

Untersuchungen zur GNSS-gestützten globalen Registrierung von Punktwolken terrestrischer Laserscanner

DANILO SCHNEIDER¹, MARIA LEONHARDT¹ & VOLKER FREVERT²

Zusammenfassung: In diesem Beitrag wird untersucht, inwieweit die GNSS-gestützte Positionsbestimmung von Laserscanner-Standpunkten die globale Registrierung lösen kann. Die einzelnen Standpunkt-Punktwolken werden dafür in einem ersten Schritt über Verknüpfungspunkte relativ zueinander registriert, die gemeinsame Punktwolke anschließend über die mit einem GNSS-Empfänger bestimmten Koordinaten der Laserscanner-Standpunkte in ein globales Referenzsystem überführt. Bei der Untersuchung wurden vor allem praktische Kriterien, wie der Empfängertyp (insb. 1- oder 2-Frequenzempfänger), Handhabung, Kosten, Genauigkeit und die dafür notwendige Messdauer berücksichtigt.

Die Beurteilung der Genauigkeit erfolgte insbesondere durch den Koordinatenvergleich an signalisierten Kontrollpunkten, die einerseits in der global registrierten Punktwolke gemessen (Ist-Koordinaten) und andererseits konventionell mit einem Tachymeter (Soll-Koordinaten) bestimmt wurden. Für diese Koordinatendifferenzen wurden mit allen GNSS-Lösungen Werte im Bereich von 1-2 cm erreicht, für die Messung mit 2-Frequenzempfänger Werte unterhalb von 1 cm – was in der Größenordnung der Genauigkeit der Punktwolke, aufgenommen mit einem Riegl-LMS Z420i, liegt. Damit stellt die GNSS-gestützte Registrierung eine sehr gute und effektive Möglichkeit der globalen Registrierung von Punktwolken dar.

1 Einleitung

Bei Verwendung eines terrestrischen Laserscanners ist in vielen Anwendungen eine globale Registrierung der aufgenommenen Punktwolken notwendig. Dies ist zum Beispiel bei der Aufnahme von Gebäuden oder anderen Objekten für 3D-Stadtmodelle (VOSSELMAN & MAAS, 2010), bei der Aufnahme von 3D-Daten für Fragestellungen in Geologie, Archäologie und Forstwissenschaft und vielen weiteren Anwendungen der Fall. Die Genauigkeitsanforderung der globalen Registrierung kann dabei von wenigen Millimetern bis hin zu einer groben Orientierung im Meter-Bereich reichen (SCHNEIDER, 2006). Und je nach Fragestellung muss dabei noch zwischen der Genauigkeit der Lage- und Höhenkomponente unterschieden werden. Während für 3D-Stadtmodelle die absolute Lageorientierung oft aus vorliegenden Grundrissdaten mit ausreichender Genauigkeit abgeleitet werden kann, muss der Laserscanner-Punktwolke oft anderweitig ein genauer absoluter Höhenbezug gegeben werden. Dies ist beispielsweise dann von Bedeutung, wenn die aus der Punktwolke generierten 3D-Modelle für Fragen der Signal- oder Lärmausbreitung genutzt werden sollen.

1) Danilo Schneider, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden; E-Mail: danilo.schneider@tu-dresden.de

2) Volker Frevert, Geodätisches Institut, Technische Universität Dresden

1.1 Relative Registrierung

Wird die Laserscanner-Punktwolke von mehreren Standpunkten aus erzeugt, müssen die Einzelpunktwolken erst relativ zueinander registriert werden. Das geschieht meistens über Verknüpfungspunkte, welche entweder markante Objekt-Features oder signalisierte Punkte sind, die in jeweils benachbarten Scanner-Positionen vorhanden sind. Markante Objekt-Features können z.B. Gebäudeecken sein, signalisierte Punkte sind z.B. retro-reflektierende Zielmarken oder kleine Objekte mit definierter Form (z.B. Kugeln). Die Verknüpfungspunkte werden entweder interaktiv oder automatisch in den Punktwolken gefunden und deren Koordinaten bestimmt. Bei ausreichend heterogener Geometrie können benachbarte Punktwolken auch vollautomatisch über ICP-Methoden (iterative closest point, z.B. RUSINKIEWICZ & LEVOY, 2001) relativ zueinander orientiert werden. Die Zuordnung gemeinsamer Punkte erfolgt im 3D-Raum meist automatisch, weil die eindeutige Zuordnung über das Distanzmuster der Verknüpfungspunkte gegeben ist. Als Ergebnis der relativen Orientierung liegt in jedem Fall eine gemeinsame Punktwolke in einem einheitlichen lokalen Koordinatensystem (z.B. mit dem Ursprung im ersten Laserscanner-Standpunkt) vor.

