

## Zwei Varianten zur direkten Georeferenzierung terrestrischer Laserscans

HARALD VENNEGEERTS, JENS-ANDRÉ PAFFENHOLZ, JENS MARTIN & HANSJÖRG KUTTERER, Hannover

**Keywords:** Direkte Georeferenzierung, Mobile Mapping, LiDAR, TLS

**Summary:** *Two Variants on Direct Geo-referencing of Terrestrial Laser Scans.* This paper presents two methods for direct geo-referencing of terrestrial laser scans. The first approach deals with the direct estimation of the sensor position and orientation with GNSS antennas mounted on a laser scanner. In the second approach a mobile mapping system is presented. This system is based on an integration of INS and GPS for positioning and orientation tasks of the hybrid sensor system formed by one laser scanner and additional navigation sensors. The paper presents the common principle, the current system setup as well as the benefit of both variants for direct geo-referencing of terrestrial laser scans.

**Zusammenfassung:** In diesem Beitrag werden zwei Varianten zur direkten Georeferenzierung von terrestrischen Laserscans vorgestellt. Für eine statische Plattform wird die Position und Ausrichtung des Laserscanners direkt durch ein integriertes kinematisches GNSS bestimmt. In der zweiten Aufnahmevariante wird die Kombination aus inertialem Messsystem (INS) und GPS genutzt, um das hybride Sensorsystem zu orientieren. Das gemeinsame Prinzip beider Ansätze wird im Kontext der Georeferenzierung erläutert. Aktuelle Realisierungen werden dargestellt und schließlich wird daraus das Potential beider Varianten für die direkte Georeferenzierung abgeleitet.

---

### 1 Einführung

Objekterfassende Sensoren wie terrestrische Laserscanner können eine lokale Szene dreidimensional, hochauflösend und automatisch abbilden. Sind mehrere lokale Szenen auf ein gemeinsames System zu beziehen (Registrierung), werden üblicherweise (signalisierte) Passpunkte genutzt, um die relativen Transformationen zwischen den lokalen Szenen zu parametrisieren. Der Bezug zu einem erdfesten System (Georeferenzierung) ist dann hergestellt, wenn diese Passpunkte ebenfalls im erdfesten System koordiniert sind. Passpunkte zu koordinieren ist jedoch eine zeitaufwändige Aufgabe.

Der vorliegende Beitrag stellt zwei Varianten vor, mit denen die Parameter zur Georeferenzierung direkt und automatisch bestimmt werden, ohne dass räumliche Passpunkte erforderlich sind. Vielmehr werden zusätzliche

Sensoren benutzt, um die Transformationsparameter zu ermitteln. Weitere Bedingungen charakterisieren den ersten Ansatz zur direkten Georeferenzierung. So kann beim statischen Scannen auf einem festen Standpunkt davon ausgegangen werden, dass sich das Zentrum des Scans erdbezogen nicht verändert. Außerdem kann die konstante horizontale Rotation des Laserscanners genutzt werden, um daraus ein Azimut redundant abzuleiten.

Beim zweiten Ansatz werden keine Bedingungen an die Orientierung des Scanners gestellt. Der Laserscanner lässt sich in einer freien Trajektorie im Raum bewegen. In diesem Ansatz werden alle Freiheitsgrade für die Transformation ins erdfeste System kontinuierlich bestimmt.

Um objekterfassende Sensoren mit Navigationssensoren zu kombinieren, ist eine gemeinsame zeitliche und räumliche Basis zu schaffen. Wie ein terrestrischer Laserscanner

in ein derartiges hybrides Sensorsystem integriert werden kann, wird im Folgenden beschrieben.

Zunächst wird die Methodik der direkten Georeferenzierung für den terrestrischen Fall gezeigt. Je nachdem wie viele Freiheitsgrade vorliegen, werden dazu zwei Varianten vorgestellt. Danach wird die Umsetzung beider Ansätze erläutert, in der die Genauigkeitsanalyse ein integrierter Systembaustein ist. Abschließend erfolgt eine kurze Diskussion über das Potential des Systems und über zukünftige Entwicklungstendenzen.

## 2 Methodik der direkten Georeferenzierung

Terrestrische Laserscanner bilden die Umgebung im sensoreigenen lokalen System ab. Für die Transformation gescannter Objekte in ein übergeordnetes (erdfestes) System sind für alle lokal gescannten Punkte (beschrieben durch den Positionsvektor  $\mathbf{x}_s$  im lokalen System) die aktuelle Rotation (beschrieben durch die Drehmatrix  $\mathbf{R}_s^E$  vom Sensorsystem in das erdfeste System) und Translation (beschrieben durch den Positionsvektor  $\Delta\mathbf{x}_s^E$  als Zentrum des Sensorsystems im erdfesten System) des Scanners zu bestimmen:

$$\mathbf{x}_E = \mathbf{R}_s^E \cdot \mathbf{x}_s + \Delta\mathbf{x}_s^E \quad (1)$$

Die Umgebung wird beim Terrestrischen Laserscanning (TLS) prinzipiell sequentiell erfasst. Alle Beobachtungen sind daher sowohl zeitlich als auch räumlich zu referenzieren. Die Anzahl der zu bestimmenden Freiheitsgrade ist dabei abhängig vom Messverfahren, von den Eigenschaften des Sensors und von nutzbaren Informationen aus dem Objektraum.

