

Genauigkeitsvergleich verschiedener Zielmarkendesigns

Fredie KERN, Bettina SIEGRIST, Uwe HUXHAGEN und Stefan MEHLIG

Zusammenfassung

Für die Referenzierung von TLS-Punktwolken werden sehr verschiedene Zielmarkentypen eingesetzt. Welche Zielmarken unter theoretischen Gesichtspunkten und welche unter Praxisbedingungen die besten Resultate liefern, wird in diesem Umfang hiermit erstmals erörtert. Ausgehend von der Entwicklung eines eigenen Zielmarkendesigns der Autoren zur genauen Zielrichtungsbestimmung im Zusammenhang mit der TLS-Kalibrierung, werden vier Zielmarkendesigns miteinander verglichen. Hierzu wurde ein einfaches Experiment durchgeführt, bei dem die Zentren von jeweils acht Marken gleichen Typs auf ihre Sollkoordinaten transformiert werden. Da einige Zielmarkendesigns softwareübergreifend ausgewertet werden können, liefert die Untersuchung zugleich Erkenntnisse über die Güte der in den Auswertepakten enthaltenen Algorithmen zur Zentrumsbestimmung. Als Fazit der Untersuchungen wird das Zielmarkendesign „weißer Kreis auf schwarzen Grund“ zur Anwendung empfohlen.

1 Motivation und Hintergrund

Für die Registrierung von TLS-Punktwolken zueinander oder in ein übergeordnetes Koordinatensystem lassen sich zwei Vorgehensarten unterscheiden. Bei der Standardmethode werden entweder spezielle TLS taugliche Zielmarken zur Identifikation identischer Passpunkte verwendet oder, auf zielmarkenfreie Weise, identische Punktwolkenbereiche im Überlappungsbereich benachbarter Scanaufnahmen genutzt. Ein typischer Vertreter für eine zielmarkenfreie Referenzierung ist der ICP-Algorithmus, der aber nur ein möglicher Ansatz ist, wie in (DOLD&RIPPERA&BRENNER 2007) dargestellt wird. Der zweite grundsätzliche Ansatz nutzt zusätzliche Sensoren am TLS-System, wie z.B. GPS, um eine direkte Georeferenzierung zu realisieren. Der Fokus dieses Artikels liegt auf der Betrachtung der zielmarkengestützten Referenzierung zur Beurteilung der Messqualität von TLS-Systemen im Rahmen von Kalibrierungsmessungen; ist also auf den Nahbereich beschränkt.

2 Vorhandene Zielmarkendesigns

Da es mit Laserscannern nicht möglich ist, diskrete Punkte gezielt anzumessen, bedient man sich künstlicher Zielmarken, die in der Objektszene platziert werden. So kann aus den Punktwolken heraus auf die markierten Einzelpunkte (Markenzentren) geschlossen werden, um dann beispielsweise im Rahmen einer Selbstkalibrierung, wie in (KERN & HUXHAGEN 2008a) beschrieben, Instrumentenfehler bestimmen zu können. Die dabei zum Einsatz kommenden Zielmarkendesigns und Methoden zum Bestimmen der Markenzentren aus einer rasterförmigen gemessenen Punktwolkensequenz sind sehr vielfältig. Tab. 1 gibt einen Überblick. Hiernach lassen sich die Ziele in die Gruppe derjenigen Marken einteilen, bei der das Zentrum anhand der Punktwolkengeometrie abgeleitet wird und in die Gruppe,

welche sich auf die Remissionswerte stützt, in dem sie z.B. Remissionskanten identifiziert und segmentiert; eine in der Photogrammetrie etablierte und erfolgreiche Methode.

Tabelle 1: Charakteristika und Klassifizierung verschiedener Zielmarkendesigns (j=ja, n=nein, m=möglich, t=teilweise).

