

Untersuchung von Registrierungsverfahren hinsichtlich des Einsatzes terrestrischer Laserscanner in der Deformationsmessung

Frank Neitzel,
Waldemar Mordwinzew
und Christian Lerche



ALLGEMEINE VERMESSUNGS-NACHRICHTEN

Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung als
PEER REVIEWED PAPER
angenommen.

Tag der Einreichung: 28. Februar 2010

Nach einer Einführung zum Einsatz des terrestrischen Laserscannings in der Deformationsmessung werden aktuelle Registrierungsverfahren kurz vorgestellt. In einer Laboruntersuchung wird dann das Genauigkeitspotenzial der eingesetzten Laserscanner hinsichtlich der Erkennung von Objektverschiebungen untersucht. Im Anschluss daran wird in einer weiteren Laboruntersuchung der Einfluss unterschiedlicher Registrierungsverfahren auf die Erkennung von Objektverschiebungen festgestellt. Ein ausgewähltes Registrierungsverfahren wird dann im Baustelleneinsatz untersucht. In allen Untersuchungen wird die innere Genauigkeit durch die Modellierung des verschobenen Objektes durch eine ausgleichende Ebene erhöht. Zur Beurteilung der äußeren Genauigkeiten werden die Sollwerte für die Objektverschiebungen mit einer Feinmessuhr erfasst.

1 Einführung

Der Einsatz des terrestrischen Laserscannings in der Deformationsmessung lässt sich in vier Phasen einteilen:

Phase 1: Erfassung des Untersuchungsobjektes und der umliegenden Topographie mit dem terrestrischen Laserscanner von unterschiedlichen Standpunkten.

Phase 2: Zusammenführung der 3D-Koordinaten von unterschiedlichen Standpunkten zu einer einzigen Punktwolke mit Hilfe von Koordinatentransformationen. Dieser Vorgang wird sowohl mit dem Begriff „Matching“ als auch mit dem Begriff „Standpunktverknüpfung“ bezeichnet.

Phase 3: Transformation der 3D-Koordinaten von Punktwolken aus zeitlich unterschiedlichen Messepochen auf einen stabilen Bezugsrahmen. Dieser Bezugsrahmen kann ein Landeskoordinatensystem sein oder ein beliebiges lokales Koordinatensystem, das mit Hilfe der stabilen Punkte im Objektraum definiert wird. Zu beachten ist, dass die Koordinaten deformierter Objektbereiche nicht an der Berechnung der Transformationsparameter teilnehmen dürfen.

Phase 4: Nach erfolgreicher Durchführung von Phase 3 können Deformationen lokalisiert und entsprechend den Vorgaben des Auftraggebers quantifiziert und visualisiert werden.

Die Arbeitsschritte der Phasen 2 und 3 werden unter dem Begriff „Registrierung“ zusammengefasst, siehe z. B. (STAIGER 2005).

Die gesamte Prozesskette für den Einsatz des terrestrischen Laserscannings in der Deformationsmessung zur Bauwerksüberwachung wird z. B. in (ELING 2009) dargestellt. Der vorliegende Beitrag widmet sich der Untersuchung von Registrierungsverfahren hinsichtlich deren Einsatzes in der Deformationsmessung. Die aktuellen Registrierungsverfahren lassen sich wie folgt klassifizieren:

- Punktbezogene Registrierungsverfahren*, bei denen ausgewählte Punkte mit Zielzeichen, z. B. Kugeln, Klebezielmarken, signalisiert werden. Die Mittelpunkte dieser Zielzeichen werden mit Hilfe der Ausgleichsrechnung bestimmt. Diese abgeleitete Punktinformation wird dann verwendet, um Scans von unterschiedlichen Standpunkten zu verknüpfen und in ein übergeordnetes Koordinatensystem zu transformieren.
- Bei der *Registrierung über ausgeglichene Objektgeometrien* werden Teilflächen von Objekten genutzt,

um daraus z. B. ausgleichende Geraden, siehe (LICHTENSTEIN & BENNING 2010) oder ausgleichende Ebenen zu berechnen, siehe (GIELSDORF et al. 2008). Mit Hilfe dieser Elemente erfolgt die Standpunktverknüpfung und auch der Bezug zu stabilen Flächen im Objektraum. Die Verwendung ausgleichender Ebenen zur Deformationsanalyse wird ebenfalls in (GIELSDORF et al. 2008) beschrieben.

- c) Bei der *Registrierung über die originären Punktwolken* werden die Transformationsparameter zur Standpunktverknüpfung von zwei Punktwolken derart bestimmt, dass der Abstand zwischen korrespondierenden Punkten in beiden Scans minimal wird. Der bekannteste Algorithmus ist der Iterative Closest Point (ICP)-Algorithmus, siehe (BESL & MCKAY 1992). Eine Übersicht über die Entwicklung verschiedener Registrierungsverfahren mit umfassender Literaturangabe ist z. B. in (GRÜN & AKCA 2005) zu finden. Die Registrierung über die originären Punktwolken kann auch verwendet werden, um die Punktwolke einer Folgeperiode auf die Punktwolke einer Referenzperiode zu transformieren.