Sequentielle Beobachtungen sind jeweils zeitlich zuzuordnen. Die Zuordnung kann entweder intern, extern oder objektraumbezogen realisiert werden. Sind konstante Abtastraten der Distanz und der Rotationen charakteristisch für die Sequenz, ist damit die zeitliche Referenz der Beobachtungen intern im scannenden System festgelegt. Die Beobachtungen lassen sich in gleichen Winkelinkrementen zuweisen.

Werden weitere (externe) Sensoren für die zeitliche Zuordnung eingesetzt, ist eine konstante Abtastrate nicht zwingend. Eine externe Zeitskala erlaubt darüber hinaus, scannende Systeme in räumlich referenzierende Systeme zu integrieren. Werden konstante Rotationen im scannenden System vorausgesetzt, kann die Zeitskala alternativ auch aus dem Objektraum generiert werden.

Im 3D-Modus – der klassischen Anwendung des TLS – wird davon ausgegangen, dass sich das Zentrum eines Scans während der Aufnahme nicht ändert. Die zeitliche Referenz der einzelnen Beobachtungen wird gewöhnlich intern durch konstante Abtastraten der Distanz und konstanter Rotation um Stehachse (horizontal) und Umlenkspiegel (vertikal) gewährleistet. Ein so gewonnener 3D Scan wird daher als konsistent betrachtet und als „statisch“ bezeichnet. Mit einer einheitlichen Rotation und Translation lässt er sich in ein übergeordnetes System transformieren. Pro Scan verbleiben sechs geometrische Freiheitsgrade. Sie werden üblicherweise indirekt mittels korrespondierender Punkte im Objektraum bestimmt.

Scans im 3D Modus sind jedoch nicht zwingend als „statisch“ zu betrachten. Da die Beobachtungen sequentiell erfolgen, ist die Richtung der Beobachtung zeitlich variabel. TLS ist im Grundsatz ein kinematisches Messsystem. Rotationen um Stehachse und Umlenkspiegel können auch als eine Zeitreihe betrachtet werden. Mit zusätzlicher Sensorik lassen sie sich auch direkt beobachten. Voraussetzung dafür ist, dass die Beobachtungsrichtung des Scanners mit den georeferenzierenden Sensoren synchronisiert wird. Exzentrisch installierte referenzierende Sensoren beschreiben eine Trajektorie, aus der das Zentrum des Scans bestimmt werden kann, das je 3D Scan als konstant angenommen wird. Alle geometrischen Freiheitsgrade werden somit direkt ermittelt. Dieser Ansatz wird im Folgenden als schnelle statische Georeferenzierung bezeichnet.

Die Abb. 1 zeigt die Realisierung eines Systems, das die Parameter der Georeferenzierung direkt liefert. Als referenzierender Sensor wird hier ein kinematisches GNSS (Global Navigation Satellite System), bestehend aus zwei Antennen eingesetzt. Für einen 3D Scan



**Abb. 1:** Aktuelle Realisierung des hybriden Sensorsystems am GIH.

beschreiben die Positionen der Antennen jeweils eine Trajektorie, aus der sich die aktuelle horizontale Ausrichtung (Azimut) eines Scans ableiten lässt. Dreht sich der Antennenreferenzpunkt (ARP) horizontal mit der Scanrichtung, kann von einem konstanten polaren Offset  $\Delta\text{Azimut}$  ausgegangen werden. Eine konstante Rotationsgeschwindigkeit um die Stehachse des Scanners ermöglicht es, das Azimut redundant abzuleiten. Da die Trajektorie aus den Positionslösungen des GNSS per se auf ein übergeordnetes System bezogen sind, kann daraus auch die Position des Scannerzentrums  $\Delta\mathbf{x}_S^E$  festgelegt werden. Verbleibende Neigungsanteile lassen sich entweder durch zusätzliche Neigungssensoren erfassen bzw. durch entsprechende Aufstellung kompensieren.

Im zweiten hier dargestellten Ansatz werden die Orientierungselemente  $\mathbf{R}_S^E$  und  $\Delta\mathbf{x}_S^E$  ebenfalls direkt über zusätzliche Sensoren bestimmt. Anders als im statischen Fall wird jedoch keine invariante Position  $\Delta\mathbf{x}_S^E$  vorausgesetzt. Der Scanner kann während der Aufnahme frei im Raum bewegt werden. Diese Variante wird demnach als Georeferenzierung on-the-fly bezeichnet. Für jeden gescannten Punkt existieren somit sechs eigene geometrische Freiheitsgrade. Alle sechs Parameter der Rotation und Translation sind dafür kontinuierlich zu ermitteln. Die Position des Scanners kann wie im statischen Ansatz mittels GNSS beobachtet werden. Neben den Positionssensoren sind zusätzliche Sensoren zu integrieren, die die aktuellen Rotationsanteile erfassen. Bewegt sich die Plattform, lässt sich aus der Richtung der Fahrtgeschwindigkeit die zugehörige horizontale Ausrichtung des Scan-