Design	invariant gegenüber						Art der Zentrumsbestimmung Algorithmik	Besonderheiten
	Aspektwinkel	Teilabdeckung	Remissionskontrast	Störeffekte Streckensensor	codierbar	automatische Erkennung		
A. Geometrische Referenzen (räumliche Zielmarken)								
Kugel	j	j	j	n	m	m	Kugel-approx.	unhandlich bei großem Durchmesser, teuer (KERN 2003, MECHELKE 2008)
Zylinder	t	j	j	n	m	m	Zylinder-approx.	Referenz ist eine Raumgerade (1 Freiheitsgrad), unhandlich, teuer
Ebene	n	j	j	n	n	j	Ebenen-approx.	Referenz ist eine Ebene (2 Freiheitsgrade), unhandlich, teuer (RIETDORF 2005)
Objektraumreferenzen	n	n	n	n	n	t	Ebenen-, Kugel-approx., ICP	ungenau (KERN 2003) idR gute Startwerte erforderlich (DOLD&RIPPERA&BRENNER 2007)
Retromarken	n	n	n	j	n	j	max. Remission	abhängig v. Laserwellenlänge und Farbtiefe der Remissionswerte
B. Bildmarken (ebene Zielmarken)								
Weißer Kreis	n	n	n	j	m	m	Remissions-schwerpunkt, Kreisapprox.	preiswert
Black&White (Schachbrett, Raute)	n	n	n	j	m	m	Kantenschnitt	rotationsvariant, preiswert, (MECHELKE 2008)
konzentrische Kreise	n	n	n	j	m	j	zwei Kreis-approx.	preiswert, zuverlässig (ELING & KUTTERER 2007)
Remissions-glocke	t	j	t	j	m	j	„Glocken“-approx.	preiswert, relativ unabhängig vom Streckensensor (KERN 2008)

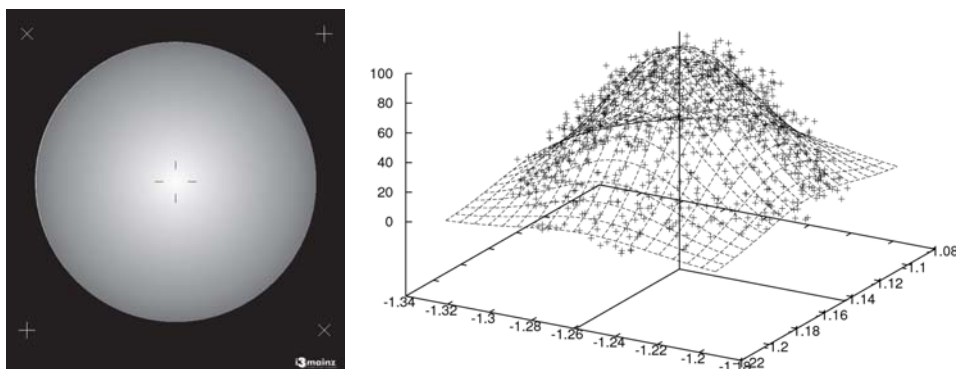
Allgemein lassen sich die verschiedenen Zielmarkendesigns wie folgt charakterisieren (ELING 2009): Vorteil von geometrischen Referenzen ist eine gleich bleibende Silhouette, die relativ unabhängig von der Standpunktwahl ist. Ideal ist hierbei die Kugel, die von allen Seiten gleich groß ist und gleich aussieht. Bei Bildmarken kann der Nachteil der variierenden Silhouette durch Montage auf einen, um das Markenzentrum kipp- und schwenkbaren,

 Genauigkeitsvergleich verschiedener Zielmarkendesigns

Zielmarkenträger behoben werden. Damit lässt sich die Marke für jeden Standpunkt neu und optimal ausrichten. Bildmarken erfordern zudem ein TLS, das die Remissionswerte mit hoher Auflösung, z.B. 12bit, erfasst und speichert.

Für alle Zielmarkendesigns ist zu fordern, dass sie auch mit anderen Messtechniken, wie z.B. mit einem Tachymeter oder einer Messkamera, kooperieren und ein dem TLS entsprechendes Genauigkeitsniveau für die Zentrumsbestimmung gewährleisten können. Bei geometrischen Referenzen, wie z.B. Kugeln, ist dies in der Regel nur durch eine Zwangszentrierung und die Berücksichtigung von Exzentrizitäten erreichbar. Erfahrungswerte aus verschiedenen Projekten des i3mainz zeigen, dass sechs bis acht gut verteilte Zielmarken für eine genaue und zuverlässige Referenzierung ausreichend sind.