1.2 Globale Registrierung

Nach erfolgter relativer Registrierung mehrerer Teil-Punktwolken ist in vielen Anwendungen eine globale Registrierung der Gesamt-Punktwolke, d.h. die Orientierung innerhalb eines Landeskoordinatensystems (z.B. Gauß-Krüger- oder UTM-Koordinatensystem) bzw. Weltkoordinatensystem (z.B. WGS84), notwendig. Zur globalen Registrierung gehört die Bestimmung der 3 Translations- und 3 Rotationsparameter, der Maßstab ist durch die Distanzmessung des Laserscanners definiert und wird in den meisten Fällen nicht neu bestimmt. In der Praxis bieten sich verschiedene Möglichkeiten an, die globale Registrierung durchzuführen: meist werden einige der für die relative Registrierung verwendeten Verknüpfungspunkte oder andere in der Punktwolke vorhandene Objekt-Features global eingemessen. Dies erfolgt mit einem Tachymeter entweder durch den Anschluss an in der Nähe des zu scannenden Objektes vorhandene Passpunkte oder über mittels GNSS temporär erzeugte Passpunkte im globalen Koordinatensystem.

1.3 Globale Registrierung mittels GNSS-Positionsbestimmung der TLS-Standpunkte

Eine weitere, in der Praxis sehr effiziente Möglichkeit zur globalen Registrierung besteht darin, die einzelnen Laserscanner-Standpunkte als Passpunkte für die Koordinatentransformation zu verwenden. Das bedeutet, dass mehrere Standpunkte mit GNSS eingemessen werden. Die Hersteller terrestrischer Laserscanner integrieren zu diesem Zweck GNSS-Antennen (z.B. RIEGL, 2013) oder bieten entsprechende Lösungen an, um eine GNSS-Antenne direkt mit dem Laserscanner zu kombinieren (Abb. 1).

Werden auf diese Weise die Koordinaten von mindestens 3 Standpunkten bestimmt, lassen sich die 6 unbekanntenen Transformationsparameter einfach berechnen, sofern die Standpunkt-Koordinaten auch im temporären lokalen Koordinatensystem bekannt sind. Bei einigen Laserscannern können die beiden Winkel für die Horizontierung über elektronische Libellen bestimmt bzw. mittels Kompensatoren zu Null korrigiert werden. Dann müssen zumindest der Azimutwin-

kel und der Translationsvektor anderweitig bestimmt werden. In diesem Fall ist es ausreichend, GNSS-Messungen auf nur 2 TLS-Standpunkten durchzuführen.



Abb. 1: Geodätische GNSS-Antenne auf einem Riegl LMS-Z420i Laserscanner

Bei dieser Vorgehensweise der globalen Registrierung von Punktwolken stellt sich die Frage, mit welcher Genauigkeit dies realisiert werden kann. Diese Genauigkeit ist selbstverständlich abhängig von der Anzahl der Standpunkte auf denen gemessen wird, der verwendeten GNSS-Antenne, vom Empfängertyp (1-Frequenz/2-Frequenz) sowie von der Auswertestrategie (z.B. relative GNSS-Auswertung mit Hilfe einer eigenen Referenzstation, Nutzung von Korrekturdaten eines Referenznetzes, siehe HOFMANN-WELLENHOF ET. AL., 2008). Wird die GNSS-Messung parallel zu den Laserscans durchgeführt, stellt sich weiterhin die Frage nach der minimalen Messdauer und im konkreten Fall, ob die Rotation der Antenne während des Scanvorgangs zu signifikanten Einschränkungen führt. Für die praktische Anwendung ist außerdem noch von Interesse, welche Kosten und welcher Zeitaufwand mit der simultan zu den Laserscans durchgeführten GNSS-Messung und späteren Auswertung verbunden sind.