Im vorliegenden Beitrag werden Beispiele betrachtet, bei denen sich der zu untersuchende Objektraum jeweils mit einer Instrumentenaufstellung vollständig erfassen ließ, so dass eine Standpunktverknüpfung nicht erforderlich ist. Der Fokus liegt auf der Transformation der 3D-Koordinaten von Punktwolken aus zeitlich unterschiedlichen Messepochen auf einen stabilen Bezugsrahmen. Die zu untersuchenden Deformationen wurden mit Hilfe einer verschiebbaren Platte in den Objektraum eingebracht, so dass für die Quantifizierung der Deformationen ausgleichende Ebenen verwendet werden, deren Verschiebungsbetrag mit übergeordneter Genauigkeit bekannt ist.

2 Eingesetzte Instrumente und Softwareprodukte

Als Untersuchungsobjekt, das einer kontrollierten Verschiebung ausgesetzt werden kann, wurde eine mattweiß lackierte Zieltafel der Größe 60×45 cm verwendet, siehe Abb. 1 a). Diese wurde mit einer Schraubvorrichtung in einem XY-Schlitten, siehe Abb. 1 b), befestigt, so dass Verschiebungen unter Ausschluss von Rotationen möglich sind. Die Verschiebungen wurden mit einer Feinmessuhr, siehe Abb. 1 c), die eine Ablesegenauigkeit von 0,01 mm aufweist, erfasst. Durch den Einsatz der Feinmessuhr lassen sich die Verschiebungen im Vergleich zur Genauigkeit der Laserdaten mit übergeordneter Genauigkeit bestimmen. Als Zielzeichen wurden mattweiß

lackierte Kugeln aus Hartplastik mit einem Durchmesser von 76,2 mm sowie schwarz-weiße Zielmarken mit Schachbrettmuster (BW-Targets) verwendet, die mit einem Laserdrucker ausgedruckt wurden.

Als Messinstrumente kamen die Laserscanner Leica HDS 6000 und Faro Photon 80 zum Einsatz. Zur Beurteilung der Genauigkeitsrelation zwischen beiden Geräten kann z. B. die Abstandsabweichung verwendet werden, die in (HUXHAGEN et al. 2009) mit $\Delta L_{\text{HDS 6000}} = 1,9$ mm und $\Delta L_{\text{Photon 80}} = 4,2$ mm angegeben wird. Setzt man diese Werte ins Verhältnis, ergibt sich eine Relation der Abstandsabweichungen von $\Delta L_{\text{HDS 6000}} : \Delta L_{\text{Photon 80}} = 1 : 2,2$. Die Auswertung der Laserdaten erfolgte mit den Softwareprodukten Leica Cyclone 7.0.2 und Geomagic Studio 11.

3 Laboruntersuchungen

In der ersten Laboruntersuchung stand die Frage im Vordergrund, ab welcher Größenordnung Deformationen in Form einer verschobenen Platte mit den eingesetzten Laserscannern erkannt werden können. In einer zweiten Untersuchung wurde festgestellt, welchen Einfluss die Registrierung mit unterschiedlichen Verfahren auf die Erkennung von Objektverschiebungen ausübt. In beiden Untersuchungen wurde die innere Genauigkeit durch die Modellierung des verschobenen Objektes durch eine ausgleichende Ebene erhöht. Zur Beurteilung der äußeren Genauigkeiten wurden die Sollwerte für die Objektverschiebungen durch unabhängige Messungen mit einer Feinmessuhr bestimmt.

3.1 Genauigkeitspotenzial der eingesetzten Laserscanner hinsichtlich der Erkennung von Objektverschiebungen

Die folgende Untersuchung wurde im Labor für 3D-Messtechnik der FH Mainz durchgeführt, so dass störende Umwelteinflüsse, z. B. durch Wind und Schwankungen der atmosphärischen Bedingungen, ausgeschlossen werden können. Die eingesetzten Laserscanner, Leica HDS 6000 und Faro Photon 80, standen in allen Untersuchungen jeweils auf einem festen Standpunkt, der ca. 17 m von der zu erfassenden Platte entfernt lag. Nach der Messung einer Referenzperiode wurde die Platte um $\tilde{d} = 1, 2, 3, 4, 5$ mm verschoben und jeweils erneut gescannt (Folgeperioden), wobei \tilde{d} die mit der Messuhr bestimmte Sollverschiebung bezeichnet. Der Scanvorgang erfolgte mit beiden Instrumenten in der jeweils höchsten Auflösung, so dass die Platte mit ca. 10 000 Punkten erfasst wurde.



