

Genauigkeitsuntersuchung zur Lokalisierung von Fahrzeugen mittels Automotive-Laserscannern

ALEXANDER SCHLICHTING¹ & CLAUS BRENNER²

Zusammenfassung: In diesem Beitrag wird untersucht, inwieweit Automotive Laserscanner für eine Fahrzeuglokalisierung in Stadtgebieten geeignet sind. Zu diesem Zweck wurden in einem Testgebiet stangenförmige Objekte und Ebenen zunächst aus den Aufnahmen eines hochgenauen Mobile-Mapping-Systems extrahiert und anschließend durch ein Fahrzeug mit einem integrierten Automotive-Laserscanner detektiert. Nachfolgend wurden die Merkmale aus den Automotive-Messungen den Referenzdaten zugeordnet. Auf dieser Basis wurde untersucht, ob es möglich ist, die jeweilige Position des Fahrzeuges, zusammen mit einer Genauigkeitsabschätzung, nur auf der Grundlage erfolgreich zugeordneter Merkmale in einer lokalen Fahrzeugumgebung zu bestimmen. Als Ergebnis der Untersuchungen liegt eine quantitative und qualitative Abschätzung der Positionierlösung vor. Neben einer Aussage über die Häufigkeit erfolgreicher Positionsbestimmungen ist auch eine Karte entstanden, welche für die etwa sechs Kilometer lange Trajektorie des Testgebiets die Genauigkeiten in Form von Fehlerellipsen der jeweiligen Standorte angibt.

1 Einleitung

Autonomes Fahren erfordert, dass die Fahrzeugposition zu jedem Zeitpunkt mit hoher Genauigkeit bekannt ist. Für eine hochgenaue Echtzeitpositionierung im Zentimeter- bis Dezimeterbereich mit Hilfe von Inertial/GNSS-Sensorik werden Verfahren wie RTK (*Real Time Kinematic*) und hochgenaue Inertialsysteme benötigt. Jedoch ist es so, dass die Genauigkeit selbst dann abhängig von Abschattungen und Mehrwegeeffekten ist, sodass insbesondere in Stadtgebieten die geforderten Genauigkeiten nicht erreicht werden. Insofern ist es nötig, weitere Sensoren und Verfahren zur Positionierung zu verwenden. Eine Möglichkeit hierzu sind Laserscanner, welche für gewöhnlich auch zur Hindernisdetektion in autonom fahrenden Fahrzeugen eingesetzt werden und so ohnehin in zukünftigen Fahrerassistenzsystemen verfügbar sind. Im Rahmen des ‚Stadtpilot‘-Projekts werden die Intensitätswerte der Laserscanner genutzt, um Fahrbahnmarkierungen zu detektieren (NOTHDURFT et al., 2011) und Referenzen aus einer digitalen Karte zuzuordnen. Aus deren Abweichungen kann anschließend die Position verbessert werden. LEVINSON et al. (2007) extrahieren aus den Intensitätswerten der Sensoren ein 2D-Bild der Straßenoberfläche. Dieses wird durch ein Korrelationsverfahren mit Bildern aus einer Datenbank abgeglichen, um das Fahrzeug hierdurch relativ zur Karte positionieren. In (BRENNER & HOFMANN, 2012) werden stangenförmige Objekte aus den Messungen von auf dem Dach angebrachten Laserscannern extrahiert. Die Stangen werden durch einen Matching-Algorithmus ihren jeweiligen Referenzen zugeordnet. Die zur Positionsverbesserung des Fahrzeuges

1) Alexander Schlichting, Institut für Kartographie und Geoinformatik Hannover, Appelstr. 9A, 30167 Hannover; E-Mail: alexander.schlichting@ikg.uni-hannover.de

2) Claus Brenner, Institut für Kartographie und Geoinformatik Hannover, Appelstr. 9A, 30167 Hannover; E-Mail: claus.brenner@ikg.uni-hannover.de

notwendige Transformation ergibt sich aus den Koordinatendifferenzen.