2 Beschreibung der Messungen

Um die Frage nach der Genauigkeit der GNSS-gestützten globalen Registrierung von Punktwolken zu beantworten, wurde ein Beispielprojekt mit einem terrestrischen Laserscanner Riegl LMS-Z420i durchgeführt, bei dem von 4 Standpunkten aus gescannt und jeweils GNSS-Messungen mit zwei unterschiedlichen Empfängertypen simultan realisiert wurden (Abb. 2). Der Laserscanner wurde mit einer einfachen Dosenlibelle grob horizontalisiert. Basierend auf diesen Messungen wurde die vorher mittels Verknüpfungspunkten relativ orientierte TLS-Punktwolke global referenziert. Vorher wurden mehrere Kontrollpunkte im gleichen globalen Koordinatensystem tachymetrisch aufgenommen und die Koordinaten dieser Punkte mit den aus der global registrierten Punktwolke abgeleiteten Koordinaten verglichen. Anhand dieses Soll-Ist-Vergleichs

können anschließend Aussagen zur Genauigkeit verschiedener GNSS-Lösungen zur globalen Orientierung von TLS-Daten getroffen werden.

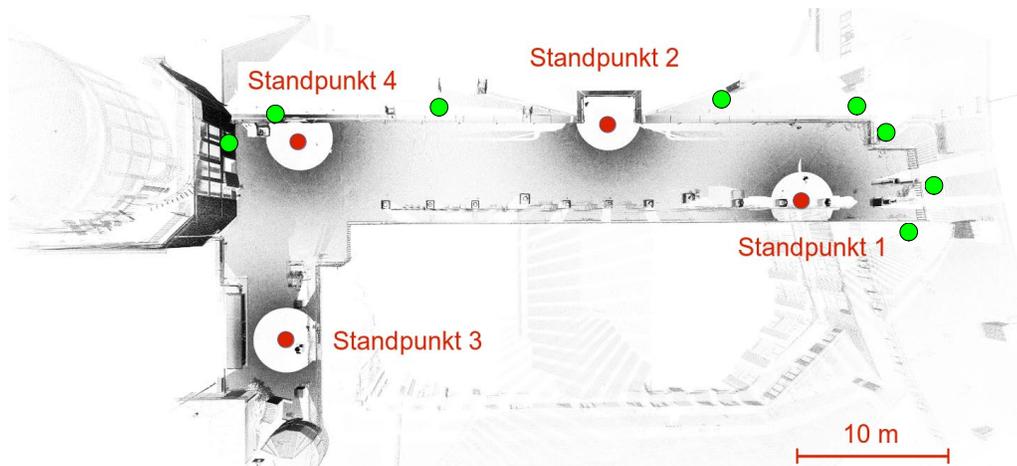


Abb. 2: TLS-Punktwolke, TLS-Standpunkte und 8 Kontrollpunkte für Soll-Ist-Vergleich (Messplattform auf dem Dach des Beyer-Baus der TU Dresden)

2.1 Terrestrisches Laserscanning

Auf jedem der 4 Laserscanner-Standpunkte wurde ein 360°-Scan mit einer horizontalen und vertikalen Winkelauflösung von 0,08° durchgeführt. In den Scandaten wurden mit der Scanner-Software anhand der Intensitätswerte nach den retro-reflektierenden Zielmarken gesucht. Die teilweise zylinderförmigen und teilweise flachen kreisförmigen Marken (Verknüpfungspunkte und Kontrollpunkte) wurden anschließend mit einer höheren Auflösung (0,004°) gescannt und ein Intensitätswert-gewichteter Schwerpunkt jeder Zielmarke berechnet. Zusätzlich zu den Scans wurde auf jedem Standpunkt ein Rundum-Bildverband mit der auf dem Scanner befestigten Kamera aufgenommen, so dass die gesamte Messdauer (inkl. Auf- und Abbau) ca. 45 Minuten pro Standpunkt betrug.

Tab. 1: Ergebnisse der Transformation der Standpunkt-Koordinatensysteme in das lokale Projektkoordinatensystem (relative Registrierung)

Standpunkt	σ_0 (mm)	Anzahl verwendeter Verknüpfungspunkte	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	identisch mit Projektkoordinaten		0,000	0,000	0,000
2	5,7	26	6,195	12,740	0,098
3	6,2	23	-7,673	34,220	0,192
4	8,7	23	5,560	32,810	0,256

Für die relative Orientierung der Punktwolke wurde das Standpunkt-Koordinatensystem des ersten Standpunktes als temporäres lokales Projektkoordinatensystem definiert. Die anderen Standpunkte wurden über die Verknüpfungspunkte in diesem Projektkoordinatensystem registriert. Die Standardabweichungen der Gewichtseinheit der drei Einzel-Transformationen sind Tabelle 1 zu entnehmen.

