



## Bewertung von Inertial/GNSS-Modulen mittels Laserscannern und bekannter Landmarken

ALEXANDER SCHLICHTING, CLAUS BRENNER & STEFFEN SCHÖN, Hannover

**Keywords:** mobile mapping, inertial navigation system, laser scanner, segmentation, landmarks

**Zusammenfassung:** In diesem Beitrag wird ein Konzept zur Bewertung von Inertial/GNSS-Sensoren in einem mit Laserscannern ausgestatteten Mobile-Mapping-System vorgestellt. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Genauigkeit der Position und Verdrehung. Zu deren Beurteilung wurde ein Algorithmus entwickelt, mit welchem Landmarken aus einer Punktwolke segmentiert und anschließend Referenzlandmarken zugeordnet werden. Die Abweichungen zwischen den segmentierten Landmarken und den korrespondierenden Referenzen geben Aufschluss über die äußere Genauigkeit des Gesamtsystems. Die Wiederholgenauigkeit wird anhand der Streuung der Abweichungen bestimmt. Durch die Erzeugung relativ großer Orientierungswinkel und Drehraten auf einer Rampe (Nick- und Roll-Winkel) wird außerdem die Genauigkeit der Verdrehung bestimmt. Das entwickelte Bewertungskonzept wird anschließend gleichzeitig auf drei verschiedene Inertial/GNSS-Kombinationen angewendet. Durch die simultane Messung lassen sich damit die Genauigkeitswerte der verschiedenen Systeme vergleichen.

**Summary:** *Evaluation of inertial measurement systems using laser scanners and known landmarks.* In this paper we present an approach for evaluating inertial/GNSS sensors using a mobile mapping system with laser scanners. We focus on the accuracy and precision of the absolute and relative position and alignment. The main approach is to detect specific pole-like landmarks in the point cloud, whose absolute position is known with high accuracy. An important evaluation factor is the position deviation between the segmented poles and the corresponding landmarks. This provides information on the accuracy of the system. The system precision is obtained by the scatter of the deviations. To evaluate the precision of the alignment, we generated relatively large orientation angles (several degrees) and angular rates (several degrees per second) by driving over a ramp (pitch and roll angle). This approach is applied to three integrated inertial/GNSS systems in parallel. Since the systems were operated simultaneously, we are able to compare their precision and accuracy.

### 1 Einleitung

Mobiles Laserscanning erlaubt die Erfassung großer Datenmengen innerhalb kurzer Zeit. Mit den Aufnahmen einer einzelnen Messfahrt können beispielsweise 3D-Stadtmodelle erstellt oder Objekte des Straßenraums kartographisch erfasst werden. Mobiles Laserscanning bietet somit im Vergleich zu herkömmlichen, statischen Messverfahren eine hohe Steigerung der Effizienz.

Um die während der Fahrt aufgenommenen Punkte direkt mit Koordinaten eines einheitlichen, globalen Koordinatensystems zu ver-

sehen, ist es notwendig, kontinuierlich die lokale Position und Orientierung (Pose) des Fahrzeuges zu bestimmen. Zur Bestimmung der Pose werden in der Regel mit GNSS gekoppelte inertielle Messeinheiten (IMU) verwendet. Die Verwendung eines Inertial/GNSS-Systems bietet den Vorteil, dass die Kurzzeitstabilität der Inertialeinheit mit der Langzeitstabilität des GNSS kombiniert werden kann. Darüber hinaus liegen durch die GNSS-Messungen globale Koordinaten vor.

Im Zuge der Sensorauswahl eines mit Laserscannern ausgestatteten mobilen Messsystems stellt sich die Frage, welche Inertial/

GNSS-Sensorik für bestimmte Anwendungen geeignet ist. Der vorliegende Artikel beschäftigt sich damit, die Eignung von mit GNSS gekoppelten inertialen Messsystemen für das Mobile-Mapping mittels eines Testfelds festzustellen. Dies ist vergleichbar mit Untersuchungen zur Genauigkeit der direkten Georeferenzierung für luftgetragene Sensorsysteme, welche ebenfalls auf der Einrichtung von Testgebieten beruhen. Allerdings werden im vorliegenden Fall vorhandene Merkmale des Straßenraums genutzt, wodurch in der Regel keine Wartung des Testfelds anfällt. Die Landmarken müssen lediglich vor einer Messfahrt auf eventuelle Änderungen überprüft werden. Dadurch entsteht ein sehr praktisches und kostengünstiges Verfahren.

Eine der ersten Untersuchungen zur Bewertung von Inertial/GNSS-Sensoren ist in SKALOUDE et al. (1996) für die Aerophotogrammetrie zu finden. Es wird vorgeschlagen, die einzelnen Standpunkte aus einer INS/GPS-Kombination mit den Ergebnissen der Aufnahmeorte aus einer Bündelblockausgleichung zu vergleichen.

Für Mobile-Mapping-Systeme mit einer kontinuierlichen Datenaufzeichnung erfolgt die Bewertung zumeist durch die Analyse einer Trajektorie, welche durch ein Positionierungssystem gemessen wird. So wird in DOBROBANTU & ZEBHAUSER (1999) die Trajektorie einer Low-Cost Inertialeinheit in Abhängigkeit der Updates der präzisen differentiellen GNSS-Lösung verglichen. Diese Methode betrachtet allerdings lediglich die Auswirkungen der Genauigkeit einer Inertial/GNSS-Kombination auf die Trajektorie, jedoch nicht die Auswirkung auf die Messungen integrierter Laserscanner.

