

Ansätze zur systematischen Kalibrierung und Prüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS)

Prof. Dr.-Ing. Fredie Kern und
M. Eng. Uwe Huxhagen
Fachhochschule Mainz – i3mainz
Holzstraße 36
55 116 Mainz
kern@geoinform.fh-mainz.de
huxhagen@geoinform.fh-mainz.de

1 Untersuchung, Kalibrierung und Prüfung

Die Begrifflichkeiten zur Untersuchung, Kalibrierung und Prüfung geodätischer Messinstrumente werden in der Praxis oftmals unscharf voneinander abgegrenzt. Eine klare Darstellung der Unterschiede in den zu Grunde liegenden Ansätzen ist jedoch aufgrund der Vielzahl der verwendeten Methoden wichtig, um eine Klassifizierung der verschiedensten realisierten Ansätze gerade im Hinblick auf das terrestrische Laserscanning (TLS) vornehmen zu können. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass dem Benutzer eines TLS-Systems primär der Begriff der Prüfung als entscheidendes Kriterium zur projektbezogenen Einsatzplanung dient.

Untersuchungen beinhalten meist gesonderte Fragestellungen zu speziellen Komponenten des Messsystems und dienen als Grundlage zum Kenntnisgewinn über die Wirkungsweise instrumentenspezifischer Einflussparameter wie Temperatur, Messentfernung, Objektmaterial etc. Anhand von Untersuchungen können systematische Messabweichungen aufgezeigt werden. Der physikalische Hintergrund für die aufgedeckten Systematiken wird erst im Nachhinein näher beleuchtet. Untersuchungen bildet das Fundament zur Aufstellung geeigneter mathematischer Modelle zur System- oder Komponentenkalibrierung.

Untersuchungen, z.B. an terrestrischen Laserscannern, betrachten Systemkomponenten einzeln oder in ihrer Wechselwirkung mit anderen Bauteilen und bein-

halten grundsätzliche Betrachtungen z.B. zum Auflösungsvermögen der Winkelgeber, der Strahldivergenz, dem Auflösungsverhalten in geometrischer und radiometrischer Hinsicht, der Auflösung der Streckenmessung, der geometrischen Justierung des Instruments und deren Stabilität sowie zusätzlicher Einrichtungen wie Libellen und Kompensatoren. Besondere Rücksicht wurde in der Vergangenheit stets auf das vom Ideal abweichende Achsensystem und den daraus resultierenden Systematiken in den Messergebnissen genommen.

Unter **Kalibrierung** versteht man die Herstellung mathematischer Beschreibungen (Aufstellung eines mathematischen Modells) für Konstruktion und die physikalische Arbeitsweise des Instrumentes sowie die Modellierung der beeinflussenden Faktoren. Die Kalibrierung hat zum Ziel, durch Modellierung der z.B. den Laserscanner beeinflussenden Achsfehlern, eine signifikante Qualitätssteigerung des zu erwartenden Messergebnisses zu erzielen. Nur ein kalibriertes TLS kann die vom Hersteller in Aussicht gestellte Messqualität erreichen. Eine regelmäßige Kalibrierung ist häufig grundlegende Voraussetzung für die Gebrauchsfähigkeit eines Sensorsystems

Die **Prüfung** soll dem Anwender eines TLS anhand von vereinbarten Kenngrößen als Funktionsnachweis dienen und Aussagen über die Verwendbarkeit des Systems erlauben. Die reine Funktionsprüfung sollte dabei genauso möglich sein, wie die aufgabenbezogene Entscheidungsfindung zum Einsatz des geeigneten Geräts. Dafür ist es substanziell, geprüfte Systeme miteinander vergleichen zu können. Bislang findet man in den Herstellerangaben kaum die gleichen Kenngrößen. Dies liegt auch darin begründet, dass noch keine standardisierten Prüfverfahren vorliegen. Daher ist es dem TLS-Nutzer oft nicht möglich anhand von Test- oder Kontrollmessungen zu beurteilen, ob die vom Hersteller angegebenen Qualitätsparameter auch immer eingehalten werden.

Ein ebenfalls wichtiger Aspekt ist die Zuverlässigkeit der Messergebnisse sowie deren Reproduzierbarkeit. Eine Richtlinie nachdem TLS auf die dargestellten Punkte geprüft werden können fehlt bisweilen. Das vom BMBF geförderte Projekt „Bildverarbeitungsgestütztes Kalibrier-, Prüf- und Feldprüfverfahren für Terrestrische Laserscannersystem (TLS) zur Qualitätssteigerung (SigmaTLS+)“ befasst sich u.a. mit der Erstellung einer für TLS geeigneten Prüfrichtlinie.