Für das Verfahren der Selbstkalibrierung (KERN&HUXHAGEN 2008b) sind an das Zielmarkendesign besondere Ansprüche zu stellen, um Ergebnisse zu erhalten, die nur wenig durch Störmessungen, wie z.B. Mischsignale und systematische Messabweichungen (beispielsweise materialabhängige Offsets) beeinflusst sind.



i3mainz-Zielmarke mit vom Rand zum Zentrum stetig fallendem Reflektionsgrad.

Zentrumsbestimmung einer i3mainz-Zielmarke mittels „Gauß-Glockenkurve“-Approximation des normierten „Remissionsberges“ über der Markenebene.

Abb. 1: i3mainz-Zielmarkendesign (KERN 2008), (KERN & HUXHAGEN 2008a)

Das in Abb. 1 illustrierte Zielmarkendesign des i3mainz ist daher motiviert durch folgende Anforderungen:

- geeignet für Messungen zur Kalibrierung des TLS-Achssystems
- keine harte geometrische oder radiometrische Übergänge (Kanten)
- hohe Richtungsgenauigkeit (Polarelemente)
- möglichst unabhängig von der Streckenmessung
- geeignet für Schrägansichten und Teilabdeckungen der Zielmarke
- automatisierbare Auswertung
- geringe Kosten

Im Kapitel 4 wird anhand eines einfachen Messexperimentes untersucht, inwieweit dieses Zielmarkendesign den Anforderungen, insb. der dritte Punkt, im Vergleich mit anderen Designs gerecht wird.

3 Theoretische Genauigkeitsbetrachtungen

Für eine grundsätzliche, theoretische Betrachtung der erzielbaren Genauigkeit beschränken wir uns auf folgende vier grundsätzlich unterschiedliche Zielmarkendesigns: die „Kugel“ als optimale geometrische Referenz, die „Black&White“-Marke (in den Ausprägungen „Schachbrett“ und „Raute“), den „weißen Kreis“ als von den Herstellern Leica Geosystems, Zoller+Fröhlich und Faro empfohlenen Standardzielmarke sowie die neue „i3mainz“-Zielmarke.

Betrachtet werden soll der maximale bzw. durchschnittliche Verschiebungsbetrag, den eine Marke bezüglich eines diskreten Abtastmusters der Rasterweite w erfahren darf, ohne dass sich dieser in den Remissionswerten der Messpunkte bei den Bildmarken, bzw. den Koordinaten der Messpunkte bei der Kugel, bemerkbar machen würde. Wie viel Spielraum hat also das jeweilige Markendesign aufgrund des Samplings? Für die Bildmarken lassen sich die maximale und die durchschnittliche Zentrumsabweichung teilweise exakt angeben (Tab. 2). Wobei folgende Grundformel zur Beschreibung der Abhängigkeit von der Abtastweite bzw. Ortsauflösung w angewendet wird.

$$\delta = \delta(w) = \frac{1}{2} \cdot k \cdot w$$

Tabelle 2: Abschätzung der maximalen und durchschnittlichen Zentrumsabweichung δ bei verschiedenen Zielmarkendesigns.

	B&W Schachbrett	B&W Raute	Weißer Kreis	Kugel	i3mainz
$\delta_{\max}, \bar{\delta}$	$k = \sqrt{2}$	$k = 1$	$k < 1$	$k \ll 1$	$k \ll 1$

Für die Kugel und die i3mainz-Marke werden rotationsinvariante Flächen approximiert, deren Bestimmungsgüte weniger durch das Abtastmuster beeinflusst wird als durch das Messrauschen und durch Störeffekte. Pauschal kann bei Annahme von idealen Bedingungen (Laserspotgröße $\ll w$, kein Messrauschen, keine Störeffekte) von den in Tab. 2 dargestellten Abweichungen dieser zwei Marken ausgegangen werden. Durchgeführte Simulationsrechnungen untermauern diese Angaben.

