

Prüfen und Kalibrieren von terrestrischen Laserscannern

Fredie KERN

Zusammenfassung

Im Beitrag werden Vorschläge zur Prüfung und Kalibrierung von Terrestrischen Laserscannern (TLS) unterbreiten. Das TLS-Prüfverfahren stützt sich auf die Kennwerte der VDI/VDE-Richtlinie 2634 Blatt 2 und erweitert diese um die Kugelradiusabweichung. Das Prüfverfahren wird an einem HDS 6000 und HDS 3000 exemplarisch angewendet und mit den Ergebnissen bisheriger Untersuchungen verglichen. Für die Methode der TLS-Selbstkalibrierung wird ein neuartiges Zielmarkendesign vorgestellt. Erste Erfahrungen mit dem hochgenauen i3mainz-Kalibrierfeld und dem realisierten, automatisierten Auswertprozess werden erörtert.

1 Allgemeines zu Prüfen und Kalibrieren

1.1 Prüfen

Beim Prüfen eines Sensorsystems gilt es festzustellen, ob es den vorgegebenen Anforderungen, z.B. Herstellerangaben, entspricht oder inwieweit es bestimmte Merkmale aufweist. Geprüft wird nicht umfassend sondern nur exemplarisch bezogen auf besondere Kennwerte. Die Kennwerte werden möglichst so festgelegt, dass unter Einhalten der normalen Betriebs- und Messbedingungen eine korrekte Funktionsweise gewährleistet ist. Das Prüfen ist somit vorwiegend für den Anwender von Interesse. Auch weil mittels der Kennwerte eine Vergleichbarkeit verschiedener Systeme hergestellt werden kann.

Bislang fehlt es im Bereich TLS an einheitlichen Prüfverfahren. Die vielfältigen Geräte-Untersuchungen, vorwiegend aus dem Bereich der Hochschulen, weisen hinsichtlich der Methodik viele Parallelitäten auf, sind aber, z.B. aufgrund der sehr unterschiedlichen Betriebs- und Umweltbedingungen, kaum miteinander vergleichbar.

Von den unzähligen Publikationen zum Thema TLS-Prüfen seien hier nur die, als fundamental einzuschätzende Arbeit (BÖHLER & BORDAS VICENT & MARBS 2003) erwähnt, die sich überwiegend mit dem qualitativen Leistungsvergleich von TLS beschäftigt. Spätere Arbeiten anderer Autoren haben viele Elemente daraus aufgegriffen und um weitere Aspekte erweitert ohne jedoch ein Standard-Prüfverfahren zu konzipieren, das sowohl bei den Anwendern und den Systemherstellern Akzeptanz findet. Mit (HEISTER 2006) wurde ein viel versprechender Vorschlag unterbreitet, der sich stark an die sehr erfolgreiche (VDI/VDE-RICHTLINE 2634/2 2002) zur Prüfung von flächenhaft antastenden optischen 3D-Messsystemen anlehnt.

1.2 Kalibrieren

Durch eine Kalibrierung wird der Zusammenhang zwischen der Ausgangs- und Eingangsgröße für ein Sensorsystem in einer Messkette festgestellt. Der physikalische Zusammenhang wird dabei meist durch ein mathematisches Modell, der Kalibrierfunktion, beschrieben. Die Kalibrierfunktion kann ein oder mehrere Kalibrierparameter enthalten, welche häufig auf Imperfektionen des Sensorsystems zurückzuführen sind. Die Kalibrierparameter gilt es im Rahmen eines Kalibrierverfahrens zuverlässig zu bestimmen. Auf das TLS übertragen, kann z.B. eine Kalibrierung zum Ziel haben, die Additions- und Maßstabskorrektur für den Entfernungsmesser zu bestimmen. Mit Hilfe der Kalibrierfunktion und -parameter können die Messwerte (Ausgangsgrößen) entweder rechnerisch korrigiert oder das Sensorsystem justiert werden. Beides führt dazu, dass die Abweichungen zum Sollwert möglichst klein sind. Damit ermöglicht das erfolgreiche Kalibrieren eine Genauigkeitssteigerung.

Mit der Systemkalibrierung von TLS haben sich insbesondere die Autoren (*SCHULZ & INGENSAND 2004*), (*RIETDORF 2005*), (*LICHTI & LICHT 2005*), (*NEITZEL 2006*), (*RESHETYUK 2006*) und (*SCHULZ 2007*) beschäftigt. Dabei wurden für die jeweils untersuchten Gerätetypen die Kalibrierfunktionen angewendet, wie sie bei Tachymeterkalibrierungen genutzt werden („Tachymetermodell“).