ners ableiten (HESSE 2008). Anders als im statischen Fall kann hier aufgrund der Fahrdynamik nicht von einer horizontalen Lage des Scanners ausgegangen werden. Diese Rotationsanteile, vor allem diejenigen um die Längsachse eines Fahrzeuges (Rollen), sind daher explizit zu erfassen. Wird zusätzlich zum GNSS eine inertielle Messeinheit (IMU) integriert, können alle sechs Parameter geschätzt werden, selbst wenn zeitweilig Abschattungen die GNSS Lösung beeinträchtigen. Wie bei der schnellen statischen Georeferenzierung ist auch im bewegten Fall die Synchronisation für den vollständigen Messzeitraum zu gewährleisten. Die gemeinsame zeitliche Basis für den Scanner und die Navigationssensoren kann mit einer hardware-basierten Registrierung der Scanzeitpunkte extern realisiert werden. Üblicherweise werden dazu die Umlaufzeiten des Umlenkspiegels erfasst. Da diese Umlenkeinheiten mit sehr konstanter Geschwindigkeit rotieren, lässt sich deren Eigenschaft auch nutzen, um selbst eine Zeitskala zu erstellen (VENNEGEERTS et al. 2008). Die Uhrparameter ergeben sich aus geometrischen Bedingungen im Objektraum.

In der Aerophotogrammetrie wird die Kombination der Beobachtungen aus IMU und GNSS bereits seit mehreren Jahren für die direkte Georeferenzierung eingesetzt. Umfangreiche Versuche und direkte Vergleiche mit dem Orientierungswinkel aus der Aerotriangulation finden sich in (CRAMER 2003). Aspekte der Kalibrierung, speziell auch die relative Ausrichtung der Winkel zwischen den Koordinatensystemen der erfassenden und referenzierenden Sensoren behandelt z. B. (JACOBSEN 2002). Untersucht wird dort auch eine langfristige Stabilität dieser Orientierungselemente. Für airborne Anwendungen stellt die direkte Georeferenzierung kein aktuelles Forschungsthema mehr da, da die Lösungen für hinreichend ausgereift gehalten werden (JACOBSEN 2008).

Für den hier vorstellten terrestrischen Fall der direkten Georeferenzierung von Laserscannern sind eine Reihe von abweichenden Merkmalen charakteristisch. Positionslösungen des kinematischen GNSS sind hier oft nicht durchgängig verfügbar. Zudem zeigt der Laserscanner durch die feste Adaptierung auf der bewegten Plattform während der Fahrt ein

stark dynamisches Verhalten, besonders bezüglich der Querneigung. Schließlich sind die Anforderungen an die absolute Orientierung der Winkel bei den hier vorliegenden vergleichbar kurzen Zielweiten entsprechend geringer, wodurch auch alternative Verfahren bzw. Sensoren einsetzbar werden. Für den terrestrischen Fall sind also die Bedingungen und damit auch die Auswirkungen auf die referenzierte gescannte Szene individuell zu betrachten. Dies wird im hier vorgestellten Ansatz der integrierten Genauigkeitsanalyse berücksichtigt, der die Wirkung der direkten Georeferenzierung unmittelbar quantifiziert und visualisiert.

### 3 Schnelle statische Georeferenzierung

#### 3.1 Methodik

Die schnelle statische Georeferenzierung basiert auf klassischen 3D Scans von einer statischen Plattform. Um die Parameter der Georeferenzierung bereitzustellen wird ein hybrides Sensorsystem bestehend aus einem Laserscanner zur Objekterfassung und kinematischem GNSS zur Positions- und Orientierungsbestimmung aufgebaut (vgl. Abb. 1). Die in einem hybriden Sensorsystem notwendige gemeinsame Zeitbasis der Einzelkomponenten wird durch das PPS (pulse per second) Signal des GNSS definiert. Jeder volle Umlauf des Umlenkspiegels des Laserscanners wird durch den Event-Marker-Input des GNSS Re-

ceivers registriert. Somit erhält jedes 2D Profil des Scans einen eindeutigen Zeitstempel in der gemeinsamen Zeitbasis.

Ein besonderes Merkmal des hybriden Sensorsystems ist die Nutzung der konstanten Rotationsgeschwindigkeit des Laserscanners um die Stehachse zur Ableitung der Orientierungsparameter. Auf Grund der Adaption der zwei GNSS Antennen auf dem Laserscanner (vgl. Abb. 2) beschreiben die ARPE durch die konstante Rotation des Laserscanners um die Stehachse jeweils eine Raumkurve mit den Parametern Mittelpunkt und Radius. Der Mittelpunkt repräsentiert die Position des Laserscanners. Aus den präzisen 3D Positionen der Raumkurve und der Position des Laserscanners lässt sich für jedes 2D Profil des Laser-scans ein Azimut ableiten. Dabei wird die Güte der schnellen statischen Georeferenzierung durch die Azimutgenauigkeit bestimmt. Eine Ungenauigkeit des abgeleiteten Azimutes von  $0.1^\circ$  führt bei einer Scanentfernung von 30 m bereits zu einer metrischen Querabweichung der Punktlage von 5 cm.

Aus der Trajektorie der ARPE kann neben der invarianten Position  $\Delta \mathbf{x}_S^E$  auch die Orientierung als verbleibender Freiheitsgrad abgeleitet werden. Das zweistufige Modell zur robusten Parameterschätzung der Trajektorie soll hier nur grob wiedergegebene werden. Eine ausführliche Diskussion ist in (PAFFENHOLZ & KUTTERER 2008) zu finden.