Erste Untersuchungen zur Bewertung eines gesamten Mobile-Mapping-Systems anhand von gemessenen Referenzpunkten finden sich in BARBER et al. (2008), wobei hier die in den LiDAR-Daten detektierten Merkmale größtenteils mit Hilfe einer kommerziellen Software manuell extrahiert und den Referenzdaten zugeordnet werden. In KAARTINEN et al. (2012) und KUKKO et al. (2012) werden Merkmale des Straßenraums, wie Straßenlaternen und Gebäudekanten, zur Beurteilung der Genauigkeit eines Mobile-Mapping-Systems genutzt, wobei die Auswertung teilauto-

matisiert erfolgt. Außerdem wird das gesamte Mapping-System untersucht, welches auch die verwendeten Laserscanner beinhaltet. Im Gegensatz zu den Untersuchungen in KAARTINEN et al. (2012) und KUKKO et al. (2012) ist hier durch die simultane Messung der Einfluss der Laserscanner für alle Systeme derselbe, so dass eine Aussage über die Genauigkeit der Sensoren zur Bestimmung der Pose getroffen werden kann. Dies wird durch simultane Messungen der Inertial/GNSS-Kombinationen innerhalb desselben Mappings-Systems erreicht. Ein weiterer, sich von den bisherigen Forschungen unterscheidender Aspekt, ist die vollautomatisierte Auswertung der Messungen.

Der Beitrag gliedert sich wie folgt. In Abschnitt 2 wird das Bewertungskonzept vorgestellt, wobei der Schwerpunkt auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung und Verdrehung des Systems gelegt wird. In Abschnitt 3 wird beschrieben, wie dieses Konzept umgesetzt werden kann. Exemplarische Ergebnisse von Messfahrten werden in Abschnitt 4 präsentiert, Abschnitt 5 fasst schließlich die Ergebnisse zusammen.

## 2 Bewertungskonzept

Ziel des Bewertungskonzeptes ist es, Ergebnisse (Punktwolken, Fahrzeugpositionen) von Messfahrten eines beliebigen, kommerziellen Mobile-Mapping-Systems heranzuziehen, um möglichst einfach Aussagen über den Einfluss der verwendeten Inertial/GNSS-Kombinationen zu erhalten. Dabei ist kein Zugang zur internen Verarbeitung der einzelnen Sensoren (GNSS, IMU, Laserscanner) oder deren Fusion notwendig.

Ein entscheidendes Kriterium zur Bewertung der Inertial/GNSS-Sensoren ist die Genauigkeit des Systems. Für viele Anwendungsfälle ist hierbei vor allem die Richtigkeit (äußere Genauigkeit) der Pose relevant. Da die GNSS-Lösungen der hier bewerteten Systeme ohne Korrekturdaten bestimmt werden, liegt die zu erwartende Genauigkeit im Dezimeter- bis Meterbereich. Zur Beurteilung der Richtigkeit bedarf es einer Referenzlösung. Als Referenz dienen in unserer Arbeit Landmarken in Form von Straßenlaternen, welche vor-

ab mit einer für diese Anwendung ausreichenden Genauigkeit von  $\sigma_{2D} < 5$  cm terrestrisch eingemessen wurden. Diese Landmarken werden in der Punktwolke segmentiert, welche sich aus den Messungen des Laserscanners ergibt. Anschließend wird die Abweichung zur Referenzposition untersucht. Die segmentierten Landmarken können gleichzeitig auch zur Bewertung der Wiederholgenauigkeit dienen, indem beispielsweise die Streuung der Abweichungen betrachtet wird. Sowohl für die Richtigkeit, als auch für die Wiederholgenauigkeit des Systems konzentrieren wir uns auf die Untersuchung der 2D-Genauigkeit, da für viele Anwendungen, insbesondere im Automotive-Bereich, die Höhe von geringer Bedeutung ist.

Des Weiteren sollte auch die Genauigkeit des Drehraten- und Beschleunigungssensors untersucht werden. Starke Beschleunigungen lassen sich in einem Fahrzeug durch Beschleunigungsvorgänge oder starke Bremsvorgänge erzeugen, hohe Drehraten im Gierwinkel (Heading) durch enge Kurven, beispielsweise in einem Kreisverkehr. Werden parallel zu diesen Vorgängen Landmarken von den Laserscannern erfasst, so können anschließend wiederum die Abweichungen zu den Referenzlandmarken untersucht werden. Eine Möglichkeit zur Analyse starker Veränderungen im Roll- und Nick-Winkel ist das Fahren über eine Rampe oder Wippe. Hierbei können insbesondere die Auswirkungen auf die Form einer durch die Scanner erfassten Ebene betrachtet werden.

Darüber hinaus ist das Rauschen des Systems wichtig. Neben der direkten Betrachtung des Rauschens in der Position und Ausrichtung des Fahrzeuges bietet es sich an, auch das Rauschen von Messpunkten auszuwerten, welche in einer Ebene liegen. Es ist jedoch zu beachten, dass somit auch das Messrauschen der Laserscanner und die Unebenheit des betrachteten Objektes, beispielsweise einer Hauswand, mit einbezogen werden.

Insbesondere in Stadtgebieten mit großen Abschattungen spielt auch die Drift der Inertialeinheit eine bedeutende Rolle. Ist keine GNSS-Lösung verfügbar, so wächst der Positionsfehler mitunter quadratisch mit der Zeit an. Dieses Verhalten kann untersucht werden, indem das GNSS-Signal von den Messungen der Inertialeinheit getrennt wird, so dass kei-

ne GNSS-Updates in die Berechnung der Pose einfließen.

Aus Platzgründen konzentrieren wir uns auf die Untersuchung der Genauigkeit der Positionierung und Verdrehung durch die Auswertung von Distanz- und Winkelmessungen zu Landmarken sowie der durch die Fahrt über eine Rampe hervorgerufenen Effekte.