Abb. 1: a) Zieltafel, b) XY-Schlitten, c) Feinmessuhr

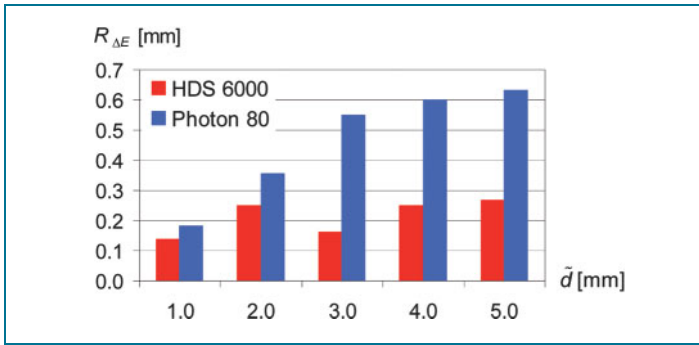


Abb. 2: Mittlere Abstandsabweichung $R_{\Delta E}$ bei Sollverschiebung \tilde{d}

Zur Auswertung der Messungen wurden zunächst die Punkte auf der Platte aus der gesamten Punktwolke ausgeschnitten. Nach einer manuellen Elimination von Störpixeln erfolgte die Berechnung ausgleichender Ebenen mit Hilfe des Programms Geomagic. Nach diesem Auswerteschritt lagen für die Referenzepeche und die Folgeepochen ausgeglichene Ebenen vor. Diese wurden mit Hilfe des Programms Geomagic gegenübergestellt, um die Verschiebungen der ausgeglichenen Ebenen zu visualisieren und zu beurteilen.

Zur Beurteilung der äußeren Genauigkeit kann der Abstand zwischen den ausgeglichenen Ebenen mit dem bekannten Sollwert der Verschiebung \tilde{d} verglichen werden. Dazu wird die „mittlere Abstandsabweichung“ zwischen zwei Ebenen

$$R_{\Delta E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i - \tilde{d}| \quad (1)$$

eingeführt, wobei mit n die Anzahl der Abstände zwischen den ausgeglichenen Ebenen bezeichnet ist. Die einzelnen Abstände d_i können mit Hilfe des Differenzbildes aus Geomagic ermittelt werden. Dieses Genauigkeitsmaß orientiert sich an der von (HEISTER 2006) eingeführten „mittleren Ebenheitsmessabweichung“, die zur Beurteilung der Residuen einer Punktwolke in Bezug zu einer ausgleichenden Ebene verwendet werden kann. Die Werte $R_{\Delta E}$ bei unterschiedlichen Verschiebungen \tilde{d} für die untersuchten Scanner Leica HDS 6000 und Faro Photon 80 zeigt Abb. 2.

Es ist zu erkennen, dass sich eine sehr hohe äußere Genauigkeit ergibt, die für den HDS 6000 im Mittel bei $\bar{R}_{\Delta E, \text{HDS 6000}} = 0,21 \text{ mm}$ und für den Photon 80 bei $\bar{R}_{\Delta E, \text{Photon 80}} = 0,46 \text{ mm}$ liegt. Nimmt man den dreifachen Wert $\bar{R}_{\Delta E}$ als Grenze, ab der Verschiebungen sicher erkannt werden können, ergibt sich für den HDS 6000 ein Wert von 0,6 mm und für den Photon 80 ein Wert von 1,4 mm. Diese hohen äußeren Genauigkeiten sind eine Bestätigung dafür, dass die Genauigkeit durch Modellierung, hier durch ausgleichende Ebenen, erheblich gegenüber der Genauigkeit einer Einzelpunktbestimmung gesteigert werden kann. Setzt man die Ergebnisse ins Verhältnis, erhält man mit $\bar{R}_{\Delta E, \text{HDS 6000}} : \bar{R}_{\Delta E, \text{Photon 80}} = 0,21 \text{ mm} : 0,46 \text{ mm} = 1 : 2,2$ das bereits in Abschnitt 2 vorgestellte Verhältnis der Abstandsabweichung zwischen den Geräten. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die in diesem Abschnitt vorgestellte Untersuchung keine unberücksichtigten systematischen Effekte enthält.

3.2 Einfluss der Registrierung auf die Erkennung von Objektverschiebungen

In einer weiteren Laboruntersuchung wurde der Einfluss unterschiedlicher Registrierungsverfahren auf die Erkennung von Objektverschiebungen festgestellt. Folgende Registrierungsverfahren wurden untersucht:

- Registrierung mit Kugeln,
- Registrierung mit schwarz-weißen Klebezielmarken (BW-Targets),
- Registrierung mit dem ICP-Algorithmus.