2.2 GNSS-Messungen

Für die GNSS-Messungen wurde eine geodätische Antenne der Firma navXperience (Typ: NAX3G+C) verwendet. Diese Antenne wurde mit einem speziellen Adapter so auf dem Laserscanner montiert, dass die Befestigung und damit näherungsweise das Antennenphasenzentrum in der Rotationsachse des Laserscanners liegt. Der Höhenoffset der GNSS-Antenne und des Scan-Zentrums beträgt ca. 50 cm und wird später im Zuge des Soll-Ist-Vergleichs an den Kontrollpunkten genauer bestimmt.

An die geodätische Antenne sind mittels eines Antennensplitters zwei verschiedene Empfänger angeschlossen: ein Einfrequenz-Empfänger der Firma NVS Technologies AG (Typ: NV08C) und ein Zweifrequenz-Empfänger Leica GRX1200+GNSS (vgl. Abb. 3). Beide Empfänger erlauben sowohl Code- als auch Phasenaufzeichnungen und die Messung von GPS- und GLO-NASS-Signalen. Der NVS-Einfrequenz-Empfänger muss zusätzlich zur Steuerung und Datenaufzeichnung an ein Notebook angeschlossen werden.

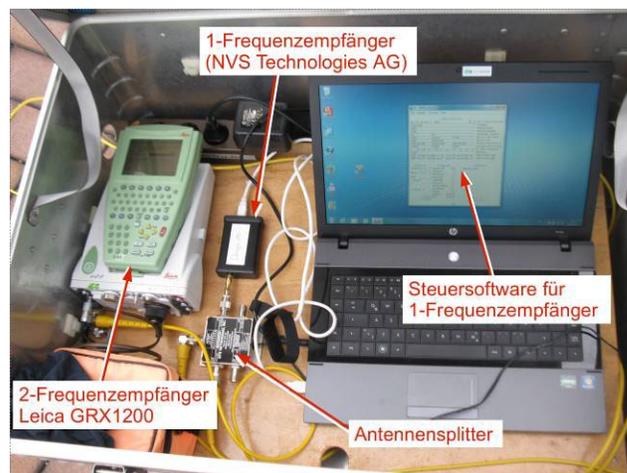


Abb. 3: Ausrüstung für die GNSS-Messungen

Die Auswertung der GNSS-Messungen erfolgte, für beide Empfänger getrennt, durch eine relative Positionsbestimmung im Postprocessing. Zur Koordinatenberechnung der Scanner-Standpunkte wurden mit den eigenen GNSS-Beobachtungsdaten und den Daten einer zweiten GNSS-Station (Referenzstation) Basislinienberechnungen durchgeführt. Gelingt es im Rahmen dieser Auswertung die sog. Phasenmehrdeutigkeiten festzusetzen ist die angestrebte Koordinatengenauigkeit von ca. 1 - 2cm bei einer GNSS-Beobachtungsdauer von weniger als 30min zu erreichen. Die Koordinaten der Scanner-Standpunkte sind anschließend im System der Referenzstation referenziert. Im Rahmen der Untersuchung wurden vier Auswertansätze betrachtet:

- (a) die Nutzung der Daten einer eigenen Referenzstation, die in unmittelbarer Nähe des Scan-Projektes aufgebaut wurde, wodurch kurze Basislinien mit einem guten Genauigkeitspotential entstehen
- (b) Basislinienberechnung durch Nutzung der Daten der nächstgelegenen Referenzstation des Satellitenpositionierungsdienstes der deutschen Landesvermessung SAPOS

- (c) Bildung und Berechnung kurzer Basislinien mittels Download der Daten einer durch einen SAPOS –Service berechneten sog. virtuellen Referenzstation (VRS)
- (d) Nutzung des Online-Berechnungsdienstes „BaLiBo“ – einem Service einiger deutscher Landesvermessungen (Sachsen, Thüringen, Bayern), bei dem die Berechnung der Koordinaten der Nutzer-Station nach Upload der GNSS-Beobachtungen auf einen SAPOS - Server als Service erfolgt (FREVERT ET. AL. , 2009)

