

Die neue Theodolit-Prüfmaschine TPM-2 von Leica Geosystems

Heinz Lippuner, René Scherrer

Zur serienmäßigen Überprüfung der Winkelmessgenauigkeit von Theodoliten wurde bei der Firma Leica die Theodolit-Prüfmaschine von 1988 weiter entwickelt und in einer neuen Version (TPM2) zu Beginn des Jahres 2004 in Betrieb genommen. Die neue Anlage lässt sich auch zur Prüfung und Kalibrierung winkelabhängiger Ausrichtungen hochwertiger Prüflinge wie z.B. Spiegelpolygone oder Winkelgeber einsetzen.

1 Einleitung

Die üblichen Verfahren zur Genauigkeitsbestimmung der Winkelmessung bei Theodoliten beruhen auf der Satz-messung. Ein Feldverfahren ist im ISO Standard 17123-3 [1] beschrieben. Dieses Verfahren ist aufwändig aber praxisnah, widerspiegelt das Resultat nicht nur die Winkelmessgenauigkeit des Theodoliten selbst, sondern auch die zur Zeit der Messung geherrschten atmosphärischen Verhältnisse sowie die Fähigkeit des Beobachters. Ein solches Verfahren ist aber zur serienmässigen Bestimmung der Winkelmessgenauigkeit bei Theodoliten nicht optimal aus der Sicht der Instrumentenhersteller. Hier möchte man vor allem ein möglichst automatisches Verfahren haben, welches unabhängig von atmosphärischen Bedingungen und menschlichen Fähigkeiten ist und zudem noch universell eingesetzt werden kann.

Mit der TPM-1 wurde von Leica erstmals im Jahre 1988 eine solche Prüfmaschine realisiert [2]. Neue Technologien sowie die gesammelten Erfahrungen mit der TPM-1 sind in die Entwicklung der heutigen TPM-2 eingeflossen (Patent angemeldet). Diese neue Theodolit-Prüfmaschine wurde zu Beginn des Jahres 2004 in Betrieb genommen.

Die Genauigkeit der TPM-2 ausgedrückt als Standardabweichung (1σ) beträgt $0.058''$ (0.018 mgon) für Horizontalwinkel und $0.091''$ (0.028 mgon) für Vertikalwinkel V . Ein in der Metrologie und anderen Disziplinen benutztes Mass zur Beschreibung der Genauigkeit ist die sogenannte Messunsicherheit, respektive erweiterte Messunsicherheit [3].

In diesem Sinne beträgt die erweiterte Messunsicherheit $0.116''$ (0.036 mgon) für H_z und $0.182''$ (0.056 mgon) für V . Sie ergibt sich als die Standard-Messunsicherheit multipliziert mit einem Deckungsfaktor $k = 2$, und entspricht im Falle einer Normalverteilung einer Deckungswahrscheinlichkeit von ungefähr 95%.

Die TPM-2 lässt sich aber nicht nur im Zusammenhang mit der Genauigkeitsbestimmung der Winkelmessung

von Theodoliten, sondern prinzipiell zum Prüfen und Kalibrieren der winkelabhängigen Ausrichtung einer Referenzstruktur eines hochwertigen Prüflings einsetzen (Spiegelpolygone, Winkelgeber, etc).

2 Aufbau der TPM-2

2.1 Hardware

Abb. 1 vermittelt einen Einblick in das TPM-2 Messlabor mit den wesentlichen Komponenten der TPM-2. Dies sind:

das Messteil mit vertikaler und horizontaler Drehachse, elektronischem Kollimator und eingesetztem Prüfling

das Elektronik-Rack

der Arbeitsplatz mit Bildschirm und Keyboard

ein Teil der Prüfmittelausrüstung (18-flächiges Spiegelpolygon)

Anhand der Abb. 2 und 5 lässt sich der Aufbau etwas detaillierter erklären. Das Messteil der TPM-2 besteht aus zwei Präzisionsdrehtischen welche auf einem L-förmigen Sockel aus Granit montiert sind. Der Sockel selbst liegt auf einem Metallrahmen dessen Füsse verstellbar sind, damit eine einfache Grobhorizontierung möglich ist.

Koaxial zur vertikalen Stehachse des horizontalen Drehtisches ist eine Vorrichtung (z. B. Dreifuss) zur Aufnahme des Prüflings (z. B. Theodolit) angebracht. Der vertikale Drehtisch mit seiner horizontalen Achse ist auf der Seite des L-förmigen Sockels montiert und besitzt einen Schwenkarm zur Befestigung des Autokollimators. Damit der Schwenkarm nicht unter einen gewissen Bereich nach unten gedreht werden kann und auf den Sockel auffährt, wird die Bewegung durch induktive Endschalter begrenzt.



