W. Huep

Zur Qualitätssicherung tachymetrischer Messungen

1 Motivation

Elektronische Tachymeter sind sehr effiziente hybride Messsysteme. Sie sind gleichzeitig auch sehr komplex, indem sie an „Rohmessungen“ eine Reihe von „Fehlerkorrekturen“ anbringen und unterschiedliche Beobachtungstypen intern miteinander verrechnen. Diese Komplexität erschließt sich dem Nutzer jedoch nur teilweise, obwohl er für Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Richtigkeit seiner ermittelten Geometrien geradestehen muss. Gerade im Vermessungswesen sind qualitätssichernde Maßnahmen ein Eckpfeiler: Regelmäßige oder fallweise Prüfungen bzw. Kalibrierungen sollen die grundsätzliche Eignung der Messmittel herstellen, und die projektbezogene Feldarbeit wird durch „kontrollierte Messungen“ und ggf. durch zusätzliche Feldprüfungen abgesichert. Diese Vorgehensweisen können sich stützen auf eine allgemein anerkannte „Best Practice“, auf Normungen (DIN, ISO), Vorschriften und Erlasse (im amtlichen Bereich) oder andere Verfahrensanweisungen.
Man kann aber auch folgende Fragen stellen: Werden die derzeitigen Kalibrier-, Prüf- und Messmodelle den aktuellen Tachymetersystemen gerecht? Sind (Feld-)Prüfverfahren und Objektmessung hinreichend in einem durchgängigen Prozess organisiert? Was ist für die jeweilige Aufgabe an Prüfungen hinreichend und notwendig? Sind die gewohnten Aussagen zu Genauigkeiten und Zuverlässigkeiten das, was ein Auftraggeber erwartet? – Hierzu seien in diesem Beitrag einige Aspekte wiedergegeben.

2 Das Tachymeter als Hybridsystem

2.1 Allgemeine Struktur

Ein Tachymeter besteht aus einer Reihe zusammenwirkender Aktoren (z.B. Motoren, Beleuchtung für automatische Zielerfassung) und Sensoren (Kreisablesung, Distanzmesser), welche optisch-mechanisch – und damit geometrisch – miteinander verknüpft sind. Die wichtigsten mechanisch-optischen Komponenten, Aktoren und Sensoren finden sich in nachfolgender Aufzählung. Die in runde Klammern dahinter gesetzten Bedingungen müssen erfüllt sein, damit das geometrische Tachymeter-Modell gilt, (topozentrische) räumliche Polarkoordinaten zu erzeugen:

- Stütze (stabilitätssichernd und genauigkeitstragend)
- Achsen (rechtwinklig, zentrisch und stabil)
- Klemmen und Triebe (müssen „stehen“ und hysteresefrei sein) [Motoren als Option]
- Teilkreise mit Ablesevorrichtungen (ohne Exzentrizität und Teilungsfehler) [absolute oder inkrementale Kreisablesung]
- Kompensator (achsparallel, mechanisch und thermisch stabil) [Ein- oder Zweiachskompensator, verschiedene technische Realisierungen]
- Fernrohr (optische Achse für alle Entfernungen rechtwinklig, zentrisch und stabil) [automatische Zielerfassung über 4-Quadranten-Diode, CCD- oder CMOS-Chip als Option, ggf. auch photogrammetrische, flächenhafte Bildauswertung – in jedem Falle mit zusätzlicher innerer Orientierung]
- Distanzmesser (Mechanik-Optik, Maßstab und Additionskonstante(n) stabil) [Phasenvergleichs- oder Impulslaufzeitverfahren, reflektorlos als Option]
- Weitere mögliche Sensoren (Temperatur, Druck, Grobzielsuche usw.)
- Firmware, Software und Benutzerschnittstelle

Ergänzend ist festzustellen:

- Die Tachymeter sind heute in verschiedenen Varianten und Ausbaustufen am Markt und unterscheiden sich nicht mehr nur in der Genauigkeit. Dies kann Rückwirkungen auf Prüfungen und Kalibrierungen haben, indem z.B. eine Richtungsmessung visuell mit dem Fadenkreuz gesondert neben einer automatischen Richtungsmessung zu erfolgen hat.
- Das Tachymeter arbeitet immer mit einem (signalisierten oder nicht-signalisierten) Ziel zusammen. Dies kann geräteinterne Korrekturen, Genauigkeit und Richtigkeit der Ergebnisse beeinflussen. Distanzmessungen zu Prismen benötigen eine zusätzliche Additionskonstante. Reflektorlose Distanzmessungen können unter Mischsignalen aufgrund unterschiedlich entfernter Objektbereiche leiden; zudem kann das Messsignal materialabhängig unterschiedlich tief in das Objekt eindringen. In entsprechenden Prüfungen und Modellierungen ist also das Gesamt-System aus Instrument und Zielobjekt zu beachten.

2.2 Automatische Richtungsmessung als Beispiel einer zusammengesetzten Messung

Ohne an dieser Stelle auf sämtliche klassischen Einflussgrößen im Tachymeter einzugehen, sei am Beispiel der automatischen Richtungsmessung gezeigt, wie neben der Teilkreisauslesung (Hz- oder V-Richtung) jetzt Bildkoordinaten (a, senkrecht zur Zielachse) zu messen und zusammen mit der meist ohnehin erfolgenden Distanzmessung (D, quasi längs der Zielachse) und Fernrohrkonstanten (k_1 und k_2) zu Ablagewinkeln (ε) verrechnet werden:
Somit erhält man Werte (Hz_{korr} und V_{korr}), die man noch um den Einfluss des Stehachsfehlers korrigieren und dann einfach abspeichern müsste. In der statischen Anwendung werden sie allerdings als Sollwerte zum motorischen Verfahren des Fernrohrs „zentrisch“ auf Zielmitte benutzt.