### 3 Umsetzung des entwickelten Bewertungskonzeptes

Zur Bestimmung der einzelnen in Abschnitt 2 genannten Bewertungskriterien wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher Landmarken aus der mit Laserscannern aufgezeichneten Punktwolke segmentiert. Diese Position wird anschließend mit der Referenzposition verglichen, welche aus einer terrestrischen Aufnahme der Landmarken mit übergeordneter Genauigkeit bekannt ist. Um zusätzlich die Genauigkeit der Verdrehung im Roll- und Nick-Winkel zu untersuchen, werden die Auswirkungen auf eine Ebene bei auftretenden Winkelveränderungen untersucht. Diese Veränderungen werden durch eine Fahrt über eine Rampe erzeugt. Während der Fahrt mit einer Fahrzeugseite über diese Rampe wird eine zur Fahrtrichtung parallele Ebene durch die Laserscanner erfasst.

#### 3.1 Wahl eines Referenzgebietes

Das in Abb. 1 dargestellte Referenzgebiet enthält sowohl Geradenabschnitte als auch Kurven. Zusätzlich bietet ein Kreisverkehr die Möglichkeit, Wiederholmessungen durchzuführen und die Genauigkeit des Headings zu untersuchen. Auf Grund der klaren und einfachen Zylinderform und der regelmäßigen Verteilung wurden Straßenlaternen als Landmarken gewählt. Das Gebiet hat eine Ausdehnung von etwa  $500 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ . Es wurden insgesamt 31 Straßenlaternen mit einer Genauigkeit von unter 5 cm in der Lage terrestrisch eingemessen. Diese Laternen dienen in der Auswertung als Referenzlandmarken.



**Abb. 1:** Gewähltes Referenzgebiet (Mercurring, Hamburg) mit eingemessenen Landmarken (rot) (GOOGLE INC. 2013).

### 3.2 Segmentierung von Landmarken

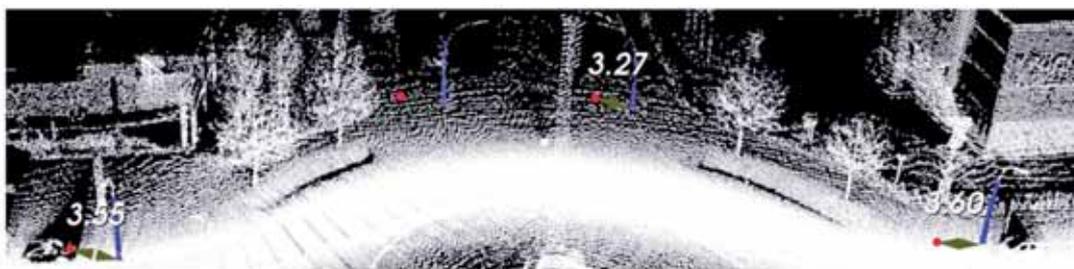
Zur Segmentierung der Landmarken ist es zunächst notwendig, potentielle stangenförmige Landmarken in der Punktmenge zu detektieren. Es muss validiert werden, ob die so gefundenen Objekte den tatsächlichen Landmarken entsprechen, so dass anschließend die detektierten Punktmenge den Referenzlandmarken zugeordnet werden können. Um die Distanz einer segmentierten Landmarke zu ihrer Referenz zu bestimmen, muss der Mittelpunkt der Landmarke bestimmt werden. Dies geschieht in diesem Fall durch eine Zylinderschätzung.

Der Algorithmus basiert im Wesentlichen darauf, dass für verschiedene Regionen in der Punktwolke die Anzahl der Fußpunkte in der Grundrissebene bestimmt wird. Regionen mit einer hohen Punktzahl kommen als Landmarken in Frage. Ein ähnliches Konzept, jedoch nur zur Stangendetektion, findet sich auch in BRENNER (2009). Die potentiellen Landmarken werden in der Folge auf weitere Kriterien überprüft und anhand dieser der Referenzlandmarke zugeordnet. Im ersten Schritt wird die Punktwolke in der Umgebung einer bekannten Landmarke in die  $x/y$ -Ebene projiziert und mit Hilfe der freien C++-Bibliothek *Point Cloud Library* (PCL) (POINT CLOUD LIBRARY 2013) in einem Quadtree mit einer

Zellenbreite von 2 cm gespeichert. Anschließend wird für jedes Blatt, das heißt für jeden Knoten in der untersten Ebene des Quadtrees, die Anzahl der in die  $x/y$ -Ebene projizierten Punkte innerhalb eines vorgegebenen Radius  $r$  bestimmt. Als Radius erwies sich der doppelte gemessene Radius der jeweiligen Referenzlandmarke als geeignet. Der Radius der Referenzlandmarken betrug in unserem Fall stets 7,4 cm. Blätter mit einer Mindestanzahl von Punkten (20) innerhalb dieses doppelten Radius liefern Kandidaten für Landmarken. Da sich auf diese Weise wegen der relativ kleinen Zellbreite für jede Landmarke mehrere eng benachbarte und sich in Hinblick auf die involvierten Punkte überlappenden Kandidaten ergeben, wird eine Unterdrückung von Nicht-Maxima durchgeführt. Für die Hypothese mit den lokal meisten enthaltenden Punkten wird die entsprechende Punktwolke als potentielle Landmarke gespeichert. Im nächsten Schritt wird überprüft, welche detektierte Stange der Referenzlandmarke zugeordnet werden kann. Diese Überprüfung findet anhand der Distanz statt, wobei die potentielle Landmarke mit der geringsten Distanz der Referenzlandmarke zugeordnet wird. Konnte einer Landmarke eine segmentierte Stange zugeordnet werden, so wird versucht, mit Hilfe von RANSAC (FISCHLER & BOLLES 1981) aus den enthaltenden Punkten die Parameter eines bestange-

passten Zylinders zu schätzen. Hierbei ist zu beachten, dass an die Stange angebrachte Objekte (beispielsweise Straßenschilder) dazu führen können, dass kein Zylinder bestimmt werden kann. In diesem Fall wird die entsprechende Landmarke aus den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen. Die Mittelachse kann auf wenige Zentimeter genau bestimmt werden, so dass bei den erwarteten Messgenauigkeiten der Einfluss der Zylinderschätzung auf die Sensorbeurteilung gering ist.