2 TLS-Prüfung in Anlehnung an VDI/VDE 2634 Blatt 2

Dem Vorschlag von (*HEISTER 2006*) folgend soll hier ein Prüfverfahren vorgestellt werden, dass sich vor allem der dort definierten Kennwerte Antastabweichung und Kugelabstandabweichung bedient. In den Geltungsbereich der VDI/VDE-Richtlinie fallen optische 3D-Messsysteme mit flächenhafter Antastung. Hierbei sind überwiegend die nach dem Triangulationsprinzip arbeitenden Systeme für den Nahbereich (Messvolumen wenige m³) angesprochen. Eine Übertragung in das Messvolumen der „mid-range“ TLS mit einer Kantenlänge von etwa 100m erfordert vor allem eine Anpassung bezüglich der Dimensionen des Prüfraumes in Abhängigkeit von einer typischen Messentfernung sowie der Dimensionierung der Prüfkörper und der Abstände zwischen den Prüfkörpern.

Sämtliche Kennwerte ergeben sich aus den Messinformationen einer „Einzelansicht“ also aus einer einzelnen von einem Standpunkt aus aufgenommenen unreferenzierten Punktwolke. Diese „originären“ Messungen können bei allen TLS-Systemen durch einen XYZ-Export bereitgestellt werden. Grundsätzlich sind Approximationen im Sinne der Minimierung der Fehlerquadratsumme durchzuführen (Fitting).

Die Messungen sollen unter denen vom Hersteller definierten normalen Betriebs- und Umweltbedingungen durchgeführt werden. Die daraus abgeleiteten Kennwerte sind daher nur für solche „Normalanwendungen“ gültig. Übertragungen auf andere Messvolumina oder Oberflächenmaterialien sind nicht möglich.

2.1 Grundkonzept

Das Grundkonzept des Prüfverfahrens besteht aus einem in seinen Dimensionen vorgegebenen Messraum in dem kalibrierte Kugeln als Prüfkörper positioniert werden. Die Festlegung des Messvolumen erfolgt gemäß (*HEISTER 2006*) anhand der typischen bzw. maxima-

len Messdistanz D des TLS, wobei eine Beschränkung auf $d_{\max} = 35\text{m}$ zur Vermeidung von utopischen Ausdehnungen sinnvoll ist. Länge a , Breite b und Höhe c des Messvolumens berechnen sich wie folgt:

$$\begin{aligned} d &= 0,7 \cdot D \leq 35 \text{ m} \\ d_{\min} &= 0,2 \cdot d \\ a &= 0,2 \cdot d_{\min} \\ b &= 0,8 \cdot d \\ c &\geq 0,5 \cdot d_{\min} \end{aligned} \tag{1}$$

Dabei steht d_{\min} für den minimalen Abstand des TLS zum Messvolumen und die Längsachse des Messvolumens zeigt in Richtung des minimalen Abstands (HEISTER 2006). Für die Dimensionierung der Prüfkugeln (Durchmesser D_p) und Abstände L_p wird abweichend von (HEISTER 2006) folgende Formel vorgeschlagen:

$$\begin{aligned} D_p &= 0,001 \dots 0,003 \cdot d \\ L_p &= 0,08 \cdot a \end{aligned} \tag{2}$$

Damit sind auch Kugeln einsetzbar, wie sie bereits zur Georeferenzierung genutzt werden. Die Oberfläche der Kugeln sollte aus einem Material bestehen, das diffus streuend ist. Die Sollradien müssen mit übergeordneter Genauigkeit bekannt bzw. kalibriert sein und die Formabweichung soll kleiner sein als 1/5 der zu überprüfenden Kenngröße.

2.2 Kenngrößen

Die VDI/VDE-Richtlinie und (HEISTER 2006) berechnen die Kenngrößen Antastabweichung, Kugelabstandabweichung und Ebenheitsmessabweichung.

Mit der Antastabweichung R soll das lokale Abweichungsverhalten des flächenhaft messenden TLS quantitativ beschrieben werden. Sie beschreibt also, grob ausgedrückt, das üblicherweise zu erwartende Rauschen an der Objektoberfläche. Die Antastabweichung wird anhand von Kugeln auf mindestens zehn beliebigen Positionen im Messvolumen berechnet. Für jede Position wird eine Kugel mit freiem Radius approximiert. Aus den verbleibenden radialen Abweichungen der Antastpunkte zur Ausgleichskugel wird die Antastabweichung ΔL berechnet.