2 Kalibrierung

2.1 Vorhandene Ansätze zur TLS-Kalibrierung

Ein Reihe von Autoren haben sich in den letzten drei Jahren intensiver mit der Kalibrierung von TLS beschäftigt. Die dabei verwendeten Methoden sind recht unterschiedlich und sehr von den konkreten Fähigkeiten der untersuchten Geräte geprägt und schwer auf die gesamte Vielfalt der TLS übertragbar. (RIEDORF 2005), (RESHETYUK 2006) und (LICHTI & LICHT 2007) verfolgen dabei den Ansatz der Systemkalibrierung und beschreiben die Gesamtheit der Geräteimperfektionen durch ein einziges mathematisches Modell (Selbstkalibrierung). Hingegen setzen (NEITZEL 2006), (SCHULZ 2007) und (HESSE 2008) auf das Konzept der Komponentenkabrierung und stützen sich auf die besondere Fähigkeit der untersuchten TLS-Geräte in zwei Lagen messen zu können, um Achsfehler zu bestimmen. Alle Ansätze fassen die polar messenden TLS als eine Sonderform eines reflektorlos messenden Tachymeters auf, kurz „Tachymetermodell“ genannt. Der Vergleich zwischen Ist- und Sollwerten erfolgt am einfachsten über Passkugeln oder Passmarken. (RIEDORF 2005) gelingt es diesen Bezug über Passebenen zu realisieren und sich so von der punkthaften Betrachtung zu verabschieden; zu Gunsten einer flächenhaften. Zudem modelliert er die Mechanik der Eigenentwicklung PoMeS mittels Quaternionen, wie es in der Robotik üblich ist.

Tabelle 1 stellt die verschiedenen Methoden und geometrischen Kalibrierparameter zusammen und klassifiziert in die folgenden vier Ordnungen ein.

- 0. Ordnung: Bestimmung ist für einwandfreie Messung in der Regel notwendig. (Parameter der äußeren Orientierung)
- 1. Ordnung: Konventionelle systematische Abweichungen (Primärabw.) des Distanzmessers und des Achssystems. Eine Bestimmung und Korrektur/Justierung ist reproduzierbar, in der Regel sinnvoll und steigert die Messqualität.
- 2. Ordnung: Systematische Abweichungen untergeordneter Bedeutung (Sekundärabw.), da in der Regel der Einfluss auf die Messgüte gering ausfällt. Die Bestimmung ist mit erheblichen Aufwand verbunden; eine relevante Qualitätssteigerung ist mitunter fraglich.
- 3. Ordnung: Systematische Abweichungen geringster Auswirkung im Grenzbereich der Bestimm- und Reproduzierbarkeit (Tertiärabw., „akademische

Abweichung“); tlw. verursacht durch Wechselwirkungen zwischen den Sensoren.

Tab. 1: Zusammenstellung möglicher TLS-Kalibrierparameter und Klassifizierung hinsichtlich der zu erwartenden Einflussstärke auf die Messqualität. Die von den Autoren eingesetzten Bestimmungsmethoden sind a) Referenzstrecke (Interferometerbasis), b) Selbstkalibrierung, c) Residuenanalyse und II) Messung in zwei Lagen d) externe Sensorik.