Abb. 2 zeigt eine so durchgeführte Extraktion der Landmarken, wobei die Distanz zur Referenz hier nur für Stangen eingezeichnet ist, deren Zylinderparameter erfolgreich geschätzt werden konnten. Zu den rot eingefärbten Referenzpositionen werden die jeweiligen Landmarken in der Punktwolke gefunden und zugeordnet. Um sicherzustellen, dass es sich um eine freistehende, stangenförmige Landmarke handelt, wird für jedes gefundene Objekt überprüft, wie viele Punkte sich in einem um 50 cm erweiterten Radius in der Umgebung des Objektes befinden. Überschreitet die Anzahl der Punkte, die zusätzlich in dem erweiterten Radius auftreten, einen Grenzwert von zehn Prozent der im Suchradius enthaltenen Punkte, so wird das Objekt als mögliche Landmarke verworfen. Weiter treten bei Bäumen oder Büschen große Punktabstände zwischen vertikal benachbarten Punkten auf, so dass sich hier über eine maximale Höhendifferenz zwischen solchen Punkten ein weiteres Filterkriterium definieren lässt. In unserer Arbeit wurde dieser Grenzwert zu einem Meter bestimmt.



**Abb. 2:** Punktwolke mit segmentierten Landmarken (blau), deren Referenzpositionen (rot) sowie der jeweiligen Distanz.

### 3.3 Bestimmung der Bewertungskriterien

Zur Beurteilung eines Inertial/GNSS-Sensors müssen hinsichtlich dessen Genauigkeit wie im Folgenden beschrieben die Werte der jeweiligen Kenngrößen bestimmt werden. In diesem Beitrag liegt der Fokus auf der Bestimmung der Richtigkeit und der Wiederholgenauigkeit der Pose sowie einer hiervon getrennten Untersuchung der Genauigkeit der Verdrehung.

#### Richtigkeit der Pose

Um die Richtigkeit der Bestimmung der Pose zu untersuchen, werden die segmentierten Landmarken mit deren Referenzen bezüglich der Position verglichen. Hierbei werden die Differenzen der  $x$ - und  $y$ -Koordinaten sowie die euklidische 2D-Distanz zu den geschätzten Zylindermittelpunkten der segmentierten Landmarken betrachtet. Anschließend wird aus den einzelnen Abweichungen der quadratische Mittelwert (RMS) berechnet. Über eine Visualisierung kann der Anwender zusätzlich Landmarken mit weiterhin fehlerhaften Zuordnungen oder sonstigen Fehlern detektieren, so dass diese Landmarken anschließend manuell aus der Berechnung des RMS entfernt werden können.

#### Wiederholgenauigkeit der Pose

Zur Beurteilung der Wiederholgenauigkeit können die Abweichungen zwischen segmentierten Stangen betrachtet werden, die denselben Referenzen zugeordnet wurden. Auch hier werden die Standardabweichungen der Abweichungen vom Mittelwert berechnet.

### Genauigkeit der Verdrehung

Die Genauigkeit der Verdrehung wird in diesem Fall durch eine Analyse der Auswirkungen hoher Werte (mehrere Grad) und starker Veränderungen (mehrere Grad pro Sekunde) im Roll- und Nick-Winkel untersucht. Hierzu wird mit dem Fahrzeug parallel zu einer Gebäudewand gefahren, wobei zwischenzeitlich eine etwa fünf Meter lange und etwa 20 cm hohe Rampe befahren wird. Während der gesamten Fahrt nehmen die Laserscanner die Gebäudewand auf. Überschreiten die gemessenen Drehraten durch die Fahrt über die Rampe kurzzeitig einen Schwellwert, so wird die Ebene an dieser Stelle aufgeteilt. Ein weiterer Schnitt der Ebene ergibt sich, wenn die jeweiligen Schwellwerte wiederum durch das Verlassen der Rampe überschritten werden. Zur Segmentierung der Ebene aus der Punktwolke wird ein Region-Growing-Algorithmus verwendet. Abb. 3 zeigt die Aufteilung der Ebene. Die relativ großen Drehraten von mehreren Grad pro Sekunde treten hierbei während der Aufnahme des Abschnitts 2 auf. Sie resultieren aus der Auffahrt auf die und der Abfahrt von der Rampe. Der folgende konstante Höhenunterschied zwischen der linken und rechten Fahrzeugseite bewirkt große Roll-Winkel. Die Teilebenen 1 und 3 bezeichnen die Ebenen, in denen das Fahrzeug sich nicht auf der Rampe befindet und weder große Winkel noch hohe Drehraten auftreten. Im folgenden Schritt werden aus den Punktmengen der einzelnen Teilebenen Ebenenparameter geschätzt und die Standardabweichung der Abweichungen der jeweiligen Punktmenge von dieser Ebene bestimmt. Diese Standardabweichung

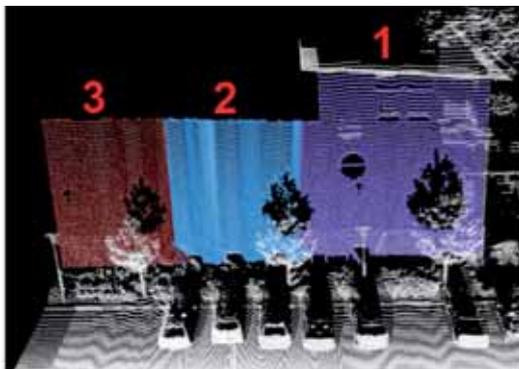


Abb. 3: Teilebenen der aufgenommenen Ebene.

wird als Indikator zur Beurteilung der Genauigkeit der Verdrehung genutzt. Anschließend wird geprüft, ob die Abweichung der Ebene zur Teilebene höher als für die Gesamtebene ist. Ist dies der Fall, so lässt die höhere Standardabweichung auf einen verbleibenden Einfluss der hohen Drehraten schließen, welcher in diesem Fall in einem höheren Rauschen in der Positionsbestimmung resultiert.