Die Kugelabstandabweichung soll exemplarisch die Maßtreue des TLS im Messvolumen quantisieren und überprüft so die Fähigkeit zur Rückführbarkeit auf ein Längennormal. Zur Bestimmung werden Kugelpaare, gebildet aus zwei Kugeln in einem definierten/kalibrierten Abstand („Hantel“), an sieben beliebigen Positionen mit verschiedenen Orientierungen angemessen. Aus den Abweichungen zwischen den Sollabständen der Kugelmittelpunkte und den Istabständen wird die Kugelabstandsabweichung R_K berechnet. Die Istkugelzentren ergeben sich durch Kugelapproximation mit festem (Soll-)Radius.

Mit der Ebenheitsmessabweichung R_E kann das Streuverhalten über größere Distanzen bestimmt werden. Zur Bestimmung sind Prüfflächen mit einer Länge von $L_0 = 0,04 \dots 0,06$

d und Breite $B_Q=0,01 \dots 0,02 d$ mit einer Ebenheit von $0,2 R_{\text{zulässig}}$ an sechs Positionen in unterschiedlichen Orientierungen aufzumessen. Für jede Prüffläche wird eine Ausgleichsebene bestimmt. Aus den Abständen der Antastpunkte hierzu wird die Ebenheitsabweichung berechnet. Das Verfahren ist also analog zum Vorgehen bei der Antastabweichung - nur das Ausgleichselement jetzt eine Ebene ist.

Angesichts der maximalen Dimension der Prüfflächen von gerade einmal $2,1 \times 0,7\text{m}^2$ ($d_{\text{max}}=35\text{m}$) wird bezweifelt, dass bei der Ebenheitsmessabweichung andere oder weitere Einflussfaktoren bzw. Systematiken mit in die Berechnung einfließen, als bei der „lokalen“ Antastabweichung. Bei beiden Kennwerten tragen zudem unterschiedliche Auftreffwinkel zum Ergebnis bei. Ein Erkenntnisgewinn durch die Bestimmung und Berechnung der Ebenheitsmessabweichung erscheint im Verhältnis zum Aufwand gering.

2.3 Berechnung der Kenngrößen und weitere Anpassungen

Für die Berechnung der Antastabweichung sollte anstelle der Spanne ($r_{\text{max}}-r_{\text{min}}$), wie es die VDI/VDI-Richtlinie verlangt, die Standardabweichung der $n = m \cdot k$ Abstände r für k Kugeln mit je m Antastpunkten herangezogen werden.

$$R = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^2} \quad (3)$$

Die Standardabweichung beschreibt die Verteilung der Messwerte (Streuung um die Kugeloberfläche) vollständig, wenn vorausgesetzt wird, dass es sich bei der zu untersuchenden Größe um eine normalverteilte Zufallsvariable handelt - was im Vermessungswesen die Regelannahme ist und erfahrungsgemäß gut mit den realen Verhältnissen harmonisiert. Die Antast-Messunsicherheit u_L ergibt sich als Mittelwert der Standardabweichungen der geschätzten Radien von k Kugeln (HEISTER 2006).

Die mittlere Kugelabstandsabweichung ΔL berechnet (HEISTER 2006) aus den p Kugelabstandsabweichungen ΔL_j , abgeleitet aus den gemessenen Abständen l_{mj} und den Sollabständen l_{kj}

$$\begin{aligned} \Delta L_j &= l_{kj} - l_{mj} \\ \Delta L &= \frac{1}{p} \sum_j^p \Delta L_j \end{aligned} \quad (4)$$

Die Abstands-Messunsicherheit u_L ermöglicht eine Genauigkeitsaussage (Standardabweichung aus wahren Abweichungen) (HEISTER 2006).

Sind anstelle der Kugelabstände die 3D-Koordinaten der Kugelpositionen mit übergeordneter Genauigkeit bekannt, so kann die Kugelabstandsabweichung ΔL alternativ aus der Transformation der Kugelmittelpunkte, wie sich aus den Kugelapproximationen kommen, auf die Sollpositionen der Kugeln abgeleitet werden. Zu berechnen ist eine 6-Parameter-Transformation mit festem Maßstab! Die Standardabweichungen der gemessenen Koordinatenwerte a posteriori können dann im Sinne eines Punktfehlers anstelle von ΔL treten.

$$\Delta L = \sqrt{s_x^2 + s_y^2 + s_z^2} \quad (5)$$

Der Transformationsansatz hat den Vorteil, dass er in einem viel umfassenderen Sinne alle Orientierungen der Kugelpaare bewertet. Zudem beinhaltet die Formel (4) die Gefahr, dass bei der gleichzeitigen Verwendung mehrerer Kugeln stochastisch abhängige Paare in die Berechnung einfließen und so das Ergebnis verzerren.