Nach der Analyse der Tab. 2 ist das Markendesign „Black&White“, ob nun parallel oder in einem 45°-Winkel zur Abtastrichtung orientiert, weniger empfehlenswert. Der „weiße Kreis“ ist deutlich weniger verschiebbar, insb. dann, wenn sehr viele „Treffer“ ($n > 100$) die Marke diskretisieren. Auch die Marken „Kugel“ und „i3mainz“ werden bei großen Trefferzahlen ($n > 1000$) faktisch unverrückbar. Für die „i3mainz“-Marke gilt dies aber nur für eine Verschiebung orthogonal zur Messrichtung; in Messrichtung ist sie deutlich weniger stabil, wie man sich leicht überlegen kann.

4 Das Messexperiment

4.1 Messaufbau

Vier verschiedene Zielmarkendesigns, die geeignet scheinen den Anforderungen aus Kap. 1 gerecht zu werden, wurden in einem Messexperiment hinsichtlich ihrer Genauigkeit miteinander verglichen. Auf einem Poster (2,30 m x 0,81 m) wurden jeweils acht Zielmarken der Typen „i3mainz-Zielmarke“ (i3ZM), „Black&White“ (B+W) und „weißer Kreis“ (WK) sowie Positionsmarken für acht Mensi-Referenzkugeln (Kugel), mit einem Radius von 38,6 mm, aufgedruckt bzw. aufgeklebt. Die Anordnung ist so gestaltet, dass sich für jeden Zielmarkentyp ein vergleichbares Muster ergibt: vier Marken einer Sorte bilden eine Reihe und die anderen vier Marken eine Raute. Damit wird der Einfluss verschiedener Abstände und Ausrichtungen zwischen den Marken auf das Transformationsergebnis der Auswertung weitestgehend eliminiert. Durch die auf wenige Quadratmeter beschränkte Testkonfiguration, was nur einem relativen kleinen Ausschnitt des Messvolumens des Laserscanners entspricht, werden zudem Einflüsse aufgrund vorhandener Achsfehler und sonstiger Instrumentenfehler minimiert. Diese Messanordnung erlaubt also treffendere Aussagen zum Genauigkeitseinfluss des Zielmarkendesigns als ein 3D-Zielmarken-Testfeld, das das gesamte Messvolumen überstreicht.

Die Zielmarkenzentren sind photogrammetrisch mit einer Positionsgenauigkeit von 0,3 mm in einem dem Poster eingeschriebenen lokalen 2D-Koordinatensystem koordiniert worden, so dass entsprechende Sollkoordinaten verfügbar sind.

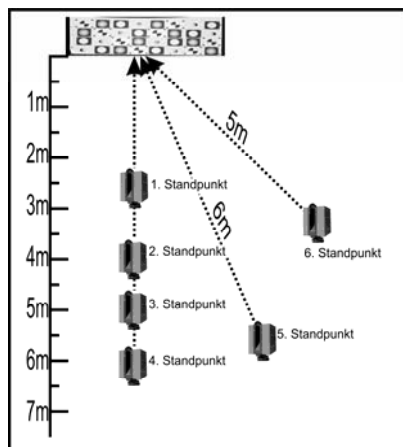


Abb. 2: Messkonfiguration des Experimentes mit einem Leica HDS6000 zur Genauigkeitsbeurteilung verschiedener Zielmarkendesigns

Das Zielmarken-Poster wurde an einer Metallwand mit Magneten befestigt und mit einem Leica HDS6000 in den Messentfernungen 2, 4, 5 und 6 Meter mit der Abtastrate "highest" (3 mm auf 10 m Entfernung) abgescannt (Abb. 2). Das Gerät wurde mit der Dosenlibelle horizontalisiert. Mit den Standpunkten 1 bis 4 wurde eine orthogonale und mit den Standpunkten 5 und 6 eine schräge Aufnahme des Markenfeldes realisiert.

4.2 Auswertung

Die sechs Aufnahmen wurden mit drei Softwaresystemen ausgewertet: Mit der Eigenentwicklung i3mainzScene v1.019, FaroScene v4.6 und Cyclone v6.0.2. Nicht mit jeder Software konnten alle vier Zielmarkendesigns ausgewertet werden, da entsprechende Algorithmen nicht implementiert sind. Tab. 3 zeigt die möglichen Kombinationen.