Im ersten Schritt erfolgt eine Projektion der 3D Positionen auf eine ausgleichende Ebene. Dieser Schritt ist erforderlich, um die 3D Informationen der Punkte zu nutzen. Des Weiteren

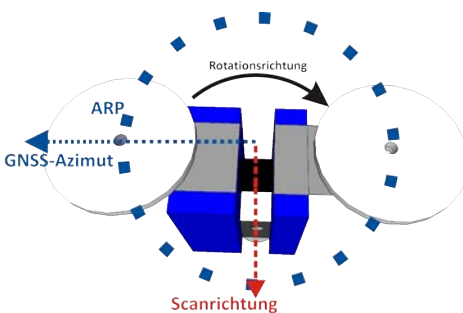


Abb. 2: Schematische Darstellung des hybriden Sensorsystems.

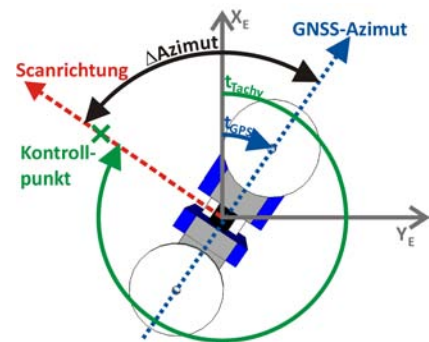


Abb. 3: Schematische Darstellung der Ableitung des Azimuts.

ren können dadurch Rotationen auf Grund des Koordinatensystems berücksichtigt werden. Im zweiten Schritt wird ein ausgleichender Kreis durch die in die Ebene projizierten Punkte geschätzt. Dies liefert zum einen Mittelpunktskoordinaten (invariante Position  $\Delta \mathbf{x}_S^E$  des Laserscanners) und Radius und zum anderen die ausgeglichenen und ausreißerfreien Beobachtungen. Diese werden anstelle der originalen Beobachtungen verwendet, da die leicht verrauschten Originalpositionen durch die Ausgleichung geglättet werden und somit die Azimutzuordnung optimiert werden kann.

Aus der ausgeglichenen Trajektorie der ARPe und der invarianten Position des Laserscanners lässt sich für jedes 2D Profil des Laserscans ein Azimut berechnen. Für die absolute Angabe des Azimutes ist zusätzlich die Anordnung der GNSS Antennen in Bezug auf die Scanrichtung zu beachten (vgl. Abb. 3). Das aus der gewählten Adaptierung resultierende  $\Delta$ Azimut ist ein konstantes polares Offset, wenn jegliche Fehlereinflüsse erfassbar sind und die Rotationsgeschwindigkeit des Laserscanners korrekt ermittelt wurde.

Wird das  $\Delta$ Azimut an jeder Position des Vertikalmotors berücksichtigt, ist die direkte Georeferenzierung des 3D Scans durch die Zuordnung eines Azimutes zu jedem 2D Profil möglich. Die Güte der Azimutzuordnung ist daher unmittelbar von der Güte der Positionsbestimmung mit dem kinematischen GNSS abhängig. Als Fehlerquellen der GNSS Komponente sind neben Nahfeldeffekten, verursacht durch die Antennenadaptation aus Aluminium und das Laserscannergehäuse, Mehrwegeeffekte sowie die alternierende Antennenausrichtung in Betracht zu ziehen. Die Analyse der genannten Fehlerquellen sowie eine Optimierung der Auswertung sind in Vorbereitung. Gegenstand aktueller Untersuchungen ist auch die Ableitung von zusätzlichen, systemstabilisierenden Informationen aus beiden GNSS Ausrüstungen, was die Nutzung von zwei GNSS Ausrüstungen rechtfertigt. Des Weiteren ist durch eine kombinierte Auswertung von GPS und Glonass sowie zukünftig Galileo eine Verbesserung der kinematischen Positionsbestimmung zu erwarten.

### 3.2 Aufbau und Potential des Systems

Die aktuelle Realisierung des hybriden Sensorsystems am Geodätischen Institut (GIH) der Leibniz Universität Hannover besteht aus einem Laserscanner vom Typ Leica HDS 4500 (baugleich mit dem Zoller+Fröhlich (Z+F) Imager 5003) zur Objekterfassung und zwei geodätischen L1/L2 GNSS Receivern und Antennen zur Positions- und Orientierungsbestimmung.

Das Potential des hybriden Sensorsystems wird im Folgenden anhand von Testmessungen im Ehrenhof des Großen Garten der Herrenhäuser Gärten aufgezeigt. Folgende Komponenten und Rahmenbedingungen wurden für die Testmessungen gewählt:

- Beim Laserscanner Leica HDS 4500 wurden die Scanparameter „high, low noise“ sowie ein horizontaler Bereich von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  gewählt. Die Dauer der Datenerfassung betrug ungefähr 15 Minuten.
- Für die Beobachtung der kreisförmigen Bewegung des Laserscanners respektive der Trajektorien der ARPe kam folgende GNSS Ausrüstung zum Einsatz: Ein Trimble 5700 Receiver mit Geodetic Zephyr Antenne (vgl. Abb. 1 links), der eine Datenrate von 10 Hz ermöglicht. Der Receiver zeichnete die zur zeitlichen Synchronisation notwendigen Impulse des Laserscanners durch den Event-Marker Eingang auf und speicherte sie in der RINEX Beobachtungsdatei. Des Weiteren wurde ein Leica GRX1200GG Pro Receiver mit einer AX1202GG Antenne (vgl. Abb. 1 rechts) mit einer Datenrate von 20 Hz verwendet. Als lokale Referenzstation diente ebenfalls ein Leica GRX1200GG Pro Receiver mit einer AX1202GG Antenne und einer Erfassungsrate von 20 Hz.