Es ist jedoch zu beachten, dass die Beschaffenheit der Ebene sowie die Genauigkeit der Laserscanner-Messungen Einfluss auf die Ergebnisse nehmen. Da dieser Einfluss bei einer simultanen Aufnahme für alle Inertial/GNSS-Sensoren konstant ist, wurde er für diesen Beitrag vernachlässigt.

## 4 Empirische Genauigkeitsuntersuchungen

Das entwickelte Konzept wurde zur Bewertung der Genauigkeit dreier Inertial/GNSS-Kombinationen mit teils unterschiedlichen Genauigkeitsklassen verwendet: Ein Sensor der Firma Oxford Technical Solutions (OXTS) mit einem Preis von etwa 30.000 Euro, ein weitaus günstigerer MEMS-Sensor der Marke Xsens für etwa 4.000 Euro sowie ein Prototyp der Firma Northrop Grumman LITEF, dessen Spezifikationen nicht veröffentlicht sind und zu dessen Preis noch keine Angaben gemacht werden können. Alle Systeme verfügten hierbei über eine eigene GNSS-Antenne. Weitere Sensordaten sind in Tab. 1 zu finden.



Abb. 4: Schematische Messkonfiguration.

**Tab. 1:** Spezifikationen der Sensoren OXTS RT 3040 (OXFORD TECHNICAL SOLUTIONS LTD 2013) und Xsens MTi-G (XSENS TECHNOLOGIES B.V. 2013).

	Inertial/GNSS-System	OXTS RT 3040	Xsens MTi-G
GNSS	Positionsgenauigkeit (CEP)	1,5 m	2,5 m
	Updaterate GNSS	Keine Angabe	4 Hz
	Receiver-Typ	L1/L2 (GPS)	L1 (GPS)
Beschleunigungssensor	Bias-Stabilität ( $1 \sigma$ )	10 mm/s <sup>2</sup>	20 mm/s <sup>2</sup>
	Bias-Linearität	0,01%	0,2%
Drehratensensor	Bias-Stabilität ( $1 \sigma$ )	2°/h	20°/h
	Bias-Linearität	Keine Angabe	0,1%
Winkelgenauigkeit	Roll/Pitch ( $1 \sigma$ )	0,03°	0,5°
	Yaw ( $1 \sigma$ )	0,1°	1°
Sonstiges	Gewicht	2200 g	68 g
	Preis	~30.000 EUR	3.790 EUR

Die Sensoren sind in einem mit drei SICK-LMS511-Zeilenlaserscannern ausgestatteten herkömmlichen PKW verbaut (Abb. 4). Dieses Mobile-Mapping-System wurde von der SICK AG entwickelt und für die Messungen bereitgestellt. Die Messungen wurden simultan durchgeführt.

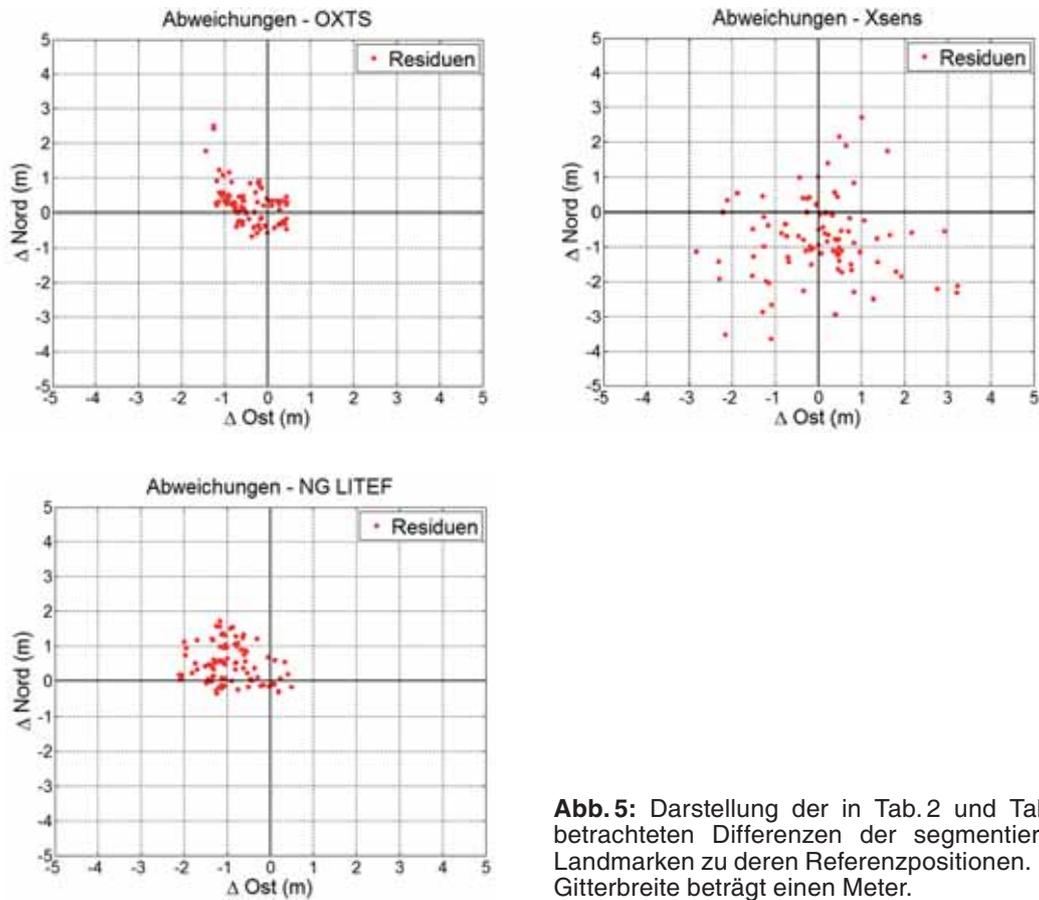
Der zufällige Fehler der Distanzmessung der Scanner beträgt bei einer Reichweite von 10–20 Metern 35 Millimeter und wurde durch entsprechende Kalibrierparameter berücksichtigt. Der statistische Fehler bei derselben Reichweite beträgt acht Millimeter, die Winkelauflösung 1°. Da die Landmarken größtenteils von den vertikal ausgerichteten, seitlich angebrachten Laserscannern aufgenommen wurden und die Entfernung der Landmarken zu den Laserscannern in der Regel weniger als zehn Meter betrug, ist der Beitrag der Unsicherheit der Laserscanner für die Messungen der Landmarken vernachlässigbar. Auf den Vergleich der Standardabweichungen der Ebenen zur Beurteilung der Genauigkeit der Verdrehung wirkt lediglich der zufällige Fehler von acht Millimetern. Aufgrund der kompakten Abmessungen und der präzisen Fertigung sind wir von einer hinreichenden Genauigkeit und Stabilität der relativen Lage der Komponenten zueinander ausgegangen. Seitens der SICK AG wurde vorab die relative Lage eingemessen und anschließend aus dieser Einmessung die Parameter der Boresight-

