-Moduls ergeben eine höhere Messgenauigkeit für statische und reflektorlose Messungen. Das ATR-Modul wurde in der Spezifikation der Messreichweite und der Messgenauigkeit entscheidend optimiert. Eine schnellere und auch leistungsfähigere ATR-Bildverarbeitung ermöglicht eine sichere Anzielung und eine schnellere sowie stabilere Zielverfolgung. Zur Integration des neuen Fernrohrs in die neue TPS1200+ Plattform waren des Weiteren umfassende Firmwareerweiterungen am Hauptsystem des TPS notwendig, um so die Vorteile der neuen Sensoren optimal zu nutzen. Die Verbesserungen für statische Anwendungen mit z.B. einem TCA1201+ gegenüber einem TCA1201 ist gesondert zu betrachten und nicht Gegenstand dieses Fachartikels.

Für Anwendungen zur Baumaschinensteuerung bietet Leica seit einigen Monaten unter dem Produktnamen „RedLine“ eine abgeänderte TPS1200+ Version an. Es handelt sich hier um einen TCA1203+ oder TCA1205+. Neben dem PDA-basierten Bedienmedium unterscheidet sich das Instrument hauptsächlich durch die Kommunikation mit der entsprechenden Applikation (z.B. der Baumaschine). Hierbei kann zwischen dem Client (PC) und Server (TPS) über ein verschlüsseltes Binärprotokoll und/oder dem GeoCom-Protokoll kommuniziert werden. Eine gewöhnliche Nutzung für Aufmaß- und Absteckarbeiten kann mit verschiedenen PDA-Tools erfolgen. Die Geräte der RedLine besitzen keine Tastatur und kein Display mehr. In naher Zukunft soll dieses Instrument durch weiterführende Modifikationen für die Bedürfnisse der Baumaschinensteuerung angepasst werden. Zur Verwendung des Binärformats ist eine spezielle Leica-Library erforderlich. Ein Dual-Rover RTK-GNSS-System auf der Basis des MNS1200 zur Bestimmung der 3D-Position zusammen mit einer Absolutorientierung rundet diese Produktlinie von Leica Geosystems bzw. Hexagon Machine Control ab.

3.2 EDM-Modul im Leica TPS1200+

Die wesentlichen Vorteile des neuen EDM-Designs betreffen die statischen sowie die reflektorlosen EDM-Mes-

sungen. Der integrierte „System Analyser“ beinhaltet einen Algorithmus mit Multi-Target-Elimination, d.h. einer verbesserten Messgenauigkeit und Reichweite. Ein weiterer Vorteil des neuen Designs im TPS1200+ ist die Verwendung von nur einem EDM-Laser für die reflektorbasierte und die reflektorlose Distanzmessung. Nur so konnten die drei Module ATR, EDM und PowerSearch auf eine Schaltung im Fernrohrkörper kombiniert werden. Dadurch ist eine schnelle Onboard-Kommunikation zwischen EDM, ATR und PowerSearch gewährleistet. Aus dieser Integration ergeben sich eine Reihe weiterer Vorteile. Für die Anwendung zur Zielverfolgung ist dabei die Kommunikation zwischen dem EDM- und dem ATR-Modul vorteilhaft. Es reduzieren sich bei kinematischen Messungen die Fehlzielung und damit die Messfehler bzw. die Phaseninhomogenität.

Beide EDM-Messverfahren basieren nur noch auf einer gemeinsamen Wellenlänge. Die dichroitische Signaltrennung im Fernrohr wird einfacher, statt einer Verwendung von zwei Wellenlängenbändern wie im alten TPS1200 Fernrohr muss beim TPS1200+ nur ein Wellenlängenband an der Vorderseite von M_3 reflektiert werden. Dadurch erhält man auch ein kontrastreicheres Fernrohrbild für die manuelle Anzielung. Für den kinematischen Messmodus ergibt sich aus dem Verzicht auf den zweiten EDM-Laser ein geringfügiger Nachteil. Es wird eine Divergenzumschaltung des EDM-Lasers für die beiden Messmodi notwendig. Wiederum aus Platzgründen musste die Steuerung der Divergenzumschaltung mit der Steuerung für die interne Kalibrierung der reflektorbasierten EDM kombiniert werden. Daraus ergibt sich ein etwas längerer Zeitraum für die Umschaltung auf den internen EDM-Kalibrationsweg. Ein neu eingebautes Revolverrad schaltet hier zwischen der reflektorlosen und der reflektorbasierten Distanzmessung um (BAYOUD, 2007). Auffällig ist hier, dass die interne Kalibrierung des EDM's eine ca. 700 ms lange Messlücke verursacht. Dies wird bei einem handelsüblichen Instrument alle 10 Sekunden durchgeführt. Dem Anwender stehen während der EDM-Kalibrierung keine Echtzeitdaten zur Verfügung. Dies ist jedoch auch bei Instrumenten anderer Hersteller der Fall (vgl. WAGNER 2006). Sonst sind mit dem eingebauten EDM-Modul Messungen von etwa 8–10 Hz möglich.