Alle Untersuchungen wurden mit dem Leica HDS 6000 durchgeführt, der in ca. 17 m Entfernung von der zu erfassenden Platte aufgestellt wurde. Die Registrierung erfolgte für alle Verfahren mit dem Programm Cyclone.

Nach dem Scannen der Referenzepoche wurde die Platte um $\vec{d} = 0,5, 1, 1,5, 2, 3, 4, 5$ mm verschoben, wobei die Verschiebung wieder mit Hilfe der Feinmessuhr bestimmt wurde. In jeder Folgepoche wurde der Scannerstandpunkt um 2 bis 3 m verlegt, wobei der Standpunkt auf einem Kreis mit dem Radius von 17 m um die die Platte wanderte. Zudem wurde die Instrumentenhöhe verändert und die Orientierung des lokalen Koordinatensystems durch Drehen des Instruments auf dem Stativteller verändert. Der Scanvorgang erfolgte mit der höchsten Auflösung, so dass die Platte jeweils mit ca. 10 000 Punkten erfasst wurde. Für die Registrierung mit Kugeln wurden deren Mittelpunkte in der Referenzepoche als Bezugsrahmen festgelegt. Die berechneten Kugelmittelpunkte in den Folgeepochen wurden verwendet, um die Punktwolken der Folgemessungen auf die Referenzepoche zu transformieren. Analog wurde bei der Registrierung mit BW-Targets vorgegangen.

Bei der Registrierung mit Hilfe des ICP-Algorithmus wurde die Punktwolke der Referenzmessung unter Ausschluss der Punkte auf dem Untersuchungsobjekt als stabiler Bezugsrahmen verwendet. Bei der Registrierung der Folgeepochen war darauf zu achten, dass die Punkte auf der verschobenen Platte nicht an der Registrierung teilnehmen, damit die Transformationsparameter nicht durch diese verfälscht werden.

Nach der Registrierung wurden die Punktwolken in das Programm Geomagic geladen, mit dem die Berechnung ausgleichender Ebenen durchgeführt wurde. Die Berechnung der äußeren Genauigkeit $R_{\Delta E}$ erfolgte wie in Abschnitt 3.1 beschrieben. Die Mittelbildung jeweils über alle Verschiebungsbeträge lieferte folgende Ergebnisse:

- Registrierung mit Kugeln:
 $\bar{R}_{\Delta E, \text{HDS 6000, Kugel}} = 0,09$ mm,
- Registrierung mit BW-Targets:
 $\bar{R}_{\Delta E, \text{HDS 6000, BW}} = 0,25$ mm,
- Registrierung mit dem ICP-Algorithmus:
 $\bar{R}_{\Delta E, \text{HDS 6000, ICP}} = 0,29$ mm.

Vergleicht man diese Ergebnisse mit dem Wert $\bar{R}_{\Delta E, \text{HDS 6000}} = 0,21$ mm aus der Untersuchung in Abschnitt 3.1, so stellt man fest, dass die äußere Genauigkeit von der Wahl des Registrierungsverfahrens beeinflusst wird. Die Registrierung mit Kugeln liefert in dieser Untersuchung ein wesentlich besseres Ergebnis. Der Grund für dieses Resultat könnte in einer leichten Instabilität des Scannerkoordinatensystems in der Untersuchung in Abschnitt 3.1 liegen. Die Registrierungen mit BW-Targets und dem ICP-Algorithmus führen zu einem etwas schlechteren Ergebnis für die äußere Genauigkeit. Nimmt man wieder den dreifachen Wert $\bar{R}_{\Delta E}$ als Grenze, ab der Verschiebungen sicher erkannt werden können, so ist es aber auch nach der Registrierung z. B. mit dem ICP-Algorithmus möglich, mit dem HDS 6000 Verschiebungen ab ca. 1 mm sicher zu erkennen, wobei dieser Wert nur in Verbindung mit der hohen Punktdichte auf dem Untersuchungsobjekt gilt.

4 Untersuchungen auf der Baustelle

Das Ergebnis der vorangegangenen Laboruntersuchungen, dass auch nach einer Registrierung mit dem ICP-Algorithmus das Genauigkeitspotenzial des eingesetzten Laserscanners nahezu vollständig ausgeschöpft werden kann, hat einen Einsatz dieses Algorithmus bei der Auswertung von Messungen auf einer Baustelle motiviert.

4.1 Einsatzpotenzial des ICP-Algorithmus hinsichtlich der Erkennung von Objektverschiebungen

Die Registrierung von Punktwolken mit Hilfe des ICP-Algorithmus bietet folgende Vorteile:

- Die Schaffung eines Festpunktfeldes mit Hilfe tachymetrischer Messungen entfällt.
- Die Signalisierung von Festpunkten und Verknüpfungspunkten entfällt.
- Die hohe Punktdichte der Lasermessungen wird für die Registrierung verwendet.