Ord- nung	Kalibrier- parameter	verwendete Passobjektarten Erläuterung	Methode					
			KLEINERF05 Ebene	REBHETTUK06 Retro	LICHT06 B&W	SCHULZ07 Kugel	HESSE08 B&W	KERN08 Graukeil Kugel
0	τ, ζ	Richtung, Neigung der Stehachse		b)	b)			b)
0	o	Orientierungsunbekannte		b)	b)			b)
1	k_0	Additionskonstante	b)	b)	b)			a) b)
1	k_m	Maßstabskonstante	b)		b)			a) b)
2	$k_{a1}, k_{b1} \dots k_{an}, k_{bn}$	Zyklischer Fehler $\lambda_1 \dots \lambda_n$			b)			a) b)
3	k_{Hz}	Zykl. Fehler in D als Funktion von Hz			c)			
3	k_V	Zykl. Fehler in D als Funktion von V			c)			
1	c	Zielachsfehler	b)	b)	b)	II	II	b)
1	i	Kippachsfehler	b)	b)	b)	II	II	b)
1	h	Höhenindexfehler	b)	b)	b)	II	II	b)
1	e_{SK}	Exzentrizität Stehachse–Kippachse	b)			II		b)
1	e_{SZ}	Exzentrizität Stehachse–Zielachse	b)			II		b)
1	e_{KZ}	Exzentrizität Kippachse–Zielachse	b)			II		b)
2	e_{Hz}, ϵ_{Hz}	Horizontal-Teilkreis-Exzentrizität						b)
2	e_V, ϵ_V	Vertikal-Teilkreis-Exzentrizität			b)			b)
2	t_A, t_ϕ	Amplitude, Phase des Taumelfehlers			b)	d)		c)
2	δm_{Hz}	Skalierung des Hz -Encoders			b)	d)		c)
2	δm_V	Skalierung des V -Encoders			b)	d)		c)
3	$k_{Hz\Delta} = f(Hz)$	Horizontalkreis-Teilungsfehler						c)
3	$k_{V\Delta} = f(V)$	Vertikalkreis-Teilungsfehler						c)
3	δ_V	Zykl. Fehler in Hz als Funktion von V			c)			

Die Abb. 1 zerlegt die TLS-Kalibrierungsaufgabe in drei Bereiche. Zum einen sind dies die Einzelsensoren des TLS zu kalibrieren. Hierzu gehört neben Kalibrierungen der Sensoren der Winkelmessung und Distanzmessung auch die Kalibrierung der Zeitbasis, die für die Synchronität der Einzelsensoren im hoch dynamischen Messprozess in Verbindung mit der Signalverarbeitung verantwortlich ist. Auf das TLS einwirkende Faktoren, wie die eventuelle Kalibrierfunktionen nützlich sein können, sind den Bereichen Umgebungsbedingungen, hier vor allem klimatische Einflüsse, Messobjekt und Datenverarbeitung zuzuordnen.