Abb. 1: TPM-2 Messplatz

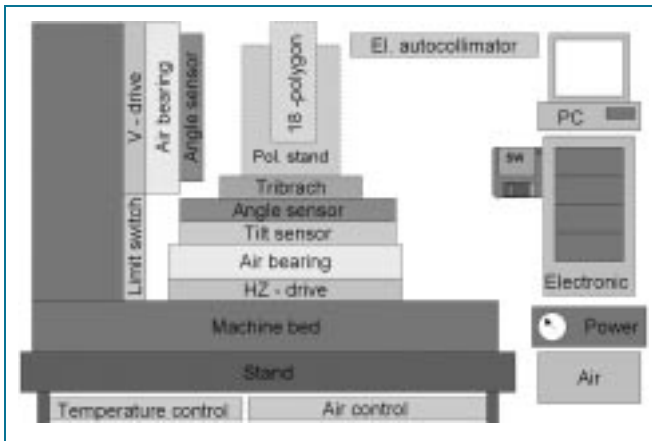


Abb. 2: Schematischer Aufbau der TPM-2

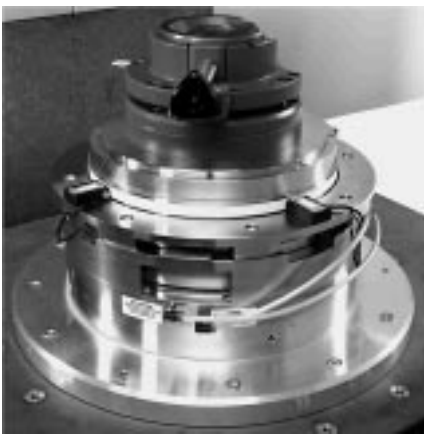


Abb. 3: Vertikales Achssystem

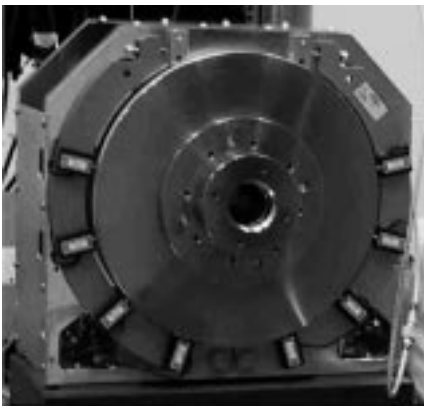


Abb. 4: Horizontales Achssystem

Das Achssystem der beiden Drehtische ist luftgelagert. Die Ebenheit und Rundheit der Luftlager beträgt $\leq 0.05 \mu\text{m}$. Die Winkelmessung erfolgt mit Heidenhain-Encodern mit je vier Ableseköpfen. Die Drehtische werden über Piezo-Motoren angetrieben. Im horizontalen Drehtisch befinden sich deren vier, im vertikalen dagegen acht solche Motoren, da hier wegen dem Schwenkarm, dem Kollimator sowie der Nachführung von nicht motorisierten Theodoliten über deren Fernrohr eine grössere Masse bewegt werden muss (Abb.3 und 4).

Die drei Achsen der TPM-2 müssen dieselben Bedingungen wie bei den Theodoliten erfüllen, nämlich:

vertikale (Steh-) Achse horizontale (Kipp-) Achse
Kollimatorachse (Ziellinie) horizontale (Kipp-) Achse
Achsen schneiden sich in einem Punkt
Zur Überprüfung der Parallelität zwischen der Stehachse der TPM-2 und des Theodolits dient ein in der Stehachse eingebauter Neigungssensor.

Der Winkelwert für Hz und V existiert nicht als direkter Variablen-Output an den Ableseköpfen der Encoder, sondern deren Signale müssen zuerst verarbeitet werden. Dazu benötigt man eine Zählerkarte welche den Anschluss von je zwei Ableseköpfen erlaubt. Das ergibt total 4 Zählerkarten die in einem Industrie-PC untergebracht sind. Des weiteren sind über eine 8-Kanal RS232 Karte der Neigungsmesser, der Kollimator, der Bewegungskontroller für die beiden Achsen, die zur Raumtemperaturüberwachung benötigten Temperaturfühler, das Testgerät sowie eine programmierbare Stromversorgung für das Testgerät angeschlossen (siehe Abb. 5).