2.3 Messung der Soll-Koordinaten der Kontrollpunkte

Die Referenzkoordinaten der acht über das gesamte Messgebiet zufällig verteilten Kontrollpunkte, an denen der Soll-Ist-Vergleich durchgeführt wurde, sind mit einem Tachymeter Leica TCR 1103 aufgenommen worden. Dabei wurde ein geodätisches Netz realisiert mit 3 Tachymeter-Standpunkten und zusätzlich 3 Reflektor-Standpunkten (vgl. Abb. 4). Auf allen 6 Standpunkten wurden GNSS-Messungen durchgeführt und jeweils 20-Minuten-Lösungen unter Verwendung der Daten einer eigenen Referenzstation (vgl. Auswertemethode 2.2 (a)) ausgewertet.

Die Auswertung des tachymetrisch beobachteten Netzes erfolgte mit der Netzausgleichungssoftware PANDA (Fa. GeoTec) durch Netzausgleichung und Referenzierung auf die GNSS-Koordinaten der Tachymeter- und Reflektorstandpunkte. Die 3D-Genauigkeit (einfache Standardabweichung) der Kontrollpunkte erreichte dabei Werte zwischen 0,3mm bis 1,3mm und widerspiegelt einerseits die hohe Messgenauigkeit der Tachymetermessungen als auch die hohe Qualität der GNSS-Ergebnisse.

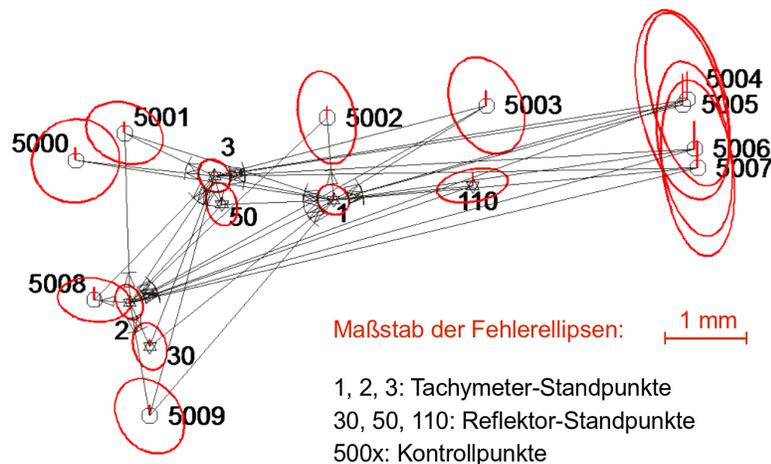


Abb. 4: Geodätisches Netz für die Referenzmessung der Kontrollpunkte

Die im Rahmen der Netzausgleichung berechneten Standardabweichungen sind allerdings nur die innere Netzgenauigkeit und sagen nichts über die äußere absolute Genauigkeit der Kontrollpunkte aus. Diese hängt unter anderem von der Genauigkeit der zugrunde liegenden Referenzstationen ab, für welche ein Genauigkeitsniveau von 1 cm abgeschätzt wird, wobei die Lagekomponente etwas besser als die Höhenkomponente ist.

Insgesamt kann also angenommen werden, dass die äußere Standardabweichung der Kontrollpunktkoordinaten (Soll-Koordinaten) mit ca. 1 cm im Bereich der Genauigkeit der Punktwolke vorliegt. Höhere Absolutgenauigkeiten sind als Referenz hier nur schwer zu beschaffen und sind

für die meisten Anwendungen, in denen eine absolute Orientierung von Laserscans gefordert ist, auch nicht notwendig.

Den Soll- und Ist-Messungen, insbesondere für die Auswertemethode (a), liegen Daten der gleichen GNSS-Referenzstation zu Grunde. Dennoch können die Messungen unter dem Aspekt dieser Untersuchungen als voneinander unabhängig betrachtet werden, weil die Messungen an unterschiedlichen Tagen (1 Woche Differenz) u.a. unter unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen durchgeführt wurden.