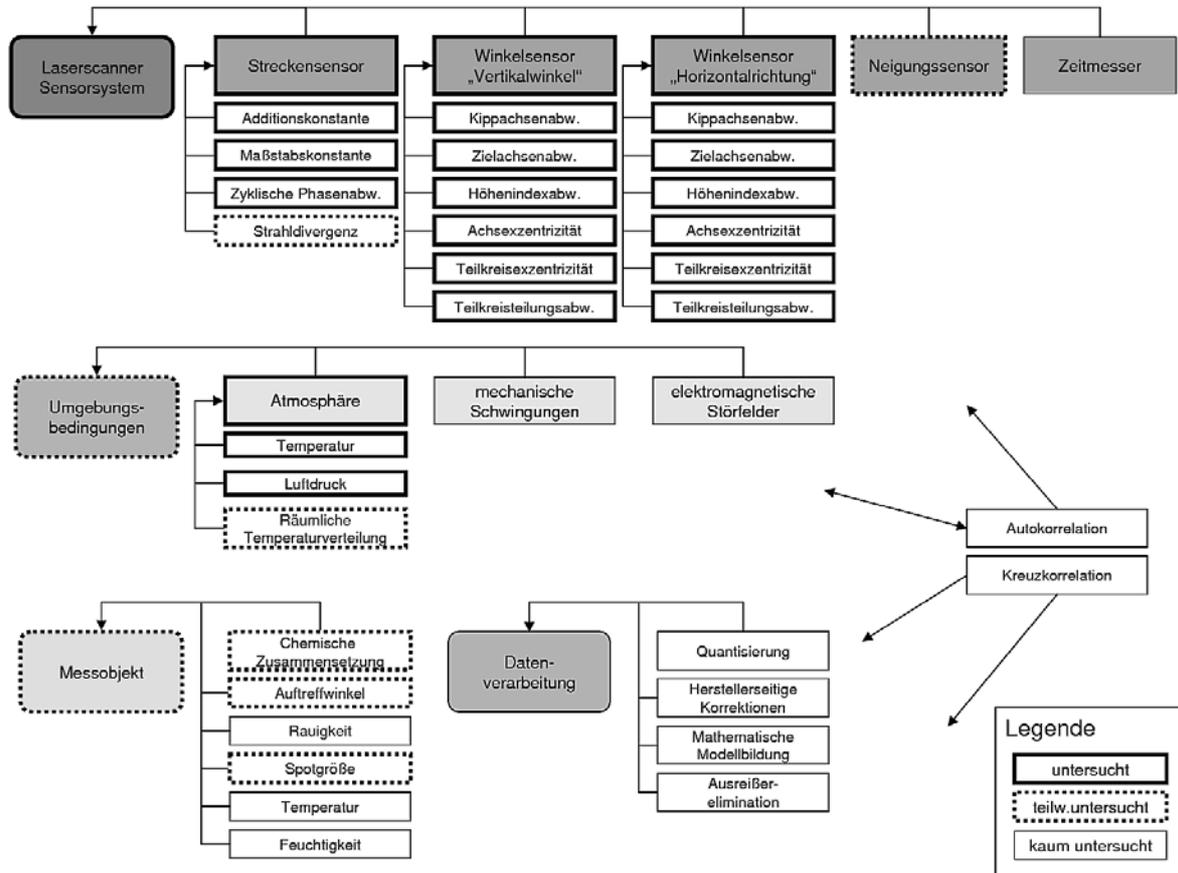


Abb. 1: Mögliche Einflussgrößen auf die verschiedenen TLS-Komponenten (in Anlehnung an HESSE 2008).

Für sehr viele der in Abb. 1 aufgezählten systematischen Abweichungen liegen bereits eine Reihe an Untersuchungsergebnisse vor. Hierzu dürfen auch Untersuchungen und Kalibriermethoden aus der Tachymetrie aufgrund der Ähnlichkeit in der Konstruktion herangezogen werden. Für den Bereich Messobjekt liegen zur Zeit, trotz vielfacher Versuche, keine brauchbaren Werkzeuge bereit; sind aber dringend einzufordern, da ihre Gesamteinflusspotential erheblich ist.

2.2 Konzept zur TLS-Selbstkalibrierung

Mit dem Konzept des i3mainz zur TLS-Kalibrierung wird die möglichst simultane Bestimmung aller Kalibrierparameter insb. für das TLS-Sensorsystem angestrebt. Dabei wird vorerst mehrstufig vorgegangen, um nach und nach die Modellbildung zu verfeinern anhand der Erfahrungen aus den vorherigen Stufen. In der 1. Stufe werden TLS als Servo-Tachymeter mit reflektorlosem Entfer-

nungsmesser aufgefasst („Tachymetermodell“) und bezüglich der Messgröße D nach den hierfür bekannten Methoden kalibriert. Für die Bestimmung der Kalibrierparameter „Achsfehler“ orientiert sich das Konzept an den Arbeiten von (LICHTI & LICHT 2005). Basis hierfür bildet ein Kalibrierraum mit annähernd konstanten Umweltbedingungen hinreichendem 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 soll in späteren Stufen auch die Aufnahme der EDM- und weiterer Parameter erlauben (Tab. 1) sowie die Korrelationen zwischen den polaren Messelementen berücksichtigen.

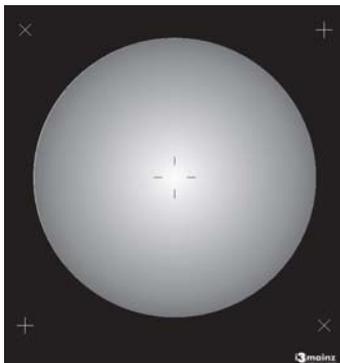


Abb. 2: i3mainz-Zielmarke mit stetig fallendem Grauwertverlauf vom Rand zur Mitte.

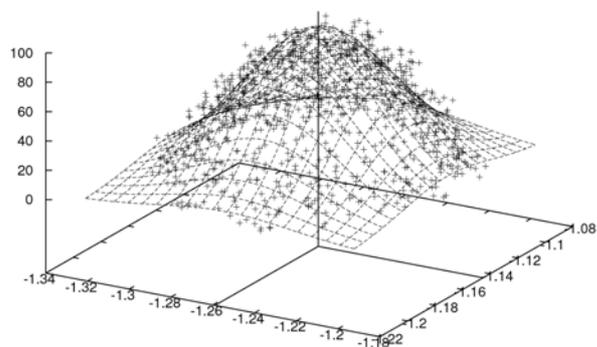


Abb. 3: Zentrumsbestimmung einer i3mainz-Zielmarke mittels „Glocke“-Approximation des „Remissionsberges“ über der Markenebene.