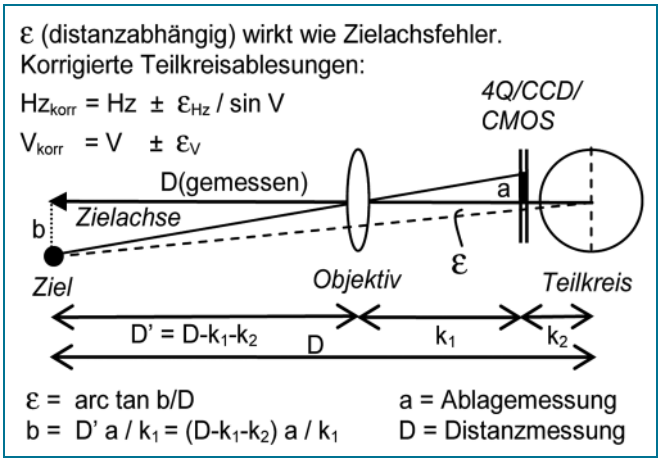

Abb. 1: Ein Schema zur automatischen Zielerfassung (Richtungsmessung)

Eine endgültige, topozentrische Horizontalrichtung Hz_{topo} z.B. geht damit auf folgende Zufallsgrößen (Beobachtungen) zurück:
$Hz_{topo} = f$ (Bildkoordinate a, Distanz D [eher unkritisch], Teilkreisauslesungen Hz und V, Kompensatorauslesungen in Längs- und Querrichtung α_l und α_q).
Für jede Größe nimmt man eigene normalverteilte Streuungen (Varianzen) annimmt, so dass sich ein Streuungsmaß für die interessierende Richtung Hz_{topo} nach dem Varianzfortpflanzungsgesetz ergibt

$$\sigma^2_{Hztopo} = g(\sigma^2_a, \sigma^2_D, \sigma^2_{Hz}, \sigma^2_V, \sigma^2_{\alpha l}, \sigma^2_{\alpha q}).$$

Hinzu kommen systematische Einflüsse, die entsprechend modelliert und kalibriert sein sollten:

- Bildkoordinate a: Innere Orientierung des Sensors (Nullpunkt, Verdrehung, Maßstab)
- einschließlich der Fernrohrkonstanten k_1 und k_2
- Distanz D: Maßstab (Frequenz, Atmosphäre) und Additionskonstante
- Teilkreisauslesungen Hz und V: evtl. Exzentrizitäts- und Teilungsfehler
- Kippachsfehler
- Kompensatorspielpunkt(e)

Die Fernrohrkonstanten k_1 und k_2 sowie die Distanz D sind allerdings eher unkritisch, wenn das Fernrohr motorisch auf „Null“ gefahren wird, also nur auf Ablagen $a = 0$ geprüft wird. Die innere Orientierung des Sensors bleibt jedoch wichtig; insbesondere der Nullpunktfehler in horizontaler und vertikaler Richtung entspricht ja genau den bekannten Hz- und V-Kollimationsfehlern. Zu beachten ist, dass diese Kollimationsfehler zweimalig auftreten: für den Sensor und für das klassische Fadenkreuz. Sie sind getrennt, also zweimalig, zu bestimmen!

3 Prüfungen und Kalibrierungen im Tachymeter-Lebenszyklus

3.1 Herstellerrolle: Entwicklung, Produktion, Service

Für den Anwender kaum transparent sind die Abläufe beim Hersteller:

- Ein Vermessungsinstrument wird auf eine bestimmte Genauigkeitsspezifikation hin entwickelt. Dabei stellen entwicklungsbegleitende Prüfungen die Einhaltung der Forderungen sicher.
- Am Ende eines Entwicklungsprozesses werden Prototypen, Vorserien- und erste Serieninstrumente typgeprüft, um die generelle Einhaltung der Genauigkeitsforderungen nachzuweisen.
- Die einzelnen Serieninstrumente werden während der Montage komponentenweise und im kompletten Zustand justiert und kalibriert, mit geringerem Aufwand als bei der Typprüfung.
- Ein Reparatur- oder Service-Instrument ist analog wie ein neues Instrument zu betrachten.

Die Kalibrierungen und Prüfungen bestimmen

- *systematische Fehler* (Kollimationsfehler, mechanische Achsfehler, EDM-Additionskonstanten etc.) zur Justage bzw. Abspeicherung und danach
- *zufällige oder sich zufällig auswirkende Fehler* (mechanische Lose, Rauschen von Elektronikbausteinen, unscharfe Optiken etc.) zum Tuning oder zur Selektion.

Wichtig ist für den Anwender die Kenntnis, welches abschließende Prüfverfahren den herstellerseitigen Genauigkeitsangaben (Standardabweichungen) zugrunde liegt. Hier stellen Normen (DIN, ISO) die Vergleichbarkeit verschiedener Produkte und die Reproduzierbarkeit sicher.
Dies gilt auch in umgekehrter Richtung, wenn ein Kunde ein Gerät zum Service gibt, weil es eine bestimmte Spezifikation (nach DIN oder ISO) nicht erreicht.
Allerdings: Aussagen oder gar Angaben zu systematischen (Rest-)Fehlern werden nicht getroffen, sondern man nimmt an, dass keine mehr wirksam bzw. durch die Messanordnung (Beispiel: Zwei-Lagen-Messung) ausgeschlossen sind.

3.2 Anwenderrolle: Weitere Prüfungen während der Produktlebensdauer

3.2.1 Genauigkeitsfaktoren geodätischer Messergebnisse

a) *Langzeitstabilität von Mechanik, Optik und Elektronik*: Aufgrund von Abnutzung, Alterung oder Sturz verändern sich möglicherweise systematische Parameter (z.B. EDM-Maßstab wegen Frequenzdrift; Kollimationsfehler) und Streuungsparameter (z.B. Richtungsmessgenauigkeit wegen unscharfer Teilkreisabbildung).
b) Für jeden neuen Job wirken sich aktuelle *Umgebungsbedingungen* sowohl systematisch als auch zufällig aus. Beispiele: Geräteerwärmung, Ausbreitungsbedingungen für EDM-Signale, verwendetes Zubehör, Objekt-Oberflächen bei reflektorloser Messung.
c) *Grundsätzliche Einstellungen, Algorithmen und feste Parameter*: Sie bestimmen sich aus dem Gerätedesign und ändern sich nicht. Sie müssen allenfalls bei einem Abnahmetest nach Auslieferung, Reparatur oder Geräteservice betrachtet werden. Die Kenntnis über diese Zusammenhänge kann dennoch wichtig sein, um die Auswirkungen der Prüfergebnisse nach a) und b) interpretieren zu können. Beispiele: Funktionales Modell für eine entfernungsabhängige EDM-Additionskon-

stante, Korrekturfunktion wegen einer Stehachsschiefe und auch bekannte Software-Fehler.