Die Stromversorgung wurde bewusst separat und programmierbar gehalten, da Geräte verschiedener Hersteller unterschiedliche Spezifikationen in der Stromversorgung aufweisen und sich somit problemlos einbinden lassen. Die Speisung von Prüfling und Neigungsmesser erfolgt über einen Schleifring in der Stehachse der TPM. In diesem Schleifring sind noch sechs Bahnen frei um auch Prüflinge mit mehreren Spannungen oder aufwändigeren Datenschnittstellen messen zu können.

Der durch den Bewegungskontroller, die Winkelabgriffe sowie die Motoren gebildete Regelkreis ermöglicht, die momentane Winkelposition der beiden Drehtische in Echtzeit zu bestimmen.

2.2 Software

Die Software läuft unter dem Betriebssystem Windows 2000 und ist im wesentlichen in Visual Basic programmiert. Um ein möglichst flexibles Softwaresystem zu haben, welches rasch und einfach an die Instrumente verschiedener Hersteller sowie den Vorstellungen des Benutzers in Bezug auf das MMI (Man Maschine Interface) und die Darstellung und Verwaltung der Resultate angepasst werden kann, wurde die Software gemäss Abb. 6 in drei Bereiche aufgeteilt.

Der eigentliche Kern der SW besteht aus einer Bibliothek von Funktionen und DLL's. Damit werden die Hardwarekomponenten der TPM-2 gesteuert. Das Auswerteprogramm für die Kalibrierung der TPM-2 wurde als Matlab Programm geschrieben und in Form eines ausführbaren exe-Programms integriert.

Das MMI lässt sich den Vorstellungen des Benutzers inklusive Sprachversion leicht anpassen. Ebenso verhält es sich mit der Testsoftware für die Totalstationen, welche den Interfaceanforderungen der verschiedenen Gerätehersteller angepasst werden muss.

Die Messresultate werden zusammen mit den aus dem Prüfling ausgelesenen oder über das MMI eingegebenen Zusatzinformationen in einem Data Management System verwaltet. Dies kann ein ganz beliebiges sein, von einer einfachen Filestruktur bis hin zu einer Datenbank. Bei Leica Geosystems werden diese Informationen in einer Oracle Datenbank abgelegt. Aus diesen Informationen

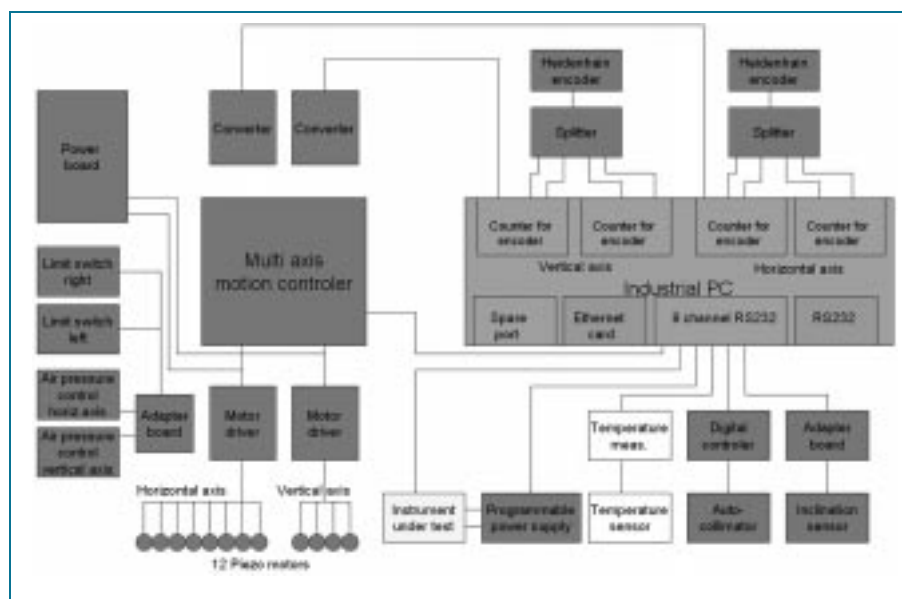


Abb. 5: Funktionales Blockdiagramm: Die Farbe kennzeichnet den Ort der Komponenten. grün: Industrie-PC, blau: Elektronik-Rack, rot: TPM-2 Messteil, gelb: Testinstrument, weiss: externes Messinstrument, grau: Standard Ausrüstung des PC's

