

Ein einfaches Feldprüfverfahren für Tachymeter

Fachautoren: Manfred Juretzko, Karlsruher Institut für Technologie

Weitere Beteiligte: DVW Arbeitskreis 3, Messmethoden und Systeme
DVW Arbeitskreis 4, Ingenieurgeodäsie

Beschlussfassung: Beschlossen vom DVW Arbeitskreis 3 am 30.03.2017
Beschlossen vom DVW Präsidium am 30.03.2017

Dokumentenstatus
verabschiedet



Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung.....	3
2	Feldprüfverfahren	6
2.1	Aufbau des Prüffeldes	6
2.2	Durchführung des Verfahrens	7
2.3	Messunsicherheit	8
2.3.1	Messunsicherheiten der Tachymeterbeobachtungen	9
2.3.2	Ermittlung der kombinierten Standardunsicherheit $u_c(y)$	9
3	Auswertung	11
3.1	Interaktion des Anwenders	11
3.2	Koordinaten-Unsicherheit nach ISO 17123-5.....	11
3.3	Unsicherheit der Winkelmessung	12
3.4	Systematische Abweichungen.....	13
4	Darstellung und Interpretation der Untersuchungsergebnisse	14
4.1	Numerische Darstellung.....	14
4.2	Grafische Darstellung	16
4.2.1	Zielachsabweichung	16
4.2.2	Höhenindexabweichung.....	17
4.2.3	Abweichung der Horizontalrichtungen	17
4.2.4	Abweichung der Vertikalwinkel.....	18
4.2.5	Standpunktbezogene Streckenabweichung	18
4.2.6	Standpunktbezogene Höhenabweichung	19
4.3	Weitere Interpretationshilfen	19
4.3.1	Verdrehung.....	19
4.3.2	Kompensatorfehler.....	20
5	Empfehlungen	21
5.1	Behandlung erkannter Auffälligkeiten	21
5.2	Optimierung des Verfahrens	21
6	Weiterführende Literatur.....	22



1 Zielsetzung

Durch eine einfache und schnelle Feldprüfung soll ein sachkundiger Anwender beurteilen können, ob das eingesetzte Instrumentarium im aktuellen Arbeitsumfeld unter Berücksichtigung der individuellen Beobachtungsgenauigkeit den vorgegebenen Anforderungen gerecht wird. Die Forderung, das eingesetzte Instrumentarium eigenverantwortlich zu überprüfen, ist in unterschiedlicher Ausprägung fester Bestandteil amtlicher Vermessungsvorschriften. Auch sehen Regelwerke wie DIN oder ISO regelmäßige, eigenverantwortliche Prüfungen von Vermessungsinstrumenten vor.

Das vorgestellte Prüfverfahren bezieht sich auf Instrumente, die für typische Vermessungsaufgaben wie topographische Aufnahmen, Katastervermessungen, Arbeiten im AP-Feld und einfache Ingenieuraufgaben eingesetzt werden. Für Aufgaben im sub-mm-Bereich und Anwendungen mit sehr steilen Visuren sollten speziellere Prüfverfahren verwendet werden.

Das Prüfverfahren basiert in Anlehnung an die ISO 17123-5 im Wesentlichen darauf, aus ermittelten Koordinaten¹ Strecken und Höhenunterschiede innerhalb eines Dreiecks zu berechnen und diese zu analysieren. Der Hauptunterschied zur ISO 17123-5 (Totalstationen) liegt in der langgestreckten (und damit einfacher zur realisierenden) Form des Dreiecks und in den Positionen der Instrumentenstandpunkte, die das Verfahren sensibler für bestimmte systematische Abweichungen machen (*Abb. 1*). Zudem wird in Anlehnung an die ISO 17123-3 (Theodolite) geprüft, ob definierte Angaben zur Unsicherheit von Horizontalrichtungen und Vertikalwinkeln eingehalten werden und ob signifikante Zielachs- bzw. Höhenindexabweichungen vorliegen². Dem Anwender wird dazu ein Excel-Formular zur Verfügung gestellt, das die wesentlichen Prüfergebnisse sowohl numerisch als auch grafisch darstellt. Insbesondere die grafische Darstellung erlaubt dem erfahrenen Anwender eine Analyse der Einflussfaktoren.

Sofern das Instrument unterschiedliche Anzielmethode(n) (visuell, automatisch, Okularkamera) und Distanzmessmethoden (Reflektor, Folie, reflektorlos) erlaubt, gelten

¹ Auf die Auswertung der originären Messwerte (Schrägdistanz, Horizontalrichtung, Vertikalwinkel) wird aus folgenden Gründen verzichtet:

- Koordinaten ermöglichen eine bequeme Übernahme der Werte in die Berechnungstabellen, ohne auf die Besonderheiten der Abspeicherung der Messwerte der einzelnen Instrumente eingehen zu müssen.
- Durch die Verwendung der Koordinaten tritt wie bei der ISO 17123-5 die Prüfung des Gesamtsystems gegenüber der Einzelkomponentenprüfung in den Vordergrund.

² Für eine genaue Analyse des Winkelmessverhaltens sollten die Koordinaten möglichst mit 4 Nachkommastellen vorliegen.



die Ergebnisse nur für die jeweils gewählte Kombination. Der Anwender sollte daher zur Prüfung genau die Methode wählen, die er auch sonst einsetzt.

Es wird vorausgesetzt, dass die Prüfung von einer Fachkraft durchgeführt wird, die mit der Bedienung des Tachymeters gut vertraut ist. Es ist darauf zu achten, dass die korrekten Parameter bezüglich der Prismenkonstante eingestellt sind. Ferner ist sicherzustellen, dass sich das Zubehör (Dreifuß, Stative, Prismen) in einwandfreiem Zustand befindet. Die Ausrüstung sollte akklimatisiert sein und die Achsabweichungen sollten entsprechend den Vorgaben des Herstellers (siehe entsprechendes Handbuch) vorab kalibriert worden sein.

Auf die atmosphärische Korrektur kann verzichtet werden, da im (Standard-) Verfahren keine Maßstabsprüfung stattfindet und nicht zu erwarten ist, dass es während des kurzen Zeitraums der Prüfungsdurchführung zu maßgeblichen Änderungen der Atmosphäre kommt.

Was ist Sinn und Zweck der Prüfung?

- Es soll festgestellt werden, ob das Tachymeter festgelegte Kriterien erfüllt bzw. den im Datenblatt spezifizierten Angaben entspricht.
- Die wichtigsten systematischen Instrumentenabweichungen sollen erkannt werden, wenn diese signifikant auf die Zielgrößen wirken.

Wann empfiehlt sich die Durchführung der Prüfung?

- entsprechend den Anforderungen amtlicher Vorschriften
- regelmäßig im Rahmen einer Qualitätssicherung
- nach längerer Nutzungspause
- nach „ungewissem“ Transport, z. B. Flug oder Lieferung
- nach einem Firmware-Update
- vor umfangreichen Messungen

Wie aufwändig ist das Feldprüfverfahren?