Ob bestimmte Parameter wirklich „fest“ sind, kann umstritten sein: Beispielsweise gibt es Hersteller, die den Kippachsfehler (variabel) zugänglich machen oder eben auch nicht.

3.2.2 Labor- und erweiterte Feldprüfungen

Die langperiodischen Instrumentenänderungen gemäß a) unterliegen schon heute regelmäßigen Laborprüfungen (ohne Normung) und erweiterten Feldprüfungen (z.B. nach der alten Norm DIN 18723 oder aktuell nach ISO 12857). Dabei werden zunächst systematische Fehler kalibriert bzw. weggestellt und daraufhin ein zufälliges Streuungsmaß (Standardabweichung – nicht mehr!) bestimmt. Dies führen häufig speziell befähigte Institutionen (Universitäten, Bezirksregierungen usw.) aus. Die Kennzeichen sind:

- objektive, allgemein reproduzierbare Prüfung,
- kein durchgreifender Systemtest,
- besondere Infrastruktur (Testfeld, Messstrecke, Frequenzzähler usw.),
- bestimmte Kenntnisse des Prüfpersonals und spezielle Software-Werkzeuge
- signifikante Aufwände, Kosten und Geräteausfallzeiten (Tage),
- Prüffrequenz z.B. jährlich oder fallweise kürzer.

3.2.3 Vereinfachte Feldprüfungen

Die aktuellen Norm-Entwicklungen sollen mit zusätzlichen Feldprüfungen folgende ganzheitliche Frage beantworten [Becker et al. 2000]: Ist die geforderte Genauigkeit für das anstehende Projekt mit der gegebenen Ausrüstung (und Mannschaft) erreichbar? Es soll gelten:

- aktuelle, projektbezogene Systemprüfung vor Ort
- Randbedingungen teilweise mit einbeziehen: Wetter, Bodenbedeckung, Bauwerke, Personal, Zeitrahmen etc.
- nicht nur zufällige, auch systematische Fehlereinflüsse abschätzen
- minimaler Bedarf an Zeit (max. 0,5 h?), Infrastruktur und Spezialkenntnissen
- möglichst hohe Akzeptanz durch den Anwender.

3.2.4 Vierphasige Prüfstrategie

Auf dem Kongress 1994 der Fédération International des Géomètres (FIG) wurde durch die Working Group 5.5. der FIG-Kommission 5 eine Empfehlung zur „routinemäßigen Prüfung von EDM-Instrumenten“ veröffentlicht, die analog auch auf andere Vermessungssysteme anwendbar ist [FIG 1994]. Sie sieht ein vierphasiges Prüf- und Kalibriermodell vor:

- Phase 1 – Funktionsprüfung,
- Phase 2 – Leistungsprüfung,
- Phase 3 – Kalibrierung,
- Phase 4 – Abnahmeprüfung.

Die Leistungsprüfung (Phase 2), abgestuft in vereinfachte Feldprüfung oder umfangreichere Verfahren, beinhaltet die Genauigkeitsprüfungen geodätischer Instrumente gemäß DIN bzw. ISO-Normen welche im nächsten Kapitel vorgestellt werden sollen.

4 Normen zur Prüfung und Kalibrierung von Tachymetern

Von den in unserer Region in Frage kommenden Normungsorganisationen

- DIN: Deutsches Institut für Normung (Empfehlungen)
- ISO: International Standard Organisation (Empfehlungen)
- CEN: Comité Européen de Normalisation (Gesetzeskraft angestrebt)

finden sich Verfahren zur Genauigkeitsbestimmung geodätischer Instrumente bei DIN und ISO. Zudem befasst sich die FIG-Kommission 5 mit der Thematik, um entsprechende Ergebnisse in Normungsarbeiten einfließen zu lassen.

Nachfolgend seien einige wichtige Normen skizziert und kommentiert. Es finden sich Details in den entsprechenden Normenblättern bzw. in der Literatur, etwa bei [Joeckel, Stober 1999].

Die *derzeitigen Normen*

- betrachten weitgehend nur die *Messgrößen Richtung, Strecke und Höhenunterschied.*
- gehen von zentrierten, instrumentell und atmosphärisch korrigierten Messgrößen aus – also möglichst *frei von systematischen Fehlern.*
- bestimmen quasi nur *zufällige Streuungsmaße* (Standardabweichungen).
- sind weniger als schnelle, projektbezogene Prüfungen geeignet.

4.1 Stand bei ISO-Normen

Genauigkeitsprüfungen von Vermessungsinstrumenten waren zunächst parallel von den Sub Committees (SC) zweier Technical Commissions (TC) erarbeitet worden:

- TC172/SC6 (Optics and Optical Instruments – Geodetic and Surveying Instruments, eher aus Herstellersicht)
- TC59/SC4 (Building Construction – Limits and Fits in Building Construction, aus der Sicht des Bau-Anwenders)

Diese Aktivitäten mündeten in die Normen ISO 12857 und ISO 8322. Mittlerweile sind diese Normungen harmonisiert in der neuen Norm ISO 17123 zusammengefasst worden. Der Vollständigkeit seien die tachymetrischen Aspekte dieser alten Normen kurz dargestellt, bevor dann auf die aktuelle ISO 17321 eingegangen wird.