Um in der 1. Stufe die Achsfehler zuverlässig zu bestimmen, ist ein Zielmarkendesign sinnvoll, dass die Trennung zwischen den Richtungs- und den Streckenmessungen aus der 3D-Punktwolke erlaubt und dass unempfindlich auf Schrägansichten und Teilabdeckungen reagiert. Das optimierte Zielmarkendesign (KERN & HUXHAGEN 2008) verwendet einen vom schwarzen Markenrand zum weißen Mittelpunkt hin ansteigenden Helligkeitsverlauf (Abb. 2). Der Scan solch einer Marke ergibt einen „Intensitätsberg“ über der Markenebene mit stetigem Übergang, der auch bei Teilabdeckungen und Schrägansichten gut durch eine „Glocke“ approximiert werden kann (Abb. 3). In der Regel lässt sich so das Markenzentrum mit besser als 1mm Genauigkeit tachymetrisch bestimmen.

3 Vorschlag für eine TLS-Prüfrichtlinie

Als Konkretisierung und Erweiterung des Vorschlages von (HEISTER 2006) wird hier ein Konzept für Prüfverfahren vorgestellt werden, das sich ähnlich den VDI/VDE-Richtlinien (VDI/VDE 2002 & VDI/VDE 2006) für optische 3D-Messsysteme mit flächenhafter Antastung auf die Bestimmung und Berechnung weniger Kennwerte beschränkt. Die Kennwerte sind dabei so definiert, dass sie wenig Messaufwand benötigen und nur geringe Anforderungen an die Prüfkörper und -situation stellen. Zugleich aber sind die Kennwerte so ausgewählt, dass sie zur Qualitätsbeurteilung für praktische Fragestellungen und Anwendungen aussagekräftig sind. Sie bilden aus vielerlei pragmatischen Gründen nur einen, möglichst breiten, Ausschnitt dessen ab, was zur vollständigen Beschreibung der Messqualität eines TLS nötig wäre.

Die Kennwerte ergeben sich entweder aus den Messinformationen einer „Einzelansicht“, also aus einer einzelnen von einem Standpunkt aus beobachteten unreferenzierten Punktwolke, oder aus der Kombination mehrerer referenzierter Ansichten bzw. Punktwolken. Die Messungen sind unter denen vom Hersteller definierten Betriebs- und Umweltbedingungen durchzuführen. Als Prüfkörper werden Kugeln verwendet, deren Dimensionierung und Materialparameter vom Hersteller näher spezifiziert werden kann. Grundsätzlich sind Approximationen im Sinne der Minimierung der Fehlerquadratsumme durchzuführen.

3.1 Kenngrößen

Die Kenngrößen des Prüfverfahrens sind die Antastabweichung, die Kugelabstandabweichung, die Radiusabstandsabweichung und das Auflösungsvermögen. Bis auf das Auflösungsvermögen sollten die Kenngrößen sowohl für Einzelansichten als auch für Mehrfachansichten bestimmt werden.

3.1.1 Antastabweichung

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 einer 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 R im Sinne einer Standardabweichung der $n = m \cdot k$ Abstände r für k Kugeln mit je m Antastpunkten herangezogen.

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

Die Antast-Messunsicherheit u_R ergibt sich als Mittelwert der Standardabweichungen der geschätzten Radien von k Kugeln (HEISTER 2006).

3.1.2 Kugelabstandsabweichung

Die Kugelabstandsabweichung ΔL soll exemplarisch die **Maßtreue** des TLS im Messvolumen abschätzen und überprüft so die Fähigkeit zur Rückführbarkeit auf ein Längennormal. Zur Bestimmung können z.B. Kugelpaare, gebildet aus zwei Kugeln in einem definierten/kalibrierten Abstand („Hantel“), an sieben beliebigen Positionen mit verschiedenen Orientierungen im Messvolumen angemessen werden. Es ist aber auch ein Passkugelfeld mit mindestens 8 Kugeln (Quadereckpunkte) verwendbar. 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. Die mittlere Kugelabstandsabweichung ΔL berechnet aus den p Kugelabstandsabweichungen ΔL_j , abgeleitet aus den gemessenen Abständen l_{mj} und den Sollabständen l_{kj}

$$\begin{aligned} \Delta L_j &= l_{kj} - l_{mj} \\ \Delta L &= \frac{1}{p} \sum_j^p \Delta L_j \end{aligned} \quad (2)$$

Die Abstands-Messunsicherheit u_L liefert die Bestimmungsgüte (HEISTER 2006).