- Der Aufbau des Prüffeldes sowie die Messungen durch eine erfahrene Fachkraft dauern maximal 1 Stunde.
- Das Prüfverfahren stellt keine außergewöhnlichen Forderungen an die Örtlichkeit der Prüfung (z. B. große Höhenunterschiede, großflächig freie Sichten).
- Es ist mit der Standardausrüstung und -software durchzuführen und mit einer einfachen Tabellenkalkulation berechenbar.

Welche Genauigkeitsangaben werden geprüft?

- Standardabweichung der Koordinaten nach ISO 17123-5.
- Standardabweichung der Winkelmessung in Hz und V.



Welche systematischen Instrumentenabweichungen können aufgedeckt werden?

- Zielachsabweichung
- Höhenindexabweichung
- Additionskonstante (für die Kombination mit einem bestimmten Prisma)
- vertikale Restabweichung (vergleichbar mit der Zielachsabweichung bei Nivellieren)

Welche systematischen Instrumentenabweichungen werden nicht geprüft?

- Maßstabsabweichung³
- Kippachsabweichung⁴
- Teilkreis-Exzentrizitäten, lang- und kurzperiodische Teilkreisabweichungen
- zyklische Phasenabweichungen und Phaseninhomogenitäten des Distanzmessers
- Abweichungen zwischen der optischen Zielachse und der Zielachse der automatischen Zielung werden nicht getrennt geprüft. Bei Verwendung der automatischen Zielung beziehen sich die Angaben zur Zielachs- bzw. Höhenindexabweichung auf eben diese Achse.

Unsicherheiten:

Das Ergebnis der Prüfung wird von zahlreichen Faktoren beeinflusst:

- instrumentelle Unsicherheiten:
Winkelmessung, Distanzmessung, Kompensator, automatische Zielfindung ...
- Zubehör:
Stabilität von Dreifuß, Stativ, Reflektorstab
- äußere Einflüsse:
Stabilität des Untergrundes, Meteorologie (Refraktion)

³ Auf die generelle Überprüfung des Maßstabs wird aus folgenden Gründen verzichtet:
Die Bereitstellung von Strecken übergeordneter Genauigkeit ist mit hohem Aufwand verbunden. Werden diese Strecken z. B. durch Bodenpunkte vermarktet, führen Zentrierunsicherheiten von 1 mm bei Strecken von z. B. 100 m zu vermeintlichen Maßstabsabweichungen von 10 ppm. Dieser Wert liegt deutlich über den gerätetypischen Abweichungen von ca. 2 ppm. Allerdings sind Sollstrecken die einzige Möglichkeit, grobe Maßstabsabweichungen festzustellen. Im Auswerteformular werden daher die um die Additionskonstante korrigierten langen Dreiecksseiten aufgeführt, um auf Wunsch den Vergleich mit Sollstrecken in einem erweiterten Prüfverfahren zu ermöglichen. In diesem Fall ist auch die Meteorologie während der Messung zu berücksichtigen.

⁴ Auf die Überprüfung der Kippachsabweichung wird aus folgenden Gründen verzichtet:
Die Kippachsabweichung wirkt sich erst bei sehr steilen Visuren signifikant auf die Horizontalwinkelmessung aus und ist zudem noch mit der Auswirkung der Zielachsabweichung überlagert. Zur Prüfung ist ein hohes Ziel in möglichst großer Entfernung erforderlich, was zu einem unverhältnismäßig hohen Aufwand bei der Realisierung des Prüffeldes führen würde.

- Anziel-Unsicherheit des Anwenders

Dem Anwender sollte bewusst sein, dass sich nicht alle Einflüsse streng voneinander trennen lassen.

Sofern er die Angaben aus dem Datenblatt des Instruments prüfen will, sollte die Prüfung unter möglichst optimalen Bedingungen ablaufen. Will er dagegen die Eignung der kompletten Ausrüstung inklusive Beobachter für ein bestimmtes Projekt überprüfen, dann sollte die Prüfung bei für das Projekt typischen bis eher kritischen äußeren Bedingungen durchgeführt werden.

Was ist zu tun, wenn die empirisch ermittelten Unsicherheiten über den Werten liegen, die anhand der Herstellerangaben oder der selbst definierten Unsicherheiten zu erwarten sind?

- Als Erstes ist zu überprüfen, ob tatsächlich die korrekten Einstellungen (z. B. Prismenkonstante) gewählt worden sind und das Zubehör keine offensichtlichen Mängel aufweist. Die grafische Auswertung kann dabei helfen, Auffälligkeiten bei der Messung zu lokalisieren.
- Es ist eine (erneute) Kalibrierung des Instruments erforderlich. Die Kalibrierung wird vom Anwender selbst unter optimalen Kalibrierbedingungen oder vom jeweiligen Hersteller vorgenommen.
- Die Prüfung ist zu wiederholen.

2 Feldprüfverfahren

2.1 Aufbau des Prüffeldes

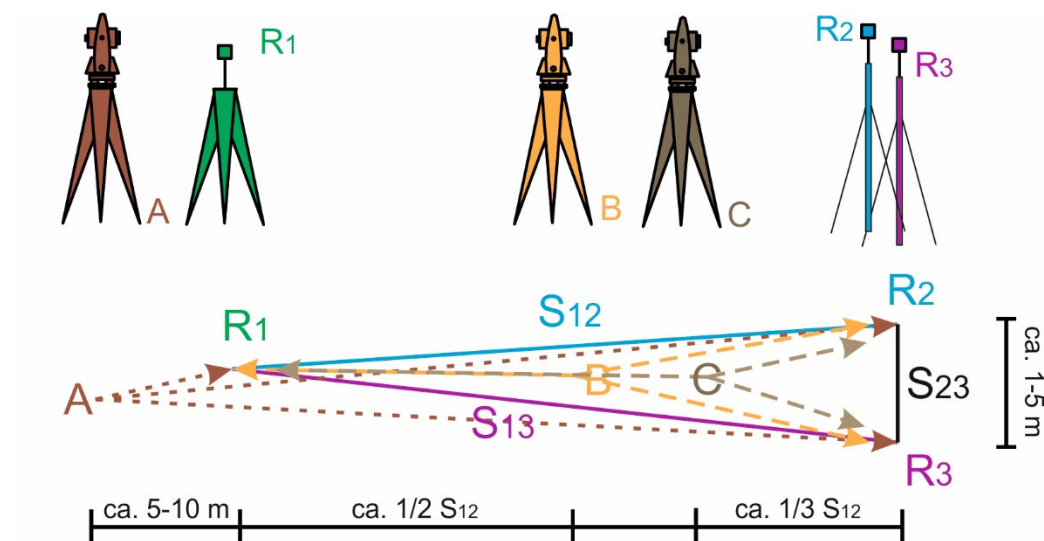


Abb. 1: Prüffeld

Wird geprüft, ob die Genauigkeit hinreichend für die Anforderungen eines bestimmten Projekts ist, sollte die Ausdehnung des Prüffeldes dem zu erwartenden Arbeitsbereich innerhalb des Projekts entsprechen. Für routinemäßige oder vergleichende Prüfungen empfiehlt sich eine Seitenlänge der langen Seiten von ca. 100 m, da in dieser Entfernung ein Zielzeichen bzw. dessen Prismen-Mittelpunkt noch genau anvisiert werden kann. Zudem repräsentiert dieser Entfernungsbereich einen Großteil der üblichen Vermessungsarbeiten.

