

Leistungsfähigkeit des reflektorlosen Distanzmessmoduls R300 der Tachymeterserie TPS1200 von Leica

von Manfred Juretzko

Zusammenfassung:

Das Distanzmessmodul R300 der jüngsten Tachymetergeneration von Leica-Geosystems TPS1200 wurde hinsichtlich seiner Reichweite und seiner Genauigkeit untersucht. Die vom Hersteller gemachten Angaben (3 mm +2 ppm unter 500 m) wurden dabei bestätigt. Es konnte eine außerordentlich hohe Wiederholgenauigkeit, allerdings auch eine entfernungs- und materialabhängige Additionskorrektur im Nahbereich nachgewiesen werden.

Abstract:

The distance measuring module R300 of the youngest generation of Leica Geosystems tachymeters TPS1200 was tested regarding its range and its accuracy. The specifications given by the manufacturer (3 mm of +2 ppm under 500 m) were confirmed thereby. An extraordinarily high repetition accuracy could be proven. However, a distance and material-dependent addition correction at close range turned out to be significant.

1 Einleitung

Seit einigen Jahren bieten alle namhaften Hersteller geodätischer Instrumente Tachymeter mit der Möglichkeit der reflektorlosen Distanzmessung an. Die Vorteile für den Anwender sind vielfältig: Es können unzugängliche Punkte an Bauwerken bestimmt werden und es können, wie bei der Fassaden- oder Gebäudeinnenaufnahme, objektbeschreibende Punkte ohne Zuhilfenahme eines Prismas aufgemessen werden. Sofern das Instrument zudem noch über motorbetriebene Achsen verfügt, ist auch die automatische Erfassung von Oberflächen und Profilen sowie die automatische iterative Absteckung bestimmter Oberflächenpunkte möglich [Juretzko, 2005]. Seit der Einführung der ersten kommerziellen reflektorlos messenden Tachymeter, die mit integrierter Impulsmessung und koaxialer Zielung arbeiteten [Köhler, 1994], [Meier-Hirmer, 1996], hat es erhebliche Weiterentwicklungen gegeben. Mit zunehmender Forderung nach Genauigkeit hängt die Reduzierung der Fleckgröße und die Erhöhung der Punktschärfe zusammen. Da aber Dioden-Puls laser nicht beugungsbegrenzt sind, können geringe Strahlquerschnitte nur mit kontinuierlich strahlenden Lasern erreicht werden, so dass in den folgenden Jahren schwerpunktmäßig Phasemesssysteme zur reflektorlosen Distanzmessung entwickelt wurden. Der Vorteil der impulslaufzeitbasierten Technik der ersten Generation bestand in der hohen Messgeschwindigkeit gegenüber der damals üblichen Phasemessstechnik mit der damals noch sequenziellen Auswertung unterschiedlich langer Modulationswellen zur Bestimmung der Mehrdeutigkeit. Dank der Fortschritte in der Entwicklung schneller Signalprozessoren können heute durch die Heterodyning-Technologie (Überlagerung mehrerer

Modulationsfrequenzen) Mehrdeutigkeiten quasi simultan bestimmt werden. Diese Technologie ermöglicht ebenfalls die Verkürzung der Distanzmesszeiten auf ein für die Robottachymetrie vertretbares Maß. Im Hinblick auf Fehlmessungen, die durch Mehrfachreflexionen entstehen können, ermöglichen raffinierte Signalanalyseprozesse die weitgehende Erkennung solcher Effekte und erzeugen somit zuverlässigere Messergebnisse. Diese Vorteile werden erkaufte durch eine gegenüber der Impulslaufzeitmessung geringere Reichweite, weil sich das Signal-Rausch-Verhältnis verschlechtert und die Sendeleistung aus verschiedenen Gründen nicht beliebig erhöht werden kann. Die hier beschriebene Strategie wurde durch eine verbesserte Signalverarbeitung weiter optimiert und von Leica unter dem Begriff „Pin Point R300“ auf den Markt gebracht, so dass nun auch Entfernungen über 300 m gemessen werden können. Diese Technologie ist in den Systemen TPS1200 integriert. Im Folgenden wurde ein Gerät dieser Serie, ein TCRP1201, im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit und Genauigkeit des Distanzmessteils untersucht.