Sind anstelle der Kugelabstände die 3D-Koordinaten der Kugelpositionen eines Passkugelfeldes mit übergeordneter Genauigkeit bekannt, so kann die Kugelabstandsabweichung ΔL alternativ aus der Transformation der Kugelmittelpunkte auf die Sollpositionen abgeleitet werden. Zu berechnen ist eine 6-Parameter-Transformation mit festem Maßstab! Die Standardabweichungen der gemessenen

Koordinatenwerte a posterior, im Sinne eines Punktfehlers, tritt dann an die Stelle von ΔL .

$$\Delta L = \sqrt{s_x^2 + s_y^2 + s_z^2} \quad (3)$$

Der Transformationsansatz hat den Vorteil, dass er in einem viel umfassenderen Sinne alle Orientierungen der Kugelpaare bewertet. Zudem beinhaltet die Formel (2) die Gefahr, dass bei der gleichzeitigen Verwendung mehrerer Kugeln stochastisch abhängige Paare in die Berechnung einfließen und so das Ergebnis nach Belieben des Auswerters „verzerren“.

3.1.3 Kugelradienabweichung

Die Kugelradienabweichung R_K als Mittelwert der Differenzen v_i zwischen geschätzten und Sollradius von k Kugeln wird als weitere Kenngröße berechnet. Sie spiegelt etwaige systematische **Formabweichungen im Lokalen** wieder.

$$R_K = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k v_i \quad (4)$$

Die Kugelradienabweichung kann ohne nennenswerten Mehraufwand aus den Beobachtungen zur Bestimmung der Antast- und Kugelabstandsabweichung berechnet werden.

3.1.4 Auflösungsvermögen

Die Kenngröße Auflösungsvermögen soll die Fähigkeit des TLS quantitativ beschreiben, inwieweit eine dreidimensionale Oberflächenstruktur, z.B. Mauerfugen oder in Stein gemeißelte Strukturen, durch die abgetastete Punktmenge diskretisiert werden kann. Anders ausgedrückt: Wie breit muss eine Mauerfuge sein, sodass sie zweifelsfrei als solche in der Punktwolke erkannt werden kann. Das Auflösungsvermögen wird u.a. beeinflusst durch die Abtastrate (Winkelinkremente), die Strahldivergenz, dem Auftreffwinkel und der Fähigkeit der Signalverarbeitung, Echos in Mischsignalen voneinander zu trennen. Diese Einflussgrößen verändern sich mit der Variation der Messentfernung, so dass das Auflösungsvermögen indirekt eine Funktion der Messentfernung ist. Zudem kann eine Abhängigkeit von der Orientierung des Spaltes zur Abtastrichtung nicht ausgeschlossen werden.



Abb. 4: BÖHLER-Sterne zur Bestimmung des Auflösungsvermögens. Links: Viertelkreise mit $\gamma=15^\circ$ und 6° , $b=176\text{mm}$; rechts: Vollkreis mit $\gamma=7,5^\circ$, $b=62\text{mm}$

Das Auflösungsvermögen lässt sich mittels eines BÖHLER-Sterns bestimmen (BÖHLER & BORDAS VICENT & MARBS 2003). Ein BÖHLER-Stern besteht aus einer planaren Vorder- und Rückfront aus dünnem, diffus streuendem Material, die parallel zueinander im Abstand b angeordnet sind (Abb. 4). Die Vorderfront (Schablone) hat regelmäßig angeordnete Öffnungen (Spalten), zweckmäßigerweise in Gestalt von Kreissektoren mit dem Zentriwinkel γ . Im Zentrum S_M der zusammenlaufenden Sektoren bleibt fertigungstechnisch ein Steg mit Radius r_0 bestehen. Durch die Gestalt und kreisförmige Anordnung der Spaltensektoren werden sämtliche Spaltenbreiten von $r_0\gamma$ bis $r_{max}\gamma$ in allen Raumlagen realisiert. Es sind Ausprägungen als Voll-, Halb- oder Viertelkreis denkbar (Abb. 4). Der BÖHLER-Stern wird in Kippachshöhe des TLS streng orthogonal zum TLS ausgerichtet und mit höchster Abtastrate abgescannt. Das Auflösungsvermögen AV kann wie folgt definiert werden:

Definition: Das Auflösungsvermögen AV ist durch diejenige minimale Spaltenbreite $r_{min}\gamma$ am BÖHLER-Stern gegeben, bei dem die Punktwolkenmenge im Abstand r_i vom Zentrum S_M in die zur Vorderfront gehörige und die zur Rückfront gehörige Punktwolkenteilmengen mit der Irrtumswahrscheinlichkeit α getrennt werden kann.