Zur Durchführung des Verfahrens werden 3 Reflektoren R_1 , R_2 und R_3 in einem spitzen Dreieck mit einer Seitenlänge von ca. 100 m angeordnet (Abb. 1). Das zu prüfende Tachymeter wird zunächst im Standpunkt A in einer Entfernung von ca. 5-10 m vom Reflektor R_1 aufgebaut, später dann im Standpunkt B in der ungefähren Mitte des Dreiecks und schließlich in Standpunkt C bei etwa $2/3$ der Seitenlänge. Der Reflektor R_1 sollte auf einem stabilen Stativ aufgebaut werden, damit er beim Drehen nicht verschoben werden kann. Für die Reflektoren R_2 und R_3 reicht eine Fixierung mit Stabstativen. Der Abstand zwischen den Reflektoren R_2 und R_3 sollte je nach Örtlichkeit etwa 1 bis 5 m betragen. Bei zu geringem Abstand besteht die Gefahr von Störsignalen durch das zweite Prisma⁵.

Das Verfahren ist auch für reflektorlose Messungen geeignet, wenn in R_1 z. B. ein drehbares Scanner-Target genutzt wird. Für R_2 und R_3 können im einfachsten Fall Papier-Targets an eine möglichst orthogonal zur Messrichtung ausgerichtete glatte Wand geklebt werden. Es ist zu beachten, dass unterschiedliche Materialien Unterschiede in der Distanzmessung hervorrufen können.

Die Ergebnisse bezüglich der Additionskonstanten beziehen sich ausschließlich auf den in Reflektorstandpunkt R_1 verwendeten Reflektor.

2.2 Durchführung des Verfahrens

Stationierung:

- Die Instrumentenstandpunkte A, B und C bilden jeweils den Ursprung eines örtlichen Koordinatensystems: $Y = 0,000$ m; $X = 0,000$ m; $Z = 0,000$ m bei einer Instrumentenhöhe von 0,000 m.

⁵ Bei einer vom obigen Vorschlag abweichenden Geometrie und Ausdehnung ist Folgendes zu beachten: Die (spitzen) Winkel von den Standpunkten zu den Reflektoren sollten kleiner als 10 Gon sein, um eine systematische Abweichung bei der Berechnung der Additionskonstanten (i. d. R. wenige mm) von 1 % nicht zu überschreiten. Um mögliche Fehlmessungen aufgrund der Divergenz des Distanzmesssignals zu vermeiden, sollten die Winkel zwischen den Prismen von den Standpunkten aus mindestens 0,6 Gon betragen. Bei automatischer Zielfindung ist ein Mindestwinkel von 1,6 Gon zu empfehlen. 1 Gon entspricht bei einer Entfernung von ca. 60 m einer Querabweichung von 1 m.



- Eine Orientierung ist nicht erforderlich.
- Für die Zielpunkte gilt jeweils eine Reflektorhöhe von 0,000 m.
- Die Erfassung und Berücksichtigung der Meteorologie ist nur dann von Bedeutung, wenn in einem erweiterten Verfahren auch der Maßstab geprüft werden soll.

Messung:

- In Anlehnung an die Prüfung nach ISO 17123-5 werden die 3 Reflektoren R_1 , R_2 und R_3 von den Tachymeterstandpunkten A, B und C aus in zwei Fernrohrlagen aufgemessen. Dabei erfolgen die Anzielungen jeweils in der Reihenfolge R_1 , R_2 , R_3 . Auf jedem Standpunkt werden zwei Vollsätze⁶ gemessen. Zwischen den Sätzen erfolgt keine Verstellung des Teilkreises.
- Um Instabilitäten von Stativ oder Dreifuß leichter detektieren zu können, empfiehlt es sich, den Wechsel zwischen den Fernrohrlagen auf den Standpunkten A und C konsequent im Uhrzeigersinn und auf dem Standpunkt B gegen den Uhrzeigersinn vorzunehmen.

2.3 Messunsicherheit

Zur Beurteilung der Prüfergebnisse sind Messunsicherheiten als Vergleichswerte für die Koordinatenbestimmung, die Winkelmessung in Hz und V sowie für die Distanzmessung anzugeben. Hierzu können in Betracht gezogen werden:

- vorhandene Herstellerangaben
- Ermittlung der empirischen Standardabweichungen der Messelemente, die jedoch nur die innere Genauigkeit (Präzision) widerspiegeln und damit als eher optimistische Unsicherheitsangaben einzustufen sind.

Da während der Messung zahlreiche Faktoren die Messgenauigkeit beeinflussen, ist es angebracht, die vorzugebenden Unsicherheiten realistisch abzuschätzen, indem sämtliche Information zur Instrumentengenauigkeit, zur Genauigkeit des verwendeten Zubehörs, zu den äußeren Bedingungen sowie Erfahrungswerte berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit, mehrere unabhängige Einflussfaktoren zu einer Gesamtunsicherheit zusammenzufassen, bietet der „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“ (GUM 2008), dessen Anwendung auch in ISO 17123-5 (2012) empfohlen wird.

⁶ Die ISO 17123-5 bezeichnet die einzelnen Halbsätze (Fernrohrlage I oder II) jeweils als „Set“ und fordert die Messung von 4 „Sets“, jeweils abwechselnd in Lage I und II. Bei der grafischen Darstellung und Analyse der Abweichungen folgt das vorliegende Merkblatt jedoch der herkömmlichen Definition eines „Satzes“ als Messung von Fernrohrlage I und II.



Im Leitfaden wird zwischen Unsicherheitsgrößen des Typs A (aus statistischer Auswertung) und des Typs B (Unsicherheitsgrößen, die auf andere Weise ermittelt wurden) unterschieden. Angaben, die aus dem zufälligen Verhalten einer Messgröße gewonnen wurden, werden als Unsicherheitsgrößen vom Typ A angesehen (z. B. eine empirische Standardabweichungen aus Mehrfachmessungen), während weitere Kenntnisse zur Unsicherheit (z. B. Herstellerangaben, äußere Einflüsse oder Erfahrungswerte) als Typ B klassifiziert werden. Unsicherheiten unterschiedlichen Typs können nach dem Unsicherheitsfortpflanzungsgesetz für unkorrelierte Größen zu einer kombinierten Standardunsicherheit $u_c(y)$ zusammengefasst werden.