2 Instrumentenbeschreibung

Das Instrument verfügt über zwei getrennte Entfernungsmesser: Der Infrarot-EDM dient zur Messung auf Prismen und Reflexfolien. Er sendet einen unsichtbaren Laserstrahl der Wellenlänge 780 nm aus, der mit einer Basisfrequenz von 100 MHz moduliert wird. Die Reichweite auf ein einzelnes Prisma bei mittleren atmosphärischen Bedingungen wird mit 3000 m, die Standardabweichung nach ISO 17123-4 mit 2 mm + 2 ppm angegeben [LEICA, 2005]. Der für die weiteren Untersuchungen interessantere Entfernungsmesser PinPoint R300 arbeitet mit einem sichtbaren Laserstrahl der Wellenlänge 670 nm. Es werden Modulationsfrequenzen von 100 MHz bis 150 MHz verwendet. Die Distanz wird durch eine neuartige Signalauswertung berechnet, die auf dem Prinzip der größten Wahrscheinlichkeit beruht. Die Reichweite wird bei mittleren atmosphärischen Bedingungen zwischen 300 m und 500 m (abhängig von der Reflektivität des Objektes) angegeben, eindeutige Ergebnisse erhält man zwischen 1,5 m und 760 m. Die Standardabweichung liegt nach Herstellerangaben bei 3 mm + 2 ppm für Entfernungen bis 500 m und 5 mm + 2 ppm für Entfernungen über 500 m [LEICA, 2005]. Die Herstellerangaben beziehen sich dabei grundsätzlich auf die Reflektivität einer Kodak Graukarte (18%).

3 Auflösungsvermögen

Unter Auflösungsvermögen soll hierbei die kleinste vom Entfernungsmesser erfassbare Streckenänderung bezeichnet werden. Das Auflösungsvermögen mit einer Sicherheit von

95% kann laut DIN1319 wie folgt aus der Standardabweichung einer Einzelmessung abgeleitet werden:

$$AV = 1,96 \cdot \sqrt{2} \cdot s_E$$

mit s_E = Standardabweichung der Einzelmessung

Zur experimentellen Bestimmung des Auflösungsvermögens wurde ein Zielzeichen (vgl. Abb. 1) in 7 m bzw. 23 m Entfernung mit Hilfe einer Mikrometerschraube über eine Distanz von 1 mm mit einer Schrittweite von 0,02 mm verschoben. Nach jeder Verschiebung des Zielzeichens (als Reflexionsmaterial diente eine Kodak Graukarte), wurde eine einzelne Distanzmessung am TCRP ausgelöst. Die Verschiebung fand sowohl im Hin- als auch im Rückgang statt.



Abb. 1: Versuchsaufbau

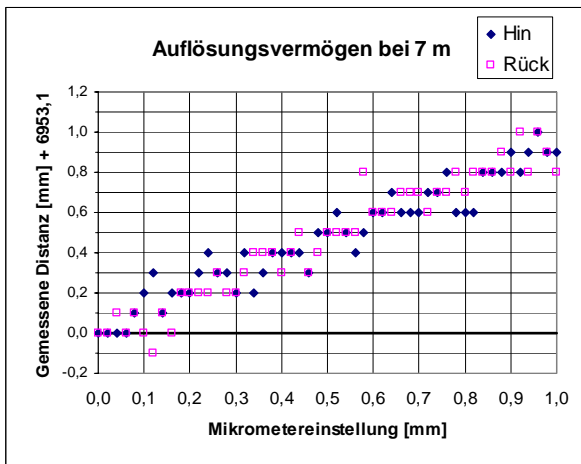


Abb. 2: Auflösungsvermögen bei 7 m

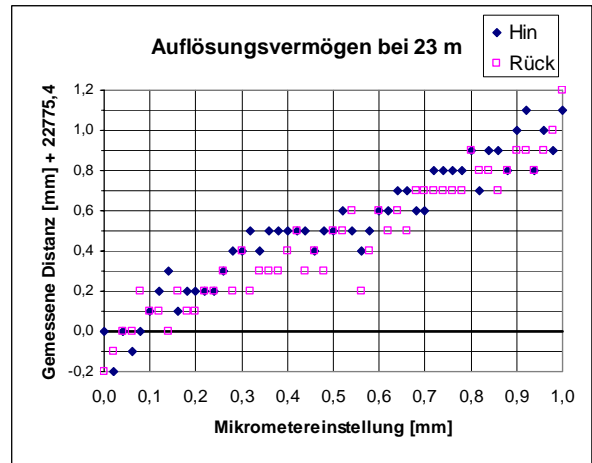


Abb. 3: Auflösungsvermögen bei 23 m

Die nur ansatzweise erkennbare Treppenform der Gegenüberstellung von Mikrometereinstellung und Messwert (vgl. Abb. 2 u. 3) deutet auf ein Auflösungsvermögen hin, das schlechter ist als das des Anzeigeintervall von 0,1 mm des Instruments. Wäre das Auflösungsvermögen deutlich höher als das Anzeigeintervall, so würde eine deutlichere Treppenform erkennbar sein [Joeckel / Stober, 1999].