Kalibrierung für das verwendete Messsystem bestimmt. Auf eine Verbesserung dieser Parameter aus Pass- und Verknüpfungspunkten wurde verzichtet. Weiterhin befanden sich die Landmarken stets in einer ähnlichen Entfernung zum Fahrzeug, wodurch distanzabhängige Fehlereinflüsse nicht erwartet werden.

Zur Beurteilung der Sensoren wurden Fahrten bei unterschiedlicher Geschwindigkeit (15 km/h, 30 km/h) und in unterschiedlicher Richtung im Messgebiet durchgeführt, wobei stets alle drei Sensorsysteme mitgeführt wurden. Für die unterschiedlichen Fahrten waren keine Veränderungen in den Ergebnissen zu erkennen.

Die folgenden Untersuchungen beziehen sich auf Fahrten bei 30 km/h. Die Messungen der Laserscanner erfolgten mit einer Frequenz von 100 Hz. Insgesamt konnten für drei Umfahrten zwischen 82 und 92 Landmarken (abhängig vom Inertial/GNSS-System) aus den Punktwolken automatisch segmentiert und Referenzlandmarken zugeordnet werden. Über die Visualisierung wurden hierbei keine Fehldetektionen festgestellt. Die horizontalen Abweichungen der Stangen werden für die jeweiligen Sensoren in Abb. 5 dargestellt.

Des Weiteren wurden zur Untersuchung der Genauigkeit der Verdrehung drei Fahrten über eine Rampe mit jeweils gleicher Geschwindigkeit durchgeführt.



**Abb. 5:** Darstellung der in Tab.2 und Tab.3 betrachteten Differenzen der segmentierten Landmarken zu deren Referenzpositionen. Die Gitterbreite beträgt einen Meter.

**Tab. 2:** RMS und Bias der Differenzen der segmentierten Landmarken zu deren Referenzpositionen. Die niedrigsten Abweichungen sind hervorgehoben.

	OXTS	Xsens	NG LITEF	NG LITEF PP
RMS 2D (m)	<b>0,90</b>	1,84	1,34	1,33
RMS Nord (m)	<b>0,61</b>	1,40	0,74	0,74
RMS Ost (m)	<b>0,66</b>	1,20	1,12	1,11
Bias 2D (m)	0,59	0,66	1,04	1,03
Bias Nord (m)	0,17	-0,62	0,48	0,48
Bias Ost (m)	-0,56	0,23	-0,92	-0,91

#### 4.1 Beurteilung der Richtigkeit

Die sich aus den Messungen ergebenden RMS-Werte der Zylindermittelpunkte sind in Tab. 2 aufgelistet und die einzelnen Abweichungen in Abb. 5 aufgezeigt. Hierbei beschreibt *PP* die vom NG-LITEF-Framework zur Verfügung gestellte Postprocessing-Lösung der mit dem

NG-LITEF-Empfänger gemessenen Trajektorie, welche lediglich eine Glättung der Trajektorie bewirkt. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die Lösungen des NG-LITEF- sowie des OXTS-Sensors systematisch verschoben sind. Gründe hierfür könnten eine ungenaue Zeitsynchronisierung oder auch bisher nicht detektierte Systematiken von Fehlern in den

Parametern der Boresight-Kalibrierung sein. Es ist weiter ersichtlich, dass die Abweichungen des OXTS-Sensors am geringsten sind. Hier beträgt der RMS-Wert zur Referenzposition einer Landmarke in der Lage 0,90 m. Die Abweichungen der Xsens- und LITEF-Lösungen sind mit 1,84 m bzw. 1,34 m deutlich höher.