Dem stehen folgende Nachteile gegenüber:

- Gute Registrierungsergebnisse lassen sich nur bei stark strukturierten Oberflächen im Objektraum erzielen.
- Bereiche mit vermutlichen Objektverschiebungen zwischen der Referenzmessung und einer Folgemessung müssen manuell von der Registrierung ausgeschlossen werden, damit diese die Transformationsparameter nicht negativ beeinflussen.

Die ausgewählte Baustelle bot ausreichende Umgebungsbedingungen für eine Anwendung des ICP-Algorithmus. Die Scannerstandpunkte wurden in allen Richtungen von Bauwerken umgeben, die aufgrund von Fensteröffnungen, Mauervorsprüngen und Gerüstbauten eine ausrei-



Abb. 3: Panoramabild der Baustelle mit Platte und Instrumentenstandpunkt

chend strukturierte Oberfläche aufwiesen. Die Aufnahme-situation mit Instrumentenstandpunkt und zu erfassender Platte zeigt Abb. 3.

Die Messungen mit dem Leica HDS 6000 und dem Faro Photon 80 fanden bei ruhendem Baustellenbetrieb statt, jedoch herrschte am Messtag starker Wind. Die Scanner wurden in ca. 20 m Entfernung von der Platte etwa in der Mitte des Häuserblocks aufgestellt. Nach der Messung der Referenzepoche wurde die Platte um $\tilde{d} = 0,5, 1, 1,5, 2, 3, 4, 5$ mm verschoben, wobei die Werte \tilde{d} erneut mit der Feinmessuhr bestimmt wurden. Nach jeder Verschiebung der Platte wurde der Instrumentenstandpunkt um ca. 2 bis 3 m verlegt, die Instrumentenhöhe und Orientierung der Scanner verändert und die Platte erneut gescannt.

Die Messungen erfolgten mit dem HDS 6000 in der Auflösung „high“ und mit dem Photon 80 in der Auflösung „1/4“. Durchschnittlich ergaben sich damit ca. 24 Millionen Punkte pro Scan, wovon ca. 700 Punkte auf der Platte lagen. Gegenüber den Laboruntersuchungen wurde eine verringerte Auflösung gewählt, um alle Messungen innerhalb eines Arbeitstages durchführen zu können.

Für die Registrierung mit Hilfe des ICP-Algorithmus wurde die Punktwolke der Referenzmessung als stabiler Bezugsrahmen zugrunde gelegt. Die Messungen der Folgeperioden wurden unter Ausschluss der Punkte auf der Platte registriert. Als Problem stellten sich dabei die zunächst unentdeckten Objektbewegungen auf der Baustelle dar. So hatte sich z. B. der Baukran infolge von Windeinflüssen leicht gedreht und Abdeckungen mit Bauplane an den Gerüsten hatten sich verändert. Diese Objektbewegungen konnten durch Drehen und Kippen der gesamten Punktwolke entdeckt werden. Die Registrierung musste dann unter Ausschluss dieser Objektbereiche wiederholt werden. Die ICP-Registrierung wurde sowohl mit dem Programm Cyclone als auch mit dem Programm Geomagic durchgeführt.

Nach der Registrierung erfolgte die Berechnung ausgleichender Ebenen und der jeweiligen mittleren Abstandsabweichungen $R_{\Delta E}$ unter Einsatz des Programms Geomagic, wie in Abschnitt 3.1 beschrieben. Die Werte $R_{\Delta E}$ für den HDS 6000 bei unterschiedlichen Sollverschiebungen \tilde{d} aus der ICP-Auswertung mit Cyclone und die entsprechenden Ergebnisse aus der ICP-Auswertung mit Geomagic zeigt Abb. 4.

Beim Vergleich einzelner Werte $R_{\Delta E}$ aus der ICP-Auswertung mit Cyclone und der entsprechenden Auswertung mit Geomagic fallen teilweise große Unterschiede auf. Da mit beiden Programmen identische Datensätze verarbeitet wurden, lässt sich feststellen, dass das Ergebnis der Registrierung softwareabhängig ist. Bei der weiteren Interpretation der Ergebnisse fällt zudem auf, dass die ICP-Auswertung mit Hilfe des Programms Geomagic bei der Plattenverschiebung von $\tilde{d} = 5$ mm einen mit $R_{\Delta E} = 4,55$ mm unplausiblen Wert für die mittlere Abstandsabweichung liefert, da dieser Wert die übrigen Ergebnisse für $R_{\Delta E}$ deutlich übersteigt. Der Grund dafür könnte sein, dass der ICP-Algorithmus nicht zum optimalen Lösungspunkt konvergiert ist. Der Wert $R_{\Delta E} = 4,55$ mm wird daher aus den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen. Die Feststellung, dass das Ergebnis der Registrierung von der eingesetzten Software abhängig ist, zeigt sich auch bei