Tabelle 3: Übersicht zur Auswertfähigkeit verschiedener Zielmarkendesigns der eingesetzten Softwaresysteme (auto = automatische, interaktiv = manuelle Feinselektion).

	B+W	Kugel	i3ZM	WK
i3mainzScene		auto	auto	auto
FaroScene	auto	auto	(auto)	auto
Cyclone	auto	interaktiv		

Für fast alle Zielmarkendesigns erlauben die Systeme eine teilautomatische Zentrumsbestimmung, die sich in zwei Phasen gliedert. Der Auswerter markiert zuerst grob die Stelle in der Punktwolke, an der sich eine Zielmarke befindet. Die Identifikation findet also nicht automatisch statt. Anhand des vom Nutzer angepickten, genäherten Zentrums wird automatisch das genaue Zielmarkenzentrum durch Interpretation der Remissionswerte oder der lokalen Punktwolkengeometrie bestimmt. Dabei sind diejenigen Messpunkte zu detektieren, die auch tatsächlich auf der Zielmarkenoberfläche liegen. Die zum Einsatz kommenden Algorithmen müssen daher und aufgrund der vielfältigen Störeinflüsse, wie z.B. den „Kometenschweif“ oder der „Zipfel“ bei einer Kugel, über eine robuste Ausreißerelimination verfügen. Für die Kugelzentrumsbestimmung mit Cyclone ist das händische Freischneiden der „echten“ Kugelpunkte zwingend erforderlich, da die dort implementierte Kugelapproximation sehr empfindlich auf „falsche“ Kugelpunkte reagiert. Ein spezieller Algorithmus für die i3mainz-Zielmarken ist in FaroScene nicht vorhanden. Dennoch ist eine Auswertung möglich, wenn die i3mainz-Zielmarken als „weißer Kreis“ behandelt werden.

Bei der Ergebnisbeurteilung ist zu beachten, dass i3mainzScene und FaroScene auf die von Cyclone exportierten Punktwolken im PTS-Format angewiesen sind. Sie verarbeiten also Fremddaten, deren Güte eventuell von den Cyclone-intern abgespeicherten Messinformationen abweichen könnte. Insbesondere die Skalierung der Remissionswerte und damit der Remissionskontrast könnten sich beim Export daher verändert haben.

5 Ergebnisse

Für den Zielmarkenvergleich bezüglich ihrer 3D-Genauigkeit sind die jeweiligen Zentrumskoordinaten eines Markendesigns und eines Standpunktes auf die Sollkoordinaten transformiert worden, wobei keine Maßstabsunbekannte geschätzt wurde, da eine solche auf den kurzen Abständen zwischen den Marken kein sinnvolles Ergebnis liefern kann. Als Gütemaß kann aus der 3D-Transformation die Standardabweichung der Gewichtseinheit

Genauigkeitsvergleich verschiedener Zielmarkendesigns

herangezogen werden, wenn alle Messgrößen als gleichgenau angesetzt werden. Diese Annahme trifft in vorliegendem Fall zu.

Um eine Aussage über die Qualität der Zielrichtungsgenauigkeit zu erhalten, wurden die Markenzentren in die Polarelemente Horizontalrichtung, Vertikalwinkel und Raumstrecke umgerechnet und ausschließlich die Winkelwerte im Sinne einer freien Stationierung (3D-Netzausgleichung ohne Strecken, inkl. Stehachsschiefen) in einer 3D-Ausgleichung, bezogen auf die Sollkoordinaten, ausgewertet. Auf diese Weise sind theoretisch weitestgehend alle Messunsicherheiten und Systematiken, die von der reflektorlosen Streckenmessung herrühren, ausgeschaltet. Die jeweils sechs Standpunkte eines Markendesigns sind gemeinsam ausgeglichen worden. Auch hier kann die Standardabweichung der Gewichtseinheit als Vergleichsgröße zur Qualitätsbeurteilung herangezogen werden, wenn gleichgewichtige Beobachtungen eingeführt sind.