Aus der Gegenüberstellung von durch die Mikrometerschraube vorgegebener Verschiebung (Soll-Wert) und der mit dem TCRP festgestellten Verschiebung (Ist-Wert) kann die Standardabweichung einer Einzelmessung zu 0,08 mm (bei 7 m) bzw. 0,09 mm (bei 23 m) berechnet werden. Somit beträgt das Auflösungsvermögen AV bis zu einer Entfernung von 23 m unter Laborbedingungen weniger als 0,25 mm. Das kleinste Anzeigeintervall von 0,1 mm ist damit gerechtfertigt.

3 Additionskorrektur im Nahbereich

Durch die Additionskorrektur wird der Unterschied zwischen dem elektrischen und dem mechanischen Nullpunkt des Distanzmessers sowie die Differenz der Reflexionsstelle gegenüber dem Zentrierpunkt des Reflektors und (bei Benutzung von Reflektorprismen) die Laufzeitverzögerung im Glas berücksichtigt. Aufgrund von Phaseninhomogenitäten und Einflüssen durch den geräteinternen Signalstärkeabgleich kann es zu einer entfernungsabhängigen Additionskorrektur kommen, die im Fernbereich hinreichend genau durch einen linearen Ansatz beschrieben werden kann. Im Nahbereich treten dagegen Abweichungen auf, die z.B. durch ein Polynom oder eine Exponentialfunktion [Hennes u.a. 1994] beschrieben werden können. Im Folgenden soll untersucht werden, welchen Einfluss die Materialeigenschaften verschiedener Oberflächen (bei der reflektorlosen Distanzmessung) auf die Additionskorrektur haben.

Versuchsaufbau

Zur Untersuchung des Distanzmessverhaltens im Nahbereich bis 22 m wurde eine Zieltafel, bestückt mit diversen zu untersuchenden Materialien auf der am geodätischen Institut der Universität Karlsruhe entwickelten automatisierten Messbahn in Schritten von 10 cm verschoben und deren

jeweilige Position interferometrisch bestimmt (Soll-Werte). Die Anfangsentfernung zwischen dem TCRP und der ersten Schlittenposition wurde durch optisches Abloten auf einen Glasmaßstab mit einer Genauigkeit von wenigen 1/10 mm ermittelt. Der Messbahnaufbau berücksichtigt die Forderung des Abbeschen Komparatorprinzips mit einer verbleibenden Unsicherheit kleiner 0,05 mm. Die integrierte Erfassung meteorologischer Parameter garantiert eine Unsicherheit der

meteorologischen Korrektur von lediglich 0,02 mm. Die Unsicherheit der Sollstrecke beläuft sich damit absolut auf wenige 1/10 mm, Streckendifferenzen sind mit einer Unsicherheit von weniger als 0,06 mm behaftet. An jeder Position wurde automatisch eine Distanzmessung am TCRP ausgelöst und registriert (Ist-Werte). Die Messung wurde in zwei Messreihen jeweils im Hin- und im Rückweg durchgeführt.