3.3 ATR-Modul im Leica TPS1200+

Die Module zur Horizontal- und Vertikalwinkelmessung sind zusammen mit der entsprechenden Neigungskorrektur im Vergleich zum herkömmlichen TPS1200 Instru-

ment unverändert. Betrachtet wird in diesem Beitrag nur das verbesserte ATR-Modul. Die kinematische Winkelmessung erfolgt auf retro-reflektive Ziele, diese sind in der Regel Tripelprismen. Wie in der Abbildung 3 links dargestellt, emittiert die ATR-Laserstrahlung aus einem Zielbeleuchter S_{ATR} , die von einem Retro-Reflektor zum Messgerät zurückreflektiert und von einem Objektiv L_1 auf einen Kamerasensor R_{ATR} fokussiert wird. Die Darstellung des Messprinzips zeigt Abbildung 3 durch ein vereinfachtes Modell für den Nah- und Fernbereich. Dabei kann der Zielbeleuchter S_{ATR} durch sein aus der Reflexion an M_2 resultierendes virtuelles Bild S'_{ATR} ersetzt werden.

Der Kamerasensor R_{ATR} stellt zusammen mit dem Hauptobjektiv L_1 ein „Fokus-unendlich-Kamerasystem“ dar, wobei das Kamerazentrum C_{ATR} sehr nahe am Vertex V von Kippachse und Stehachse liegt. Die Abstände in der Zeichnung sind wiederum aus Gründen der Anschaulichkeit überzeichnet dargestellt. Der Laserzielbeleuchter kann in guter Näherung als Punktquelle aufgefasst werden, der Ort S'_{ATR} seines virtuellen Bildes ist ebenfalls nahe bei V . Der systematische Fehler, der durch den Abstand

$$\delta = |\overrightarrow{VC}_{ATR} + \overrightarrow{VS'}_{ATR}|$$

hervorgerufen wird, entspricht am Rand des ATR-Gesichtsfeldes unabhängig von der Reflektordistanz 0,1 mm und ist damit gegenüber anderen Messfehlern vernachlässigbar. Die Messanordnung des ATR-Modus in der Abbildung 3 links entspricht einer großen Reflektordistanz, d.h. Reichweite zum Reflektor > 100 m. Für diesen Fernbereich ist das detektierte Bild der Punktquelle Spot S'_{ATR} auf dem Sensor ein sehr kleiner Spot von nur wenigen Pixel Durchmesser. Die Position dieses Spots auf dem CCD-Sensor wird vom Bildverarbeitungssystem der ATR im Sensorkoordinatensystem berechnet. Aus dieser Position werden später die Werte für die Hz- und V-Ablage im Koordinatensystem der Totalstation berechnet. Abweichungen in der Bestimmung der Spot-Position führen zu Fehlern in der Richtungsbestimmung. Im Fernbereich (Reflektorabstand > 100 m) ist der Kamerasensor die dominante Fehlerquelle. Das Rauschen im Helligkeitswert der wenigen am Spot-Bild beteiligten Pixel und die Variation der elektrischen Parameter dieser Pixel limitieren die Messgenauigkeit.

Die Verbesserung des Messfehlers beim TPS1200+ im Fernbereich resultiert einerseits aus einer höheren Auflösung des CMOS-Bild-Sensors im Vergleich zum Vorgängersystem. Andererseits hat der neue CMOS-Sensor eine

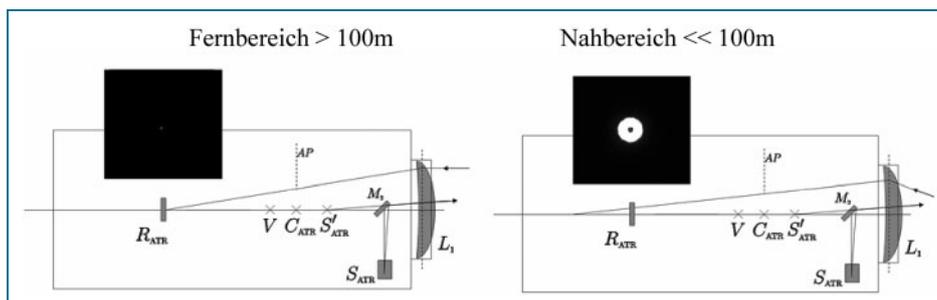


Abb. 3: Messprinzip des neuen ATR-Moduls, (unmaßstäblich)