Die GNSS Auswertung erfolgte für die obige Szene sowohl individuell für die beiden auf dem Laserscanner adaptierten GNSS Antennen als auch integriert für beide GNSS Antennen gemeinsam. Dabei ergaben sich bei einer Datenrate von 10 Hz circa 8000 3D Positionen für die Trajektorie der ARPe. Neben den 3D Positionen stehen auch Varianz-Kovarianzmatrizen der Positionen zur Verfügung. Die

Ergebnisse einer individuellen Auswertung beider GNSS Antennen ist in (PAFFENHOLZ & KUTTERER 2008) zu finden. Die folgenden Ergebnisse resultieren aus einer integrierten GNSS Auswertung beider Antennen, wodurch sich eine Genauigkeitssteigerung der Azimutzuordnung erzielen lässt.

Zur Validierung der Messungen in den Herrenhäuser Gärten wurden zusätzlich Messungen mit einer Totalstation zu ausgewählten Kontrollpunkten durchgeführt. Somit kann in diesen Kontrollpunkten die Differenz zwischen den Laserscanner Richtungen und den GNSS Azimuten ( $\Delta$ Azimut) überprüft werden. Unter der Annahme einer konstanten Rotation des Laserscanners sollte sich für das  $\Delta$ Azimut (vgl. Abb. 3) ein konstanter Wert ergeben.

Tab. 1 zeigt für ausgewählte Kontrollpunkte die Zielentfernung, den aus der ARP Trajektorie abgeleiteten Richtungswinkel sowie den aus den tachymetrischen Messungen abgeleiteten Richtungswinkel. Weiterhin zeigt Tab. 1 das  $\Delta$ Azimut sowie die aus der Azimutzuordnung resultierende metrische Unsicherheit in der Entfernung der Kontrollpunkte. Für kurze Distanzen bis zu 30 m liegen die beobachteten Querabweichungen gegenüber einer Punktbestimmung mit einer Totalstation deutlich unter 2 cm. Bei circa 30 m zeigt sich ein deutlicher Anstieg der Querabweichung auf circa 7 cm bis zu über 10 cm für Entfernungen

von 53 m. Dieser Anstieg lässt sich durch ein ungünstiges Signal-Rausch-Verhältnis des eingesetzten Laserscanners für Entfernungen ab 30 m erklären (BÖHLER 2005). Hinzu kommt, dass bei den gewählten Scanparametern „high, low noise“ für Entfernungen von über 30 m die manuelle Identifizierung des 2D Profils eines ausgewählten Kontrollpunktes eine gewisse Unsicherheit von 1–2 Profilen mit sich bringt. Des Weiteren liegen die Distanzen von 50 m bzw. 53 m nahe an der Grenze des eindeutigen Entfernungsbereichs von 53.5 m des Laserscanners Leica HDS 4500.

## 4 Georeferenzierung on-the-fly

### 4.1 Methodik

Der zweite hier vorgestellte Ansatz bestimmt die Parameter zur Georeferenzierung ohne Bedingungen an die Aufnahmekonstellation, also für eine freie Trajektorie mit sechs Freiheitsgraden je gescannten Punkt. Objekterfassende als auch referenzierende Sensoren sind dafür in einem hybriden System zu integrieren. Wird ein Laserscanner zur Aufnahme der Objekte eingesetzt, kann dieser prinzipiell in unterschiedlichen Messmodi betrieben werden. Da im kinematischen Einsatz auch bei höheren Fahrtgeschwindigkeiten die Umgebung möglichst umfassend abgebildet werden

Tab. 1: Ergebnisse der Azimutzuordnung für ausgewählte 2D Profile; Relative GNSS-Auswertung beider Antennen mit Wa1 (hg4thg4lgnCA).

Kontrollpunkt	Zielentfernung [m]	$t_{GPS}$ [°]	$t_{Tachy}$ [°]	$\Delta$ Azimut [°]	Metrische Unsicherheit @ Zielentfernung [cm]
327	50	21.538	109.707	88.169	14.6
350	53	36.290	124.178	87.888	9.9
306	19	203.834	291.796	87.962	0.5
309	17	246.869	334.833	87.963	0.1
311	19	271.922	359.878	87.956	0.6
314	22	296.939	24.905	87.966	0.7
320	28	311.225	39.076	87.851	7.5
321	32	320.557	48.688	88.131	9.2
324	37	345.143	73.042	87.900	7.5
325	44	354.726	82.795	88.069	6.0

soll, wird hier der 2D-Profilmodus gewählt. Durch die Bewegung des Fahrzeugs beschreiben die gescannten Punkte dann die Form einer Helix, deren Tiefe durch Fahrtgeschwindigkeit und Rotationsgeschwindigkeit des vertikalen Umlenkspiegels skaliert wird.