2.3.1 Messunsicherheiten der Tachymeterbeobachtungen

Im Falle der Tachymeterbeobachtungen können zur Unsicherheitsabschätzung z. B. herangezogen werden:

- **Unsicherheiten aus statistischer Auswertung (Typ A):**
Falls Mehrfachmessungen vorliegen, kann der zufällige Anteil der Unsicherheit durch Ermittlung der Standardabweichungen der Koordinaten entsprechend ISO 17123-5, der Standardabweichungen der arithmetischen Mittelwerte der Winkelmessungen in Hz und V sowie der Standardabweichung des arithmetischen Mittelwerts der Streckenmessung ermittelt werden.
- **Weitere Informationen zur Messunsicherheit (Typ B):**
 - Herstellerangaben zur Winkel- und Streckenmessung, zum Kompensator, zur automatischen Zielfindung, ...
 - Anziel-Unsicherheit des Anwenders
 - Unsicherheiten des verwendeten Zubehörs:
Stabilität des Dreifußes, des Stativs, des Reflektorstabs, ...
 - Äußere Einflüsse:
Stabilität des Untergrunds, Meteorologie (Refraktion)
 - Erfahrungswerte zur Genauigkeit von Tachymeterbeobachtungen

In ISO 17123-5 (2012) wird am Beispiel der Koordinatenbestimmung mittels eines Tachymeters die Ableitung einer kombinierten Standardunsicherheit aufgezeigt. Im Folgenden wird der allgemeine Rechenweg zur Ermittlung einer kombinierten Standardunsicherheit nach GUM (2008) in seinen Grundzügen skizziert.

2.3.2 Ermittlung der kombinierten Standardunsicherheit $u_c(y)$

Zunächst ist die Modellfunktion zur Beschreibung des funktionalen Zusammenhangs zwischen den Einflussgrößen x_i und dem Wert y der Mess- bzw. Zielgröße Y , auf die sich die kombinierte Standardunsicherheit bezieht, aufzustellen:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N). \quad (1)$$

Ist eine Einflussgröße x_i eine Zufallsgröße, deren Standardunsicherheit $u(x_i)$ durch die Auswertung einer Mehrfachmessung abgeschätzt werden kann, ist sie eine Größe des Typs A. Ihre Standardunsicherheit ergibt sich durch

$$u(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \quad (2)$$

(analog zur Standardabweichung des arithmetischen Mittelwerts) mit dem arithmetischen Mittelwert

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (3)$$

der n Einzelmessungen q_k .

Unsicherheiten des Typs B können in Abhängigkeit der Informationsquelle abgeschätzt werden. Können beispielsweise nur eine obere Grenze a_+ sowie eine untere Grenze a_- angegeben werden, zwischen denen sich die Einflussgröße mit einer Wahrscheinlichkeit von nahezu 1 und mit einer gleichen Wahrscheinlichkeit innerhalb des gesamten Bereichs bewegt, ist von einer Gleichverteilung auszugehen. Somit ergibt sich die Unsicherheit dieser Einflussgröße zu:

$$u(x_i) = \sqrt{\frac{(a_+ - a_-)^2}{12}} \quad (4)$$

In anderen Fällen können Standardunsicherheiten $u(x_i)$ eventuell anhand von Herstellerangaben oder Kalibrierzertifikaten abgeleitet werden. Ist in diesen Fällen die Genauigkeitsangabe als Vielfaches einer Standardabweichung angegeben, kann die Standardunsicherheit $u(x_i)$ durch Berechnung der einfachen Standardabweichung abgeleitet werden. Die Standardabweichung ist dann gleichbedeutend mit der Standardunsicherheit anzusetzen.

Liegen die Standardunsicherheiten $u(x_i)$ der Einflussgrößen vor, berechnet sich die kombinierte Standardunsicherheit $u_c(y)$ des Wertes y der Zielgröße für unkorrelierte Einflussgrößen nach dem Unsicherheitsfortpflanzungsgesetz durch Kombination der Unsicherheiten $u(x_i)$ in einer linearen Näherung einer Taylorreihenentwicklung:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)} \quad (5)$$

Detaillierte Ausführungen zur Thematik der Messunsicherheit sind GUM (2008) zu entnehmen.

Die in der Auswertung des vorgestellten Prüferfahrens aufgeführten Unsicherheiten sind ausschließlich solche nach Typ A.

3 Auswertung

Die Auswertung der Messung erfolgt mit Hilfe eines zugehörigen Excel-Formulars.

3.1 Interaktion des Anwenders

- Der Anwender dokumentiert neben der Gerätebezeichnung und -nummer die verwendete Distanzmess- und Anzielmethode sowie den verwendeten Prismentyp (bei Untersuchungen höchster Genauigkeit auch die Seriennummer o. Ä. des Prismas R₁).
- Er gibt folgende aus der Instrumentenbeschreibung entnommenen oder selbst definierten Angaben ein:
 - die Unsicherheit der Horizontalrichtungsmessung
 - die Unsicherheit der Vertikalwinkelmessung
 - das Absolutglied für die Unsicherheit der Distanzmessung
 - die Unsicherheit der Koordinatenbestimmung⁷
- Er kopiert die ermittelten Koordinaten in der vorgegebenen Beobachtungsreihenfolge in den vorgesehenen (gelb hinterlegten) Bereich der Tabelle.

3.2 Koordinaten-Unsicherheit nach ISO 17123-5

- Empirische Standardabweichung $s_{ISO-TS-XY}$ der Lagekoordinaten:
 - Die in der ISO 17123-5 aufgeführten Formeln beziehen sich auf ein mathematisches XYZ-Koordinatensystem, die meisten Tachymeter liefern Koordinaten im Ausgabeformat YXZ eines geodätischen Koordinatensystems.

⁷ Die Angaben der Unsicherheit der Koordinaten entsprechend ISO 17123-5 sind allerdings in aktuellen Datenblättern (noch) unüblich und erhalten erst dann eine sinnvolle Aussage, wenn sie mit einer Distanz in Verbindung gebracht werden. Dem Anwender wird in der Eingabemaske aufgrund der Vorgabewerte der Unsicherheiten der Winkelmessung, der maximal gemessenen Distanz und des Absolutgliedes der Unsicherheit der Distanzmessung ein realistischer Vorschlag für die Unsicherheit der Koordinaten mit Hilfe des Fehlerfortpflanzungsgesetzes gemacht.



Um die ISO-Formeln ohne Umstellung nutzen zu können, erfolgt eine Vertauschung der X- und Y-Koordinaten.