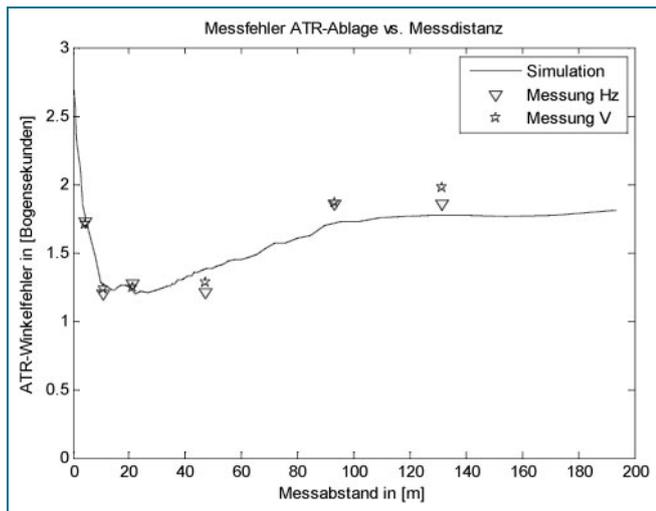


Abb. 4: Abhängigkeit des ATR-Fehlers in Bezug auf die Prismenentfernung (Simulationsrechnung)

höhere Dynamik, d.h. weniger Störeinflüsse bei den Helligkeitswerten der Pixel. Im Nahbereich der Messung, also für Reflektorabstände $\ll 100$ m (siehe Abb. 3 rechts) ergibt sich eine etwas andere Form des Spots. Das vom Reflektor erzeugte virtuelle Bild der Punktquelle hat im Nahbereich einen kürzeren Abstand zum ATR-Kamerasystem. Der Bildort durch L_1 (reelles Bild) verschiebt sich hinter den Sensor R_{ATR} . Auf dem Sensor erscheint eine defokussierte Abbildung der Punktquelle. Der Defokus führt zu einer symmetrischen Punktbildverwaschung. Somit verschiebt sich der Helligkeitsschwerpunkt der Bildfigur im Vergleich zum Fernbereich nicht. Es entsteht ein Spotbild, wie Abbildung 3 rechts zeigt. Das „Loch“ in der Mitte des Spots entsteht durch die Befestigung von M_2 . Diese zentrale Blende ist beim TPS1200+ zentrosymmetrisch zum Kamerazentrum der ATR und führt daher zu keinem zusätzlichen systematischen Fehler. Dies ist bei statischen Zweilagennmessungen ein Vorteil. Durch die Größe des Spotbildes im Nahbereich tritt der Bildsensor als Fehlerquelle in den Hintergrund. Der Einfluss der Pixelvariation wird durch die Mittelung der Position über alle Pixel des Spotbildes vernachlässigbar. Der dominante Fehlereinfluss ist hier der Laserzielbeleuchter. Die Punktquelle hat eine mit dem Abstrahlwinkel etwas variierende Strahlstärke, d.h. sie erzeugt eine ungleichmäßige Zielausleuchtung. Dies ist für große Zielweiten vernachlässigbar, da bei solchen Messungen nur sehr kleine Raumwinkel der abgegebenen Strahlung zur Abbildung beitragen. Im Nahbereich hingegen führt die ungleichmäßige Ausleuchtung des Ziels zu einem größeren Gesamtfehler. Der Betrag wird mit zunehmender Distanz geringer. Diese Abstandsabhängigkeit der Messgenauigkeit im TPS1200+ zeigt Abbildung 4 (Definition der Messgenauigkeit siehe BOCKHORN, 2006). Die modifizierte ATR-Wellenlänge von 785 nm im TPS1200+ (im alten TPS1200 Fernrohr 850 nm) ermöglicht zusätzlich den Einsatz von neuen Laserquellen mit verbesserten Eigenschaften und vor allem mit einer höheren Leistung bei gleichbleibender Lasersicherheitsklasse (IEC 60825-1 Klasse 1: uneingeschränkt augensicher). Dies wirkt sich besonders bei Messungen mit größeren

Reichweiten genauigkeitssteigernd aus. Im Nahbereich profitiert man zusätzlich von der gleichmäßigeren Ausleuchtung des ATR-Gesichtsfeldes durch den neuen Zielbeleuchter. So ist beim neuen TPS1200+ auch eine signifikante Steigerung der Winkelmessung im Nahbereich implementiert.