Hybride Sensoren erfordern eine gemeinsame zeitliche und räumliche Basis. Für die zeitliche Basis wird gewöhnlich ein externes hardware-basiertes Zeitnormal installiert, das eine Referenz für die beteiligten Sensoren darstellt. Das hier vorliegende System beinhaltet einen Echtzeitprozessor, der die Zeitpunkte des Umlaufs des vertikalen Umlenkspiegels misst. Da durch die Integration der Inertial- und Satellitennavigation bereits ein solches Zeitnormal (PPS Signal des GPS) besteht, können optional software-basiert die Umlaufzeiten auch auf das Zeitnormal des INS/GPS adaptiert werden.

Unter der Annahme einer konstanten relativen Orientierung zwischen den Sensoren lässt sich diese interne räumliche Transformation prinzipiell aus einer örtlichen Einmessung (z. B. photogrammetrisch oder tachymetrisch) bzw. alternativ indirekt aus dem Objektraum bestimmen. Das Body-System der IMU repräsentiert dabei ein lokales Zielsystem, von dem anschließend über ein topozenrisches Navigationssystem in das erdfeste System transformiert wird.

Entsprechend der aktuellen Orientierung des Systems werden die Punkte aus der Profilmessung des terrestrischen Laserscanners  $\mathbf{x}_{S2D}$  in das übergeordnete geozentrische System transformiert (HEINZE 1996):

$$\mathbf{x}_E = \mathbf{R}_{Na}^E \cdot \mathbf{R}_{Bo}^{Na} \cdot (\mathbf{R}_{S3D}^{Bo} \cdot \mathbf{R}_{S2D}^{S3D} \cdot \mathbf{x}_{S2D} + \Delta \mathbf{x}_{Sc}^{Bo}) + \Delta \mathbf{x}_{Bo}^E \quad (2)$$

Der Übergang wird dabei über folgende Systeme realisiert:

- Lokales 3D-System des Laserscanners (*S3D*)
- Body-System (*Bo*) (in diesem Fall dem Sensor-System der IMU entsprechend)
- Topozentrisches Navigationssystem (**N**orth, **E**ast, **D**own) (*Na*)
- Übergeordnetes, geozentrisches, kartesisches Koordinatensystem (Earth-Centered-Earth-Fixed, hier: WGS84) (*E*).

Vor der Fahrt kann die Richtung der Profilmessung um die Vertikalachse im System des Laserscanners beliebig eingestellt werden. Entsprechend sind die 2D-Scankoordinaten in das 3D-System des Laserscanners zu rotieren. Photogrammetrisch koordinierte Punkte im Body-System der IMU dienen als identische Punkte zur Bestimmung der Transformationsparameter zum System des Laserscanners. Um die Punkte im Body-System der IMU auf das geozentrische System zu beziehen, werden die Orientierungselemente aus Eulerwinkeln (roll, pitch, yaw nach DIN 9050) und Positionsvektoren verwendet. Diese werden als Zustandsparameter im KALMAN-Filter des INS/GPS geschätzt (HEINZE 1996).

### Integrierte Genauigkeitsanalyse

Alle beteiligten Sensoren liefern einen Beitrag für das gesamte Genauigkeitsbudget eines gescannten Punktes, für dessen Berechnung folgende Größen verwendet werden:

- Orientierungsvektor im System der IMU aus der Position  $XYZ_{IMU}$ , Länge und Breite  $LB_{IMU}$  und Rotation  $pry_{IMU}$
- Relative Transformation zwischen Laserscannersystem und Body-System von IMU/GPS  $\Delta xy z_{S2Bo}$  und  $r_{xy z_{S2Bo}}$
- Fahrtgeschwindigkeit
- Rotationsgeschwindigkeit des vertikalen Umlenkspiegels  $\omega_v$
- Horizontale Ausrichtung des Laserscanners  $r_{z_{S2E}}$
- Gescannte Koordinate im 2D-System  $xy_s$

Diese Beobachtungen definieren das stochastische Modell der Punkte im erdfesten System. Um das geometrische Potential von Mobile-Mapping-Systeme zu belegen, werden oft unabhängig beobachtete Kontrollpunkte bzw. Flächenparameter herangezogen. Die abgeleiteten Genauigkeitsaussagen beinhalten – sofern sie auf ein übergeordnetes System bezogen sind – zwar das gesamte Budget der einzelnen Sensoren, sie sind jedoch nur lokal und instantan interpretierbar.

Der Einfluss der hybriden Sensoren kann mittels durchgängig integrierter Genauigkeitsanalyse quantifiziert werden. (BARBER et al. 2008) und (GLENNIE 2007) verwenden ein statisches stochastisches Modell, um die Aus-

wirkungen der einzelnen Beobachtungsanteile miteinander zu vergleichen. Das stochastische Modell der Orientierungsvektoren ist jedoch zeitlich variant, weil die GNSS Lösungen niederfrequent aufdatiert werden und abhängig von der aktuell verfügbaren Satellitenkonstellation sind. Aus diesem Grund werden im vorliegenden System die Koordinaten berechnet und die Varianzen fortgepflanzt.