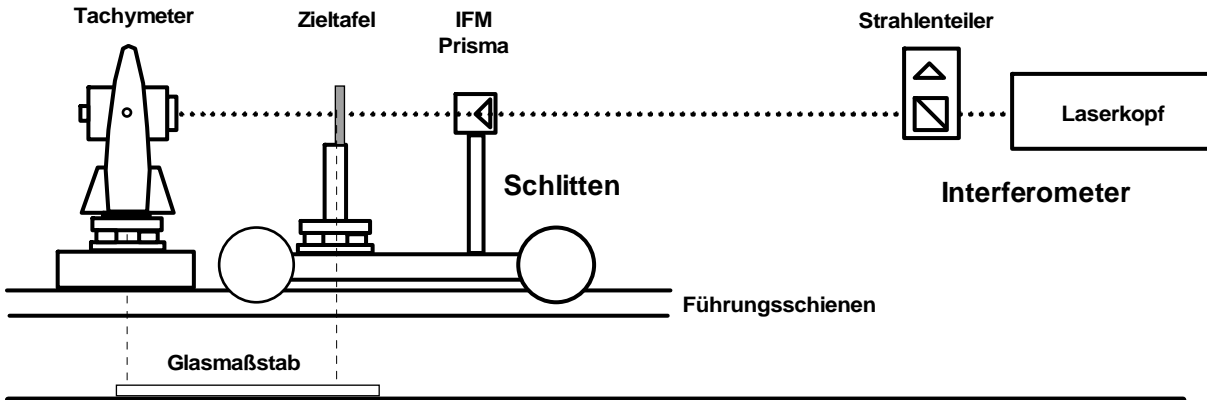


Abb. 4: Schematischer Versuchsaufbau auf Interferometerbahn

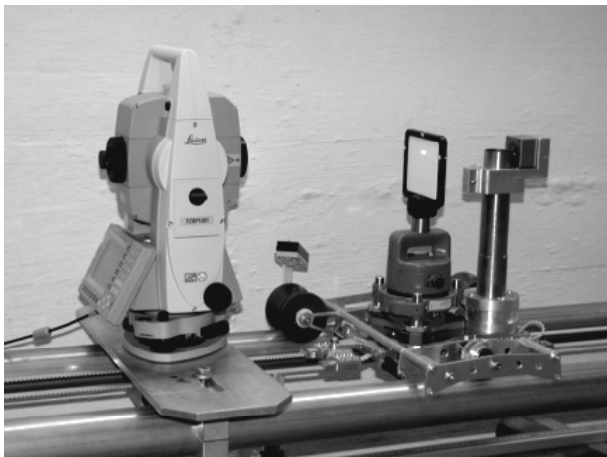


Abb. 5: Versuchsaufbau

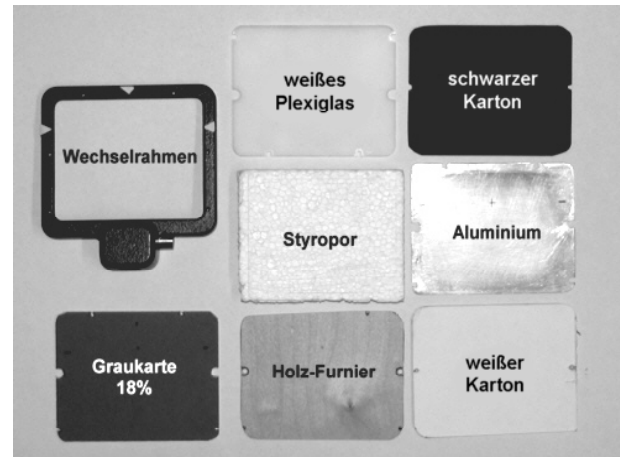


Abb. 6: Untersuchte Materialien

Materialien

Die Untersuchung wurde an verschiedenen Materialien mit unterschiedlichem Reflexionsverhalten durchgeführt:

- Grauer Karton mit 18% Reflektivität (entsprechend Kodak Graukarte)
- Aluminium, matt
- Weißer Karton
- Schwarzer Karton (Bastelkarton)
- Helles Holzfurnier
- Weißes Plexiglas, Materialstärke 2,1 mm
- Styropor, Materialstärke 15 mm

Die Materialien Styropor und Kunststoff, die vom Laserstrahl durchdrungen werden können, wurden auf der Rückseite mit schwarzem Bastelkarton bedeckt, um mögliche ungewollte Hintergrundreflexionen zu vermeiden.

Ergebnisse

Abb. 7 zeigt die Additionskorrektur für die untersuchten Materialien in verschiedenen Entfernungen. Die vom Hersteller gemachten Angaben zur Genauigkeit und zum Messbereich sind durch einen entsprechenden Rahmen dargestellt. Anhand der Standardabweichungen, die aus den Differenzen zwischen Hin- und Rückweg für jede Messposition einer einzelnen Messreihe abgeleitet wurden (vgl. Tabelle 1), lässt sich eine große Reproduzierbarkeit der Abweichungen ableiten. Ebenso erscheint im Vergleich zu den Maximalbeträgen der Abweichung eine Modellierung der Kalibrierfunktion als sinnvoll. Da sich das Verhalten des R300-Moduls bei etwa 7 m zu ändern scheint, wird die Korrekturfunktion vorteilhaft stückweise definiert: Für den Bereich von 1 m bis 7 m wurden als Kalibrierfunktionen ausgleichende Polynome berechnet; die Abweichungen für Bereiche über 7 m lassen sich als ausgleichende Geraden darstellen. Diese Modelle erlauben eine erhebliche Genauigkeitssteigerung im Nahbereich, weil die

Standardabweichung für eine einzelne Messung, berechnet aus den Differenzen zu den Sollwerten, nach Anbringen der Korrektur im Nahbereich erheblich (materialabhängig um

Faktor 2 bis 40) vermindert werden kann (vgl. Standardabweichung mit Korrektur, Tabelle 1).