4.1.1 Frühere ISO 12857: Optics and optical instruments – Geodetic and surveying instruments – Field procedures for determining accuracy:

Die Norm beschreibt *erweiterte Feldverfahren* zur Genauigkeitsbestimmung geodätischer Instrumente und ist sowohl hersteller- als auch anwenderorientiert. Bearbeitet wurde sie von der TC172/SC6 und sie ist auch Grundlage für weitere geodätische ISO-Normungen.

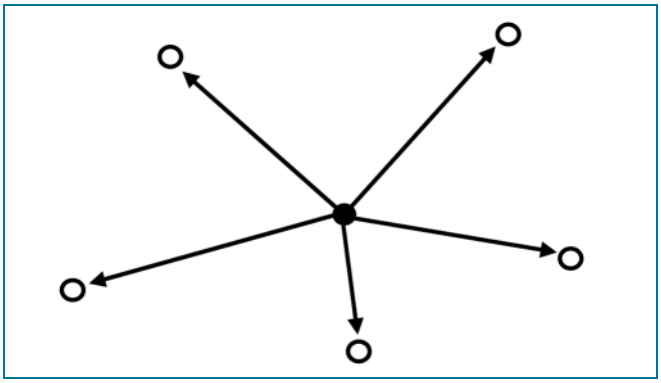

Abb. 2: ISO 12857-2 Theodolitprüfung (Hz)

Es wird nach anerkannten geodätischen Verfahren möglichst objektiv eine *empirische Standardabweichung* der jeweiligen Messgröße bestimmt. Die Norm dient damit eher der Verifizierung von „Prospektdaten". Hierzu sind auch *statistische Tests* formuliert, um Unterschiede zu Standardabweichungen anderer Instrumente oder früherer Bestimmungen auf Signifikanz zu prüfen.

ISO 12857 – Part 2: Theodolites (Theodolite)

Horizontalrichtungen

- 5 Ziele gleichmäßig über den Horizont verteilt, in 100–250 m Entfernung,
- Zieltafeln empfohlen für sichere Zielung
- 4 Messreihen bei leicht unterschiedlichem Wetter mit je 3 Sätzen in 2 Lagen
- Berechnung der Standardabweichung einer in 2 Lagen gemessenen Richtung

Auch hier werden die systematischen (Achs-)Fehler absichtlich nicht betrachtet (Zwei-Lagen-Messung). Dies könnte für Beobachtungen in nur 1 Fernrohrlage kritisch sein, falls wider Erwarten kein sauber kalibriertes System gegeben ist.

Auf die Messung der Stehachsschiefe (wirksame Eichkurve(n) des Kompensators) wird nicht direkt eingegangen. Dem Anwender ist überlassen, eine eventuelle automatische Zielerfassung (CCD-Array o.ä.) getrennt von einer visuellen Messung (Strichplatte) zu prüfen.

Vertikalwinkel

- Als Ziele dienen verschiedene Teilstriche einer Invar-Nivellierlatte, die in 2 Lagen beobachtet werden.
- Berechnet wird die Standardabweichung eines in 2 Lagen gemessenen Vertikalwinkels.

Absichtsgemäß erfolgt auch hier keine direkte Prüfung auf systematische Fehler (Kollimation, Index, Kompensatorspielpunkt), welche sich in der Praxis bei Ein-Lagen-Messungen jedoch auswirken.

Es ist ein relativ kompliziertes Mess- und Rechenverfahren, weshalb die „Nachfolge"-Norm ISO 17123 Vereinfachungen vornahm.

ISO 12857 – Part 3: EDM instruments (Elektrooptische Distanz-Messer)

- Streckenmessung in allen 21 Kombination auf Teststrecke ohne Sollstrecken
- Teststrecke 500 m lang und wellenlängenabhängig in 6 Teile unterteilt
- Berechnung der empirischen Standardabweichung einer einzelnen Streckenmessung

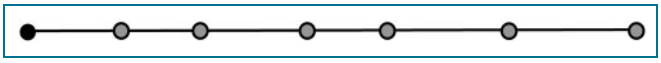

Abb. 3: ISO 12857-3 EDM-Prüfung nach Schwendener

Es sind bedingt Aussagen zu systematischen Fehlern in Additionskonstante und zyklischem Phasenverhalten möglich, nicht jedoch zu einem Maßstabsfaktor. Der Prüfaufwand richtet sich an möglichen zyklischen Fehleranteilen aus: Diese sind jedoch bei aktuellen Phasenmessern und bei Impulsmessern quasi bedeutungslos.

Für reflektorlose Messungen ist die Prüfung zwar prinzipiell geeignet, jedoch sind viele Streckenlängen zu groß. Bei einem *Tachymeter* lassen sich die Richtungs- und Streckenmessgenauigkeiten jeweils nach ISO 12857, Part 2 + Part 3, bestimmen.

4.1.2 Frühere ISO 8322: Building construction – Measuring instruments – Procedures for determining accuracy in use

Hier wurden vom TC59/SC4 für den Baubereich ähnliche Standards erstellt wie vom TC172/SC6, allerdings:

- mehr auf die Anwendung als auf Herstellerdaten orientiert,
- eine größere Instrumentenvielfalt abdeckend,
- unter Einbezug der aktuellen Randbedingungen, des Zubehörs und des Messpersonals.

Die entsprechende Norm ISO 8322 beschreibt Verfahren analog zur ISO 12857, wobei für die Tachymetrie interessant waren: Part 1 (Theory), Part 4 (Theodolites), Part 7 (Instruments when used for setting out) und Part 8 (EDM instruments).

Trotz ihrer Projektbezogenheit hatte sich die ISO-Norm 8322 aufgrund ihrer Komplexität nicht durchgesetzt.