3.4 Winkelmessung aus ATR, Fernrohr, Teilkreisabgriff und Neigungskorrektur

Die Richtungsbestimmung zum Reflektor, d.h. aus dem Bild der Punktquelle und Richtungsbestimmung zum Inversionszentrum des Prismas sind äquivalent. Die Kamera ist hierbei fix auf unendlich fokussiert. Für größere Entfernungen wird somit die Punktquelle scharf abgebildet. Für Messungen im Nahbereich entsteht eine unscharfe Abbildung ohne Verlust von Messgenauigkeit. Darüber hinaus wurde zur Sicherstellung der Stabilität eine Temperaturkalibrierung im Fernrohr integriert. Zudem ist mit dem neuen hochauflösenderen CMOS-Sensor eine präzisere Bestimmung des Spotschwerpunkts und somit eine höhere Genauigkeit für die Positionsbestimmung gegeben. Für statische Messungen erhält man mit einem TPS1201 eine Messgenauigkeit von einer Bogensekunde nach ISO 17123-3 und im Nahbereich Messfehler kleiner als 1 mm. Durch eine für den Benutzer geschützte Implementierung können ATR-Ablagen auch im Lock-Modus mit Subpixelgenauigkeit bestimmt werden. Das ATR-Modul leistet mehr als 200 Bildsegmentierungen pro Sekunde (Vergleich: ein PC erreicht etwa 50 X VGA Bildsegmentierungen pro Sekunde bei 100 mal höherem Stromverbrauch). Diese hohe Messfrequenz gewährleistet eine stabile Zielverfolgung auch mit kurzen Reflektorabständen. Eine ausreichende Messgenauigkeit bei großen Reichweiten kann nur mit retro-reflektiven Tripelprismen mit ausreichender Größe erreicht werden. Für zu kleine Reflektordurchmesser $\ll 20$ mm oder Katzenaugen bzw. Reflektorfolien fällt die Messgenauigkeit wesentlich ungenauer aus. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass die Bündelbegrenzung des Messstrahls bei kleinen Reflektordurchmessern durch den Reflektor erfolgt und damit das Kamerazentrum des Abbildungssystems verschoben wird. Dadurch ergeben sich abstandsabhängige systematische Fehler in der Umrechnung von den Pixelablagen in die Winkelablagen. Eine Verschmutzung des Reflektors wirkt sich zusätzlich genauigkeitsmindernd aus. Für kinematische Messungen ist zudem noch der Einfluss der Refraktion des Glases bei Messung mit verkippten Tripelprismen störend. Durch Mehrspotauswertung der ATR-Algorithmik wird dieser Fehler verringert. Grundsätzlich muss jedoch für eine genaue kinematische Bestimmung der Bewegungsspur der Reflektor vor allem in Hz-Richtung kontinuierlich und auf etwa $\pm 10^\circ$ zum Instrument ausgerichtet sein. Dieser Störeffekt wird im nachfolgenden Abschnitt genauer betrachtet.

3.5 Einfluss der 360°-Reflektoren auf die Zielverfolgung

Eine automatische Nachführung eines Präzisionsprismas ist für die präzise Messungen mit minimalen Fehlerein-

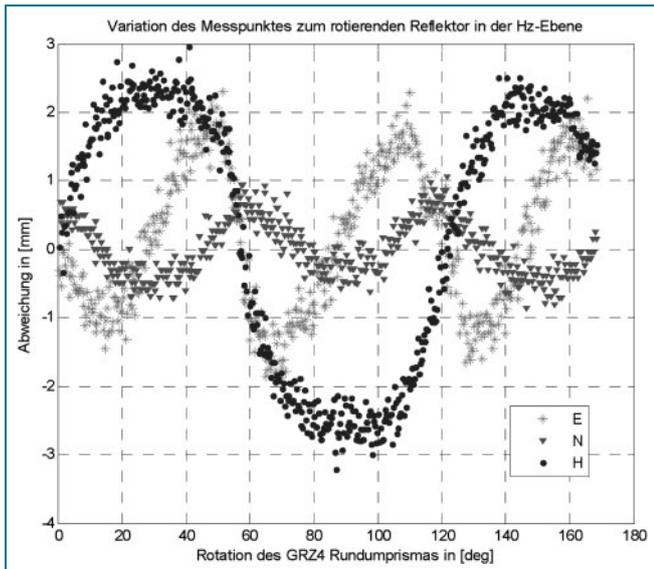


Abb. 5: Einfluss eines rotierenden 360°-Reflektors (Leica GRZ4 statische Messungen)

flüsse zwingend erforderlich. Eine einfache und kostengünstige Realisierung ist sicherlich nicht aufwendig. Bei kinematischen Messungen mit zielverfolgenden Tachymetern werden von allen Herstellern 360°-Prismen verwendet. Solche Rundumreflektoren sind in der Regel aus mehreren Tripelprismen aufgebaut (z.B. Leica GRZ4, GRZ121 oder neu das GRZ122). Dem Vorteil, den Reflektor unabhängig von seiner horizontalen Orientierung verwenden zu können, steht der Nachteil von größeren Messfehlern gegenüber (HENNES, 2000). Prismenabhängige Fehler in horizontaler und auch in vertikaler Richtung betragen hier mehrere Millimeter. Der zusätzliche Fehlerbeitrag des Reflektors entsteht durch Brechung der EDM- und ATR-Sensorstrahlung am Glas des Rundumreflektors (INGENSAND, 2001).