Für alle Beobachtungen  $\mathbf{L}$  kann ein stochastisches Modell  $\Sigma_{LL}$  aufgestellt werden, das sich bei den Orientierungsparametern aus der KALMAN-Filterung und beim Laserscanner aus geräteinternen Untersuchungen (BÜTTNER & STAIGER 2007) ergibt. Die zugehörige Funktionalmatrix  $\mathbf{F}$  enthält die partiellen Ableitungen der obigen Transformationsvorschrift (2) nach den einzelnen Beobachtungen.  $\mathbf{F}$  hat hier die Dimension  $(18 \times 3)$ , wobei nur die partiellen Ableitungen nach der Translation  $\Delta \mathbf{x}_{B_o}^E$  zeitlich konstant sind. Die übrigen Elemente werden für die einzelnen Punkte numerisch bestimmt und variieren mit der Zeit. Mit der Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung lässt sich schließlich für jeden Laserscanpunkt auch die Kovarianzmatrix  $\Sigma_{xx}$  im geozentrischen System aufstellen

$$\Sigma_{xx} = \mathbf{F} \cdot \Sigma_{LL} \cdot \mathbf{F}^T . \quad (3)$$

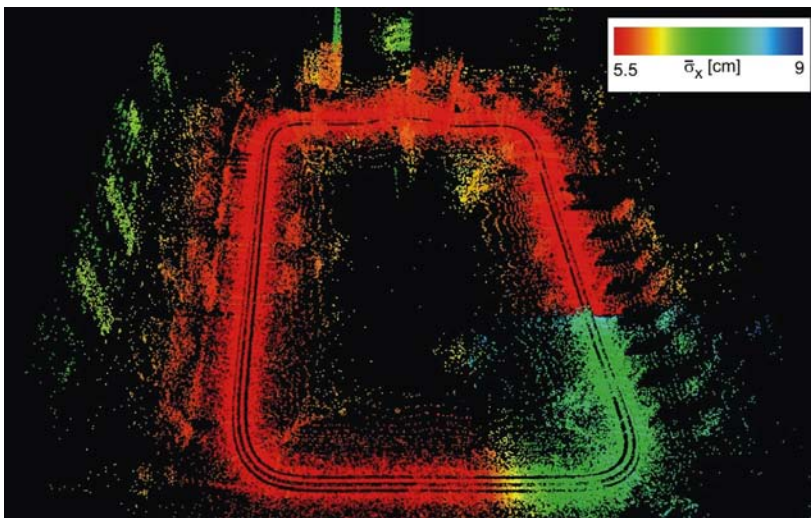
Optimierte Verfahren zur effizienten Ableitung von Varianzinformationen, speziell zur Aufstellung der Funktionalmatrix, sind aktuelle Forschungsgebiete des GIH.

#### 4.2 Aufbau und Potential des Systems

Für die Georeferenzierung on-the-fly werden als Aufnahmesensor der terrestrische Laserscanner Leica HDS 4500 sowie kinematisches GPS kombiniert mit der Inertialen Messeinheit (IMU) Honeywell Lasernav II verwendet. Zur Validierung des Systems wurden auf dem Gelände der TU Darmstadt mehrere Testfahrten durchgeführt. Für die gescannten Punkte wurden auch die Kovarianzmatrizen berechnet. Um die Varianzen für eine große Menge von Punkten in einer Punktwolke sichtbar zu machen, werden sie auf ein skalares Maß in Form der mittleren Standardabweichung der Koordinaten reduziert (vgl. Abb. 4)

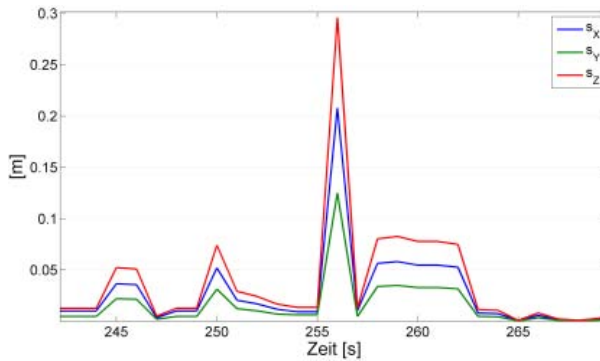
$$\bar{\sigma}_x = \sqrt{\frac{\text{sp}(\Sigma_{xx})}{3}} . \quad (4)$$

Die Auswirkungen des variablen stochastischen Modells der Beobachtungen werden hier sofort deutlich. Die Genauigkeit der auf-



**Abb. 4:** Stochastische Punktwolke (die mittlere Standardabweichung der Koordinaten ist farbcodiert).





**Abb. 5:** Variation der Koordinatengenauigkeit des kinematischen GPS während der Fahrt (Ausschnitt).

datierten Position aus dem kinematischen GPS ist abhängig von der aktuell verfügbaren Satellitenkonstellation. Abschattungen verringern die Qualität der Positionslösung, was sich unmittelbar auch auf die gescannten Punkte auswirkt. Einen Ausschnitt aus dem Genauigkeitsniveau der einzelnen Koordinatenzeitreihen der kinematischen GPS-Lösung zeigt die Abb. 5.

Sprunghafte Änderungen der Koordinatengenauigkeit verringern das Genauigkeitsniveau der zu diesem Zeitpunkt gescannten Punkte. In stochastischen Punktwolken lässt sich dieser Einfluss lokalisieren und quantifizieren. Die Auswirkungen auf die fortgepflanzte Punktgenauigkeit werden in Abb. 4 (siehe Trajektorie unten rechts) direkt deutlich.