4.1.3 Neue Norm ISO 17123: Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments (Optik und optische Instrumente – Feldverfahren zur Untersuchung geodätischer Instrumente)

In einer gemeinsamen Arbeitsgruppe (Joint Working Group), angesiedelt beim TC 172/SC6 haben sich TC172/SC6 („Optik") und TC59/SC4 („Bau") auf eine harmonisierte und vereinfachte Norm ISO17123 verständigt. Normiert wurden Feldprüfungen geodätischer Instumente mit nachstehenden Zielsetzungen:

- kein besonderer Prüfmittelbedarf
- keine Spezialkenntnisse nötig
- minimierter Aufwand, möglichst unter ł Stunde
- teilweise projektbezogene Systemprüfung
- teilweise Betrachtung nicht nur stochastischer, sondern auch systematischer Fehler
- Einbezug weiterer, moderner Instrumente (z.B. Totalstation, Rotationslaser)

Die instrumentenbezogenen Teile sind *zweistufig* angelegt:

- Eine *vereinfachte Feldprüfung* des Systems Mensch-Maschine-Zubehör-Umgebung überwacht die Einhaltung bestimmter Fehlergrenzen bei geringstmöglichem Aufwand. Gegebenenfalls berechnete Standardabwei-

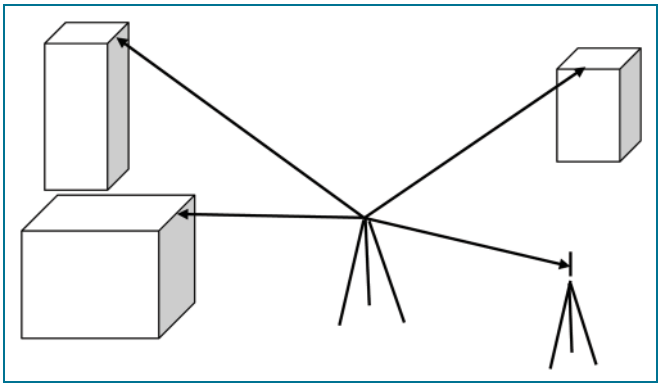

Abb. 4: ISO 17123-3: Vereinfachte Theodolitprüfung (V-Winkel)

chungen stützen sich auf einen nur geringen Stichprobenumfang. Diese Inhalte sind neu.

- Erst bei Überschreiten von Fehlergrenzen bzw. Grenzwerten erfolgt dann eine *erweiterte Feldprüfung*, welche das jeweilige Instrument eher frei von den jeweiligen Umgebungsbedingungen – und damit reproduzierbarer – untersucht und ggf. Signifikanztests durchführt. Sofern schon vorhanden, werden hierfür die Regelungen der bestehenden ISO-Norm 12857 übernommen. Jene Norm wird damit quasi ersetzt.

Für die Tachymetrie sind relevant:

ISO 17123 – Part 1: Theory (Theorie)

Beinhaltet die algorithmischen Grundlagen für die Genauigkeitsschätzungen der anderen Teile dieser ISO-Norm.

Auch systematische Fehlereinflüsse (z.B. Kollimationsfehler) sind wegen der verschiedenen Zielweiten jetzt leichter erkennbar.

Allerdings sind die Grundzüge des GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement; Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen) nicht eingearbeitet [DIN 1999], so dass weiterhin stochastische Fehler isoliert von systematischen (Rest-)Fehlern modelliert werden. Derzeit wird überlegt, die Norm ISO 17123 entsprechend zu überarbeiten.

ISO 17123 – Part 3: Theodolites (Theodolite)

- Die Genauigkeit einer *Horizontalrichtung* wird auch im *vereinfachten Verfahren* ähnlich wie bisher (ISO 12857) bestimmt.
- Allerdings werden nur einmalig 3 Vollsätze zu 4 Zielen in 2 Lagen beobachtet.
- *Vertikalwinkel* werden in beiden Lagen zu 4 Zielen auf höheren Bauwerken mehrfach beobachtet, einen Vertikalwinkel-Bereich von 30° überdeckend.

Die Aufwandsminimierung stand hier im Vordergrund, ohne auf die Ein-Lagen-Messung einschließlich der dafür nötigen Korrektionen (Zielachsfehler, Kippachsfehler, Teilkreis-Exzentrizitäten, Indexfehler, Kompensatorspielpunkt), oder auf die Messung der Stehachsschiefe näher einzugehen.

ISO 17123 – Part 4: EDM instruments (Nahbereichsentfernungsmesser)

- Anstelle einer Streckenmessung in allen Kombinationen sieht die *vereinfachte Prüfung* Soll-Ist-Streckenvergleiche in einem Testfeld vor.

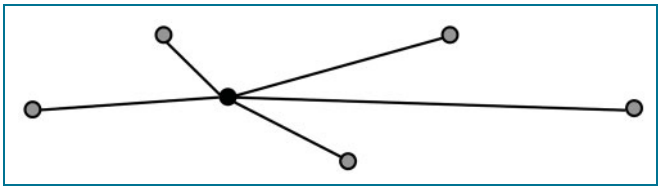

Abb. 5: ISO 17123-4: Vereinfachte EDM-Prüfung (Sollstrecken)

- Die Streckenlängen sollen typisch für die gegebene Messaufgabe(n) sein.
- Ihre *Sollwerte* werden entweder mit einem EDM höherer Genauigkeit oder mit dem Prüfling unmittelbar nach Auslieferung/Abnahme bestimmt.
- Werden anwendungsspezifische Fehlergrenzen nicht überschritten, sind keine weiteren Untersuchungen zu Maßstab, Additionskonstante oder zyklischem Phasenfehler (aktuell eher bedeutungslos) zu veranlassen.

Anders als bei ISO 12857 wird eher eine „äußere Genauigkeit“ betrachtet, mit der Chance, weitere systematische Fehlereffekte (Maßstabsfehler) aufzudecken.

Dem Anwender überlassen bleibt die unkritische Aufgabe, auch für die zunehmend angebotenen reflektorlos messenden EDM entsprechend typische Zielpunktsignalisierungen undbestimmungen vorzunehmen.