Die Abbildung 5 zeigt den Einfluss einer kontinuierlichen Rotation eines Leica GRZ4 Rundumreflektors um die Reflektorachse, bei statischen Horizontalvisuren im Abstand von 50 m mit dem TPS1200+. Der Reflektor rotiert dabei entlang seiner (vertikalen) Längsachse in 0,3° Schritten. Dieses Beispiel zeigt relative Fehler in der Höhe (H) von 2,4 mm, in der EDM-Messung (N) von 0,5 mm und in der Richtung senkrecht zu beiden (E) von ca. 1,5 mm. Bei steilen Visuren ergibt sich ein noch größerer Höhenfehler. Eine Abschätzung des Fehlers aus der Reflektorgeometrie und dem Brechungsindex des verwendeten Glases ist für die EDM-Messung einfach. Bei der ATR-Messung wird dieser Messfehler vor allem der Hz-Richtung durch Auswertung von mehreren Prismen unterschiedlicher Orientierung zum Messgerät korrigiert. Dies ist in der folgenden Abbildung 6 skizziert.

Bei der Messung auf die direkte Prismenfläche mit einer optimalen Ausrichtung zum Zielstrahl (Abb. 6 linke Seite unten) ist das Spotbild (Abb. 6 linke Seite oben) ähnlich wie beim Präzisionsprisma. Hingegen erzeugt eine ATR-Messung auf einen Kantenübergang (Abb. 6 rechte Seite unten) der beiden beteiligten Prismen infolge der starken Verkippung der Prismen zwei in entgegengesetzter Richtung diagonal verschobene Spotbilder (Abb. 6 rechte Seite

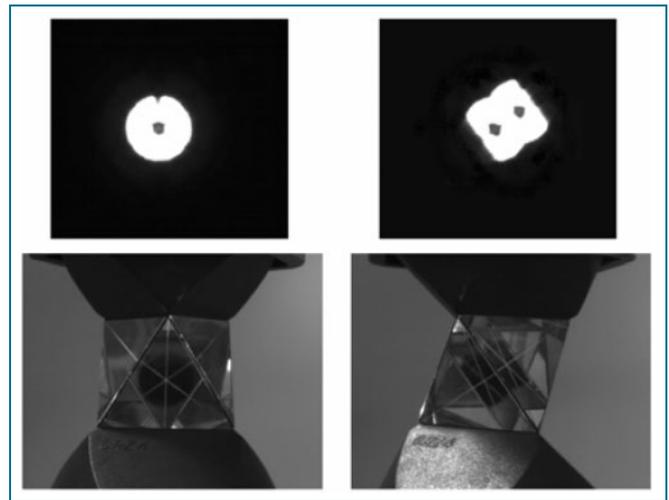


Abb. 6: Einfluss des 360°-Prismas auf die Bildauswertung im Nahbereich

oben). Für die ATR-Messung wird in diesem Fall aber der Schwerpunkt des Gesamtbildes verwendet, wodurch sich jeweilige Fehler bei der Bestimmung der Ablage aufheben. Bei bewegtem Rundumreflektor variiert in der Regel dessen Orientierung zum zielverfolgenden Tachymeter. Durch den oben in der Abbildung 5 dargestellten Beitrag der Reflektorverkippung zum Gesamtpositionsfehler ist dieser bei Messungen mit dem GRZ4 noch um etwa 2–3 mm ungenauer. Um den vergleichsweise hohen Fehlerbeitrag des Rundumreflektors bei der Zielverfolgung zu reduzieren, wurde in der Messanordnung das Tripelprisma (GPR1) kontinuierlich ausgerichtet (vgl. Abb. 7 links). Daraus resultiert mit dem GPR1 ein Messfehler von < 0,1 mm, der vernachlässigt werden kann. Somit werden bei der anschließenden Untersuchung nur Instrumentenfehler verifiziert. Eine weitere Störgröße kann durch Fremdrelexionen verursacht werden. Hierbei führen fehlerhafte Reflexionen, durch z.B. metallische Flächen, zu zusätzlichen Spots. Die ATR-Auswertung kann solche Zusatzspots abtrennen und damit Fremdrelexionen weitgehend eliminieren.

4 Verifizierung der kinematischen Leistungsfähigkeit des Leica TPS1200+

Durch die zunehmende Bedeutung der zielverfolgenden Tachymeter in der geodätischen Messtechnik ergaben sich zwangsläufig verschiedene Arbeiten zur Genauigkeitsverifizierung oder Beurteilung der Leistungsfähigkeit (z.B. STAIGER, 1998 und HENNES, 1999). Veröffentlichungen zur aktuellen Instrumenten findet man z.B. in STEMPFHUBER, 2004, WAGNER, 2006 und BAYOUD, 2007. Um das komplett neu konzipierte Instrument TPS1200+ genauer zu betrachten, wurden an der Messbahn des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich kinematische Messungen durchgeführt und ausgewertet. Auf einem mit konstanter Geschwindigkeit bewegten Schlitten können so lineare Bewegungen bis 50 m verifiziert werden. Ein Laserinterferometer stellt über eine einheitliche Basis den absoluten Zeitbezug zu