#### 4.2 Beurteilung der Wiederholgenauigkeit

Zur Untersuchung der Wiederholgenauigkeit des Systems sind verschiedene Ansätze möglich. An dieser Stelle wurden die Streuung der Abweichungen aus Abb. 5 bezogen auf die Mittelwerte untersucht. Weitere Möglichkeiten sind die Untersuchung der Abweichungen zwischen denselben segmentierten Landmarken bei Wiederholungsmessungen sowie die der Veränderungen der Abweichungen in aufeinanderfolgenden Landmarken.

Betrachtet man die Streuung zwischen den gemessenen und den Referenzpositionen der Landmarken bezogen auf die mittleren Abweichungen, so ist ersichtlich, dass jene des Xsens-Sensors in etwa um den Faktor zwei höher als die der übrigen Lösungen sind (siehe

Tab. 3). Somit ist dessen Wiederholgenauigkeit als deutlich schlechter einzustufen.

#### 4.3 Beurteilung der Genauigkeit der Verdrehung

Bei einer Anfälligkeit der Sensoren gegenüber hohen Drehraten oder Orientierungswinkeln wären Abweichungen der einzelnen Ebenen aus Abschnitt 3.3 von der Gesamtebene zu erwarten. Um dies zu überprüfen, werden sowohl für die drei Ebenenabschnitte separat als auch für die Gesamtebene ausgleichende Ebenen bestimmt. Weiterhin wird die mittlere quadratische Abweichung (RMS) der Punkte zur zuvor bestimmten Ebene berechnet. Dieser Vorgang wurde dreimal durchgeführt und anschließend das geometrische Mittel der RMS-Werte bestimmt.

In einer Voruntersuchung wurden die Standardabweichungen der RMS-Abweichungen der Gesamtebene bestimmt. Hierzu wurden insgesamt zwölf Aufnahmen der Gesamtebene pro Sensor gemacht, wobei die Rampe entfernt war, so dass es zu keinen größeren Verdrehungen kam. Aus diesen Aufnahmen wurden die Ebenenparameter und hieraus die mittleren quadratischen Abweichungen der

**Tab. 3:** Standardabweichungen der Differenzen zu den Referenzlandmarken bezogen auf die mittlere Abweichung. Die niedrigsten Abweichungen sind hervorgehoben.

1 $\sigma$ (m)	OXTS	Xsens	NG LITEF	NG LITEF PP
2D	<b>0,75</b>	1,67	0,62	0,62
Nord	0,56	1,16	<b>0,53</b>	<b>0,53</b>
Ost	<b>0,50</b>	1,20	0,60	0,60

**Tab. 4:** RMS-Werte sowie die Standardabweichungen der RMS-Werte der Ebenen. Die hohen Drehraten und Orientierungswinkel treten während der Aufnahme der Teilebene 2 auf.

	OXTS	Xsens	NG LITEF	NG LITEF PP	
Standardabweichung der RMS-Bestimmung (m)	0,018	0,021	0,020	0,020	
	1 (1 $\sigma$ ) (m)	0,046	0,043	0,041	0,039
RMS zu den Teilebenen	<b>2 (1 <math>\sigma</math>) (m)</b>	<b>0,021</b>	<b>0,032</b>	<b>0,018</b>	<b>0,015</b>
	3 (1 $\sigma$ ) (m)	0,017	0,046	0,020	0,016
RMS zur Gesamtebene	(1 $\sigma$ ) (m)	0,033	0,040	0,037	0,035

Gesamtebene und deren Standardabweichungen zum geometrischen Mittel für alle Sensoren bestimmt.

Zur Analyse des Einflusses der Verdrehung wird der RMS-Wert des untersuchten Ebenenabschnitts mit dem Wert der Gesamtebene verglichen. Wie in Tab.4 dargestellt, ist die Differenz zwischen den RMS-Werten der einzelnen Ebenenabschnitte und dem Wert der gesamten Ebene stets niedriger als die aus mehreren Messungen bestimmte Standardabweichung der RMS-Werte der Gesamtebene. Demzufolge ist hier kein deutlicher durch das Fahren über eine Rampe hervorgerufener Effekt erkennbar. Es ist allerdings anzumerken, dass sich auch die Beschaffenheit der Gebäudewandabschnitte auf die Ergebnisse auswirkt. Dennoch kann hier kein Einfluss der Drehraten und hohen Orientierungswinkel auf die Messgenauigkeit des Gesamtsystems festgestellt werden.

## 5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein Konzept vorgestellt, um die Genauigkeit von Inertial/GNSS-Modulen in mit Laserscannern ausgestatteten Mobile-Mapping-Systemen zu bewerten. Hierzu wurden insbesondere die Richtigkeit und die Wiederholgenauigkeit der Pose sowie die Genauigkeit der Verdrehung als wesentliche Bewertungskriterien festgelegt. Es wurden Methoden entwickelt, um aus den Messungen der Laserscanner die entsprechenden Kenngrößen automatisch zu bestimmen. In diesem Zusammenhang wurden in einem Referenzgebiet Landmarken mit übergeordneter Genauigkeit eingemessen. Durch einen entsprechenden Algorithmus ließen sich diese Landmarken in Form von Straßenlaternen aus den in Messfahrten aufgezeichneten Punktwolken segmentieren und die Position der segmentierten Objekte mit den Referenzen vergleichen. Kern dieses Algorithmus ist die Projektion der Punktwolke auf die  $x/y$ -Ebene. Zur Segmentierung einer Landmarke werden Gebiete mit einer hohen Punktdichte gewählt und die zugehörigen dreidimensionalen Punkte extrahiert. Mit diesem Algorithmus erfolgt eine automatische Segmentierung und Zuordnung der Landmarken aus einer aufgenom-

menen Punktwolke. Aus den Abweichungen der segmentierten Landmarken zu deren Referenzen lässt sich auf die äußere Genauigkeit (Richtigkeit) des verwendeten Inertial/GNSS-Sensors, aus der Streuung der Abweichungen auf die Wiederholgenauigkeit (Präzision) schließen. Die Genauigkeit der Verdrehung wurde durch eine Fahrt über eine Rampe mit anschließender Analyse der parallel von den Laserscannern aufgenommenen Ebene untersucht.