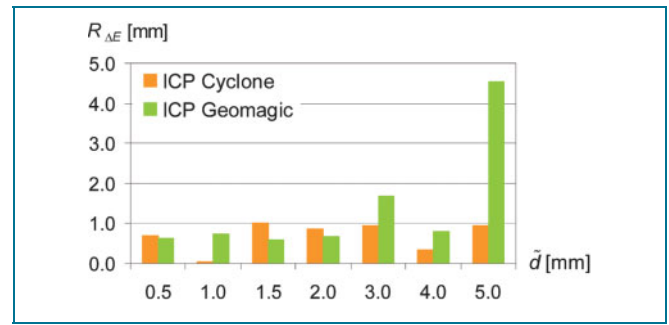


Abb. 4: : Mittlere Abstandsabweichung $R_{\Delta E}$ für den HDS 6000 bei Sollverschiebung \tilde{d} aus ICP-Auswertung mit Cyclone und Geomagic

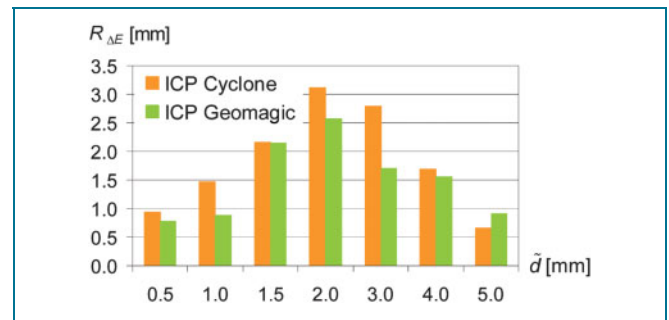


Abb. 5: : Mittlere Abstandsabweichung $R_{\Delta E}$ für den Photon 80 bei Sollverschiebung \tilde{d} aus ICP-Auswertung mit Cyclone und Geomagic

der Auswertung der Messungen mit dem Photon 80, die in Abb. 5 dargestellt ist.

Auffällig ist, dass bei Sollverschiebungen im Bereich von 0,5 mm bis 2,0 mm die mittleren Abstandsabweichungen $R_{\Delta E}$ ansteigen und bei Sollverschiebungen ab 2,0 mm bis 5,0 mm wieder abfallen. Da sich dieses Verhalten bei der Laboruntersuchung des Photon 80 nicht gezeigt hat, siehe Abb. 2, könnten nicht entdeckte Veränderungen in den Punktwolken der Vergleichsepochen das Ergebnis beeinflusst haben. Obwohl die mittleren Abstandsabweichungen aus beiden ICP-Auswertungen ein ähnliches Verhalten aufweisen, sind auch hier korrespondierende Einzelwerte $R_{\Delta E}$ teilweise stark unterschiedlich.

Bildet man aus den Werten $R_{\Delta E}$, die sich aus der ICP-Auswertung mit Cyclone und Geomagic ergeben, jeweils den Mittelwert $\bar{R}_{\Delta E, ICP, Cyclone}$ bzw. $\bar{R}_{\Delta E, ICP, Geomagic}$ und fasst diese dann zu einem Gesamtmittel $\bar{R}_{\Delta E, ICP}$ zusammen, erhält man die Ergebnisse in Tabelle 1.

Bildet man aus den Ergebnissen der Messungen auf der Baustelle das Verhältnis der mittleren Abstandsabweichungen der eingesetzten Laserscanner, ergibt sich mit $\bar{R}_{\Delta E, HDS\ 6000, ICP} : \bar{R}_{\Delta E, Photon\ 80, ICP} = 0,77\ \text{mm} : 1,67\ \text{mm} = 1 : 2,2$ wieder das gleiche Verhältnis wie in den Ab-

Tabelle 1: Mittlere Abstandsabweichungen aus ICP-Auswertungen

	$\bar{R}_{\Delta E, ICP, Cyclone}$ [mm]	$\bar{R}_{\Delta E, ICP, Geomagic}$ [mm]	$\bar{R}_{\Delta E, ICP}$ [mm]
Leica HDS 6000	0,69	0,85	0,77
Faro Photon 80	1,83	1,51	1,67

schnitten 2 und 3.1. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse keine unberücksichtigten systematischen Effekte enthalten und dass die Ergebnisse nicht durch unentdeckte Veränderungen in den Punktwolken der Vergleichsepochen beeinflusst sind.