- Entsprechend des Formelwerks der ISO 17123-5 erfolgt eine Ausgleichung der 12 gemessenen Dreiecke (jeweils 4 Halbsätze von 3 Instrumentenstandpunkten aus) durch Translation und Rotation um einen gemeinsamen Schwerpunkt.
- Aus den Residuen wird die empirische Standardabweichung $s_{ISO-TS-XY}$ einer Koordinate in 2 Fernrohrlagen berechnet. Der Freiheitsgrad dieser Ausgleichung beträgt 51.
- Empirische Standardabweichung $s_{ISO-TS-Z}$ der Z-Koordinaten:
 - Aus den 12 „Sets“ werden die gemittelten Höhenunterschiede zwischen den Zielen 1 und 2 bzw. 1 und 3 berechnet.
 - Aus den Residuen wird die empirische Standardabweichung $s_{ISO-TS-Z}$ einer Z-Koordinate in 2 Fernrohrlagen berechnet. Der Freiheitsgrad dieser Ausgleichung beträgt 22.
- Hypothesentests:

Es wird getestet, ob die empirische Standardabweichung einer in 2 Lagen gemessenen Lagekoordinate $s_{ISO-TS-XY}$ bzw. Z-Koordinate $s_{ISO-TS-Z}$ kleiner ist als die vom Instrumentenhersteller angegebene bzw. im Projekt definierte Vorgabe. Es erfolgt eine Rot-/Grün-Entscheidung aufgrund einer χ^2 -Verteilung bei einem Signifikanzniveau von 95%.

3.3 Unsicherheit der Winkelmessung

Die Berechnung der Unsicherheit der Winkelmessung erfolgt in Anlehnung an die ISO 17123-3 (Theodolite), allerdings entsprechend des vorliegenden Datenmaterials mit deutlich weniger Beobachtungen als in der ISO vorgeschlagen.

Empirische Standardabweichung s_{HZ} :

- Die YX-Koordinaten werden für jeden Halbsatz in Richtungswinkel umgerechnet, die fortan wie Richtungsbeobachtungen betrachtet werden.
- Für jeden Standpunkt wird entsprechend der Formeln der ISO 17123-3 zu jedem Zielpunkt das Mittel aus 2 Fernrohrlagen, daraus die auf das erste Ziel reduzierten Richtungen und schließlich das Mittel dieser reduzierten Richtungen aus allen Sätzen berechnet. Innerhalb eines Standpunkts werden dann (über den Zwischenschritt der Differenz zwischen dem Satzmittel und der



endgültigen Richtung) die Residuen und daraus die Standardabweichung einer Richtungsmessung in 2 Lagen berechnet.

- Aus den Standardabweichungen der einzelnen Standpunkte wird eine gemittelte Standardabweichung mit einem Freiheitsgrad von 6 berechnet.

Empirische Standardabweichung s_V :

- Die Z-Koordinaten werden für jeden Halbsatz in Vertikalwinkel umgerechnet.
- Für jeden Standpunkt wird entsprechend der Formeln der ISO 17123-3 zu jedem Zielpunkt der Mittelwert aus 2 Fernrohrlagen und daraus der Mittelwert aus allen Sätzen berechnet. Innerhalb eines Standpunkts werden die Residuen berechnet und daraus die Standardabweichung eines Vertikalwinkels in 2 Lagen berechnet.
- Aus den Standardabweichungen der einzelnen Standpunkte wird eine gemittelte Standardabweichung mit einem Freiheitsgrad von 9 berechnet.

Hypothesentests:

Es wird getestet, ob die empirische Standardabweichung einer in 2 Lagen gemessenen Horizontalrichtung s_{HZ} bzw. eines in 2 Lagen gemessenen Vertikalwinkels s_V kleiner ist als die vom Instrumentenhersteller angegebene bzw. im Projekt definierte Vorgabe. Es erfolgt eine Rot-/Grün-Entscheidung aufgrund einer χ^2 -Verteilung bei einem Signifikanzniveau von 95%.

3.4 Systematische Abweichungen

Aus dem vorliegenden Datenmaterial können Hinweise auf systematische Abweichungen abgeleitet werden.

- Zielachs- und Höhenindexabweichung:
Aus den Polarelementen werden die Zielachs- und die Höhenindexabweichung sowie deren Standardabweichungen berechnet (siehe *Abb. 3* und *Abb. 5*). Da diese Abweichungen, insbesondere bei kurzen Sichtweiten, nicht-linear von der Distanz abhängen, werden die sehr kurzen Zielungen von Standpunkt A zum Reflektor R_1 von der Berechnung ausgeschlossen. Auf Grundlage der empirischen Standardabweichungen und einer t-Verteilung wird getestet, ob die Abweichungen in ihrem Betrag signifikant größer als Null sind.
- Additionskonstante:
Aus den Strecken-Differenzen der langen Dreiecksseiten in Bezug auf den Instrumentenstandpunkt wird die Additionskonstante berechnet (*Abb. 7*). Bei hinlänglich linearer Gestalt des Testfelds wirkt sich die Additionskonstante bei Messungen von Standpunkt A nicht auf die Länge der langen Dreiecksseiten

aus, während sie bei der Messung von den Standpunkten B und C aus doppelt wirkt.

- „Vertikale Restabweichung“:

Die standpunktbezogene Variation der (bereits aus 2 Fernrohrlagen gemittelten) Höhenunterschiede zwischen den Zielpunkten kann unter Umständen systematische Anteile aufweisen. Gründe hierfür können in einem mangelhaften Kompensator, aber auch in nicht berücksichtigten starken vertikalen Temperaturgradienten liegen. Die Auswirkung ist vergleichbar mit einer Zielachsabweichung bei Nivellieren.

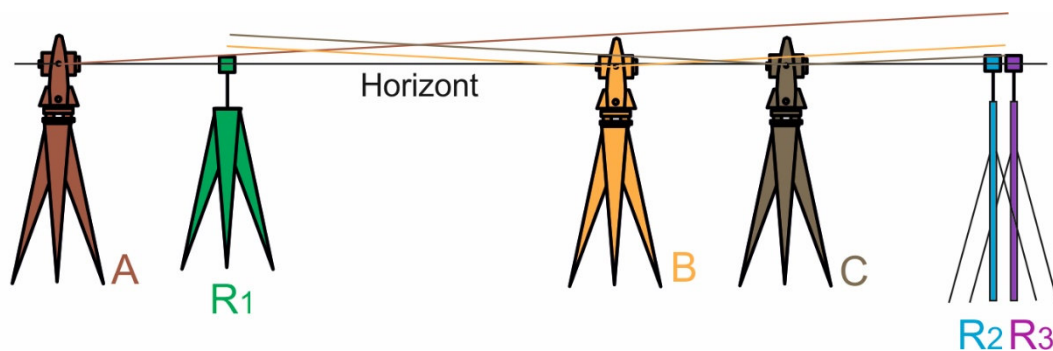


Abb. 2: Vertikale Restabweichung

In Anlehnung an eine Nivellierprüfung „aus der Mitte“ werden die Höhen-Differenzen bei der Messung vom Standpunkt B aus aufgrund der gleichen Zielweiten als fehlerfrei angesehen, während sie bei der Messung von den Standpunkten A und C entsprechend der unterschiedlichen Zielweiten wirken. Die vertikale Restabweichung wird entsprechend der Messdistanzen in eine Winkelangabe umgerechnet (Abb. 8).