Bei der praktischen Auswertung werden Kreisringe $r_i+\Delta r$ ausgeschnitten und deren Abstände zur Vorderfront bestimmt. Die Abstände sind aufsteigend zu sor-

tieren. Die ersten 50% der Punkte in dieser Reihe werden der Vorderfront zugeordnet und die der verbleibenden 50% der großen Abständen der Rückfront. Diese Aufteilung ist möglich, da durch die symmetrische Verteilung der Stege und Spalten theoretisch gleich viele Punkte auf der Vorder- und der Rückfront gemessen sein müssen. Für beide Teilpunktmengen wird der Median der Abstände berechnet. Die Mediane dienen als robuste Schätzwerte für die Entfernungen der Fronten zum TLS, die aufgrund der Mischsignale am Übergang zwischen Steg und Spalt zwangsläufig stark verfälscht sind. Die Differenz dieser Mediane wird auf signifikante Abweichung von Null getestet. Bei dem Kreisring r_{min} , bei dem eine signifikante Vorder-/Hintergrund-Trennung angezeigt wird, ist das gesuchte Auflösungsvermögen

$$AV = \left(r_{min} + \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \gamma \quad (5)$$

mit der Wahrscheinlichkeit $1-\alpha$ nachgewiesen.

3.2 Exemplarische Prüfungen

Auf Datensätze dreier Laserscanner, die im Rahmen des i3mainz-Prüfparcours angefallen sind, wurde das oben dargestellte Prüfverfahren für Einzelansichten angewendet (Tab. 2). Zum Einsatz kamen Kugeln mit einem Durchmesser von 76,2mm. Die Entfernungen der Kugeln im Prüffeld reichen von 0,9 bis 3,5 m.

Tabelle 2: Angaben zu den Prüflingen

	HDS 6000	HDS 3000	FARO LS880
Streckenmessverfahren	Phasen~	Impuls~	Phasen~
Prüfentfernung d	30 m	60 m	10m
Herstellerangaben			
Genauigkeit – Position (1σ)	6 mm	6 mm	
Modeled Surface precision/noise (1σ)	2 mm	2 mm	
Systematischer Distanzmessfehler			± 3 mm @ 10 m
Reproduzierbarkeit (RMS, ungefiltert)			4,2 mm @ 10 m (90% Reflektivität)

In der Tab. 3 sind die Prüfergebnisse zusammengestellt. Alle von den verschiedenen Autoren favorisierten Berechnungsarten für die Kennwerte sind ebenfalls

zur vergleichenden Beurteilung darin aufgeführt. Zwei Auffälligkeiten können festgestellt werden. Bei der Kugelabstandsabweichung schneidet der HDS 3000 mindestens um den Faktor zwei besser ab als der HDS 6000 und FARO LS880 trotz der doppelten Messentfernung. Dies korrespondiert nur wenig mit den Herstellerangaben, die für alle Geräte eine gleich gute Leistungsfähigkeit vermuten lassen. Interessant ist auch, dass die Kugelradien für beide Phasendifferenz-Geräte deutlich systematisch vom Sollradius abweichen.

Tabelle 3: Exemplarische Prüfergebnisse

Kenngröße nach	Formel	HDS 6000 [mm]	HDS 3000 [mm]	FARO LS880 [mm]
Antastabweichung R				
[VDI/VDE]	$r_{max} - r_{min}$	10.1	9.7	14.2
[Kern08]	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^2}$	1.5	1.6	1.7
Antast-Messunsicherheit u_R				
[Heister06]	$\sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_{Radius,i}^2}$	0.4	0.6	0.2
Kugelabstandsabweichung ΔL				
[VDI/VDE]	$\Delta L_{max} - \Delta L_{min}$	3.5	1.9	8.9
[Heister06]	$\frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \Delta L_j $	1.8	0.6	2.0
6P-Trans. [Kern08]	$\sqrt{s_x^2 + s_y^2 + s_z^2}$	1.9	0.8	4.8
Abstands-Messunsicherheit u_L				
[Heister06]	$\sqrt{\frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \Delta L_j^2}$	2.2	0.8	2.0
Kugelradiusabweichung R_K				
[Kern08]	$\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k v_i$	+2.40	+0.49	+1.93
Auflösungsvermögen AV				
[KernHuxhagen08]	$ f(r_i) - b(r_i) \stackrel{r_i \rightarrow min}{<} T$			
	@6m	4	6	4
	@21m	12	4,5	13

Die Tab. 3 zeigt deutlich, dass die Berechnung der Kennwerte nach einheitlichen Regeln erfolgen muss, um einen korrekten Gerätevergleich zu bekommen. Die

in der VDE/VDI-Richtlinie vorgegebene Spanne aus minimaler und maximaler Abweichung scheint weniger plausible Werte zu produzieren als die anderen Berechnungsarten.