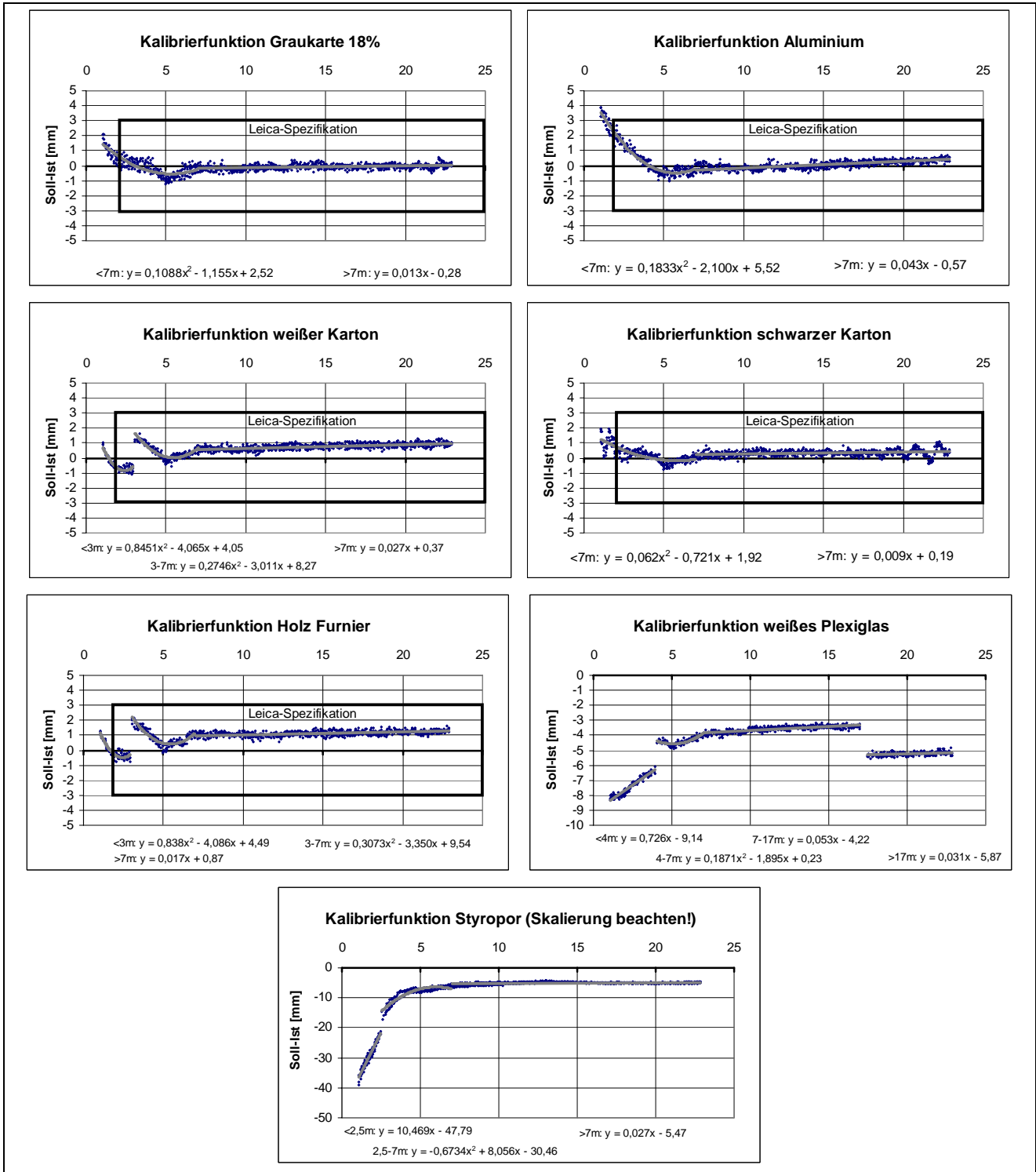


Abb. 7: Additionskorrekturen verschiedener Materialien mit dazugehöriger Kalibrierfunktion