Ergänzend sollte die Kugelradienabweichung R_K als Mittelwert der Differenzen v_i zwischen geschätzten und Sollradius von k Kugeln als weitere Kenngröße berechnet werden. Sie liefert zusätzliche Informationen über etwaige systematische Formabweichungen.

$$R_K = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k v_i \quad (6)$$

2.4 Exemplarische Prüfungen

2.4.1 Messvolumen, Prüfkörper und Messbedingungen

Auf drei Datensätze, die im Rahmen des i3mainz-Prüfparcours für zwei Laserscanner angefallen sind, wurde das oben erweiterte Prüfverfahren angewendet. Zum einem wurden Daten eines HDS 6000 als Vertreter eines Phasenlaufzeit-Scanners und zum anderen die eines HDS 3000 als Vertreter eines Impulslaufzeit-Scanners geprüft. Die Angaben zu den Prüfungen sind in der Tab. 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Angaben zu den Prüfungen

	HDS 6000	HDS 3000
Streckenmessverfahren	Phasenlaufzeit	Impulslaufzeit
Prüfentfernung d	30 m	60 m
Prüfkugeldurchmesser D_P	38,1 mm	38,1 mm
Kugelabstand L_P	0,9 – 3,5 m	0,9 – 3,5 m
Herstellerangaben :		
Genauigkeit – Position (1σ)	6 mm	6 mm
Modeled Surface precision/noise (1σ)	2 mm	2 mm
Anzahl erfasster Datensätze	2	1

Das Messvolumen ist durch eine steinerne Treppe realisiert (Abb. 2). Die zwei verwendeten Prüfkugeln haben einen kalibrierten Radius von 38,1mm, sind weiß und überwiegend diffus streuend. Über eine magnetische Grundplatte können sie in einer Zielvorrichtung (Abb. 1) mit Submillimeter-Genauigkeit auf einer Treppenstufe rechts und links zu einem Kugelpaar positioniert werden (BÖHLER & BORDAS VICENT & MARBS 2004).

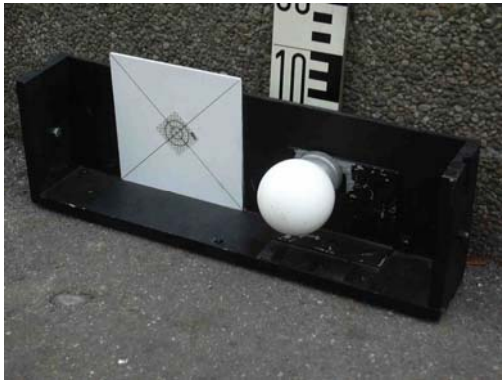


Abb. 1: Zielvorrichtung mit Prüfkörper Kugel und Zielmarke (BÖHLER & BORDAS VICENT & MARBS 2004).

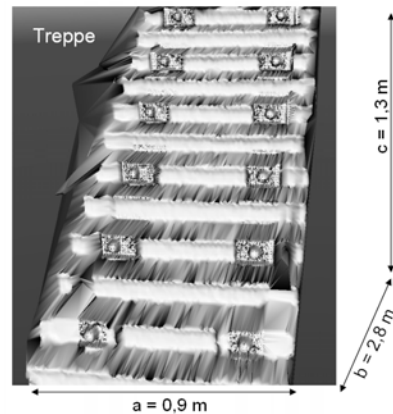


Abb. 2: Vermaschte Punktwolke der sechs gescannten Kugelpaare auf den Treppenstufen.

Alle Kugelpaare (Stufen) wurden mit der gleichen Stationierung und Orientierung des Scanners aufgenommen und als gemeinsame XYZ-Punktwolke exportiert. Zur Auswertung wurde eine Software zur automatischen Kugelfindung programmiert. Damit konnte eine objektive Auswahl der „Kugelpunkte“, im Gegensatz zu einer manuellen Auswertung, nach gleich bleibenden Kriterien vorgenommen werden. Integriert sind auch eine Ausreißerelimination und die Eingrenzung auf Punkte, die mindestens unter einem Auftreffwinkel von 80gon angetastet wurden. Die zur Ableitung der Kenngrößen notwendigen Kugelapproximationen und Koordinatentransformationen wurden mit dem Programm Xdesy berechnet.