Das entwickelte Konzept wurde auf drei verschiedene Systeme angewendet. Hierbei zeigte sich, dass die Kenngrößen zur Bewertung der Genauigkeit bestimmt werden konnten. Insgesamt ergaben sich für die Sensoren der Firma OXTS und NG LITEF vergleichbare Ergebnisse, für den deutlich preiswerteren XSens-Sensor wie erwartet geringere Genauigkeiten.

Die Stärke des vorgestellten Bewertungskonzeptes liegt in der Automatisierbarkeit und der hieraus resultierenden geringen Auswertzeit für den Anwender. Ist ein Referenzgebiet verfügbar, so können die Bewertungskriterien ohne größeren Aufwand bestimmt werden.

Zur Untersuchung hochgenauer Inertial/GNSS-Systeme sind jedoch die Genauigkeiten der Laserscanner und der Referenzlandmarken sowie die Unebenheiten der verwendeten Häuserfassaden die limitierenden Faktoren. Weiter müssen hier auch die Laserscanner gegenüber der Inertial/GNSS-Einheit mit hoher Genauigkeit kalibriert sein. Hier könnte das Verfahren in Zukunft durch eine Bore-sight-Kalibrierung ergänzt werden. Auch gilt es, für eine gesamte Bewertung eines Sensors weitere Bewertungskriterien zu definieren.

## Anmerkung

Die Autoren zielen in diesem Beitrag nicht auf eine Instrumentenempfehlung ab. Die Firmen- und Produktnamen sind nur zur Transparenz angegeben. Der Leser soll sich ermutigt fühlen, sein eigenes Equipment unter Nutzung des vorgeschlagenen Testkonzepts und unter Berücksichtigung seiner spezifischen Anwendung zu testen.

## Danksagung

An dieser Stelle möchten wir uns bei der SICK AG, insbesondere bei Dr.-Ing. KAY FUERSTENBERG, Dr.-Ing. ROLAND KRZIKALLA sowie Dipl.-Ing. MARC SOWEN für die Durchführung der Messungen und die Unterstützung während der Auswertung der Ergebnisse bedanken.

## Literaturverzeichnis

- BARBER, D., MILLS, J. & SMITH-VOYSEY, S., 2008: Geometric validation of a ground-based mobile laser scanning system. – ISPRS Journal Photogrammetry and Remote Sensing 2008 **63**: 128–141.
- BRENNER, C., 2009: Extraction of features from mobile laser scanning data for future driver assistance systems. – Advances in GIScience: 12th AGILE Conference on GIScience, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography: 25–42, Springer, Berlin, Heidelberg.
- DOROBANTU, R. & ZEBHAUSER, B.R., 1999: Field Evaluation of a Low-Cost Strapdown IMU by means GPS. – Ortung und Navigation **1999** (1): 51–65.
- FISCHLER, M.A. & BOLLES, R.C., 1981: Random Sample Consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. – Communications of the ACM **24** (6): 381–395.
- GOOGLE INC., 2013: Google Earth (V. 7.1.1.1888). GeoBasis-DE/BKG (2009). Merckuring, Hamburg. Bildaufnahmedatum: 6.10.2006. <http://www.google.de/intl/de/earth/index.html> (30.4.2013).
- KAARTINEN, H., HYYPPÄ, J., KUKKO, A., JAAKKOLA, A. & HYYPPÄ, H., 2012: Benchmarking the Performance of Mobile Laser Scanning Systems Using a Permanent Test Field. – Sensors 2012 **12**: 12814–12835.
- KUKKO, A., KAARTINEN, H., HYYPPÄ, J. & CHEN, Y., 2012: Multiplatform Mobile laser scanning: Usability and performance. – Sensors 2012 **12**: 11712–11733.
- OXFORD TECHNICAL SOLUTIONS LTD, 2013: RT3000: Hochpräzise GPS-gestützte Inertialmesssysteme (Datenblatt). [http://www.oxts.com/Downloads/Products/RT3000/RT3000\\_DE.pdf](http://www.oxts.com/Downloads/Products/RT3000/RT3000_DE.pdf) (30.4.2013).
- POINT CLOUD LIBRARY, 2013. [www.pointclouds.org](http://www.pointclouds.org) (30.4.2013).
- SKALLOUD, J., CRAMER, M. & SCHWARZ, K., 1996: Exterior orientation without ground control. – ISPRS Congress Commission III, ISPRS Archives **31** (B3): 125–130.
- XSENS TECHNOLOGIES B.V., 2013: MTi-G. Miniature AHRS with intergrated GPS (Datenblatt). [http://www.xsens.com/images/stories/products/PDF\\_Brochures/mti-g%20leaflet.pdf](http://www.xsens.com/images/stories/products/PDF_Brochures/mti-g%20leaflet.pdf) (30.4.2013).

### Adresse der Autoren:

ALEXANDER SCHLICHTING & apl. Prof. Dr.-Ing. CLAUD BRENNER, Institut für Kartographie und Geoinformatik, Leibniz Universität Hannover, Appelstr. 9A, 30167 Hannover, Tel.: +49-511-762-3465, Fax.: +49-511-762-2780, e-mail: {alexander.schlichting}{claus.brenner}@ikg.uni-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. STEFFEN SCHÖN, Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover, Schneiderberg 50, 30167 Hannover, Tel.: +49-511-762-3397, Fax.: +49-511-762-4006, e-mail: schoen@ife.uni-hannover.de

Manuskript eingereicht: Mai 2013

Angenommen: September 2013