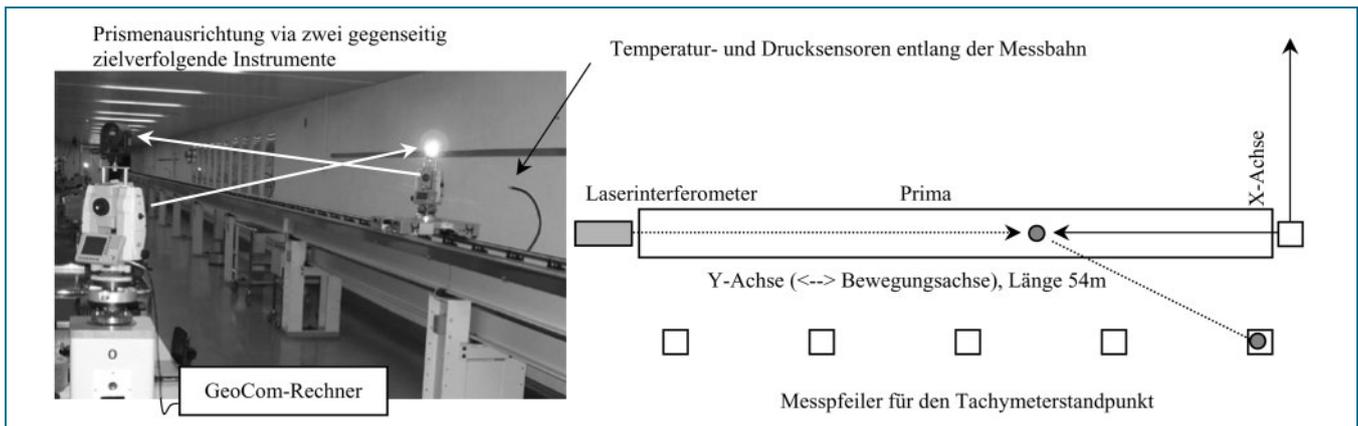


Abb. 7: Verifizierung kinematischer Messsensoren an der Messbahn des IGP (ETH Zürich)

einer Referenzposition des bewegten Objektes dar und lässt so auch eine Beurteilung der Totzeiten zu. Folgende Messanordnung kam zum Einsatz.

Die geometrische Form der Bahn ist im Submillimeterbereich bekannt. Durch eine geeignete Definition des Koordinatensystems (siehe Abb. 7 rechts) können so die orthogonalen Quer- sowie die Höhenabweichungen aufgetragen und analysiert werden. Eine getrennte Auswertung in Lage und Höhe liefert so relevante Ergebnisse für verschiedene kinematische Aufgabenstellungen. Die mit dem TPS1200+ via der GeoCom-Schnittstelle gemessene Trajektorie setzt des Weiteren einige kinematisch relevante Einstellungen voraus.

Eine sehr einfache Realisierung einer idealen Prismenausrichtung für die Optimierung der Positionsverifizierung kann durch zwei gegenseitig-gleichzeitig messenden Tachymeter im Lock-Modus erfolgen. An beiden Instrumenten wurde auf dem Tragegriff jeweils ein Rundprisma angebracht (vgl. Abb. 7 rechts). Somit werden der in Abbildungen 5 und 6 beschriebene Fehler nahezu vollständig eliminiert. Die Ergebnisse mit dem TPS1200+ (TCA1201+) zeigen, dass mit einer solchen Messanordnung orthogonale Lageabweichungen sowie Abweichungen zur Referenzhöhe im Millimeterbereich erreicht werden können.

Diese Resultate können sicherlich noch mit einer entsprechenden Datenglättung bzw. -filterung zusammen mit den Bewegungsparametern verbessert werden. Im Vergleich zu einer ersten Untersuchung des TPS1200 im Jahre 2004 ist hier eine erhebliche Steigerung in der Lage- bzw. Höhengenaugigkeit erreicht worden (vgl. STEMPFHUBER, 2004). Die Verwendung einer aktuellen On-board-Tachymeter-Software wird selbstverständlich vorausgesetzt. Bei der genauen Interpretation, vor allem in der Höhenkomponente, müssen noch zusätzlich die Einflussgrößen des Zweiachsneigungssensors erwähnt werden. Mit dem GeoCom-Befehl „GetAngle1“ kann man die Werte des Zweiachsneigungssensors auslesen. Diese Korrekturen werden natürlich bei der Bestimmung der 3D-Trajektorie zusammen mit den dynamischen Eigenschaften der Bewegung berücksichtigt.

Dieser Einfluss lässt sich hier vor allem in der Vertikalwinkelmessung nicht klar von der ATR-Auswertung trennen. Bei langsamen und stetigen Bewegungen wird dieser Einfluss jedoch immer kleiner und kann deshalb auch in der Regel vernachlässigt werden.