2.4.2 Prüfergebnisse

In der Tab. 2 sind die Prüfergebnisse zusammengestellt. Alle von den verschiedenen Autoren favorisierten Berechnungsarten für die Kennwerte sind ebenfalls darin aufgeführt. Zwei Auffälligkeiten können festgestellt werden. Bei der Kugelabstandsabweichung schneidet der HDS 3000 um den Faktor zwei besser ab als der HDS 6000 trotz der doppelten Messentfernung. Dies steht im Einklang mit anderen Untersuchungen wie z.B. (BÖHLER 2005); korrespondieren aber weniger mit den Herstellerangaben, die für beide Geräte eine gleich gute Leistungsfähigkeit vermuten lassen. Interessant ist auch, dass die Kugelradien für beiden Geräte systematisch vom Sollradius abweichen. Beim HDS 6000 sind es beachtliche 6% und beim HDS 3000 1% um die die Schätzungen zu klein sind. Eine geometrische Erklärung hierfür wären die häufig vor allem bei Phasenlaufzeit-TLS zu beobachtenden Effekte, dass die Entfernung zu dem Antastpunkte mit einem Auftreffwinkel nahe 0° systematisch zu kurz („Zipfelmütze“) und diejenigen mit schleifendem Schnitt eher zu lang („Kometenschweif“) gemessen werden. Diese Formveränderung hin zu einem Ellipsoid könnte im Zusammenhang mit der Ausreißerelimination zu einem kleineren Ist-Radius führen.

Die Tab. 2 zeigt auch, dass die variierenden Berechnungsarten der Kennwerte für den Gerätevergleich unerheblich sind. Wichtig ist nur dass z.B. die Kugelabstandsabweichung nicht einmal als Spanne und das andere Mal als mittlere absolute Abweichung angegeben wird.

Tabelle 2: Prüfergebnisse (alle Angaben in [mm])

Kenngröße nach	Formel	HDS 6000		HDS 3000
		Daten 1	Daten 2	
Antastabweichung R				
[VDI/VDE]	$r_{max} - r_{min}$	9.8	10.5	9.7
	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^2}$	1.6	1.4	1.6
Antast-Messunsicherheit u_R				
[Heister06]	$\sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_{Radius,i}^2}$	0.4	0.3	0.6
Kugelabstandsabweichung ΔL				
[VDI/VDE]	$\Delta L_{max} - \Delta L_{min}$	4.9	2.3	1.9
[Heister06]	$\frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \Delta L_j $	1.8	1.8	0.6
Transformation	$\sqrt{s_x^2 + s_y^2 + s_z^2}$	2.0	1.8	0.8
Abstands-Messunsicherheit u_L				
[Heister06]	$\Delta L = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \Delta L_j^2}$	2.3	2.0	0.8
Kugelradiusabweichung R_K				
	$\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k v_i$	+2.59	+2.30	+0.49

2.5 Schlussfolgerungen

Die vorgeschlagenen Kennwerte scheinen sehr geeignet zu sein, die Leistungsfähigkeit von TLS bzgl. des Oberflächenmessrauschens, der Maßtreue und zu einem gewissen Grade auch bzgl. der Formtreue zu quantisieren. Sie können so zumindest für einfache Standardanwendungen realistische Entscheidungskriterien sein.

Bei der Berechnung der Kennwerte zeigte sich, dass die Art und Weise, wie die Kugelapproximation durchgeführt wird, einen erheblichen Einfluss auf die Resultate haben kann. Durch die automatische Kugelfindung konnte zumindest die Subjektivität, die in einer manuellen Selektion der Kugelpunktmenge enthalten ist, umgangen werden. Unbedingt geregelt werden muss, welcher Algorithmus mit welcher Art der Ausreißerdetektion anzuwenden ist. Die Vorgabe der VDE/VDI-Richtlinie nur 3 Promille an Ausreißer zuzulassen ist für TLS nicht zweckmäßig. Die Praxis zeigt, dass mit Ausreißermengen von 1 bis 5% gearbeitet werden muss, um korrekte Ergebnisse zu erhalten.