Material	Standardabweichung einer einzelnen Messung [mm]				aus Differenzen Rück-Hin
	< 7 m		>7 m		
	ohne Kalib.	mit Kalib.	ohne Kalib.	mit Kalib.	
Graukarte 18%	0,67	0,34	0,19	0,16	0,15
Aluminium	1,38	0,26	0,27	0,17	0,15
Weißer Karton	0,64	0,16	0,80	0,19	0,13
Schwarzer Karton	0,58	0,33	0,39	0,21	0,18
Holz Furnier	0,92	0,17	1,14	0,21	0,16
Weißes Plexiglas	6,1	0,14	3,6	0,12	0,11
Styropor	16,7	1,0	5,1	0,33	0,17

Tabelle 1: Zusammenstellung der Standardabweichungen

Interpretation der Ergebnisse

Obwohl der Hersteller die kürzeste Zielweite mit 2 m angibt, sind tatsächlich Messungen deutlich unter 1 m Entfernung möglich, für einige Materialien direkt ab der Fernrohröffnung. Für diesen, vom Hersteller nicht spezifizierten extremen Nahbereich ergeben sich Abweichungen, die zum Teil über denen im spezifizierten Bereich ab 2 m liegen.

Bei allen untersuchten Materialien konnte eine deutliche und reproduzierbare Streckenabhängigkeit der Additionskorrektur im Nahbereich bis ca. 7 m festgestellt werden. Dieses Verhalten kann nach Auskunft des Herstellers dadurch erklärt werden, dass bei extrem kurzen Zielweiten in erster Linie Randstrahlen des zurückkommenden Signals ausgewertet werden, die eine andere Phasenlage als die zentrumsnahen Strahlen des Signals haben können. Bei einigen Materialien (weiße Pappe, helles Holz, weißes Plexiglas, Styropor) kam es dabei zu Diskontinuitäten von 2 mm, die durch geräteinterne Intensitätsregulierungsvorgänge des Sende- / Empfangssignals hervorgerufen werden: Der entsprechende Graufilter ist nicht kontinuierlich sondern segmentiert und kann somit zu Sprüngen bei der Intensitätsregulierung führen.

Als besonders problematisch erwiesen sich Materialien, in die der Laserstrahl eindringen kann (weißes Plexiglas, Styropor). Diese Materialien weisen sowohl große Abweichungen im extremen Nahbereich sowie Diskontinuitäten auf und haben auch bei weiteren Entfernungen eine deutlich von Null verschiedene Additionskorrektur. Insbesondere Styropor weist im extremen Nahbereich bis 2 m enorm hohe Fehler von bis zu 7 cm auf. Im spezifizierten Bereich ab 2 m beträgt der Fehler noch maximal 3 cm, nähert sich aber mit zunehmender Entfernung einem konstanten Fehler von ca. 5 mm an. Wenn auf die Anbringung einer Korrekturfunktion für die Materialien Plexiglas und Styropor verzichtet wird, sollte auf jeden Fall die dem Material entsprechende Additionskonstante im Instrument gesetzt werden, um Messergebnisse zu erhalten, die innerhalb der Herstellerspezifikationen liegen. Beachtenswert ist auch die hohe Reproduzierbarkeit an den Messpositionen im Hin- und Rückgang. Diese ist weitgehend unabhängig vom untersuchten Material. Die aus den Differenzen der Hin- und Rückmessung abgeleitete Standardabweichung aus Doppelmessungen einer Messreihe liegt im Durchschnitt bei 0,15 mm und belegt die hohe innere Genauigkeit der Messwerte. Die hohe Reproduzierbarkeit der Messwerte erlaubt somit die Anwendung von materialspezifischen Funktionen (Polynomen) zur Korrektur der systematischen, entfernungsabhängigen

Distanzmessfehler im Nahbereich. Durch Anwendung dieser materialspezifischen Funktionen können die verbleibenden Abweichungen vom Soll-Wert im extremen Nahbereich auf ein Maß reduziert werden, das dem zufälligen Fehler im weiteren Untersuchungsbereich entspricht. Es sei darauf hingewiesen, dass die hier ermittelten Kalibrierfunktionen das typische Verhalten aufzeigen, weswegen sich im Einzelfall in Abhängigkeit der Materialzusammensetzung und/oder der Oberflächenstruktur (geringe) Abweichungen bei den Kalibrierparametern ergeben können. Um also die beste Genauigkeit zu erhalten, wird eine Kalibrierung mit der speziellen Materialprobe empfohlen, was auf der Kalibrieranlage des Geodätischen Instituts der Universität Karlsruhe innerhalb von etwa zwei Stunden erfolgen kann. Insbesondere bei der Erfassung der Form wenig strukturierter Objekte im Nahbereich kann die Genauigkeit hierdurch auf wenige 1/10 mm gesteigert werden, denn hierbei spielen sowohl ein konstantes Offset in der Distanzmessung wie auch die Unsicherheit der Winkelmessung eine untergeordnete Rolle