Zusätzlich lassen sich mit diesem Versuchsaufbau das Zeitverhalten bzw. die auftretenden Latenzzeiten noch genauer analysieren. Das in der Abbildung 7 dargestellte Laserinterferometer bildet hier das Referenzsystem (Totzeit

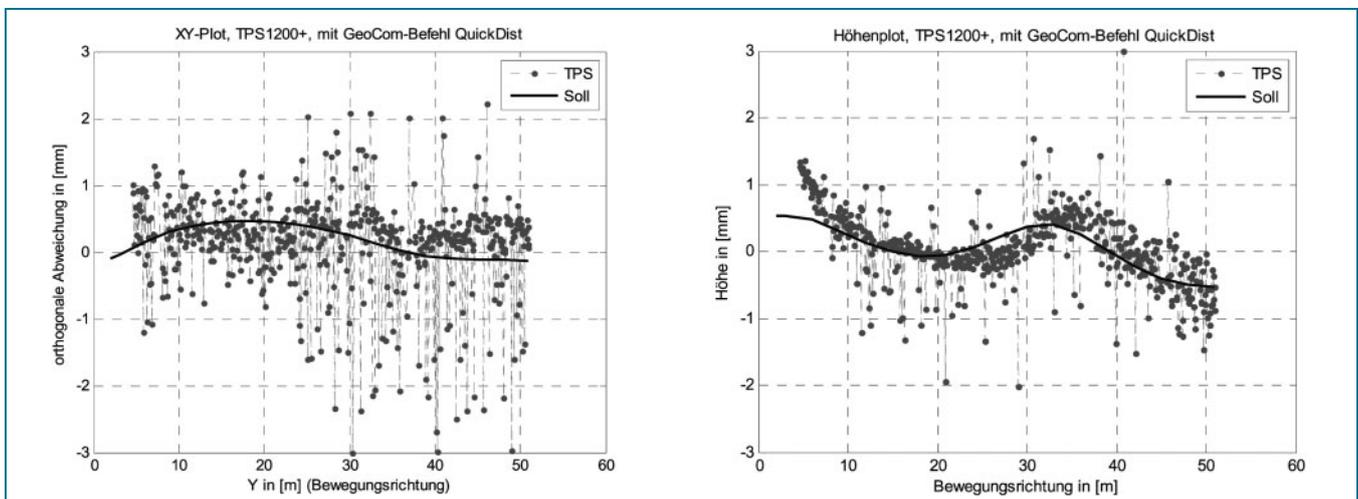


Abb. 8: TPS1200+ Messungen auf der Messbahn, Bewegungsgeschwindigkeit = 0,6 m/s

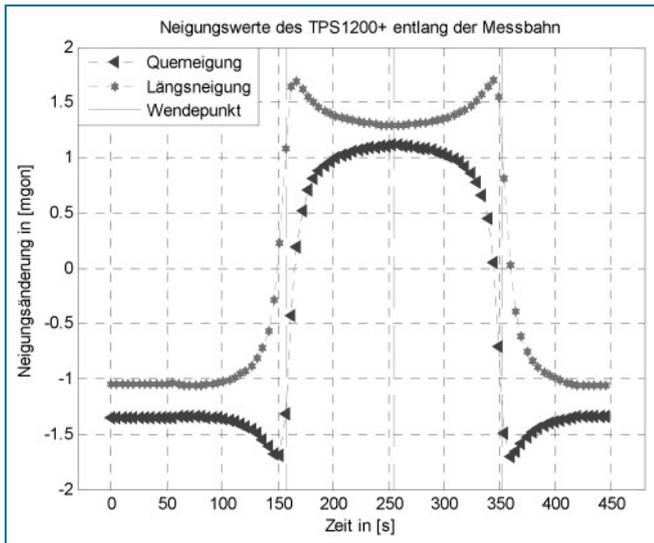


Abb. 9: Neigungskorrektur einer Hin- und Rückbewegung an der Messbahn

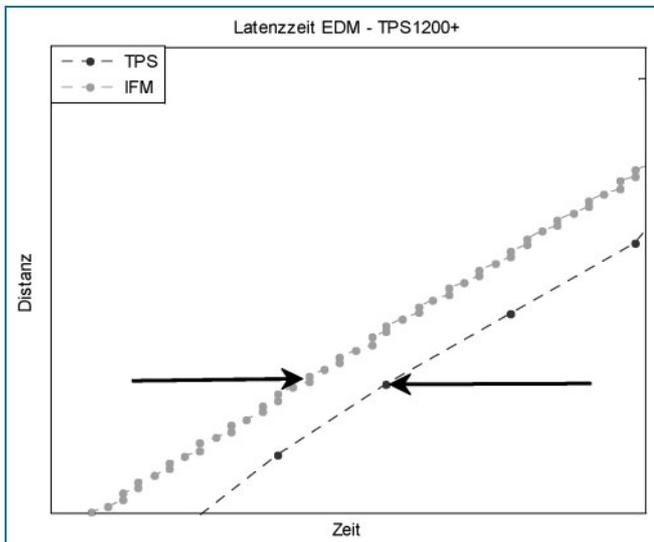


Abb. 10: Analyse der Latenzzeiten, hier Vergleich EDM – Laserinterferometer

im Bereich von wenigen Millisekunden). Treten Abweichungen auf, so zeigt sich dieser Offset als Verschiebung auf der Zeitachse. EDM-Messungen können hier direkt verglichen werden, bei der Winkelmessung muss eine geeignete Skalierung erfolgen. Latenzzeiten von wenigen Millisekunden sind eindeutig sichtbar.