Bei der Ableitung eines TLS-Prüfverfahrens in Anlehnung an die VDI/VDE-Richtlinie wären darüber hinaus folgende Punkte sehr wichtig näher zu spezifizieren:

- Festlegen des Datenaufbereitungsstatus
- Auch Messungen mit Prüfling innerhalb des Messvolumens vorsehen
- Messvolumen in allen drei Raumrichtungen möglichst gleich groß
- Praxistaugliche Festlegung der Prüfkörperdimensionen

3 Kalibrierung

3.1 Kalibrierparameter und Kalibrierfunktion

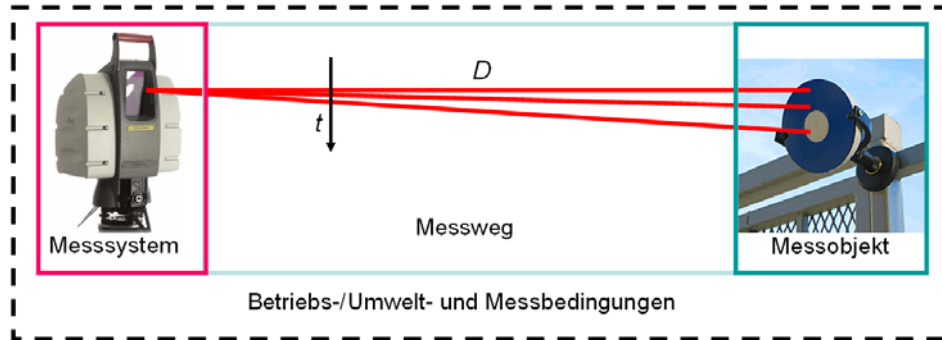


Abb. 3: Unterteilung des Gesamtsystems Terrestrischer Laserscanner in die Untersuchungsbereiche Messsystem, Messweg und Messobjekt.

Die Aufgabe der TLS-Kalibrierung kann in drei Bereiche

1. Kalibrierung des TLS-Sensorsystems,
2. Bestimmung oder Kontrolle der Einflüsse entlang des Messweges (Temperatur, Luftdruck, Erdkrümmung u.a.) und
3. Bestimmung oder Kontrolle der Einflüsse verursacht durch das Messobjekt (Auftrittswinkel, selektives Remissionsverhalten, Rauigkeit u.a.)

unterteilt werden (Abb. 3). Darüber hinaus beeinflussen die jeweilig herrschenden Betriebs-/Umwelt- und Messbedingungen die Messergebnisse. Ein bislang wenig beachteter Aspekt ist die asynchrone Erfassung der „originären“ polaren Messgrößen (Horizontalrichtung H_z , Vertikalwinkel V und Raumstrecke D) und der Remission I .

3.2 Konzept zur TLS-Kalibrierung

Mit dem Konzept des i3mainz zur TLS-Kalibrierung wird die möglichst simultane Bestimmung aller Kalibrierparameter insb. für das TLS-Sensorsystem angestrebt. Dabei wird mehrstufig vorgegangen, um nach und nach die Modellbildung zu verfeinern anhand der Erfahrungen aus den vorherigen Stufen. In der 1. Stufe werden TLS als Tachymeter mit reflektorlosem Entfernungsmesser aufgefasst („Tachymetermodell“) und bezüglich der Messgröße D nach den hierfür bekannten Methoden kalibriert (EICHRICHTLINIEN EDM). Für die Bestimmung der Kalibrierparameter „Achsfelder“ orientiert sich das Konzept an den Arbeiten von (LICHTI & LICHT 2005). Ziel dort ist die gemeinsame Bestimmung aller Kalibrierparameter im Sinne einer Selbstkalibrierung. Basis hierfür bildet ein Kalibrierraum (Labor mit konstanten Umweltbedingungen) mit ausreichendem Messvolumen, an dessen Wänden, der Decke und auf dem Boden Zielmarken in großer Zahl platziert werden und dessen 3D-Zentren mit hoher Genauigkeit bekannt sind. Der Selbstkalibrierungsansatz des

soll in späteren Stufen auch die Aufnahme der EDM- und weiterer Parameter erlauben (Tab 3) sowie die Korrelationen zwischen den polaren Messelementen berücksichtigen.

Tabelle 3: Physikalisch begründbare Kalibrierparameter im „Tachymetermodell“. Angestrebte Bestimmungsmethoden sind a) Interferometerbasis, b) Selbstkalibrierung und c) Residuenanalyse.

Kalibrierparameter	Erläuterung	Methode
k_0	Additionskonstante	a) b)
k_m	Maßstabskonstante	a) b)
$k_{a1}, k_{b1} \dots k_{an}, k_{bn}$	Fourierkoeff. Zyklischer Fehler $\lambda_1 \dots \lambda_n$	a)
c	Zielachsfehler	b)
i	Kippachsfehler	b)
h	Höhenindexfehler	b)
e_{SK}	Exzentrizität Stehachse–Kippachse	b)
e_{SZ}	Exzentrizität Stehachse–Zielachse	b)
e_{KZ}	Exzentrizität Kippachse–Zielachse	b)
e_{Hz}, ϵ_{Hz}	Horizontal-Teilkreis-Exzentrizität	c)
e_V, ϵ_V	Vertikal-Teilkreis-Exzentrizität	c)
t_A, t_ϕ	Amplitude und Phase des Taumelfehlers	c)
$k_{Hz\Delta} = f(Hz)$	Horizontalkreis-Teilungsfehler	c)
$k_{V\Delta} = f(V)$	Vertikalkreis-Teilungsfehler	c)