3 Auswertung und Ergebnisse

3.1 Transformation der Punktwolke ins globale Koordinatensystem

Die Transformation des Projektkoordinatensystems in das globale Koordinatensystem erfolgte über die 4 Geräte-Standpunkte als Passpunkte. Die Koordinaten dieser Punkte im Projektkoordinatensystem wurden in Tab. 1 aufgelistet, die Koordinaten im globalen System resultieren aus der GNSS-Messung bzw. -auswertung und unterscheiden sich geringfügig je nach verwendetem Empfänger und der Auswertemethode (a)-(d). Im Folgenden werden 5 verschiedene mögliche Kombinationen zwischen Empfänger und Auswertemethode betrachtet. Die in Tabelle 2 angegebenen Standardabweichungen der Gewichtseinheit für die Transformationen resultieren aus einer geringen Überbestimmung (4 Passpunkte), werden hier aber dennoch als Kriterium zur Beurteilung der Transformationsgenauigkeit herangezogen und bestätigen das cm-Niveau. Tendenziell sind die Ergebnisse aus der Messung mit dem Zweifrequenzempfänger erwartungsgemäß besser als mit dem Einfrequenz-Empfänger.

Tab. 2: Ergebnisse der Transformation des lokalen Projektkoordinatensystem in das globale Koordinatensystem (globale Registrierung)

Empfängertyp	GNSS-Auswertemethode (siehe 2.2)	σ_0 (cm)
1-Frequenz	(a)	1,0
2-Frequenz	(b)	1,2
2-Frequenz	(c)	1,2
1-Frequenz	(d)	1,8
2-Frequenz	(d)	1,2

3.2 Koordinatendifferenzen an den Kontrollpunkten

Für eine ausgewählte Lösung (Zweifrequenz-Empfänger/Virtuelle Referenzstation) werden in Tabelle 3 die einzelnen Abweichungen an den Kontrollpunkten getrennt nach den Koordinatenrichtungen aufgelistet. Auf den ersten Blick fällt dabei der noch vorhandene Höhenoffset von 46,9 cm zwischen GNSS-Antennenphasenzentrum und dem Ursprung des Scanner-Koordinatensystems auf. In einer realen Anwendung muss dieser Offset als bekannt vorausgesetzt werden und kann als „Antennenhöhe“ direkt in die GNSS-Auswertung eingehen. In dem hier beschriebenen Beispielprojekt kann er über die Soll-Ist-Differenzen an den Kontrollpunkten

bestimmt und unter der Annahme, dass die Rotationsachse des Scanners lotrecht ist und das Antennenphasenzentrum enthält, von den Höhenwerten abgezogen werden. Die berechneten Mittelwerte für ΔX und ΔY sind im Unterschied zu dem Höhenoffset ΔZ nicht signifikant und werden deshalb nicht weiter berücksichtigt.

Tab. 3: Abweichungen an Kontrollpunkten für Lösung mit 2-Frequenz-Empfänger und GNSS-Auswertemethode (c) über Berechnung einer virtuellen Referenzstation

Kontrollpunkt	ΔX (cm)	ΔY (cm)	ΔZ (cm)	ΔZ^* (cm) nach Abzug Höhenoffset
5000	-0,3	1,3	-47,2	-0,3
5003	-0,5	0,9	-46,9	0,0
5004	-1,1	-0,9	-46,9	0,0
5005	-0,7	-1,1	-46,8	0,1
5006	-0,5	-0,8	-46,8	0,1
5007	-0,6	-1,1	-46,8	0,1
5008	0,0	1,8	-46,9	0,0
5009	1,2	1,6	-46,9	0,0
Mittelwert	-0,3	0,2	-46,9	0,0
RMS	0,7	1,2	46,9	0,1
Standardabw.	0,7	1,3	0,1	0,1

So wie für die in Tab. 3 zu Grunde liegende GNSS-Auswertemethode (Zweifrequenz-Empfänger/Virtuelle Referenzstation) wurde auch für die anderen Kombinationen aus Empfängertyp und Auswertemethode das quadratische Mittel (RMS) der Abweichungen an den Kontrollpunkten berechnet, einerseits getrennt nach den Koordinatenrichtungen andererseits als Länge des Vektors in Raumrichtung. Bei allen Methoden wurde der gleiche Höhenoffset von 46,9 cm berücksichtigt.