Vergleicht man den Wert $\bar{R}_{\Delta E, ICP} = 0,77$ mm für den HDS 6000 mit dem Wert $\bar{R}_{\Delta E, ICP} = 0,29$ mm aus der Untersuchung in Abschnitt 3.2, lässt sich eine Zunahme der mittleren Abstandsabweichung um den Faktor 2,7 feststellen. Aus dem Verhältnis der Punktzahl auf der Platte von 700 zu 10 000 wäre eine Zunahme der Abstandsabweichung um den Faktor 3,8 zu erwarten gewesen. Die Ursache für den geringeren Faktor von 2,7 kann z. B. in einer günstigen räumlichen Verteilung der für die ICP-Auswertung verwendeten Punkte liegen.

Nimmt man das Dreifache der Werte $\bar{R}_{\Delta E, ICP}$ aus Tabelle 1 als Grenze, ab der Verschiebungen sicher erkannt werden können, ergibt sich für den HDS 6000 ein Wert von 2,3 mm und für den Photon 80 ein Wert von 5,0 mm. Auch diese Werte dürfen wieder nur in Verbindung mit der Anzahl der Punkte auf dem Untersuchungsobjekt interpretiert werden.

4.2 Anmerkungen zum Einsatz des ICP-Algorithmus

Kritisch anzumerken ist, dass die Ergebnisse einer Registrierung mit Hilfe des ICP-Algorithmus offensichtlich softwareabhängig sind, wie die Untersuchungen im vorangegangenen Abschnitt gezeigt haben. Um die Ergebnisse für den Anwender transparenter zu machen, sind folgende Punkte wünschenswert:

- Dokumentation der verwendeten Formeln und Algorithmen,
- Vereinheitlichung der Parameter für die Voreinstellungen,
- Bereitstellung von einheitlichen und aussagekräftigen Güteparametern,
- Visualisierung der für die Registrierung verwendeten Punkte und Visualisierung der Restklaffungen.

Weiterhin ist seitens des Anwenders ein gewisses Maß an Erfahrung bei der Wahl der Parameter für die Voreinstellungen erforderlich. Wählt man z. B. in dem behandelten Beispiel den Suchradius für den ICP-Algorithmus im Programm Cyclone mit 1 mm, werden aus der Punktwolke mit 24 Millionen Punkten lediglich 122 Punkte als korrespondierende Punkte für die Registrierung verwendet. Die auf Grundlage dieser Registrierung berechneten Verschiebungen der Platte wichen um durchschnittlich 4 mm vom Sollwert ab. Das optimale Ergebnis in Bezug auf die Erkennbarkeit von Verschiebungen der Platte ergab sich mit einem Suchradius von 5 cm, was zu einer Verwendung von ca. 1 Million korrespondierender Punkte führte. Eine Vergrößerung des Suchradius lieferte vergleichbare Ergebnisse.

5 Schlussbetrachtung

In Laboruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass mit dem Leica HDS 6000 Deformationen in Form von Verschiebungen einer Ebene ab 0,6 mm sicher erkannt wer-

den können. Für den Faro Photon 80 liegt dieser Wert bei 1,4 mm. Diese hohe äußere Genauigkeit ist durch die Verwendung ausgleichender Ebenen mit hoher Redundanz begründet.

In einer weiteren Untersuchung mit dem HDS 6000 bei wechselnden Instrumentenstandpunkten wurden unterschiedliche Registrierungsverfahren verwendet, um die Punktwolken auf das Koordinatensystem einer Referenzmessung zu transformieren. Hierbei zeigte sich, dass Verschiebungen ab ca. 1 mm sicher erkannt werden können, wobei bei dieser Untersuchung ein geringer Einfluss des verwendeten Registrierungsverfahrens erkennbar war.

Zur Auswertung von Messungen auf einer Baustelle wurde ausschließlich der ICP-Algorithmus zur Registrierung eingesetzt. Dieses Verfahren bietet sich insbesondere in bebauten Gebieten an, um Punktwolken ohne Anlage eines Festpunktfeldes und ohne Signalisierungsaufwand zu registrieren. Die Messungen wurden mit dem Leica HDS 6000 und dem Faro Photon 80 durchgeführt, die ICP-Registrierung erfolgte mit den Programmen Cyclone und Geomagic.

Für den HDS 6000 ergab sich, dass Punktverschiebungen ab 2,3 mm sicher erkannt werden können. Für den Photon 80 liegt dieser Wert bei 5,0 mm. Diese Angaben dürfen aber nur in Verbindung mit der Redundanz bei der Berechnung der ausgleichenden Ebenen interpretiert werden und können daher nicht verallgemeinert werden. Es lässt sich aber grundsätzlich feststellen, dass die Genauigkeit durch Modellierung, hier durch ausgleichende Ebenen, erheblich gegenüber der Genauigkeit einer Einzelpunktbestimmung gesteigert werden kann. Für Deformationsmessungen unter Verwendung von Laserdaten ist diese Vorgehensweise somit generell zu empfehlen.