Das geräteunabhängige Kalibrierfeld (L x B x H: 16,0 x 6,0 x 2,5m) besteht derzeit aus 60 Punkten, die mit i3mainz-Zielmarken (Abschnitt 3.3) signalisiert sind. Die Marken sind über 3D-Vorwärtsschnitte auf Basis eines Grundnetzes (7 Punkte mittels Lasertracker eingemessen) mit einer Güte von $s_{3D} < 0,2\text{mm}$ bestimmt worden. Zur Kalibrierung sind Scans von ca. 10 verschiedenen Standpunkten aus vorzunehmen, um Messungen in allen Richtungen (0-400gon für Hz und V) und über alle Distanzen (1-18m) zu erhalten.

3.3 Optimierte Zielmarkendesign

Um in der 1. Stufe die Achsfehler zuverlässig zu bestimmen musste ein Zielmarkendesign gefunden werden, dass zum einen die Trennung zwischen den Richtungs- und den Streckenmessungen aus der 3D-Punktwolke erlaubt und auch bei Teilabdeckungen sowie Schrägansichten automatisiert ausgewertet werden kann. Das Standarddesign „weißer Kreis auf schwarzem Grund“ erwies sich bei Testmessungen als zu ungenau ($>1\text{mm}$) und aufgrund der Remissionswert-gewichteten Schwerpunktbildung als sehr unzuverlässig. Das optimierte Zielmarkendesign verwendet einen vom schwarzen Markenrand zum weißen Mittelpunkt hin ansteigenden Helligkeitsverlauf (Abb. 4). Der Scan solch einer Marke ergibt einen „Remissionsberg“ über der Markenebene mit stetigem Übergang, der auch bei Teilabdeckungen und Schrägansichten gut durch eine „Glocke“ approximiert werden kann (Abb. 5). In der Regel lässt sich so das Markenzentrum mit $<1\text{mm}$ Genauigkeit bestimmen. Für die Zielmarkenfindung und Zentrumsbestimmung wurde vom Autor die geräteunabhängige Software i3mainz-Scene entwickelt, die bis auf eine Grobreferenzierung ohne Interaktion durch den Anwender auskommt.

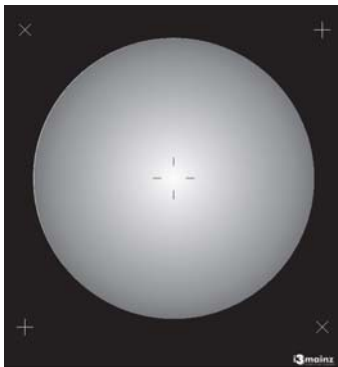


Abb. 4: i3mainz-Zielmarke mit stetig fallendem Grauwertverlauf vom Rand zur Mitte.

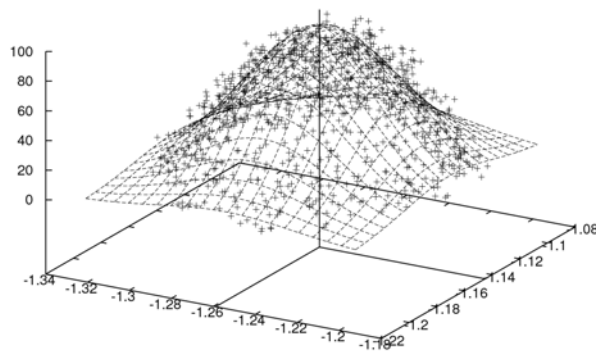


Abb. 5: Zentrumsbestimmung einer i3mainz-Zielmarke mittels „Glocke“-Approximation des „Remissionsberges“ über der Markenebene.

3.4 Erste Erfahrungen

Bei der Kalibrierung eines FARO LS 880 wurden Messungen auf 10 Standpunkten vorgenommen. Eine Voranalyse mittels Transformation der Istmarkenzentren auf die Sollkoordinaten ergab im Mittel Punktgenauigkeiten von 3,8mm. Bezogen auf die erzielte Richtungs-genauigkeit ergibt dies ca. 20mgon auf 6m. In einer Gesamtausgleichung mit Xdesy konnten der Streckenmaßstab und ein Höhenindexfehler signifikant bestimmt werden. Zusätzlich traten trotz Kompensator standpunktbezogene Stehachsneigungen signifikant in Erscheinung. Achsfehler konnten aus den Messdaten nicht signifikant nachgewiesen werden, da für die Trennung von Ziel- und Kippachsfehler die Standpunkte zu ungünstig gewählt wurden. Mit Messungen auf einer Referenzstrecke konnte ein zyklischer Fehler nachgewiesen werden.