ISO 17123 – Part 5: Electronic tacheometers (Elektronische Tachymeter)

Dieser Teil ist komplett neu, da Totalstationen bislang weder bei DIN noch bei ISO abgedeckt sind. Die Genauigkeit der polaren Messelemente lässt sich natürlich gemäß der Teile 3 (Theodolite) und 4 (EDM) untersuchen, jedoch bislang nicht die darauf zurückgehenden Koordinaten(unterschiede) x, y, z!

Vereinfachte Feldprüfung

- 2 Punkte P_1 und P_2 mit ca. 100 m Abstand und möglichst großer Höhendifferenz mit Prismen signalisieren (Berg, Gebäude)
- in seitlichen Abständen von 20–100 m zur Strecke P_1–P_2 sind 10 verschiedene Tachymeter-Aufstellungen S_1 … S_{10} vorzunehmen
- stationsweise Polaraufnahme von P_1 und P_2 in beiden Lagen
- Koordinatenbestimmung x,y,z der Streckenendpunkte P_1 und P_2 im jeweiligen Instrumenten-Koordinatensystem, Koordinaten mitteln aus 2 Lagen (Stationskoordinaten 0,0,0)
- 10malige Berechnung der Horizontalstrecken (Spannmaße) aus Koordinaten
- Standardabweichung der Horizontalstrecke aus Streckenmittelwert rechnen
- daraus Standardabweichung der Lage (x oder y) aus 2-Lagen-Messung

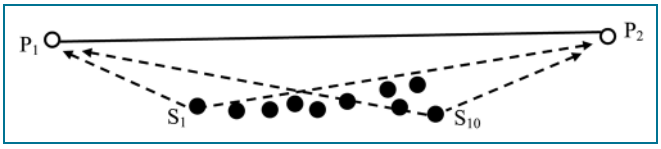

Abb. 6: ISO 17123-5: Vereinfachte Tachymeter-Prüfung (Spannmaß)

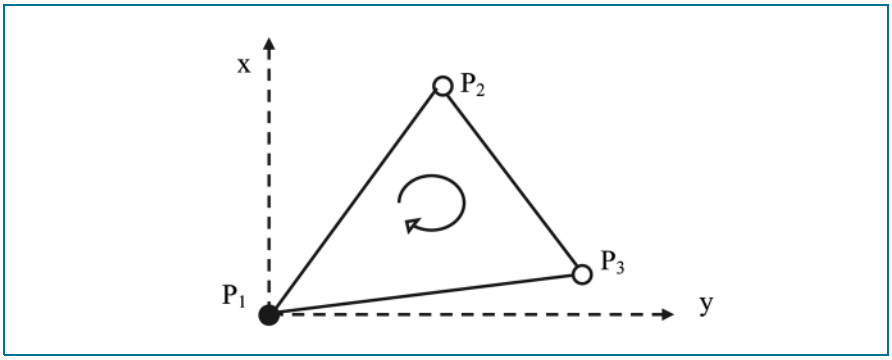

Abb. 7: ISO 17123-5: Erweiterte Tachymeter-Prüfung (Prüffeld)

- 10malige Berechnung der Höhendifferenz aus z-Koordinaten
- Standardabweichung der Höhendifferenz anhand Mittelwert rechnen
- daraus Standardabweichung einer z-Koordinate aus 2 Lagen

Erweiterte Feldprüfung

- zwangszentriertes Testfeld P_1, P_2, P_3 als gleichseitiges Dreieck einrichten
- Seitenlängen entsprechend dem aktuellen Messprojekt, z.B. 100 m
- möglichst große Höhenunterschiede im Testfeld
- von jedem Dreieckspunkt die anderen beiden Eckpunkte polar beobachten
- zyklische Wiederholung in 3 Messreihen
- Koordinatenbestimmung x,y,z der anderen beiden Dreieckspunkte jeweils im Instrumentenkoordinatensystem (Stationskoordinaten 0,0,0)
- Transformation aller Lagemessungen in das Ausgangskoordinatensystem (Translation nach und Rotation um P_1)
- aus insgesamt 36 Beobachtungen 12 Unbekannte (Koordinaten und Transformationsparameter) schätzen
- Standardabweichung einer in 2 Lagen gemessenen x- oder y-Koordinate mit 24 Freiheitsgraden schätzen
- Höhen z_2 und z_3 in bezug auf P_1 sowie (konstante) Differenz δ zwischen Kippachs- und Reflektorhöhe aus insgesamt 18 Beobachtungen schätzen
- Standardabweichung einer in 2 Lagen gemessenen z-Koordinate mit 15 Freiheitsgraden schätzen
- Es sind wieder Signifikanztests für verschiedene empirische oder empirische und theoretische Standardabweichungen angegeben.

Dies ist die erste geodätische Prüfnorm, welche kartesische Koordinaten betrachtet, die aus den Messgrößen Horizontalrichtung, Vertikalwinkel und Schrägstrecke abgeleitet sind. Gerechnet werden für die Koordinaten nur zufällige Streuungsmaße.

Wie bei der Theodolit-Prüfung wird weiterhin von justierten/kalibrierten Instrumenten ausgegangen und alles auf Zwei-Lagen-Messungen bezogen. Spätere Richtungsbeobachtungen in 1 Lage könnten also von systematischen Fehlern unbemerkt beeinträchtigt sein. Systematische Fehler im Distanzmesser wirken sich teilweise auf die Prüfergebnisse aus, nicht jedoch ein Maßstabsfehler.

Messung und Auswertung beider Feldprüfungen ließen sich in der Onboard-Software der Tachymeter ideal unterstützen.

4.2 DIN-Normen

Für den Tachymetrie-Anwender kommt die im Normenausschuss Bauwesen entwickelte Norm DIN 18723 in Frage. Einhergehend mit dem aktualitätsbegründeten Rückzug dieser Norm wird überlegt, die Norm ISO 17123 in das DIN-Normenwerk zu übernehmen.