Die Auswertungsergebnisse mit den drei verschiedenen Softwaresystemen sind anhand zweier Diagramme (Abb. 3 und 4) dargestellt. Es fällt auf, dass die 3D-Genauigkeit der „Kugeln“ deutlich schlechter ist als die der Bildmarken und eine Tendenz zur Abhängigkeit mit der Messentfernung besteht: im Nahbereich sind sie deutlich schlechter. Bei den Bildmarken lassen sich mit dem „weißen Kreis“, mit Abstand die besten Ergebnisse erzielen. Die neu konzipierten „i3mainz“-Marken sind in diesem Experiment nicht besser als die „Black&White“-Zielmarken. Der theoretische Vorteil des Remissionsberges kommt also unter Praxisbedingungen nicht zum Tragen; das gilt auch für die „Kugeln“. Offensichtlich hat das Messrauschen einen stärkeren Anteil an der Bestimmungsgenauigkeit als vorab vermutet. Der „weiße Kreis“ erscheint diesbezüglich weniger empfindlich und liefert selbst bei schräger Ansicht (Standpunkt 5 und 6) hervorragende Genauigkeiten. Die „i3mainz“-Marken kommen ebenso, wie erhofft, mit Schrägansichten klar und haben hierbei gegenüber den „Black&White“-Targets einen kleinen Vorsprung bei größeren Entfernungen.

Abb. 3 zeigt weitere interessante Auffälligkeiten. Während die kommerziellen Softwarepakete die Kugeln identisch schlecht bestimmen, erzielt i3mainzScene deutlich bessere Genauigkeiten aus seinem Algorithmus zur Kugelapproximation, was wohl der robusten Ausreißereliminierung zu verdanken ist. Die besten Ergebnisse bezüglich der eigenen „i3mainz“-Marken werden kurioserweise nicht mit dem speziell zugeschnittenen Algorithmus in i3mainzScene erzielt sondern mit FaroScene, wenn man einfach so tut als wären es „weiße Kreise“. Dass bei der Auswertung des „weißen Kreises“ noch Genauigkeitspotentiale vorhanden sind, zeigt der Vergleich der Auswertungen mit FaroScene und i3mainzScene. i3mainzScene baut nicht, wie bei FaroScene zu vermuten ist, allein auf eine Kantenfindung im Remissionsbild, sondern bewertet zudem die lokal triangulierte Punktwolke hinsichtlich des Überganges von Weiß nach Schwarz. Berücksichtigt man den theoretischen Genauigkeitsvorteil von $1/\sqrt{2}$ der um 45° gedrehten „B&W“-Marke gegenüber der parallel zum Abtastmuster ausgerichteten „B&W“-Marke, so sind diese ähnlich genau (ca. 0,5 bis 0,7 mm), wie das Design „weißer Kreis“