4 Darstellung und Interpretation der Untersuchungsergebnisse

Dem Anwender wird ein zweiseitiges Ergebnisprotokoll zur Verfügung gestellt. Seite 1 führt numerische und statistische Ergebnisse auf, Seite 2 stellt die Ergebnisse grafisch dar und erleichtert die Interpretation bei auffälligen Ergebnissen.

4.1 Numerische Darstellung

Auf Seite 1 werden zunächst die beschreibenden Angaben der Eingabedatei übernommen.



Instrument:	1201			Datum:	16.2.17	
Datum:		16.2.17				
Prüfer:		Juretzko KIT-GIK				
Messreihe:		0				
Originaldaten:		xxx				
Reflektor in R1, (Nr):		Präzision (1,2,3)				
Anzielmodus:		ATR				
Distanzmodus:		IR				
Ort der Messung:		Testdreieck Nordseite Architekturgebäude				
Messbedingungen:		sonnig, 13°				
Zusatz-Infos:		-				

Es folgen die Ergebnisse der empirischen Standardabweichungen der Koordinatenbestimmung sowie der Horizontalrichtungs- und Vertikalwinkelmessung mit der Aussage, ob sie die vorgegebenen Unsicherheitsangaben einhalten.

Unsicherheitsangaben					
		Vorgabe:	empirisch:	Hypothesentest (95%)	
σ_H [mgon]		0,3	0,3	geringer	als Vorgabe
σ_V [mgon]		0,3	0,3	geringer	als Vorgabe
σ_S (Absolut) [mm]		2,0			
σ_{XY} [mm]		2,0	0,6	geringer	als Vorgabe
σ_Z [mm]		2,0	1,2	geringer	als Vorgabe

In einem weiteren Block werden die systematischen Abweichungen aufgeführt, verbunden mit der Aussage, ob sie die Vorgaben einhalten, bzw. ob sie signifikant von Null abweichen.

Systematische Abweichungen:					
				Hypothesentest (95%)	
Zielachsabweichung c [mgon]:		0,0	nicht sign.	abweichend von Null	
Std.abw. c [mgon]:		0,1			
Höhenindexabweichung i [mgon]:		1,0	signifikant	abweichend von Null	
Std.abw. i [mgon]:		0,1			
Additionskonstante [mm]:		1,3			
Vertikale Restabweichung [mgon]:		0,8			

Informativ werden die von Standpunkt A aus bestimmten (von der Additionskonstante nicht beeinflussten) langen Dreiecksseiten aufgelistet, um dem Anwender bei (optionaler) Verwendung von Sollstrecken einen Vergleich zu ermöglichen.

Dreiecksseiten von Standpunkt A (ohne Additionskonstante)							
S _{1,2} [m]	93,7065						
S _{1,3} [m]	94,9357						

4.2 Grafische Darstellung

Auf Seite 2 werden die Messergebnisse grafisch dargestellt.

Legende:

■ Ziel 1 ■ Ziel 2 ■ Ziel 3 S: Satz Nr.

Zur intuitiven Interpretation sind die Ziele farblich codiert. Die Skalierung ist prinzipiell frei wählbar, zur besseren Vergleichbarkeit empfiehlt es sich aber, die Vertikalachse in einem Bereich von -3 bis +3 zu skalieren.

4.2.1 Zielachsabweichung

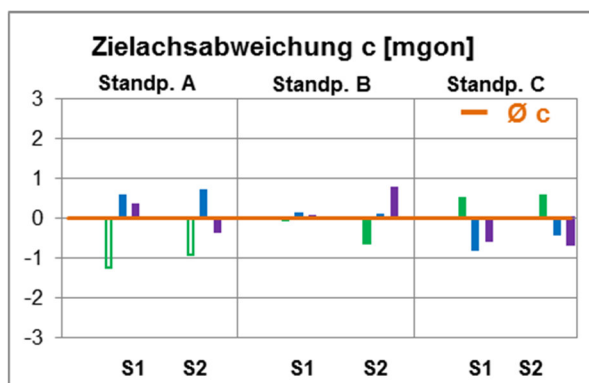


Abb. 3: Zielachsabweichung

Dargestellt sind die halben Abweichungen der Horizontalrichtung zwischen Lage 1 und Lage 2 der einzelnen Messungen. Die Messungen mit der kurzen Zielweite von Standpunkt A zum Ziel 1 sind nur angedeutet dargestellt und werden bei der Berechnung der Zielachsabweichung c nicht berücksichtigt. Die (mittlere) Zielachsabweichung c ist als orange Linie dargestellt.

Interpretation der Abweichungen:

Es sind keine Auffälligkeiten zu erkennen.

4.2.2 Höhenindexabweichung

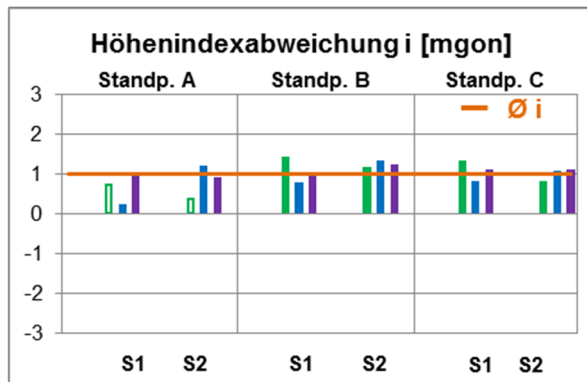


Abb. 4: Höhenindexabweichung

Dargestellt sind die halben Abweichungen der Vertikalwinkel zwischen Lage 1 und Lage 2 der einzelnen Messungen. Die Messungen mit der kurzen Zielweite von Standpunkt A zum Ziel 1 sind nur angedeutet dargestellt und werden bei der Berechnung der Höhenindexabweichung i nicht berücksichtigt. Die (mittlere) Höhenindexabweichung i ist als orange Linie dargestellt.

Interpretation der Abweichungen:

Es ist eine systematische Höhenindexabweichung von 1,0 mgon zu erkennen.

4.2.3 Abweichung der Horizontalrichtungen

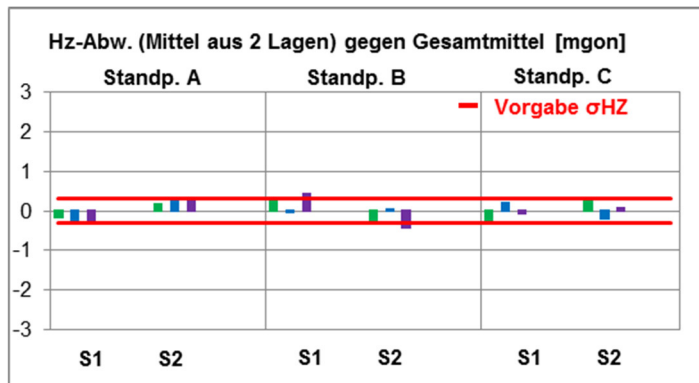


Abb. 5: HZ-Abweichung

Dargestellt ist die Abweichung der Horizontalrichtungen eines Satzes (Mittel aus 2 Lagen) vom Gesamtmittel aus beiden Sätzen. Zum Vergleich sind die Vorgaben der Unsicherheit der Horizontalrichtungsmessung durch rote Linien dargestellt.