In diesem Beitrag werden stangenförmige Objekte und Ebenen aus den Messungen eines Fahrzeuges mit einem integrierten Automotive-Laserscanner extrahiert. Da diese Laserscanner in den meisten Fällen ohnehin beispielsweise zur Hindernisdetektion (FUERSTENBERG et al., 2003) genutzt werden und somit in autonom fahrenden Fahrzeugen verbaut sind, bietet es sich an, die Messungen der Scanner auch zu nutzen, um die Positionslösung des Fahrzeuges zu verbessern. Hierzu müssen die Stangen und Ebenen entsprechenden Referenzen aus einer digitalen Karte zugeordnet werden. Die Referenzmerkmale wurden vorab aus einer Punktwolke eines Riegl VMX-250 Mobile-Mapping-Systems extrahiert. Hierbei konnten in einem etwa 3 km² großen Messgebiet in Hannover insgesamt über 10.000 stangenförmige Objekte und über 2.000 Ebenen extrahiert werden. Abb. 1 zeigt eine Karte des Messgebietes mit den extrahierten Stangen und Ebenen. Für beide Systeme lagen Positionierungslösungen einer Inertial/GNSS-Lösung vor, welche jeweils durch Daten eines Satellitenpositionierungsdienstes verbessert wurden. Für jeden Standpunkt der etwa sechs Kilometer langen Trajektorie des mit dem Automotive-Laserscanner ausgestatteten Fahrzeugs wurde untersucht, ob aus den detektierten und zu den entsprechenden Referenzen zugeordneten Merkmalen eine Positionierung möglich ist. Hierbei wurden nur Merkmale berücksichtigt, welche sich in einem 30-Meter-Radius um das Fahrzeug befinden. Außerdem wurde unter Berücksichtigung der Genauigkeit der Segmentierung aus den Messungen des Automotive-Laserscanners die Genauigkeit für die jeweiligen Standpunkte berechnet und in Form von Fehlerellipsen in einer Karte visualisiert.