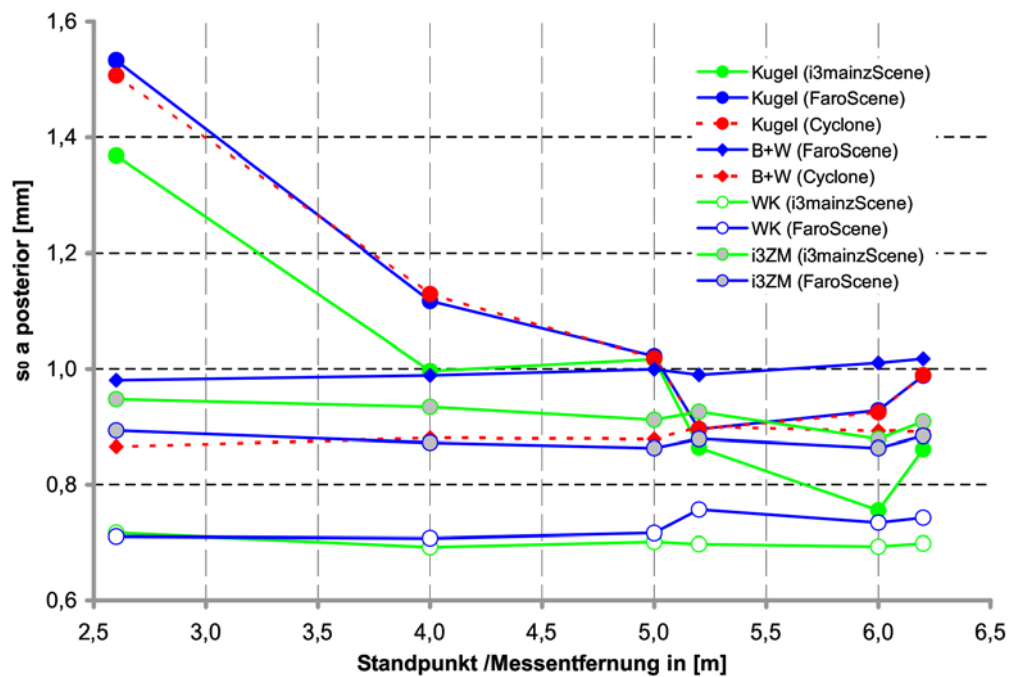


Abb. 3: Vergleich verschiedener Zielmarkendesigns anhand der Standardabweichung der Gewichtseinheit a posteriori s_0 aus einer 3D-Transformation mit festem Maßstab (Gleichgenaue Koordinatenunbekannte mit s_0 a priori = 1 mm)

Bei der Zielgenauigkeit der verschiedenen Zielmarkendesigns zeigen sich keine klaren Tendenzen (Abb. 4). Festgehalten werden kann lediglich, dass die von den Herstellern priorisierten Designs tatsächlich die am besten mit der Herstellersoftware auswertbaren Marken sind und dass die Cyclone-Auswertungen die besten von allen sind. Letzteres könnte daran liegen, dass Cyclone als einzige Software den vollen Zugriff auf die „echten Messdaten“ hat und diese nicht durch Export- und Importvorgänge „variiert“ sind. Welche Richtungsqualität Kugeln als Zielmarken haben hängt anscheinend vom verwendeten Algorithmus ab. Je besser es gelingt die Störungen „Kometenschweif“ und „Zipfel“ zu eliminieren, desto besser ist die Genauigkeit der Mittelpunktskoordinate. Das blendende Ergebnis der mit Cyclone händisch freigeschnittenen Kugeln mag als Beleg für diese Behauptung an dieser Stelle genügen. Der „weiße Kreis“ liefert nur mittelgute Genauigkeiten und das i3mainz-Zielmarkendesign kann die ihn sie gestellte Erwartung an eine besonders gute Zielrichtungsgenauigkeit leider nicht erfüllen.

Genauigkeitsvergleich verschiedener Zielmarkendesigns

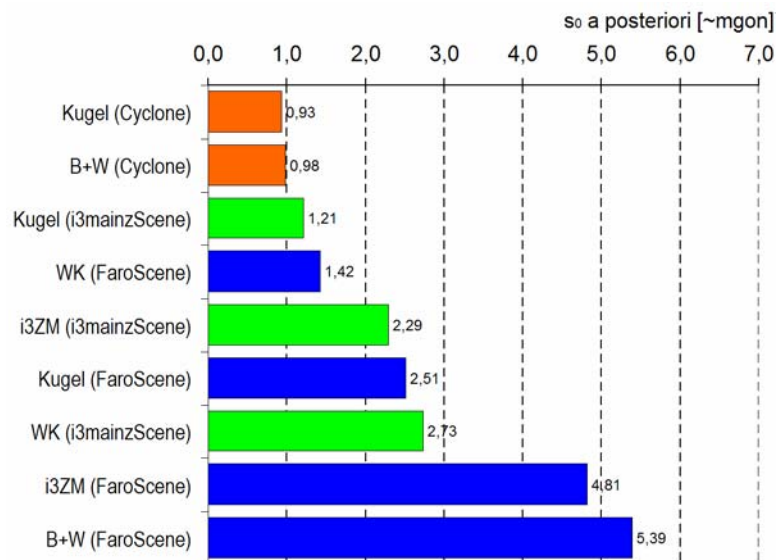


Abb. 4: Vergleich verschiedener Zielmarkendesigns bei ausschließlicher Verwendung der Polarelemente Horizontalrichtung und Vertikalwinkel anhand der Standardabweichung der Gewichtseinheit a posteriori s_0 aus sechs freien Stationierungen (Gleichgenaue Beobachtungen mit s_0 a priori = 1 mgon)