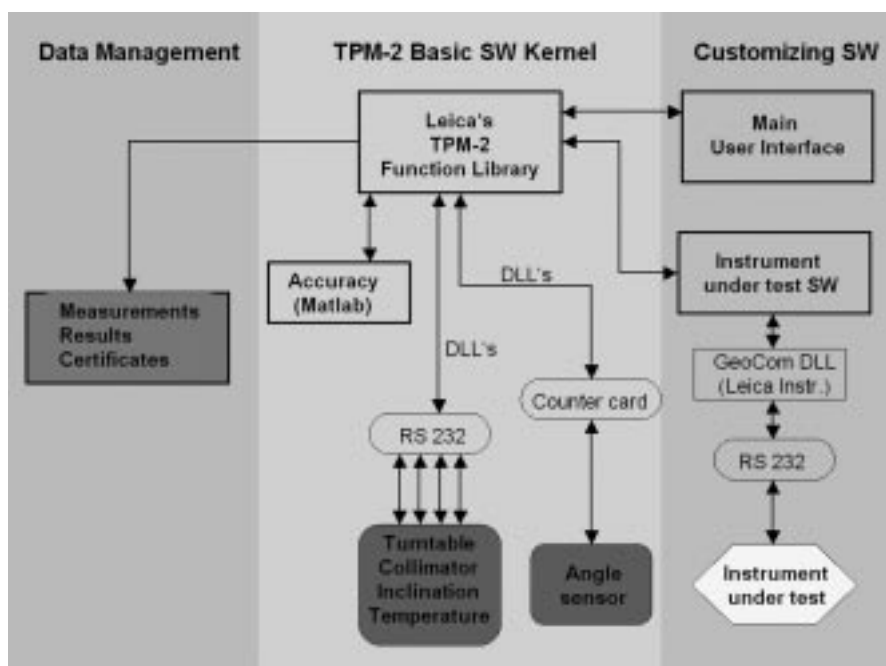


Abb. 6: Software Architektur

können dann die entsprechenden Zertifikate erstellt werden.

3 Genauigkeitsbestimmung

Zur Genauigkeitsbestimmung der TPM-2 wird das sogenannte „Rosettenverfahren“ [4, 5] eingesetzt. Dazu werden zwei 18-seitige Spiegelpolygone benutzt, deren Ebenheit 50 nm beträgt. Zur Bestimmung der Vertikalwinkel-Genauigkeit wurde eines dieser Polygone in die Kippachse eines hochpräzisen Theodolites (TC 5100) montiert. Das andere wurde zur Bestimmung der Horizontalwinkel-Genauigkeit auf die Stehachse desselben Instrumententyps montiert (siehe Abb. 7 und 8). Die Vertikal-

und Horizontalwinkelmessungen erfolgen in separaten Abläufen mit dem jeweils entsprechenden Prüfpolygon. Das Rosettenverfahren beruht prinzipiell auf einer vollständigen Satzmessung in jeder Spiegelflächenposition. Die Spiegelflächen werden der Reihe nach mittels Auto-kollimation auf den Kollimator ausgerichtet. Bei der Horizontalwinkelmessung wird das Polygon durch den Horizontaldrehtisch der TPM weitergedreht, bei der Vertikalwinkelmessung bewegt sich der Messbügel mit Kollimator um das stillstehende Polygon herum. Der jeweilige Messwert ergibt sich als Summe aus Winkel- und Kollimatorablesung.

Dies ergibt im Horizont total $18 \times 18 = 324$ Messungen, im Vertikal $12 \times 18 = 216$ Messungen, da wegen der Abdeckung des unteren Richtungsbereichs durch das Ma-



Abb. 7: Vertikales Spiegelpolygon

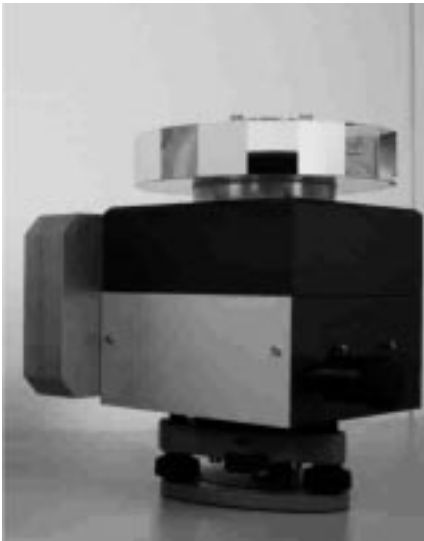


Abb. 8: Horizontales Spiegelpolygon

schinenbett der TPM-2 jeweils nur 12 Richtungen pro Satz gemessen werden können. In beiden Auswerteverfahren ist die Anzahl der Unbekannten jedoch gleich gross, nämlich die 18 Spiegelflächennormalen und die 18 Orientierungsunbekannten (je eine pro Satz).