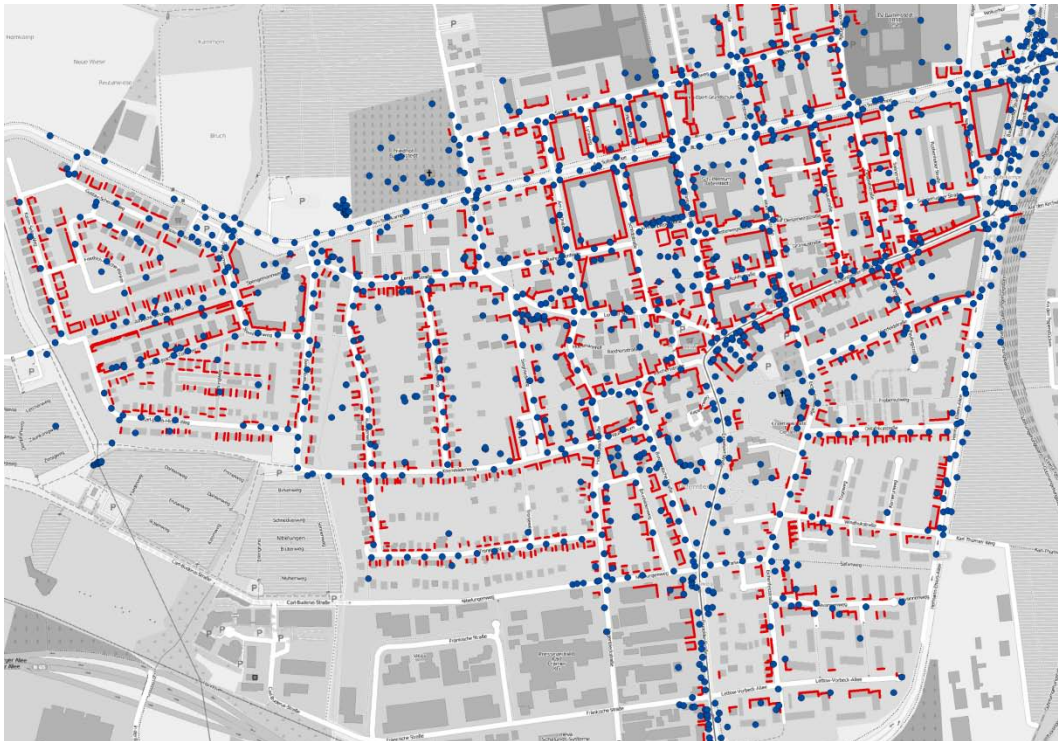


Abb. 1: Aus den Messungen des Mobile-Mapping-Systems extrahierte Stangen (blau) und Ebenen (rot). Hintergrundkarte: (OPENSTREETMAP, 2013).

2 Datenakquise

Als Testgebiet wurde der Stadtteil Badenstedt in Hannover gewählt. Hier wurden sowohl stangenförmige Objekte und Ebenen aus den Messungen eines Mobile-Mapping-Systems, als auch aus den Messungen eines Fahrzeuges, welches mit einem Automotive-Laserscanner ausgestattet ist, extrahiert.

2.1 Referenzdaten

Das eingesetzte Riegl VMX-250 Mobile-Mapping-System (siehe Abb. 2) verfügt über zwei Laserscanner, welche mit einer Scanrate von jeweils 300.000 Punkten pro Sekunde messen können. Die maximale Distanz beträgt hierbei 200 Meter, bei einer Distanzgenauigkeit von zehn Millimetern. Zur Lokalisierung wird ein Applanix GNSS/INS-System in Kombination mit einem Odometer verwendet. Die GNSS-Messungen werden im Postprocessing mit Hilfe von Korrekturdaten des Satellitenpositionierungsdienstes SAPOS verbessert.

Der zur Segmentierung der Stangen verwendete Algorithmus wird in (BRENNER, 2009a) vorgestellt. Der Algorithmus nutzt die zwei Hauptcharakteristiken der untersuchten Stangen, welche die Segmentierung stark vereinfachen. Die erste Haupteigenschaft der Stangen ist, dass sie aufrecht stehen. Weiterhin haben sie die Form einer Zylinderoberfläche, aus der sich ein Kern mit dem Radius r_1 (siehe Abb. 3) ergibt. Außerhalb dieses Kernes befindet sich eine Region, welche keine weiteren Punkte enthält. Nachdem die Stange in zylindrische Schichten aufgeteilt wird, findet eine Analyse der einzelnen Zylinderschichten auf die zuvor genannten Charakteristiken statt. Das untersuchte Objekt wird als Stange gespeichert, sofern eine bestimmte Anzahl von Schichten gefunden wurde und die Gesamthöhe der Stange einen Mindestwert (hier 1,5 m) vorweisen kann. Der Stangenmittelpunkt ergibt sich aus dem Mittelwert der Lagekoordinaten der innerhalb der Zylinderschichten liegenden Punkte. Auf diese Weise konnten 10.633 Stangen segmentiert werden.

Die Extraktion der Ebenen geschieht auf Basis eines Region-Growing-Algorithmus, wie er in (ADAMS & BISCHOF, 1994) beschrieben wird. Als Homogenitätskriterium wurden der Normalenvektor und die euklidische Distanz verwendet. Um sicherzustellen, dass die Form und