Tab. 4: Mittlere quadratische Abweichungen (RMS), berechnet an 8 Kontrollpunkten

Empfängertyp	GNSS-Auswertemethode (siehe 2.2)	$RMS_{\Delta X}$ (cm)	$RMS_{\Delta Y}$ (cm)	$RMS_{\Delta Z^*}$ (cm)	$RMS_{\Delta XYZ^*}$ (cm)
1-Frequenz	(a)	0,7	1,7	0,8	2,0
2-Frequenz	(b)	0,9	1,3	1,8	2,4
2-Frequenz	(c)	0,7	1,3	0,1	1,5
1-Frequenz	(d)	0,6	1,3	1,5	2,1
2-Frequenz	(d)	0,7	1,2	0,3	1,4

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Auswertungen auf Basis des Zweifrequenz-Empfängers geringfügig genauer sind als die auf Basis des Einfrequenz-Empfängers. Dies liegt zum Teil darin begründet, dass bei einigen Einfrequenz-Auswertungen (z.B. aufgrund von Abschattungen bei Standpunkt 4) die Phasen-Mehrdeutigkeiten nicht gelöst werden konnten und demzufolge nur Float-Lösungen berechnet wurden. Außerdem konnten bei einigen Auswertungen nur die GLO-NASS-Signale aber nicht die GPS-Signale verwendet werden. Bei der Auswertung mit Zweifre-

quenz-Empfänger sind die Ergebnisse auf Basis eines Referenzstationsnetzes (Virtuelle Referenzstation (c) sowie Online-Dienst „BaLiBo“ (d)) etwas genauer als die Berechnung auf Basis einer einzelnen Referenzstation mit größerer Distanz zur Nutzer-Station (hier 5 km). Die Ergebnisse aller Lösungen sind allerdings in einer Größenordnung (max. 2,4 cm), die für fast alle Anwendungen, bei denen eine globale Referenzierung von Punktwolken oder daraus abgeleiteter Produkte, wie z.B. 3D-Modelle, gewünscht wird, vollkommen ausreichend ist.

Die Genauigkeit der GNSS-Auswertung hängt zudem noch von der Messdauer ab. Den oben genannten Ergebnissen liegt jeweils eine Messdauer von 45 Minuten zu Grunde. Bei der effizienten Durchführung eines terrestrischen Laserscanner-Projektes können durchaus deutlich kürzere Verweildauern je Standpunkt vorkommen. Deshalb wurde die GNSS-Auswertung an den Kontrollpunkten auch mit 15-Minuten-Ausschnitten aus den GNSS-Beobachtungen berechnet. Es konnte festgestellt werden, dass die 15-Minuten-Ergebnisse sich für das vorliegende Beispielprojekt nur unwesentlich von den 45-Minuten-Ergebnissen unterscheiden. Diese Aussage hängt natürlich stark von den örtlichen Gegebenheiten ab (z.B. Signalabschattungen, Mehrwegeeffekte).

Auch die Rotation der Antenne während der Datenaufzeichnung aufgrund des zeitgleich durchgeführten Scanvorgangs scheint die Genauigkeit nicht wesentlich nachteilig zu beeinflussen. Das hängt wiederum von der Qualität der verwendeten GNSS-Antenne ab, insb. von der genauen Position des Antennenphasenzentrum innerhalb des Antennenkörpers. Bei einer guten geodätischen GNSS-Antenne sollte eine eventuell vorhandene Antennenphasenzentrums-Exzentrizität klein und damit für die hier beschriebene Anwendung vernachlässigbar sein.

4 Fazit

Müssen mit einem terrestrischen Laserscanner aufgenommene Punktwolken global registriert werden, ist die beschriebene Vorgehensweise – basierend auf GNSS-Messungen auf den Laserscanner-Standpunkten – eine effiziente, einfache und zumeist ausreichend genaue Methode. Es sollte zumindest eine gute geodätische GNSS-Antenne (aktuell ab ca. 1000 Euro) verwendet werden. Sofern auf jedem Standpunkt (aber besser 4 oder mehr) genügend lange GNSS-Messungen durchgeführt werden können und die Standpunkte wenig Abschattungen aufweisen, ist die Verwendung eines (guten) Einfrequenz-Empfängers ausreichend, was eine deutliche Reduktion von Investitionskosten im Vergleich zu einem geodätischen Zweifrequenz-Empfänger bedeutet. Aktuell verfügbare gute Einfrequenz-Empfänger sind sehr handlich und haben optional eine interne Speichermöglichkeit, so dass vor Ort nicht extra ein separates Notebook verwendet werden muss, und sind für Preise zwischen 300 und 1000 Euro erhältlich.