Bei der Beurteilung der Kenngröße Auflösungsvermögen zeigt sich für die Untersuchungsentfernungen von 6 und 21 m recht deutlich der Einfluss der Strahldivergenz. Aufgrund der Strahldivergenz sollte der HDS6000 in 6 m Entfernung eine Auflösung von 4,1 mm, der HDS 3000 von kleiner 6 mm und der FARO LS 880 von 4,5 mm. In 12 m Entfernung liegen die theoretischen Werte bei 7,4 mm (HDS 6000), kleiner 6 mm (HDS 3000) und 8,3 mm (FARO LS880). Bei großer Messentfernung werden somit noch weitere Einflüsse neben der Strahldivergenz wirksam, die das Auflösungsvermögen vermindert. Beim HDS 3000 wird die Fokussierung des Laserstrahls, die bei ca. 18 m liegt, deutlich.

4 Zusammenfassung

Mit dem Aufsatz wurde versucht den Themenkreis Untersuchen, Kalibrieren und Prüfen von TLS zu systematisieren und bestehende Ansätze zusammenzutragen. Es wurde deutlich, dass es bislang an Ansätzen fehlt, die der Vielfalt an Gerätetypen gerecht wird und alle Sensorkomponenten und deren Störfaktoren gleichrangig behandeln.

Es wurde ein konkretes Prüfverfahren mit den Kenngrößen Antastabweichung, Kugelabstandsabweichung, Kugelradienabweichung und Auflösungsvermögen vorgestellt. Anhand von exemplarischen Messungen und Berechnungen für drei TLS-Systeme wurde das Prüfverfahren hinsichtlich Plausibilität und Aussagekraft untersucht. Die Resultate sind sehr ermutigend, lassen sie sich doch grob in Einklang mit den Qualitätsangaben der Hersteller und den Erfahrungen mit dem i3mainz-Parcours bringen. Bei genauerer Analyse der ersten Ergebnisse ist das Prüfverfahren aber noch weiter zu konkretisieren. So ist z.B. für die Prüfkugeln ein Mindestdurchmesser in Abhängigkeit vom Messvolumen festzusetzen, um praxisirrelevante Situationen zur Beurteilung der Antastqualität zu unterbinden.

Das dargelegte Verfahren zur Auflösungsvermögen steht noch am Anfang seiner Entwicklung. Ungeklärt ist z.B. noch der Einfluss des Abstandes zwischen Vorder- und Rückfront. Auch arbeiten die Autoren noch ein einem optimierten Spalt-Steg-Design für den BÖHLER-Stern.

Literatur

- Böhler, W.; Bordas Vicent, M.; Marbs, A. (2003): *Investigation Laser Scanner Accuracy*. In: Proceedings of XIX. CIPA Symposium, Antalya.
- 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
- Hesse, Ch. (2008): Hochauflösende kinematische Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern. (Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover, Nr. 268).
- Kern, F.; Huxhagen, U. (2008): Ansätze zur Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern. In: Boochs, F. (Hrsg.) ; Klonowski, J. (Hrsg.) ; Müller, H. (Hrsg.): Aktuelle Arbeiten auf dem Gebiet der Informations- und Messtechnik – Festschrift zum 10. Jahrestag der Gründung des i3mainz. Shaker (Schriftenreihe Informations- und Messtechnik Band 7)
- 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 Band 51/2006). S. 15–34
- Reshetyuk, Y. (2006): *Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners*. Stockholm: Royal Institute of Technology. – Licentiate thesis in Geodesy
- 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)
- VDI/VDE (2002): *Optische 3D-Messsysteme – Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung*. VDI/VDE-Richtlinie 2634 Blatt 2
- VDI/VDE (2006): *Optische 3D-Messsysteme – Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung in mehreren Einzelansichten*. VDI/VDE-Richtlinie 2634 Blatt 3 - Entwurf