Abb. 2: Riegl VMX-250 Mobile-Mapping-System

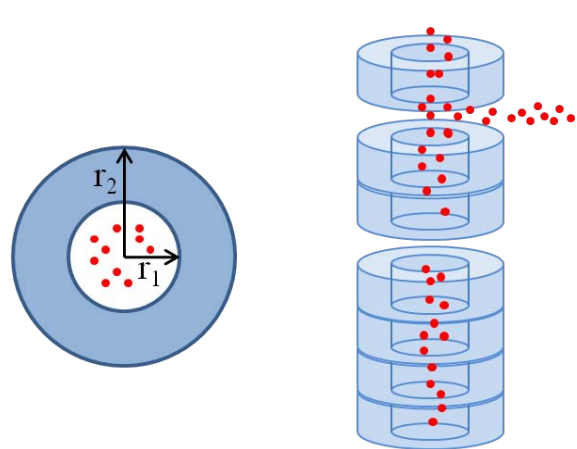


Abb. 3: Links: Geometrische Stangendetektion mit Hilfe von zwei Radien. Rechts: Analyse einer Stange in Zylinderschichten.

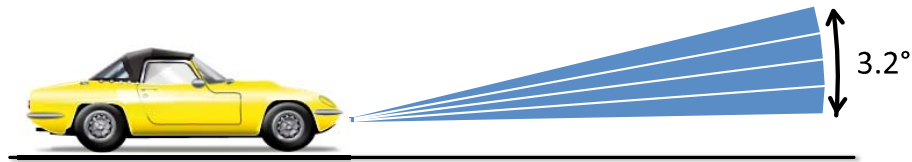


Abb. 4: Anordnung und vertikaler Sichtbereich des Automotive Laserscanners.

Ausdehnung der Ebenen weitestgehend konstant ist, wurden Häuserfassaden gewählt. Als Kriterien hierfür dienten eine Mindestpunktzahl von 2.000 Punkten sowie eine minimale vertikale und horizontale Ausdehnung von jeweils drei Metern. So wird beispielsweise verhindert, dass Autos oder Hecken als Ebenen detektiert werden. Für 2.305 segmentierte Ebenen wurden die Ebenenparameter (Normalenvektor und Distanz zum Ursprung) sowie die äußeren Begrenzungspunkte in eine digitale Karte eingetragen.

2.2 Automotive-Daten

Automotive-Laserscanner haben in der Regel ein begrenztes Sichtfeld. In diesem Fall wurde ein Multilayer-Scanner verwendet, welcher, ähnlich dem Ibeo Lux (IBE0, 2014), bis zu vier Horizontalebene mit einem Sichtbereich von jeweils 135° abtasten kann. Der vertikale Sichtbereich beträgt $3,2^\circ$, die Distanzmessgenauigkeit 10 cm. Der Scanner misst mit 25 Hz bei einer Winkelauflösung von $0,25^\circ$ und ist am Fahrzeug etwa 0,5 m über dem Boden an der Frontstoßstange montiert (siehe Abb. 4). Die Positionierung geschieht durch eine OXTS RT3000 Inertial/GNSS-Einheit in Verbindung mit RTK. Zur Segmentierung der Stangen und Ebenen wurde der gleiche Algorithmus wie bei der Gewinnung der Referenzdaten verwendet, wobei hier die minimale Ausdehnung in der Höhe nicht berücksichtigt wurde. Die niedrige Einbauhöhe und der geringe vertikale Sichtbereich führen dazu, dass in den meisten Fällen nur ein schmaler Bereich zu sehen ist, der sich am unteren Ende der jeweiligen Objekte befindet. Dies wird in Abb. 5