Um eine flexible Auswertesoftware zu erhalten wurde eine vermittelnde Ausgleichung angesetzt. Damit das System nicht singulär wird muss über eine Richtung willkürlich verfügt werden oder für die optimale Lösung (kleinste Quadratsumme der Verbesserungen) wird die Summe der Winkelnormalen über den Vollkreis zu Null gesetzt. Dazu wird das Normalgleichungssystem mit der Bedingungsgleichung C gerändert und das zu invertierende Normalgleichungssystem erhält dann die Form

$$\frac{N_l}{C} \frac{C^T}{-0} \frac{\Delta}{-k_c} = \frac{w_l}{w_c}$$

mit

$$N_l = A^T P A = \text{Normalgleichungssystem aus vermittelnder Ausgleichung}$$

- C = Bedingungsgleichung (Summe der ausgeglichenen Richtungen = 0)
- 0 = Null matrix
- Δ = Unbekanntevektor (Richtungen und Orientierungsunbekannte)
- k_c = Korrekture
- w_l = $A^T P l$ = Absolutvektor aus vermittelnder Ausgleichung
- w_c = Widerspruchsvektor aus Bedingungsgleichung
- P = Gewichtsmatrix der Beobachtungen
- l = Beobachtungsvektor
- A = Design- oder Jaccobi-Matrix

Das Einführen der Gewichtsmatrix P hat neben der allfälligen Möglichkeit, Beobachtungen, falls nötig, unterschiedlich zu gewichten, einen weiteren rechen-technischen Vorteil. Im Vertikal konnten wegen der Unzugänglichkeit der unteren Spiegelflächen nur unvollständige Richtungssätze gemessen werden. Setzt man in der Gewichtsmatrix P das Gewicht der nicht gemessenen Richtungen zu Null, so kann im Vertikal das gleiche Auswerteprogramm genommen werden, ohne die Design-Matrix A neu aufstellen zu müssen.

Zur Untersuchung allfälliger systematischer Effekte können grundsätzlich noch Glieder höherer Ordnung in dem vermittelnden Ansatz der Richtungsbeobachtungen berücksichtigt werden. Führt man zusätzlich im Auswertemodell eine Gewichtsmatrix P_x für die Unbekannten ein, welche zur Normalgleichungsmatrix N_l addiert wird, erhält man ein völlig allgemeines, flexibles Auswertesystem. Dies sei an zwei Beispielen skizziert: Besteht die P_x -Matrix aus lauter Nullen, so werden die zusätzlichen Glieder höherer Ordnung mitgeschätzt. Wird eine P_x -Matrix addiert deren Diagonalgliedern der höheren Terme das Gewicht Unendlich zugewiesen wurde, so werden diese Unbekannten nicht mitgeschätzt, sondern bleiben auf den Ausgangswerten (in diesem Fall Null).

Die somit erreichte Systemgenauigkeit der TPM-2 beträgt für eine einmal gemessene Richtung im Horizont $0.058''$ (0.018 mgon) und im Vertikal $0.91''$ (0.028 mgon).

4 Anwendungen

Die TPM-2 wird bei Leica Geosystems sowohl im Bereich der Entwicklung, der Produktion und Produktionsüberwachung sowie zur Zertifizierung der Winkelgenauigkeit von Theodoliten eingesetzt. Im folgenden wird der Vorgang zur Genauigkeitsbestimmung der Winkelmessung eines Theodoliten erläutert.

Um Vergleichsmessungen zwischen dem Winkelabgriffsystem der TPM-2 und des Theodoliten machen zu können, müssen diese zueinander in Beziehung gebracht werden. Dazu müssen die beiden Achssysteme möglichst genau (innerhalb gewisser Toleranzen) aufeinander ausgerichtet sein. Der Einfluss eines allfälligen kleinen Versatzes des Ursprungs der beiden Achssysteme wird durch das Verfahren der Autokollimation eliminiert. Mit anderen Worten: die Stehachse V der TPM-2 und die des Theodoliten sollen zueinander parallel sein und möglichst zusammenfallen (Zentrierung und Horizontierung des Theodoliten im TPM-2 System). Dasselbe gilt für die Horizontal-