4.2.1 DIN 18723: Feldverfahren zur Genauigkeitsuntersuchung geodätischer Instrumente

Partiell waren Inhalte dieser Norm in die knappere ISO-Norm 12857 eingeflossen. Auch hier werden (unter Annahme vernachlässigbarer systematischer Fehler) Standardabweichungen berechnet und auf Signifikanz getestet. Für elektronische Tachymeter haben neben dem Teil 1 (Allgemeines) die Teile 3 und 6 Bedeutung:

DIN 18723 – Teil 3: Theodolite

Horizontalrichtungen

Das Verfahren entspricht der ISO 12857.

›I›Vertikalwinkel

Die Messkonfiguration ist hier ähnlich wie für die Horizontalrichtungen, indem zu rundherum aufgebauten Zieltafeln und nicht wie bei ISO 12857 nur zu einer Invarlatte beobachtet wird. Dies ist realistischer, aber auch aufwändiger zu installieren.

- 4 Zieltafeln über den Horizont verteilt bei 100 m Zielweite einrichten
- sie sollen Vertikalwinkel gleichmäßig von 100 bis 50 gon abdecken
- 4 Messreihen bei leicht verschiedener Witterung, je 3 Sätze in 2 Lagen
- Berechnung der Standardabweichung einer Vertikalwinkelbeobachtung

Absichtsgemäß werden systematische Fehler, die sich bei Ein-Lagen-Messungen auswirken werden, nicht erfasst.

DIN 18723 – Teil 6: Elektrooptische Distanzmesser für den Nahbereich

Die Messung nach dem Schwendener-Verfahren entspricht prinzipiell der ISO-Norm 12857.

4.2.2 DIN 18724: Geodätische Instrumente – Genauigkeitsbeurteilung von Nivellieren und Theodoliten aus technischen Daten

Die Norm lässt sich – ohne sie an dieser Stelle weiter darzustellen – als Querverbindung zu den erweiterten Feldprüfungen der DIN 18723, ISO 12857 bzw. der neuen ISO 17123 auffassen.

4.3 Versuch einer Bewertung für den Normungsbereich

Die Normungstätigkeiten stellen zunehmend die *pratikable Feldprüfung* (und Systemprüfung) und damit den Anwender in den Vordergrund. Laborprüfungen oder Kalibrierungen bleiben den Spezialisten überlassen.

Die neueren Entwürfe bewerten zunehmend *Koordinatengenauigkeiten* anstelle einzelner Messgrößen. Dies ist sicher sinnvoll, da es auf der eine Seite eine anwendungsbezogene Sicht sein kann und auf der anderen Seite die einzelnen Fehlereinflüsse oft schwer modellierbar und identifizierbar sind. Denn aufgrund der Komplexität von Elektronik, Firmware und Software wird auch ein Tachymeter zunehmend zur „Black Box“, wenngleich nicht in dem Maße wie ein GNSS-Empfänger. Neben der Messung in Prüffeldern mit bzw. ohne Soll-Koordinaten kann auch die Formbestimmung von Kubus/Quadrat, Kugel/Kreis usw. ein sinnvolles Prüfverfahren werden.

Zunehmend werden sowohl *zufällige als auch systematische Fehler betrachtet*. Dennoch berücksichtigen die Prüfungen für Theodolit und Tachymeter viele systematische Fehleranteile nicht bzw. setzen ein sauber kalibriertes/justiertes System voraus. Aussagen über *Ein-Lagen-Messungen* sind *kaum* möglich.

Die Einbeziehung des *GUM*-Leitfadens zur Darstellung von Messunsicherheiten statt der geodätisch üblichen Angabe von Standardabweichungen ist für die Zukunft wohl *zu erwarten*.

Automatische Zielerfassungen werden nicht gesondert behandelt. Sieht man sie einfach als Alternative zur visuellen Anzielung, lassen sich die bestehenden Normen weiterhin anwenden. Dies gilt vor allem für statische Tachymetermessungen.

Auch die *reflektorlosen EDM* (Impuls und Phasenmesser) werden nicht gesondert behandelt. Hier könnte Handlungsbedarf bestehen, um die unterschiedlichen Eigenschaften des Zielobjekts sauber zu modellieren und um generell zu berücksichtigen, dass oft kein sauber signalisiertes Ziel vorhanden ist.

Kinematische Anwendungen gewinnen gerade im Baubereich an Bedeutung, die derzeitigen Prüf- und Kalibrieransätze sind jedoch rein statisch.

5 Sind für die Tachymetrie alle QS-Bausteine vorhanden?

5.1 Verfahrensanweisungen für die Feldarbeit

Der amtliche Bereich ist hier bindend abgedeckt, der Bereich der Ingenieurvermessung nur fallweise. Wie früher in der „Qualitätssicherung“ üblich, dienen aber die ohnehin nicht immer durchgreifenden doppelten Punktaufnahmen eher zur nachträglichen Prüfung der Qualität einer Messung, nicht aber zum „Einbau“ von Qualität gleich zu Messbeginn.

Ganz einfaches Beispiel: Wo wird kurz vor dem „Standard-Messjob“ der Spielpunkt des Kompensators geprüft? Eigentlich gehören derartige Überlegungen zu einer gelebten „Best Practice“, könnten aber auch in Verfahrensanweisungen einfließen, deren Existenz im Rahmen einer ISO 900x Zertifizierung relevant werden dürfte.

Abschließendes Ziel wäre sicherlich, den Prozess

- erweiterte und vereinfachte Feldprüfung (gemäß DIN bzw. ISO)
- Inbetriebnahme des Instruments im Feld
- Stationierung
- Aufnahme bzw. Absteckung
- weitere Berechnungen („field-to-finish“)

durchgehend zu strukturieren und zu dokumentieren, und zwar für bestimmte Anwendungsklassen. Echte Normen für durchgehende Messprozesse existieren nicht und würden wegen vieler unterschiedlicher Anwendungsfälle auch nur einen Rahmen abstecken können.