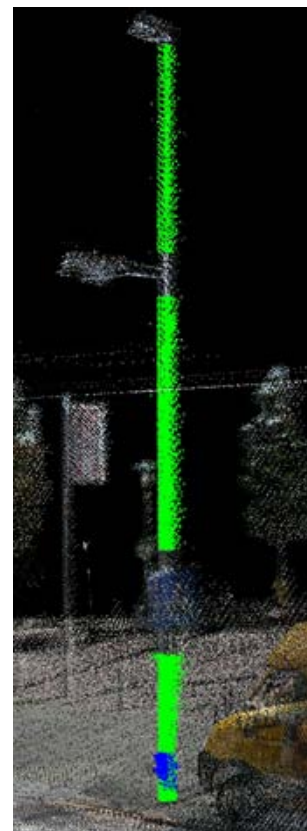
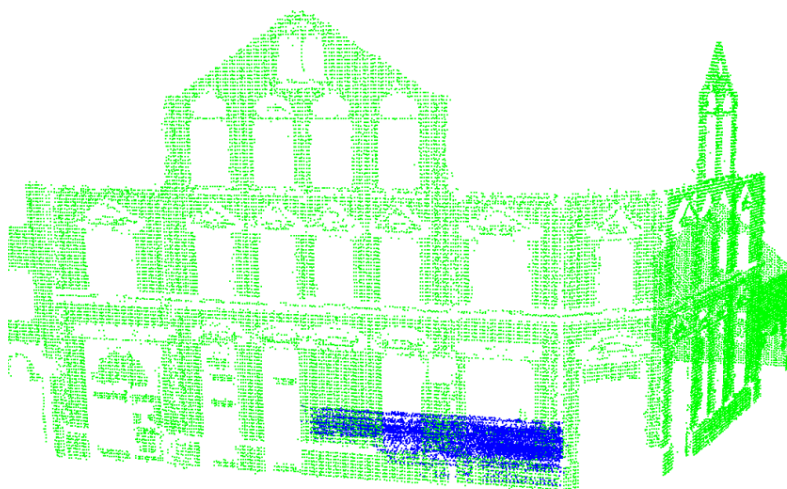


Abb. 5: Vergleich der vom Mobile Mapping System (grün) und vom Automotive-Laserscanner (blau) erfassten Punkte.

angenommen, wenn sich in diesem Umkreis entweder jeweils mindestens drei Stangen, zwei Ebenen, oder zwei Stangen und mindestens eine Ebene befanden. Liegen ausreichend Merkmale vor, so wird für den jeweiligen Standpunkt die Genauigkeit durch Varianzfortpflanzung berechnet, wie in (BRENNER, 2009a) beschrieben, und anschließend durch Fehlerellipsen visualisiert. Die detektierten Ebenen werden hierfür auf die Ebenenendpunkte reduziert. In die Berechnung gehen die für Automotive-Laserscanner typischen Messunsicherheiten σ_d und σ_α ein (IBEO, 2014). Da hier lediglich untersucht werden soll, wie genau eine Positionsbestimmung mit vorliegenden, hochgenauen Referenzdaten möglich ist, wurden für die Referenzstangen und -ebenen Genauigkeiten von wenigen Zentimetern angenommen. Eine Übersicht der angenommenen Genauigkeiten befindet sich in Tab. 1.

Tab. 1: In die Berechnung der Fehlerellipsen eingehende Unsicherheitsfaktoren.

Genauigkeitsfaktor	Standardabweichung
Distanzmessung (σ_d)	10 cm
Winkelmessung (σ_α)	0,25°
Stangen (σ_{Stange})	2 cm
Ebenenendpunkte (σ_{Ebene})	5 cm

4 Ergebnisse

In der Auswertung der Ergebnisse wurde zwischen der Fahrzeuglokalisierung mit Hilfe von Messungen zu stangenförmigen Objekten, zu Ebenen und zu Stangen und Ebenen unterschieden. Die Anzahl der erfolgreichen Positionsbestimmungen und die jeweiligen mittleren Genauigkeiten der Standpunkte sind in Tab. 2 aufgeführt. Zusätzlich sind die berechneten Fehlerellipsen für die jeweiligen Standorte in Abb. 7 eingezeichnet. Das Messgebiet in Hannover-Badenstedt umfasst verschiedene Bereiche, die mit den Ziffern 1-5 gekennzeichnet sind. Der Bereich 1 führt entlang einer breiten Hauptstraße, an der zum Teil Fahrzeuge am Seitenstreifen abgestellt sind. Die Bereiche 2 und 3 kennzeichnen Wohngebiete. Im Bereich 4 befindet sich ein Neubaugebiet, im Bereich 5 ein typischer Innenstadtbereich.