4 Wiederholgenauigkeit der reflektorlosen Messung im Fernbereich

Zur Bestimmung der Wiederholgenauigkeit im Fernbereich wurden natürliche Ziele zwischen 178 m und 567 m bei verschiedenen meteorologischen Bedingungen angemessen. Als Ziele wurden „unproblematische“ Bereiche an umliegenden Gebäuden ausgewählt, die vom Messdach des geodätischen Instituts angezielt werden konnten. Als „unproblematisch“ soll dabei gelten, dass die Oberfläche möglichst glatt ist (Putz, Beton). Die Flächennormale war dabei bis maximal 35° gegen den Zielstrahl verschwenkt und es waren keinerlei störende Kanten in der Nähe des Zielpunktes zu finden. Nachdem das Ziel einmalig mit dem Fadenkreuz eingestellt wurde, erfolgten jeweils 10 Distanzmessungen unmittelbar nacheinander, ohne eine erneute Anzielung vorzunehmen. Die Standardabweichung einer Einzelmessung ist für die jeweilige Distanz und meteorologische Situation dem nachfolgenden Diagramm (Abb. 8) zu entnehmen.

Bei den durchgeführten Messreihen herrschten folgende meteorologische Bedingungen:

- Bedeckt, Morgen: Vollständig bedeckter Himmel gegen 9 Uhr, ca. 16°C, leichter Wind.

- Vor Regen, Nachmittag: Vollständig bedeckter Himmel, Windböen, ca. 20°C, aufziehender Starkregen.
- Hochnebel, Morgen: Gegen 11 Uhr, ca. 16°C, windstill.
- Sehr diesig, Morgen: Z.T. Nebelschwaden, Sicht < 1 km, gegen 9 Uhr, windstill.
- Leicht bedeckt, Mittag: Keine direkte Sonne, gegen 15 Uhr, ca. 18°C, leichter Wind.
- Sonne Morgen: Wolkenloser Himmel gegen 9 Uhr, ca. 10°C, leichter Wind.
- Sonne, Mittag: Wolkenloser Himmel gegen 13 Uhr, ca. 18°C, leichter Wind.

In die folgende Zusammenstellung der Ergebnisse wurden zusätzlich die Herstellerangaben für die Standardabweichung bei günstigen meteorologischen Bedingungen (Objekt im Schatten, bedeckter Himmel) aufgenommen (3 mm +2 ppm bis 500 m, 5 mm +2 ppm über 500 m).

Deutlich zu erkennen ist, dass die Wiederholgenauigkeit sehr langer Strecken bei ungünstigen meteorologischen Bedingungen stark ansteigt. Zum Teil konnten Strecken über 400 m bei sehr starker Sonneneinstrahlung überhaupt nicht gemessen werden. Bei sehr günstigen meteorologischen Bedingungen wurden die Herstellerangaben über den gesamten Entfernungsbereich deutlich eingehalten. Gleiches gilt für Strecken bis 300 m auch unter ungünstigen Bedingungen.