Interpretation der Abweichungen:

Die Abweichungen liegen weitgehend innerhalb der Vorgaben. Die Systematik auf Standpunkt A könnte als minimale Verdrehung interpretiert werden.

4.2.4 Abweichung der Vertikalwinkel

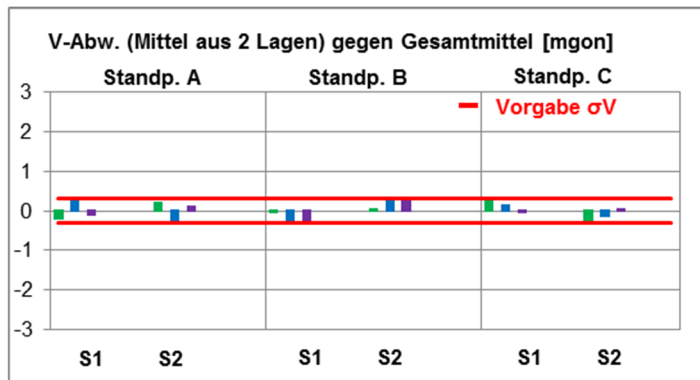


Abb. 6: V-Abweichung

Dargestellt ist die Abweichung der Vertikalwinkel eines Satzes (Mittel aus 2 Lagen) vom Gesamtmittel aus beiden Sätzen. Zum Vergleich sind die Vorgaben der Unsicherheit der Vertikalwinkelmessung durch rote Linien dargestellt.

Interpretation der Abweichungen:

Die Abweichungen liegen innerhalb der Vorgaben. Es ist keine Systematik zu erkennen.

4.2.5 Standpunktbezogene Streckenabweichung

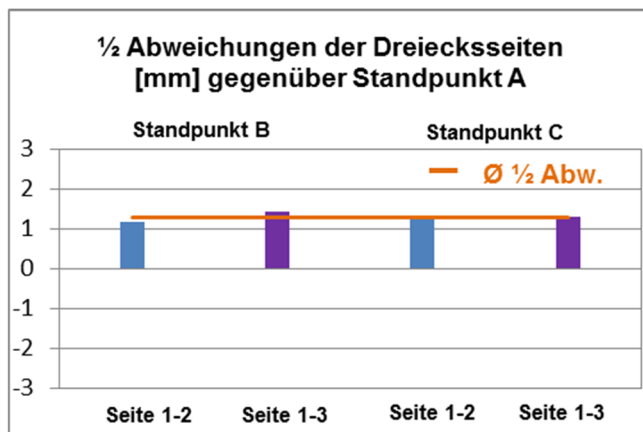


Abb. 7: Standpunktbezogene Streckenabweichung

Dargestellt sind die halben Abweichungen der von den Standpunkten B und C aus bestimmten langen Dreiecksseiten gegenüber der Bestimmung von Standpunkt A aus. Aufgrund der Aufnahmegeometrie sind die langen Dreiecksseiten nicht von der Additionskonstante betroffen, wenn die Aufnahme von Standpunkt A erfolgt ist. Von den Standpunkten B und C wirkt sich die Additionskonstante doppelt aus.

Interpretation der Abweichungen:

Die Abweichungen deuten auf eine Additionskonstante von 1,3 mm hin.

4.2.6 Standpunktbezogene Höhenabweichung

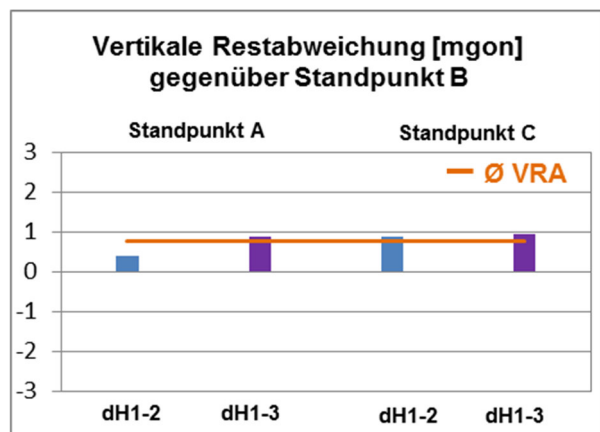


Abb. 8: Standpunktbezogene Höhenabweichung

Die Höhenunterschiede dH_{12} und dH_{13} können hinsichtlich des Beobachtungsstandpunkts variieren. Die in 2 Lagen bestimmten Höhenunterschiede für dH_{12} und dH_{13} von B aus (Mittelstellung) werden in Analogie zur Nivellierprüfung aus der Mitte als fehlerfrei angenommen. Differenzen der Höhenunterschiede dH_{12} und dH_{13} von A oder C aus werden als „vertikale Restabweichung“ bezeichnet. Sofern systematische Abweichungen vorliegen, deuten sie auf eine Horizontabweichung (Abb. 2) hin und könnten auf Kompensator-Restfehler oder nicht berücksichtigte starke vertikale Temperaturgradienten zurückzuführen sein. Diese Differenzen werden entsprechend der Distanzen in Winkelwerte umgerechnet und im numerischen Teil des Ergebnisprotokolls mit angegeben.

Interpretation der Abweichungen:

Die Abweichungen deuten auf eine vertikale Restabweichung von ca. 0,8 mgon hin.

4.3 Weitere Interpretationshilfen

Zusätzlich zu den bereits in den oben stehenden Grafiken beschriebenen Effekten werden hier weitere Auffälligkeiten dargestellt und interpretiert.

4.3.1 Verdrehung

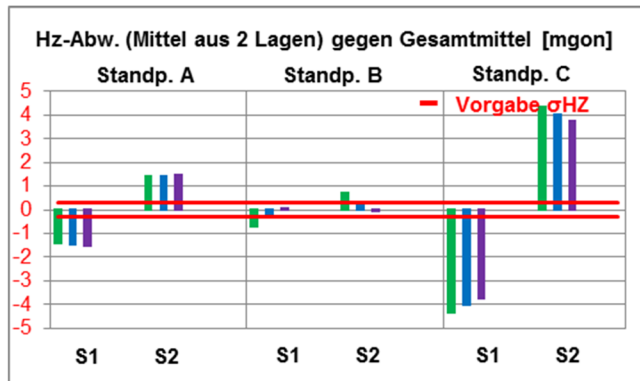


Abb. 9: Defekter Dreifuß

Im obigen Beispiel führte ein defekter Dreifuß (durch eine kontinuierliche mechanische Entlastungsbewegung) zu einer gleichmäßigen Verdrehung des Instruments. Deutlich zu erkennen ist auch ein Zusammenhang mit der Drehrichtung: Auf den Standpunkten A und C erfolgte der Wechsel zwischen den Lagen im Uhrzeigersinn und führte zu größeren Abweichungen als auf Standpunkt B, wo der Wechsel gegen den Uhrzeigersinn erfolgte. Ähnliche Auffälligkeiten zeigte eine Messung mit einem Stativ, dessen Tellerschrauben locker waren.