Tab. 2: Auswertung der erfolgreichen Positionsbestimmung im Testgebiet.

	Stangen	Ebenen	Stangen und Ebenen
Anteil erfolgreicher Positionsbestimmungen	64 %	35 %	74 %
Mittlere Standardabweichung (1σ)	0,06 m	0,11 m	0,06 m

Werden nur detektierte und erfolgreich zugeordnete Stangen in die Auswertung einbezogen, so ist eine Positionsbestimmung in 64 % der Fälle mit einer mittleren Standardabweichung von 6 cm möglich. Werden zusätzlich Ebenen verwendet, so erhöht sich diese Erfolgsrate auf 74 %, bei einer gleichbleibenden Standardabweichung. Für eine Lokalisierung nur auf Grund von extrahierten und zugeordneten Ebenen ergibt sich eine Rate von 35 %, mit einer mittleren Standardabweichung von 11 cm. Abb. 7 zeigt, dass insbesondere in den Bereichen 1 und 3 eine

Fahrzeuglokalisierung aus gefundenen Stangen und Ebenen häufig nicht möglich ist. In diesen Gebieten sind vornehmlich Einzelhäuser, deren Grundstücke durch Hecken oder dichte Zäune begrenzt sind, vorzufinden. Stangenförmige Objekte, wie Straßenlaternen, befinden sich zumeist