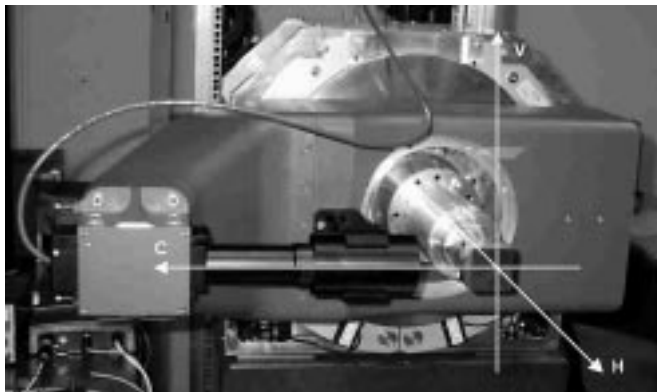


Abb. 9: Achssystem der TPM-2, Schwenkarm mit Autokollimator und Schutzstutzen

achse H der TPM-2 und die Kippachse des Theodoliten (siehe Abb. 9). Einsetzbare Distanzscheiben in der TPM-2 erlauben, Theodolite mit unterschiedlicher Kippachshöhe (Unterschied > 1 mm) der Höhe der Horizontalachse der TPM-2 anzupassen.

Durch das Aufsetzen eines Autokollimations-spiegels auf das Fernrohrobjektiv (Abb. 11 und 12) wird eine fiktive aber konstante Ziellinie des Fernrohres simuliert welche wiederum innerhalb gewisser Toleranzen parallel zur Kollimatorachse ausgerichtet sein muss. Durch das Anbringen eines Gegengewichts auf der Okularseite wird die Ausbalancierung des Fernrohres gewährleistet (Abb. 12). Eine weitere Möglichkeit besteht darin, einen Autokollimationsspiegel gemäss Abb. 10 auf der okularseite des Fernrohres zu befestigen.

Der am Autokollimator angebrachte Schutzstutzen wird bei der Messung vor den Autokollimationsspiegel gezogen und verhindert dadurch den Einfluss von Luftfluktuationen. Bei nicht motorisierten Prüflingen dient er zudem auch als Führungssystem für die Positionierung des Theodolitfernrohres. In diesem Fall wird er ein Stück über den Autokollimationsspiegel gezogen.



Abb. 10: Okularseitiges Lösungsidee

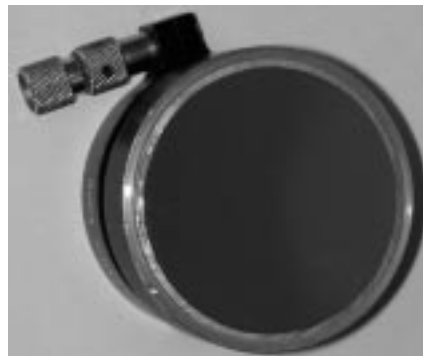


Abb. 11: Autokollimationsspiegel



Abb. 12: Total Station während der Messung

Bei der Horizontalrichtungs-Messung wird der Limbus des Theodolits, welcher fest mit dem Drehtisch verbunden ist, unter der Alhidade durchgedreht. Das Fernrohr des Theodolites wird dabei nicht bewegt. Im Gegensatz dazu wird das Fernrohr bei der Vertikalwinkel-Messung um die Kippachse geschwenkt.

Die Differenzen der Hz- und V-Ablesungen zwischen Theodolit und TPM-2 werden als „ist – soll“ Werte betrachtet aus denen sich die Standardabweichung einer Einzelmessung des Systems „TPM-2 – Theodolit“ berechnen lässt. Um die Genauigkeit der Theodolitmessung zu erhalten ist es spätestens hier notwendig, sich vom Begriff Standardabweichung zu lösen und zumindest gedanklich den Übergang zur Messunsicherheit gemäss GUM [3] zu machen, damit auch systematische Fehleranteile mit berücksichtigt werden können.

$$\text{Es gilt: } \sigma_{\text{System}}^2 = \sigma_{\text{TPM-2}}^2 + \sigma_{\text{Theodolit}}^2 + \sum \sigma_{\text{Systematik}}^2$$

Die Terme σ_{System}^2 aus der durchgeführten Messung mit dem zu testenden Theodolit und $\sigma_{\text{TPM-2}}^2$ aus der Kalibrierungsmessung sind bekannt. Die Summe der systematischen Fehleranteile können über die festgelegten Toleranzwerte berechnet und aus der zu grunde liegenden Art der Wahrscheinlichkeitsverteilung kann deren Beitrag zur Standardabweichung ermittelt werden, d. h. der Term $\sum \sigma_{\text{Systematik}}^2$ ist ebenfalls bekannt. Somit lässt sich der Term $\sigma_{\text{Theodolit}}^2$ berechnen und damit auch die Standardabweichung für die Winkelmessung des Theodoliten.