Bei der Auswertung der Laserdaten ist weiterhin aufgefallen, dass sich die Ergebnisse aus den beiden Softwareprodukten zum Teil stark unterscheiden und dass die Parameter für die Voreinstellungen mit Sorgfalt gewählt werden müssen, um ein brauchbares Ergebnis zu erzielen. Da es z. B. für die Festlegung des Suchradius bei der Anwendung des ICP-Algorithmus keine festen Regeln gibt, ist auf jeden Fall eine Untersuchung verschiedener Einstellungen für den Radius empfehlenswert. Dieser sollte derart gewählt werden, dass die Standardabweichung für die Registrierung einen möglichst kleinen und die Anzahl der für die Registrierung verwendeten Punkte einen möglichst großen Wert annimmt.

Eine abschließende Beurteilung von Registrierungsverfahren kann nicht gegeben werden, da jedes Verfahren nur so gut ist, wie die erforderlichen Umgebungsverhältnisse erfüllt sind. Verfahren mit Hilfe ausgeglichener Objektgeometrien können nur dann ein zufriedenstellendes Ergebnis liefern, wenn die erforderlichen Objekte, z. B. zylindrische Rohrleitungen bei der Verwendung von Raumgeraden, Hausfassaden bei der Verwendung ausgleichender Ebenen, tatsächlich im Objektraum vorhanden sind. Der ICP-Algorithmus ist universell einsetzbar, benötigt aber strukturierte Objektflächen. Ebenfalls universell einsetzbar sind die punktbezogenen Verfahren, die aber einen hohen Vorbereitungsaufwand erfordern und nicht die volle Punktdichte der Laserdaten für die Registrierung nutzen.

Für die Zukunft ist anzustreben, die Vorteile der unterschiedlichen Verfahren synergetisch zu nutzen. Dies kann wie folgt realisiert werden:

1. Automatische Erkennung von Geraden, Ebenen, Freiformflächen, Zielmarken und Regionen für die Anwendung des ICP-Algorithmus im Objektraum.
2. Berechnung ausgleichender Objektgeometrien.
3. Automatisches Auffinden korrespondierender Objektgeometrien und Einzelpunkte.
4. Gemeinsame Registrierung aller Punktwolken unter Verwendung aller Korrespondenzen unter strenger Varianzfortpflanzung, so dass deformierte Bereiche erkannt und von der Registrierung ausgeschlossen werden können.

Danach kann die Ausgabe von Deformationsparametern und der zugehörigen Standardabweichungen für die deformierten Objektbereiche erfolgen.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 17N0509 gefördert.

6 Literatur

- [1] BESL P. & N. MCKAY (1992) *A method for registration of 3D shapes*. IEEE Trans. Pattern Anal. And Machine Intell. 14(2), 239-256
- [2] ELING D. (2009): *Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 641, München
- [3] GIELSDORF F., L. GRÜNDIG, I. MILEV (2008): *Deformation Analysis with 3D Laser Scanning*. Proceedings of the Joint Symposium „Measuring the Changes“ of the FIG 13th Symposium on Deformation Measurement and Analysis and the IAG 4th Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering - Lisbon, Portugal, 12-15 May 2008
- [4] GRÜN, A, ARCA, D (2005): *Least squares 3D surface and curve matching*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 59 (3), 151-174
- [5] HEISTER H. (2006): *Zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS)*. In: Terrestrisches Laser-Scanning (TLS 2006), Beiträge zum 72. DVW-Seminar am 9. und 10. November 2006 in Fulda. DVW-Schriftenreihe Band 51/2006, 35-44
- [6] HUXHAGEN U., F. KERN, B. SIEGRIST (2009): *Proposal for a full testing procedure for terrestrial laser scanners (TLS)*. In: A. GRÜN, H. KAHMEN, *Optical 3-D Measurement Techniques IX*, Volume II, 1-9
- [7] LICHTENSTEIN M. & W. BENNING (2010): *Registrierung von Punktwolken auf der Grundlage von Objektprimitiven*. In: T. Luhmann, C. Müller (Hrsg.), *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik*, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2010. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 14-21
- [8] STAIGER R. (2005): *Terrestrisches Laserscanning – eine neue Universalmethode?* In: Terrestrisches Laser-Scanning (TLS), Beiträge zum 65. DVW-Seminar am 21. und 22. November 2005 in Fulda. DVW-Schriftenreihe Band 48/2005, 3-15

Anschriften der Autoren:

Prof. Dr.-Ing. FRANK NEITZEL, WALDEMAR MORDWINZEW,
CHRISTIAN LERCHE

i3mainz – Institut für Raumbezogene Informations-
und Messtechnik, Fachhochschule Mainz

Lucy-Hillebrand-Str. 2, 55128 Mainz

E-Mail: neitzel@geoinform.fh-mainz.de