## 5 Fazit und Ausblick

Der Übergang von lokalen sensoreigenen Systemen in ein übergeordnetes erdfestes System kann unmittelbar realisiert werden, wenn die geometrischen Freiheitsgrade mit zusätzlichen Sensoren bestimmt werden. Die hier vorgestellten Ansätze verwenden beide GNSS, wobei zumindest im schnellen statischen Fall deren Verfügbarkeit durchgängig gewährleistet sein muss. Der Vorteil liegt hier darin, dass die Georeferenzierung parallel zum Scanvorgang stattfindet. Anders als bei objektraumbasierten Verfahren ist sie außerdem unabhängig von der Struktur der gescannten Szene.

Für die Qualität der schnellen statischen Georeferenzierung konnte gezeigt werden, dass bei einer Entfernung von circa 30 m Querabweichungen gegenüber einer Punktbestimmung mit einer Totalstation von kleiner 2 cm erreichbar sind. Weitere Optimierungen insbesondere im GNSS Teil durch eine integrierte Auswertung beider ARPe Trajektorien, ein abnehmendes Rauschverhalten und eine erhöhte räumliche Auflösung zukünftiger Laserscanner lassen erwarten, dass die Rotationsparameter auch für größere Entfernungen mit hinreichender Genauigkeit berechnet werden können.

Bei der direkten Georeferenzierung on-the-fly wird deutlich, dass gerade bei der Integration des terrestrischen Laserscannings in hybride Sensorensysteme eine Betrachtung der Genauigkeit wichtig ist. Auf diese Weise lassen sich die Auswirkungen der einzelnen Sensoren auf die stochastische Qualität des 3D Scans quantifizieren.

Insgesamt bieten beide Ansätze aufgrund der identischen methodischen Grundlage eine effiziente Möglichkeit, terrestrische Laserscans zu georeferenzieren, weil keine zusätzlichen Passpunkte koordiniert werden müssen und zudem die Georeferenzierung simultan zum Scannen abläuft. Durch die Entwicklung kostengünstiger Navigationslösungen (WÄGGLI et al. 2007) auf der Basis von Einfrequenz GPS L1 und MEMS (Micro Electro Mechanical System) ist abzusehen, dass die direkte Georeferenzierung zukünftig vermehrt in scannende Systeme integriert werden wird.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Herrn Dipl.-Ing. Frank Hinsche (Leica Geosystems) für die Bereitstellung der Leica GNSS Ausrüstung sowie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Lambert Wanninger für die GNSS Auswertung.

## Literatur

- BARBER, D., MILLS, J. & SMITH-VOYSEY, S., 2008: Geometric Validation of a ground-based mobile laser scanning system. – *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **63**: 128–141.
- BÖHLER, W., 2005: Vergleichende Untersuchungen zur Genauigkeit und Auflösung von Laserscannern. – Schriftenreihe des DVW, Terrestrisches Laserscanning (TLS) 48, Wißner, Augsburg, 17–28.
- BÜTTNER, E. & STAIGER, R., 2007: Erste Untersuchungen des Laserscanners IMAGER 5006 von Zoller+Fröhlich. – *Photogrammetrie – Laser-scanning – Optische 3D-Messtechnik*, Wichmann, Heidelberg: 206–269.
- CRAMER, M., 2003: Erfahrungen mit der direkten Georeferenzierung. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **2007** (4): 267–278.
- GLENNIE, C., 2007: Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LIDAR systems. – *Journal of Applied Geodesy* **2007** (3): 147–157.
- HESSE, C., 2008: Ein Beitrag zur hochauflösenden kinematischen Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern. – *DGK C 608*, München.
- HEINZE, O., 1996: Aufbau eines operablen inertialen Vermessungssystems zur Online-Verarbeitung in der Geodäsie auf Basis eines kommerziellen Strapdown Inertialsystems. – Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Institut für Physikalische Geodäsie.
- JACOBSEN, K., 2002: Calibration Aspects in Direct Georeferencing of Frame Imagery. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **34** (1): 82–88.
- JACOBSEN, K., 2008: Persönliche Mitteilung.
- PAFFENHOLZ, J.-A. & KUTTERER, H., 2008: Direct Georeferencing of Static Terrestrial Laser Scans. – *FIG Working Week 2008, Integrating Generations*, Stockholm, Sweden, June 14–19.
- VENNEGEERTS, H., MARTIN, J., BECKER, M. & KUTTERER, H., 2008: Validation of a Kinematic Laser-scanning System. *Journal of Applied Geodesy* **2008** (2): 79–84.
- WÄGLI, A., SKALLOUD, J., TOME, P. & BONNAZ, J.-M., 2007: Assessment of the Integration Strategy between GPS and Body-Worn MEMS Sensors with Application to Sports. – *ION-GNSS*, Fort Worth, Texas, USA, September 25–28, **2007**: 2075–2084.

### Anschriften der Autoren:

Dipl.-Ing. HARALD VENNEGEERTS, Dipl.-Ing. JENS-ANDRÉ PAFFENHOLZ, Prof. Dr.-Ing. HANSJÖRG KUTTERER, Leibniz Universität Hannover, Geodätisches Institut, D-30167 Hannover, Tel.: +49-511-762-2466, Fax: +49-511-762-2468, e-mail: {vennegeerts, paffenholz, kutterer}@gih.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. JENS MARTIN, Technische Universität Darmstadt, Institut für Physikalische Geodäsie, D-60487 Darmstadt, Tel.: +49-65151-16-4509, Fax: +49-65151-16-4512, E-Mail: martin@ipg.tu-darmstadt.de

Manuskript eingereicht: Juli 2008

Angenommen: November 2008