4 Zusammenfassung

Eine TLS-Prüfung aufbauend auf VDI/VDE 2634 Blatt 2 kann mit einfachen Hilfsmitteln realisiert werden, liefert aussagekräftige Kenngrößen, schafft Vergleichbarkeit unter den Systemen, ist sinnvoll und ist auch automatisierbar.

Der Erfolg einer TLS-Systemkalibrierung hängt u.a. ab von der korrekten Parametrisierung der Imperfektionen, dem Zielmarkendesign, dem Genauigkeitspotential des TLS und der Beherrschung der Umweltbedingungen. Weitere Anstrengungen sind notwendig, um auch TLS-spezifische Kalibrierparameter zu modellieren.

5 Literatur

Böhler, W.; Bordas Vicent, M.; Marbs, A. (2003): *Investigation Laser Scanner Accuracy*. In: Proceedings of XIX. CIPA Symposium, Antalya.

- Böhler, W. (2005): *Vergleichende Untersuchungen zur Genauigkeit und Auflösung von Laserscannern*. In: Terrestrisches Laserscanning (TLS) – Ein geodätisches Messverfahren mit Zukunft. Augsburg: Wißner, (DVW-Schriftenreihe Band 48/2005). S. 17–28
- Eichrichtlinien (EDM): Innenministerium des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2000): *Entwurf – Richtlinien zur Eichung und Prüfung von EDM-Instrumenten – Eichrichtlinien (EDM)* – LVerMA Nordrhein-Westfalen, – Stand 31.03.2000
- Heister, H. (2006): *Zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS)*. In: Terrestrisches Laser-Scanning (TLS 2006). Augsburg: Wißner, (DVW-Schriftenreihe Band 51/2006). S. 35–44
- Kern, F. (2008): *Xdesy – Ausgleichung von geodätischen Netzen, photogrammetrischer Bündelblockausgleichung und Ebenen- und Kugelapproximation sowie 3D-Koordinatentransformation*. Version 1.9.00, Internet: www.xdesy.de
- Lichti, D. D.; Licht, M.G. (2006): *Experiences with Terrestrial Laser Scanner Modelling and Accuracy Assessment*. In: IAPRS Volume XXXVI, Part 5. Dresden, 25.-27. September 2006, S. 155–160
- Neitzel, F. (2006): *Untersuchung des Achssystems und des Taumelfehlers terrestrischer Laserscanner mit dem tachymetrischen Messprinzip*. In: Terrestrisches Laser-Scanning (TLS 2006). Augsburg : Wißner, (DVW-Schriftenreihe Band51/2006). S. 15–34
- Reshetyuk, Y. (2006): Calibration of Terrestrial Laser Scanners for the Purposes of Geodetic Engineering. In: 3rd IAG / 12th FIG Symposium. Baden, 22.-24. Mai 2006
- Rietdorf, A. (2005): *Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip*. München: DGK (Reihe C, Heft Nr.582)
- Schulz, Th. (2007): *Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy*. Zürich: ETH Zürich (Dissertationen Nr. 17036)
- Schulz, Th.; Ingensand, H. (2004): *Laserscanning – Genauigkeitsbetrachtungen und Anwendungen*. In: Luhmann, Th. (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik, Heidelberg: Wichmann, S. 90–97
- Sternberg, H.; Kersten, Th.; Conseil, N. (2005): *Untersuchungen des terrestrischen Laserscanners Mensi GS100 – Einfluss unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften auf die Punktbestimmung*. In: Luhmann, Th. (Hrsg.) ; Müller, Ch. (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik. Heidelberg: Wichmann, S. 56–65
- Staiger, R. (2005): *The Geometrical Quality of Terrestrial Laser Scanner (TLS)*. In: From Pharaohs to Geomatics FIG Working Week 2005 and GSDI-8, TS 38- Using Laser Scanning in Engineering Surveys, TS 38.6 Geometrical Quality of Laser Scans. Kairo, 16.-21. April 2005, S. 1–11
- VDI/VDE-Richtlinie 2634/2 (2002): *Optische 3D-Messsysteme – Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung*. VDI/VDE - Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) – Fachausschuss Optische 3D-Messtechnik – August 2002