5 Zusammenfassung und Schlussbemerkung

Aus der Beschreibung der technischen Zusammensetzung des neuen Leica TPS1200+ wurde anhand der Messanordnung gezeigt, dass unter Berücksichtigung der verschiedenen Einflussgrößen kinematische Messungen von wenigen Millimetern bis zu einer Entfernung von 50 m möglich sind. Eine genaue Kenntnis des kinematischen Verhaltens von zielverfolgenden Tachymetern ist bei diesen Anwendungen unabdingbar. Nur durch ein de-

tailliertes Studium der Zielverfolgung und dem Zusammenspiel der einzelnen Messsensoren kann dieses Messverfahren erst gezielt eingesetzt werden. Nur wenn die Leistungsfähigkeit des Messinstruments bei allen Umgebungsparametern bekannt ist, können zielverfolgende Tachymeter bewegte Objekte oder Baumaschinen unter 1 cm für Aufgaben der Planierungen oder Einbauarbeiten erfassen bzw. steuern. Dieser Artikel stellt die Einflussgrößen der einzelnen Subsysteme sowie des Zielobjekts dar und definiert die resultierenden Abweichungen qualitativ. Nur unter der Berücksichtigung bzw. Reduzierung aller Einflussgrößen können Messungen im Genauigkeitsbereich von wenigen Millimetern auf einer begrenzten Reichweite gewährleistet werden.

Literatur

- [1] BAYOUD, F.: Leica TPS1200+ A Telescope with Opto-Mechnical Design, White Paper, www.leica-geosystems.com, 2007
- [2] BOCKHORN, M.: Richtungsbestimmung mit Leica ATR bei Zielweiten über 100 m, Fachhochschule Bochum, Fachbereich Vermessungswesen und Geoinformatik, unveröffentlichte Masterarbeit, 2006
- [3] HENNES, M.: Leistungsmerkmale des One-Man-Systems Geodimeter System 4000, VR 54. Vol. 5 + 6, Seite 287–295, 1992
- [4] HENNES, M.: Grundlegende Aspekte zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Robottachymetern, AVN 106, S. 374–385, 1999
- [5] HENNES, M.; FAVRE, C.: Zum Einfluss der geometrischen Ausrichtung von 360°-Reflektoren bei Messungen mit automatischer Zielerfassung, VPK 2/2000, S. 72–78, 2000
- [6] INGENSAND, H.: Die Weiterentwicklung der automatischen Zieleinstellung nach dem Intensitätsmaximumprinzip, BDVI-Forum, Vol. 4, Seite 212–223, 1983
- [7] INGENSAND, H.: Systematische Einflüsse auf praktische Messungen mit dem Tachymeter und Digitalnivellier, DVW Schriftenreihe 42/2001, Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik, Wittwer Verlag Stuttgart, S. 120–137, 2001
- [8] Leica GeoCom Manual, www.leica-geosystems.com
- [9] KAHMEN, H.: Selbsttätig zielende tachymetrische Vermessungssysteme für Aufgaben der Ingenieurgeodäsie, IX. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Dümmler Verlag, Bonn, Band 1, 1984
- [10] KAHMEN, H.; STEUDEL, J.: Das automatisch zielende Messsystem GEOROBOT II, Ingenieurvermessung Dümmler Verlag, Bonn, 1988
- [11] MATTHIAS, H.: Der Robotertheodolit TOPOMAT, Technik, Anwendungen und Auswirkungen auf dem Beruf, Vermessung Photogrammetrie und Kultur, Heft 8/91, S. 427–431, 1991
- [12] STAIGER, R.: Verfahren der automatischen Zielpunktserfassung und -verfolgung, DVW Schriftenreihe 29/1998, Hybride Vermessungssysteme - Grundlagen und Anwendungen -, Wittwer Verlag Stuttgart, S. 13–27, 1998
- [13] STEMPPHUBER, W.; WUNDERLICH, Th.: Auf dem Weg zur Sensorsynchronisation von GPS und TPS für kinematische Messaufgaben, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 05/2004



- [14] STEMPFHUBER, W.: Baumaschinenführung und -steuerung, Von der statischen zur kinematischen Absteckung, ZfV Heft 1/2008, Seite 36–44, 2008
- [15] WAGNER, M.: Trimble ATS-Totalstation: Moderne hochgenaue Tracking-Systeme für Anwendungen in der Baubranche. (www.trimble.com/ats_wp.asp), 2006

Adressen der Autoren:

Dr. WERNER STEMPFHUBER, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, Wolfgang-Pauli-Strasse 15, CH 8093 Zürich, Schweiz

Dr. HOLGER KIRSCHNER, Leica Geosystems AG, Heinrich-Wild-Strasse, CH-9435 Heerbrugg, Schweiz