6 Fazit

Die vier miteinander verglichenen Zielmarkendesigns unterscheiden sich deutlich hinsichtlich der theoretisch zu erwartenden Zentrumsabweichung. Das Design „weißer Kreis“, „Kugel“ und „i3mainz“ sind diesbezüglich dem Design „Black&White“ weit überlegen. In der Praxis, das zeigte ein einfaches Experiment, führen das Messrauschen und die bekannten Störeffekte terrestrischer Laserscanner an den Objektoberflächen dazu, dass man zu einer anderen Qualitätsbewertung kommen muss. In Summe schneidet die „Kugel“ als Zielmarke am schlechtesten ab, was u. a. auch auf die relativ glatte, und spiegelnde Oberfläche der verwendeten Kugeln zurückzuführen ist. Der „weiße Kreis“ lieferte unerwartet hohe Qualitäten und ist selbst dem speziellen Design des i3mainz hinsichtlich Zielrichtungsgenauigkeit deutlich überlegen. ELING (2009) hat zurecht das Design „weißer Kreis“ zur einer Zielmarke mit „vier konzentrischen Kreiskonturen“ erweitert, um so den hohen Anforderungen der Georeferenzierung im Rahmen einer Deformationsvermessung gerecht zu werden. Die in den zwei konzentrischen Kreisen implizierte Redundanz könnte auch bei der TLS-Kalibrierung neue Impulse und Qualitäten bringen.

7 Danksagung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des BMBF unter dem Förderkennzeichen 17N3708 gefördert.

Literatur

- DOLD, C.; RIPPERDA, N., BRENNER, C. (2007): *Vergleich verschiedener Methoden zur automatischen Registrierung von terrestrischen Laserscandaten*. In: Luhmann, T. & Müller, C. (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik*, Wichmann, S. 196-205
- Eling, D.; Kutterer, J. (2007): *Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung am Beispiel einer Talsperre*. In: Brunner, F. K. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 07 – Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz 2007*. Heidelberg: Wichmann, 2007, S. 119–130
- Eling, D. (2009): *Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung*. München: Deutsche Geodätische Kommission, (Reihe C, Heft Nr. 641)
- Kern, F. (2003): *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten*. Geodätische Schriftenreihe der TU Braunschweig, Heft 19, 2003
- Kern, F. (2008): *Prüfen und Kalibrieren von terrestrischen Laserscannern*. Luhmann, Thomas (Hrsg.); Müller, Christina (Hrsg.): *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik*, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008. Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, S. 306–316
- Kern, F.; Huxhagen, U. (2008a): *Ansätze zur Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern*. 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), S. 35 – 44
- Kern, F.; Huxhagen, U. (2008b): *Zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS)*. In: Niemeier, W. (Hrsg.); Schäfer, M. (Hrsg.): *Terrestrisches Laser-Scanning (TLS 2008)*. Augsburg: Wißner-Verlag, (DVW-Schriftenreihe Band 54), S. 111–124
- Mechelke, K.; Kersten, T. ; Lindstaedt, M. (2008): *Geometrisches Genauigkeitsuntersuchungen neues terrestrischer Laserscannersysteme – Leica Scanstation 2 und Z+F IMAGER 5006*. In: Luhmann, Th. (Hrsg.); Müller, Ch. (Hrsg.): *Optische 3D-Messtechnik, Photogrammetrie, Laserscanning*. Heidelberg: Wichmann, S. 317–328
- Wehmann W.; Van Zyl, Ch.; Kramer, H.; Widger, D.; Zimmermann, R. (2007): *Einrichtung eines Prüffeldes zur Genauigkeitsbestimmung von Laserscannern und Untersuchung des Scanners LMS-Z360i der Firma Riegl in diesem Testfeld*. In: ZfV, Heft 3, S. 175–180
- Rietdorf, A. (2005): *Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip*. München: DGK (Reihe C, Nr. 582)