In den Abb. 13 und 14 sind die Abweichungen der Theodolitmessung zur TPM-2 Messung für den Hz- sowie für den V-Kreisabgriff aufgezeichnet. In der Graphik für den V-Abgriff sieht man deutlich den durch das Maschinenbett abgeschirmten Teil welcher für eine V-Messung nicht zugänglich ist. Zusätzlich wird um den Zenit ein Bereich von $\pm 9^\circ$ (± 10 gon) von der Messung ausgeschlossen.

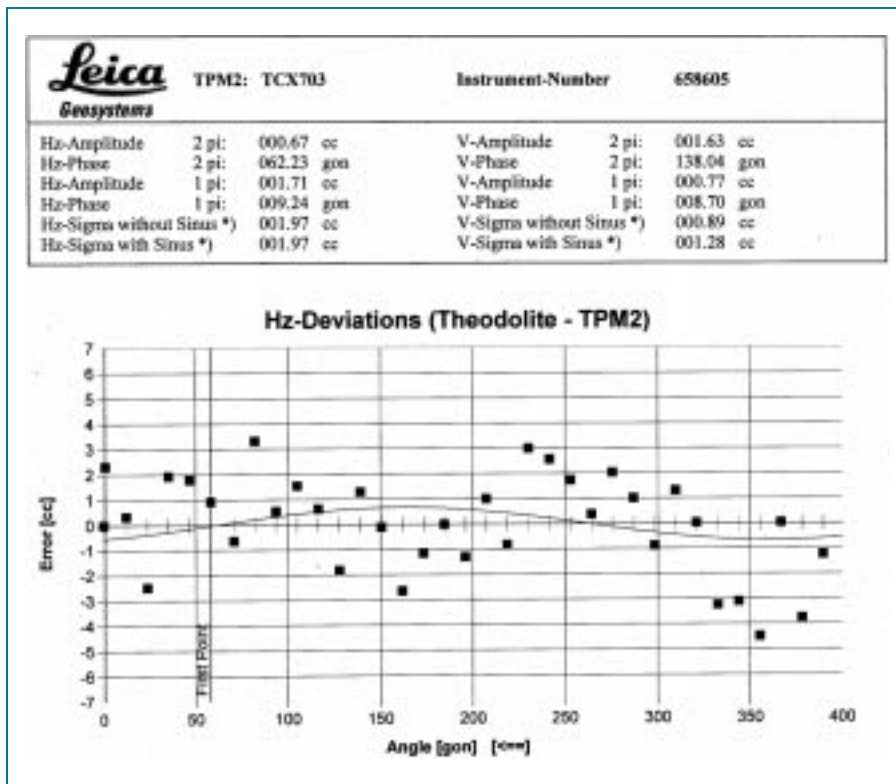


Abb. 13: Messabweichungen zwischen TPM-2 und Theodolit im Horizont mit Sinus fit

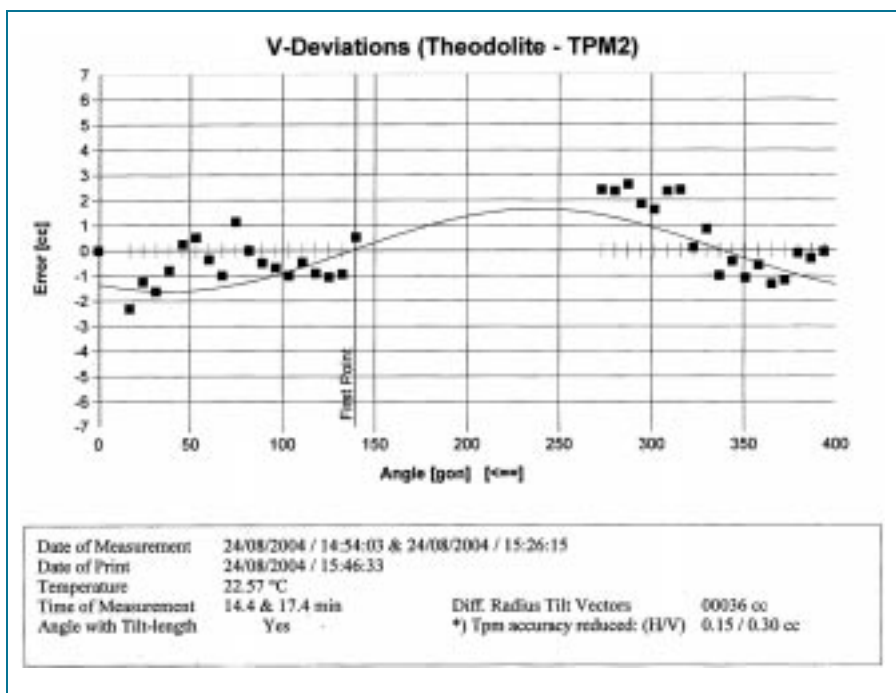


Abb. 14: Messabweichungen zwischen TPM-2 und Theodolit im Vertikal mit Sinus fit

Dadurch werden Singularitätsprobleme umgangen, welche durch Restfehler in der Kippachsneigung des Prüflings und einer nicht hundert prozentigen parallelen Montage des Autokollimationsspiegels zur Kippachse entstehen können.

Legt man eine ausgleichende 2π -periodische Sinusfunktion durch die Abweichungen der Messpunkte so reflektiert dies die restliche Kreisexzentrizität. Der Einfluss solcher 2π -periodischen Systematiken lässt sich aber in der

Praxis durch eine Zweilagennmessung eliminieren. Berechnet man also die Standardabweichung ohne diesen systematischen Sinusanteil, so reflektiert dieser im wesentlichen die Genauigkeit am Mittel einer Zweilagennmessung, welche gemäss ISO der Spezifikationsangabe der Winkelgenauigkeit des Theodoliten entspricht. Der hauptsächlichste Unterschied besteht darin, dass dem ISO Standard eine von einem Beobachter durchgeführte Messung in der Natur zu grunde liegt und im Falle der TPM-2 eine



automatisch ablaufende Labormessung. Diesem Umstand kann aber durch Vergleichsmessungen Rechnung getragen werden.

5 Technische Daten der TPM-2

Genauigkeit:

Winkelmessgenauigkeit:

Standardabweichung in Hz (1σ) 0.058" (0.018 mgon)

Standardabweichung in V (1σ) 0.091" (0.028 mgon)

Erweiterte Messunsicherheit
($k = 2$) in Hz 0.116" (0.036 mgon)

Erweiterte Messunsicherheit
($k = 2$) in V 0.182" (0.056 mgon)

Grösse:

TPM-2 mit Sockel 110 × 100 × 170 cm

Elektronik-Rack 65 × 65 × 173 cm

Gewicht:

TPM-2 mit Sockel 1000 kg

Elektronik-Rack 170 kg

6 Zusammenfassung

Die Theodolit-Prüfmaschine TPM-2 von Leica Geosystems AG zeichnet sich nicht nur durch ihre hohe Genauigkeit aus (Standardabweichung $1\sigma \leq 0.058''$ (0.018 mgon) für Hz und $\leq 0.091''$ (0.028 mgon) für V), sondern auch durch ihre durchdachte und stabile Konstruktion, welche eine einfache Wartung und Kalibrierung sowie einen freien Zugang zum Prüfling erlaubt. Sie ermöglicht prinzipiell das Ausmessen der Flächennormalen beliebiger geometrischen Strukturen und kann den Bedürfnisse des Benutzers angepasst werden. Bei Leica Geosystems wird die Theodolit-Prüfmaschine in der Entwicklung von Winkelgebern, zur Produktionsüberwachung und zur Erstellung von Zertifikaten für die Winkelmessgenauigkeit von Theodoliten verwendet.

Literatur

- [1] ISO 17123-3: Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments. Part 3: Theodolites.
- [2] H. Ingensand: A new Method of Theodolite Calibration, FIG XIX International Congress, Helsinki, Finland, 1990.
- [3] GUM: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements. ISBN 92-67-100188-9.
- [4] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bericht Me-8, Braunschweig, Oktober 1979.
- [5] Industrielle Winkelmesstechnik, Band 260, Kontakt und Studium, Mess- und Prüftechnik, Expert Verlag.

Adresse der Verfasser:

Heinz Lippuner René Scherrer,

Leica-Geosystems AG,

Heinrich Wild Strasse, CH-9435 Heerbrugg (Schweiz)