4.3.2 Kompensatorfehler

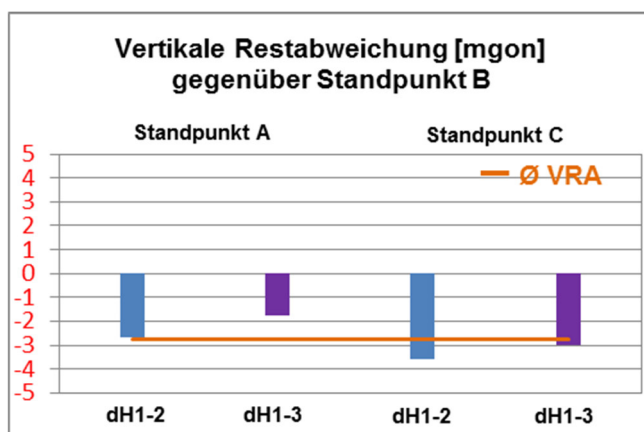


Abb. 10: Kompensatorfehler

Das obige Beispiel zeigt die standpunktbezogenen Höhendifferenzen bei Verwendung eines Instruments mit einem (aus zahlreichen Überprüfungen vor einem Kolli-mator) bekannten Kompensatorfehler.

5 Empfehlungen

5.1 Behandlung erkannter Auffälligkeiten

Bei stark auffälligen Ergebnissen sollte sich der Anwender zunächst vergewissern, dass die Prüfung entsprechend der Beschreibung durchgeführt worden ist. Insbesondere die Geräteeinstellungen sind zu überprüfen.

Folgende Auffälligkeiten können auf systematische instrumentelle Abweichungen zurückgeführt werden:

- Die Additionskonstante überschreitet die Herstellerangabe für den Absolutwert der Distanzmessung:
 - Falls möglich, ist eine andere Additionskonstante oder ein anderes Prisma auf Grundlage der neu berechneten Additionskonstante zu definieren.
 - Die Prüfung ist mit korrigierten Einstellwerten zu wiederholen.
- Es wird eine signifikante Zielachs- bzw. Höhenindexabweichung festgestellt:
 - Das Instrument befindet sich nicht im optimalen Kalibrierzustand.
 - Sofern sie größer ist als die Herstellerangaben zur Unsicherheit der Horizontalrichtungs- bzw. Vertikalrichtungsmessung, sollte Folgendes beachtet werden:
 - Messungen sollten nur in 2 Fernrohrlagen durchgeführt werden oder
 - die Kalibrierung ist entsprechend der Herstellerangaben zu aktualisieren und die Prüfung zur Kontrolle erneut durchzuführen.

Weitere auffällige Abweichungen lassen sich vor allem in den Grafiken der Horizontalrichtungs- und der Vertikalwinkelabweichung erkennen. Hier sollte insbesondere das Zubehör in Augenschein genommen und geprüft werden, ob die Instrumenten- und Reflektorstandpunkte hinreichend stabil waren. Im Zweifel ist die Prüfung mit anderem Zubehör und unter günstigeren Beobachtungsbedingungen zu wiederholen.

5.2 Optimierung des Verfahrens

- Zur Zeitersparnis empfiehlt es sich, mehrere Instrumente mit demselben Stativaufbau nacheinander zu testen. Wird dabei auch ein „Referenzgerät“ mit bekanntem Maßstab eingesetzt, können die langen, um die Additionskonstante korrigierten Dreiecksseiten miteinander verglichen werden, sofern bei allen Messungen die Meteorologie berücksichtigt wird.
- Wenn es die räumlichen bzw. baulichen Verhältnisse zulassen, ist es sinnvoll, Aufnahmevorrichtungen für Reflektoren fest an einem Bauwerk zu installieren, um



Rüstzeiten zu minimieren. Dies erleichtert auch einen möglichen Vergleich mit Sollstrecken zur Maßstabsprüfung in einem erweiterten Verfahren.

- Wenn ein Instrument in unterschiedlichen Distanzmessmodi (Reflektor bzw. reflektorlos RL) getestet wird, ist darauf zu achten, dass die RL-Ziele weit genug von den Prismen entfernt sind, damit bei der RL-Messung nicht Randsignale der Prismen die Messung überlagern.

6 Weiterführende Literatur

Deumlich, F., Staiger, R. (2002): Instrumentenkunde der Vermessungstechnik, 9. Auflage, Wichmann.

Gottwald, R. (1998): Prüfung und Kalibrierung von Vermessungsinstrumenten – Grundsätzliche Überlegungen und Konzepte. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 8/98, S. 409-413.

Gottwald, R., Rüeger, J. M. (2000): Feldprüfverfahren für elektronische Tachymeter – Wunsch oder Realität. AVN 11-12/2000, S. 386-390.

GUM (2008): Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. JCGM 100:2008. GUM 1995 with minor corrections. <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html> (letzter Zugriff: 17.11.2016).

Huep, W. (2009): Zur Qualitätssicherung tachymetrischer Messungen, AVN 1/2009, S. 12-19.

ISO 17123-3 (2001): Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 3: Theodolites. First edition 2001-12-01.

ISO 17123-4 (2012): Optics and optical instruments - Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 4: Electro-optical distance meters (EDM measurements to reflectors). Second edition 2012-06-01.

ISO 17123-5 (2012): Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 5: Total stations. Second edition 2012-12-15.

Juretzko, M. (2006): Leistungsfähigkeit des reflektorlosen Distanzmessmoduls R300 der Tachymeterserie TPS1200 von Leica. Flächenmanagement und Bodenordnung (fub) 2/2006, S. 90-95.

Juretzko, M. (2013): Überprüfungsstrategien für Tachymeter. Beiträge zum 125. DVW-Seminar „Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren“, S. 47-63.

Neitzel, F. (2006): Bestimmung von Ziel- und Kippachsfehler polarer Messsysteme aus Minimalkonfigurationen und überbestimmten Konfigurationen. zfv 3/2006, S. 132-140.

Staiger, R. (1998): Zur Überprüfung moderner Vermessungsinstrumente. AVN 11-12/1998, S. 365-372.



Witte, B., Sparla, P. (2011): Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen, 7. Auflage, Wichmann