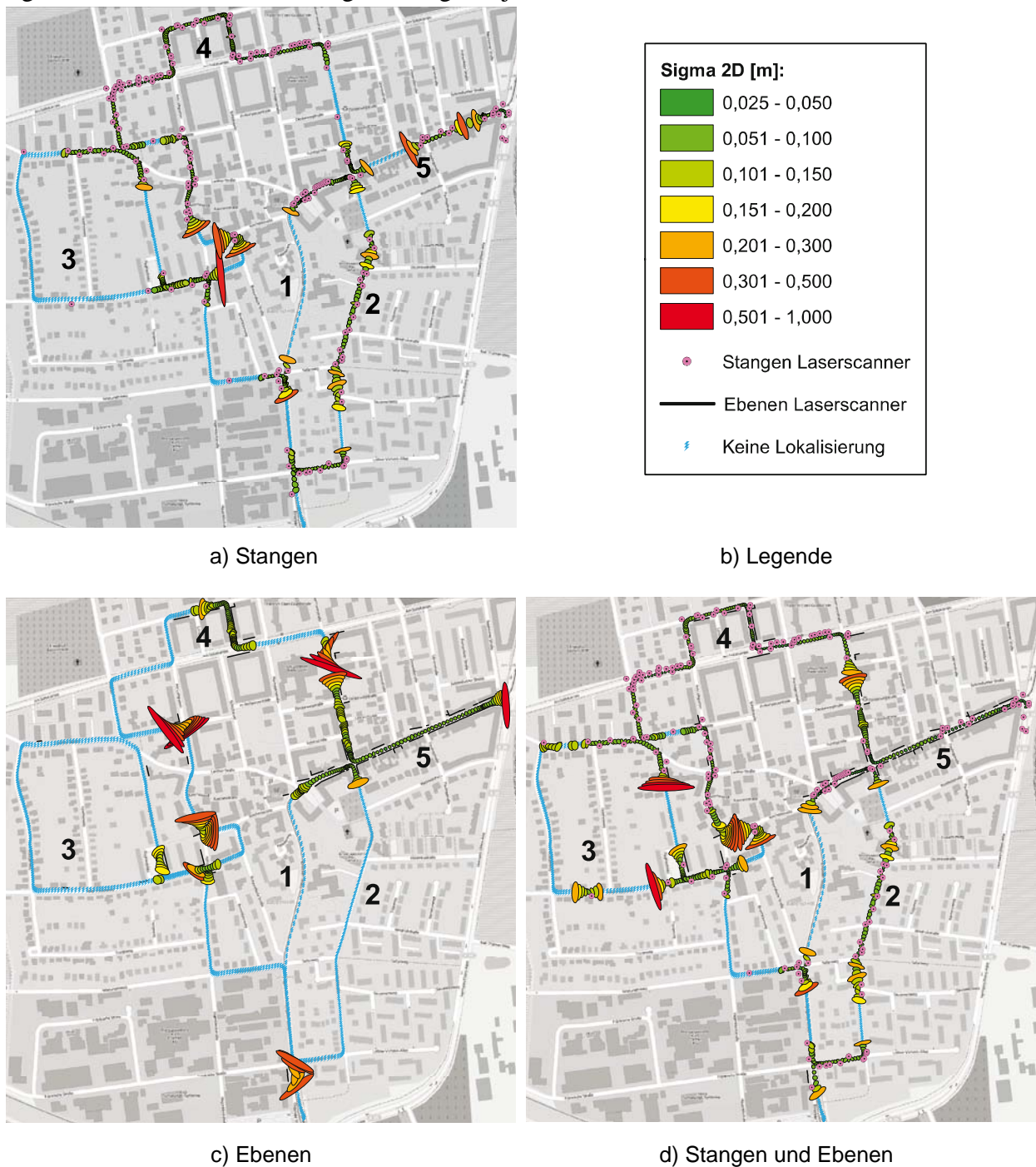


Abb. 7: Fehlerellipsen der Standpunkte im gewählten Testgebiet. Hintergrundkarte: (OPENSTREETMAP, 2013).

nur wenige Zentimeter vor diesen Grundstücksbegrenzungen entfernt. Der relativ niedrig am Fahrzeug angebrachte Laserscanner erfasst auch auf Grund seines geringen vertikalen Öffnungswinkels nur den unteren Bereich einer Stange (siehe Abb. 5). Dies hat zur Folge, dass in den Daten nicht mehr zwischen Stange und Grundstücksbegrenzung unterschieden werden kann und das jeweilige Objekt somit nicht detektiert wird. Da auch die Häuserfassaden in der Regel verdeckt sind, ist auch eine Lokalisierung durch die hier gewählten Ebenen nicht möglich. Eine Möglichkeit die Anzahl der detektierten Objekte zu erhöhen ist, den Laserscanner an einer höheren Position am Fahrzeug anzubringen. Auch ein größerer vertikaler Öffnungswinkel ist in diesem Zusammenhang sinnvoll.

Bei den erzielten Ergebnissen ist zu beachten, dass von einer hochgenauen Lagegenauigkeit der Referenzobjekte von wenigen Zentimetern ausgegangen wurde. Referenzdaten mit einer niedrigeren Genauigkeit hätten auch direkt eine niedrige Lokalisierungs-genauigkeit zur Folge. Weiterhin konnten die aus den Messungen des Automotive-Laserscanners extrahierten Objekte den Referenzdaten weitestgehend automatisiert zugeordnet werden, da auf Grund der eingesetzten INS/GNSS-Kombination in Verbindung mit RTK die Genauigkeit der detektierten Stangen und Ebenen sehr hoch war. Es ist aber durchaus denkbar, dass die Position und Ausrichtung des Fahrzeuges vorab nur mit einer niedrigen Genauigkeit bekannt sind. Dies kann die Zuordnung unter Betrachtung der euklidischen 2D-Distanz erheblich erschweren. Für diesen Fall muss ein entsprechender Zuordnungsalgorithmus eingesetzt werden, wie er beispielsweise in (BRENNER, 2009b) vorgestellt wird.