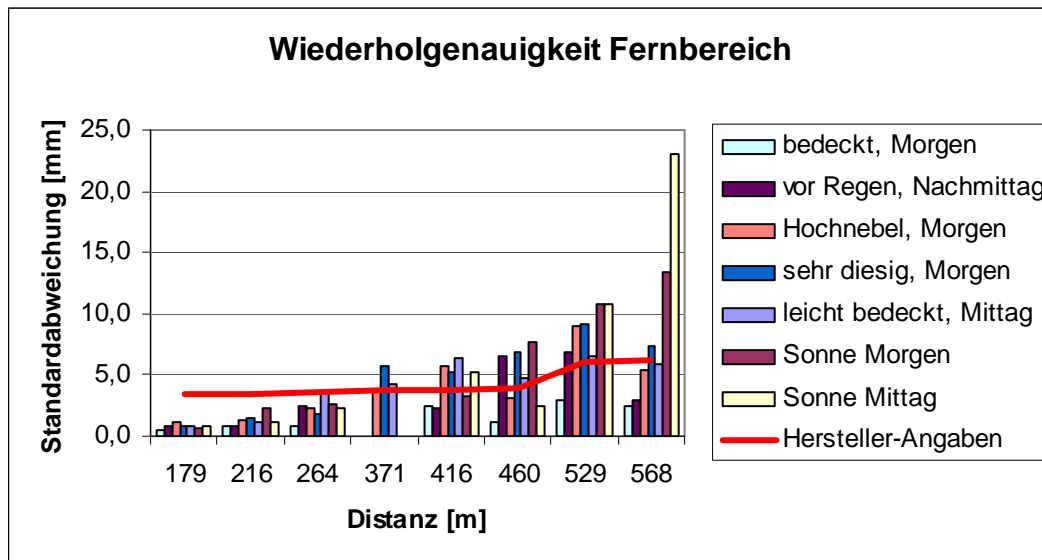


Abb. 8: Wiederholgenauigkeit im Fernbereich

5 Fazit und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass die vom Hersteller gemachten Angaben zur Genauigkeit und Reichweite des reflektorlosen Distanzmessmodul R300 der Leica-Tachymeterserie TPS1200 realistisch sind. Das Instrument verfügt über eine sehr hohe Wiederholgenauigkeit sowohl im Nah- wie auch im Fernbereich. Auch die absolute Genauigkeit im Vergleich mit interferometrisch bestimmten Soll-Strecken im Nahbereich ab ca. 5 m ist beachtlich. Im extremen (vom Hersteller nicht spezifizierten) Nahbereich unter 2 m konnten jedoch bei relativ „unproblematischen“ Oberflächen entfernungs- und materialabhängige Additionskorrekturen von bis zu 4 mm nachgewiesen werden. Bei „problematischen“ Oberflächen wie Styropor kann es gar zu entfernungsabhängigen Additionskorrekturen von etlichen Zentimetern kommen. Wie gezeigt, kann die Leistungsfähigkeit im Nahbereich durch materialspezifische Kalibrierung erheblich gesteigert werden. Es kann zudem davon ausgegangen werden, dass die ermittelten Additionskorrekturen nicht nur material- sondern auch instrumentenabhängig sind. Dies soll zum Gegenstand zukünftiger Untersuchungen werden. Zur Bewertung der Untersuchungsergebnisse ist es unerlässlich, auch andere reflektorlos messende Instrumente bezüglich einer entfernungs- und materialabhängigen

Additionskorrektur zu untersuchen. Dann wäre es auch leichter möglich, zu trennen, welche Fehleranteile instrumenten- und welche materialbedingt sind. Festzuhalten bleibt, dass auch eine sehr hohe Wiederholgenauigkeit der reflektorlosen Distanzmessung nur wenig über die absolute Genauigkeit im extremen Nahbereich aussagt. Hier sollte der Anwender (z.B. bei der Vermessung von Bauteilen, die aus verschiedenen Materialien bestehen) besondere Vorsicht walten lassen und möglichst Kalibrierfunktionen nutzen.

Literatur

- Hennes, M.; Juretzko, M.; Witte, B. [1994]:** Die prüfstreckenunabhängige Modellierung von Additionskorrekturen elektrooptischer Distanzmesser. AVN 101, S. 121-132.
- Joeckel, R.; Stober, M. [1999]:** Elektronische Entfernung- und Richtungsmessung. Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart, ISBN 3-87919-266-9.
- Juretzko, M. [2005]:** Reflektorlose Video-Tachymetrie – ein integrales Verfahren zur Erfassung geometrischer und visueller Informationen, DGK Reihe C, Heft 588, München 2005, ISBN 3 7696 5027 1

Köhler, M. [1994]: Einige theoretische Grundlagen für die reflektorlose Messung mit dem Zeiss-Tachymeter Rec Elta RL. Verm-Ing. 5/1994, S. 216-221.

LEICA [2005]: Gebrauchsanweisung TPS1200 Series, Leica-Geosystems, Heerbrugg

Meier-Hirmer, B.; Meier-Hirmer, R. [1996]: Untersuchungen zum Reflexionsverhalten des Zeiss-Tachymeters Rec Elta RL an strukturierten Oberflächen. AVN 6/1996, S. 233-239.

Anschrift des Verfassers:

Dr.-Ing. Manfred Juretzko

Universität Karlsruhe

Geodätisches Institut

Englerstraße 7

D-76131 Karlsruhe

Tel.: 0721 / 608 3672

E-Mail: juretzko@gik.uni-karlsruhe.de