Für die Prozessierung gilt, dass für Genauigkeitsanforderungen im cm-Bereich auf jeden Fall eine relative Auswertung auf Basis von gelösten Phasen-Mehrdeutigkeiten angestrebt werden soll. Dies ist zum einen mit einer eigenen Referenzstation möglich, die man über einen längeren Zeitraum (z.B. einen halben Tag) in der Nähe des Laserscanner-Projektes betreibt, wobei allerdings weitere Kosten sowie zusätzlicher Zeitaufwand für den Auf- und Abbau der Station berücksichtigt werden müssen. Zum anderen ist es in den meisten Gebieten Deutschlands bzw. Europas möglich, auf einen Korrekturdatendienst zurückzugreifen, der auf einem Referenzstations-Netz basiert und eine virtuelle Referenzstation in unmittelbarer Nähe des Messprojektes berechnet. Diese zweite Möglichkeit ist in der Praxis sicher die einfachere, wobei hier für jede Auswer-

tung ggf. zusätzliche Kosten für den Zugriff auf die Daten bzw. Online-Dienste der Landesvermessungsämter oder privater Anbieter entstehen können.

5 Ausblick

Werden lediglich Genauigkeiten der globalen Registrierung im Meter-Bereich gefordert, kann ggf. auf eine relative GNSS-Auswertung verzichtet werden. Für geforderte Genauigkeiten im Dezimeter-Bereich kann auch eine PPP-Lösung (Precise Point Positioning, HEBELBARTH, 2011) in Betracht gezogen werden, dabei wird zwar keine Referenzstation benötigt, jedoch ist ein Zweifrequenz-Empfänger für vertretbare Beobachtungszeiten unverzichtbar. In der vorliegenden Untersuchung wurde auf maximal erreichbare Genauigkeiten fokussiert, deshalb sollten in weiteren Untersuchungen auch solche Lösungen für geringere Genauigkeitsanforderungen berücksichtigt werden, die in der Praxis ggf. noch deutlich effizienter sein können.

Nicht bei allen Projekten ist es möglich oder sinnvoll, den Laserscanner zu horizontieren. Nicht selten muss der Scanner sogar bewusst geneigt werden. Deshalb soll in einer zukünftigen ähnlichen Untersuchung nicht nur ein Höhenoffset zwischen Scanner und GNSS-Antenne berücksichtigt werden, sondern die Länge und Orientierung des gesamten Vektors zwischen Scanner-Ursprung und Antennenphasenzentrum mit in die Berechnung einfließen. Die Information über die Ausrichtung der Laserscanner-Rotationsachse im lokalen Projektkoordinatensystem steht für diesen Zweck nach der relativen Registrierung ohnehin zur Verfügung. Es stellt sich dabei weiterhin die Frage, bis zu welcher Neigung die GNSS-Antenne überhaupt noch brauchbare Ergebnisse liefert.

6 Literaturverzeichnis

- FREVERT, V.; SCHWABE, J.; WANNINGER, L.; ZEISLER, J., 2009: BaLiBo - zentralisierte Prozessierung von GPS-Beobachtungen. Beitrag zum 83. DVW-Seminar "GNSS 2009: Systeme, Dienste, Anwendungen", 18.-19.03.2009, Dresden. DVW-Schriftenreihe, Band 57/2009, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 145-162.
- HEBELBARTH, A., 2011: Statische und kinematische GNSS-Auswertung mittels *Precise Point Positioning* (PPP), Dissertation. Deutsche Geodätische Kommission, C-667, München 2011, ISSN 0065-5325, ISBN 978-3-7696-5079-2.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H. & WASLE, E., 2008: GNSS – Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, Galileo and more, Springer-Verlag, Wien.
- RUSINKIEWICZ, S. & LEVOY, M., 2001: Efficient Variants of the ICP Algorithm. Proceedings of the 3rd International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling.
- RIEGL, 2013: Data Sheet Riegl VZ-1000 (http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/DataSheet_VZ-1000_18-09-2013.pdf, Zugriff am 29.01.2014)
- SCHNEIDER, D., 2006: Terrestrial laser scanning for area based deformation analysis of towers and water dams. H. Kahmen, A. Chrzanowski (Eds.): Proceedings of the 3rd IAG Symposium of Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering and 12th FIG Symposium on Deformation Measurements, Baden, Austria.
- VOSELNAN, G. & MAAS, H.-G., 2010: Airborne and Terrestrial Laser Scanning. Whittles Publishing, CRC Press, 336 pages.