5.2 Anwendung von Normen

Die Kenntnisse über und die Anwendung von Prüfnormen geht oft über die Prospektangaben „Standardabweichung

nach DIN“ nicht hinaus. Im gegenseitigen Verhältnis Anwender-Hersteller (Produktqualität) und Anwender-Auftraggeber (durchgängiges Qualitäts-Management-System) könnte deren Bedeutung allmählich zunehmen. Wie in Kapitel 4 dargestellt, sind derzeit vielfältige Normungen vorhanden und können genutzt werden.

5.3 Prüfungen in Testfeldern und an Testkörpern

Für flächenhaft arbeitende 3D-Messsysteme werden Richtigkeit und Messunsicherheit abgeschätzt über die Bestimmung von

- Formparametern (z.B. Kubus, Quader, Kugel usw.)
- Spannmaße (z.B. zwischen Kugelmittelpunkten)
- Ebenheit (einer entsprechenden Fläche).

Die Ermittlung von Spannmaßen zwischen (nicht flächenhaft, sondern punkthaft) angemessenen Prismen findet sich bereits in ISO 17123. Speziell bei reflektorlos arbeitenden Tachymetern lassen sich Eckpunkte eines Raumes oder Körpers oft nicht direkt beobachten, sondern werden indirekt über flächenhafte Aufnahmen gerechnet: Die gescannten Seitenflächen z.B. eines Kubus werden als ausgeglichene Ebene berechnet, deren Einfachschnitt eine Gerade und deren Dreifachschnitt die Eckpunktkoordinaten liefert. Für eine beobachtete und besteingepasste Kugel lassen sich ebenso – meist bei festem Radius – die Mittelpunktkoordinaten und die Abweichungen von der Kugelform schätzen. Analog lassen sich Abweichungen von besteingepassten Ebenen ermitteln.

Ein reflektorlos messendes Tachymeter könnte hier also ähnlichen Prüfverfahren unterliegen, wie eine Koordinatenmessmaschine in der Industrievermessung oder wie möglicherweise einmal ein terrestrischer Laserscanner. Ähnliches gilt für die speziellen Tachymeter mit eingebautem Bild/Video-Chip, also flächenhaft-photogrammetrischen Ansätzen.

Falls dann unzulässige Formabweichungen (Verbiegungen) vorliegen, kann es sehr komplex sein, auf die eigentlichen Fehlerursachen rückzuschließen – je nachdem, wie leicht man sie funktional modellieren kann (z.B. Additionskonstante in der Raumstrecke).

5.4 Angabe von Messunsicherheiten (GUM)?

Der Rahmen dieses Beitrags könnte einer schlüssigen Darstellung der GUM-Theorie nicht gerecht werden; siehe z.B. [Grabe 2000] als gut lesbare Kurzeinführung. Die GUM-Leitlinien werden in der Literatur durchaus kontrovers diskutiert, aber sie beantworten vielleicht Probleme, wie sie auch im heutigen Tachymeter-Einsatz auftreten:

Zunächst einmal werden *zufällige Beobachtungsfehler* betrachtet, die der Gauß’schen Normalverteilung folgen (sollen). Wie in Kapitel 2.2 angerissen, wirken immer mehr Quellen derartiger Fehler zusammen.

Auf der anderen Seite wächst mit der zunehmenden Zahl von tachymeterinternen Sensoren auch die Zahl *systematischer (Rest-)Fehler* an. Da die Sensoren immer stärker miteinander verkettet sind, ist auch die saubere Bestimmung (Kalibrierung) der verschiedenen systematischen Fehleranteile komplexer geworden.

In vielen Fällen helfen die üblichen *redundanten Beobachtungen, systematische (Rest-)Fehler zu minimieren bzw. im Messjob zu schätzen*. In einem Lagenetz mit möglichst unterschiedlich langen Strecken kann man die Auswirkung einer Strecken-Additionskonstante quasi als zufällig auffassen und durch Ausgleichung minimieren – oder mit dem richtigen Vorwissen alternativ im funktionalen Modell als Unbekannte einführen und schätzen. *Redundanzen* sind jedoch durch Wirtschaftlichkeitsüberlegungen *auch* begrenzt. Das einfachste Beispiel sind 1-Lagen-Beobachtungen, in denen z.B. systematische Restanteile der Achsfehler enthalten bleiben.

Folglich ist die Einbeziehung systematischer Fehleraussagen in unseren bisher rein stochastischen Fehlerhaushalt z.B. entsprechend GUM sicherlich sinnvoll.

6 Literaturhinweise

[1] Becker, J.-M.; Heister, H.; Slaboch, V.: New technical standards improving the quality in positioning and measurement. FIG Working Week, Prag 2000

[2] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“, DIN V ENV 13005, Beuth Verlag GmbH, Berlin 1999

[3] FIG, Commission 5, Working Group 5.5: Recommended procedures for routine checks of electro-optical distance meters. FIG-Kongress, Melbourne 1994

[4] Grabe, M.: Gedanken zur Revision der Gauß’schen Fehlerrechnung, Technisches Messen 6/2000

[5] Gottwald, R.; Rüeger, J. M.: Feldprüfverfahren für elektronische Tachymeter – Wunsch oder Realität? Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Heft 11–12, 2000

[6] Ingensand, H.: Neue Verfahren zur Zertifizierung geodätischer Messinstrumente. In: IX. Internationale Geodätische Woche Obergurgl, Institutsmitteilungen der Universität Innsbruck – Geodätisches Institut, Heft 17, 1997

[7] Joeckel, R.; Stober, M.: Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung. Verlag Wittwer, Stuttgart 1999

[8] Zeiske, K.: Current status of the ISO standardization of accuracy determining procedures for surveying instruments. New Technology for a New Century, Technical conference during the FIG working week, Seoul, 8.–10. Mai 2001

Anschrift des Verfassers:
Wolfgang Huep, Fakultät Vermessung, Informatik und Mathematik, Hochschule für Technik Stuttgart, Schellingstraße 24, 70174 Stuttgart, eMail: wolfgang.huep@hft-stuttgart.de