5 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wurde analysiert, ob sich Automotive-Laserscanner für eine Fahrzeuglokalisierung in urbanen Gebieten eignen. Hierzu wurden Laserscanner-Messungen genutzt, um stangenförmiger Objekte und Ebenen zu detektieren. Diese Stangen und Ebenen wurden anschließend entsprechenden Referenzobjekten, welche zuvor aus den Messungen eines hochgenauen Mobile-Mapping-Systems extrahiert wurden, zugeordnet. Auf einer etwa sechs Kilometer langen Trajektorie wurden aus erfolgreich zugeordneten Objekten die Genauigkeiten der Positionsbestimmung ermittelt und in Form von Fehlerellipsen dargestellt. In diese Berechnung gingen die in einer lokalen Fahrzeugumgebung erfolgreich detektierten und zugeordneten Stangen und Ebenen sowie die Messfehler des Laserscanners ein. Aus den Ergebnissen der Untersuchungen wurde eine Karte erstellt, in der die Fehlerellipsen für die jeweiligen Standpunkte eingezeichnet sind. Es zeigte sich, dass im untersuchten Testgebiet eine Positionsbestimmung unter Verwendung von stangenförmigen Objekten in 64 % der Fälle mit einer Genauigkeit von sechs Zentimetern theoretisch möglich ist. Unter Zunahme von Ebenen erhöht sich die Anzahl erfolgreicher Positionsbestimmungen auf 74 %, bei einer gleichbleibenden Genauigkeit.

Die Zuordnung der Stangen geschieht anhand der euklidischen Distanz mit anschließender visueller Kontrolle. Für zukünftige Arbeiten gilt es, einen automatischen Zuordnungsalgorithmus mit einer möglichst geringen Anzahl an Fehlzuordnungen zu entwickeln. Hierbei ist auch die Vermeidung von False-Positive-Messungen von großer Bedeutung. Diese fehlerhaften Objektdetektionen können zum Beispiel vermieden werden, indem bestimmte Bereiche durch

eine Szenenklassifikation ausgeschlossen werden. So kann beispielsweise davon ausgegangen werden, dass sich stangenförmige Objekte oder Ebenen nicht im Straßenbereich befinden.

6 Literaturverzeichnis

- ADAMS, R & BISCHOF, L., 1994: Seeded Region Growing. IEEE Transaction of Pattern Analyses and Machine Intelligence, **16** (6), S. 641-647.
- BRENNER, C., 2009a: Extraction of features from mobile laser scanning data for future driver assistance systems. Advances in GIScience. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Springer, S. 25-42.
- BRENNER, C., 2009b: Global localization of vehicles using local pole patterns. Pattern Recognition, Springer, S. 61-70.
- BRENNER, C. & HOFMANN, S., 2012: Evaluation of automatically generated feature maps for future driver assistance systems. Advances in Spatial Data Handling and GIS, Springer, S. 169-181.
- FUERSTENBERG, K. C., LINZMEIER, D. T. & DIETMAYER, K. C. J., 2003: Pedestrian recognition and tracking of vehicles using a vehicle based multilayer laserscanner. Proceedings of 10th World Congress on Intelligent Transport Systems.
- IBEO AUTOMOTIVE SYSTEMS GMBH, 2014: ibeo Lux (Datenblatt).
http://www.ibeo-as.com/ibeo_lux.html.
- LEVINSON, J.; MONTEMERLO, M. & THRUN, S., 2011: Map-based precision vehicle localization in urban environments. Robotic: Science and systems.
- NOTHDURFT, T.; SCHREIBER, M., ZIEGLER, J. & STILLER, C., 2011: Stadtpilot: First fully autonomous test drives in urban traffic. 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITCS), S. 919-924.
- OPENSTREETMAP, 2014: Hannover-Badenstedt. <http://www.openstreetmap.org/node/255606172>. 28.01.2014.