

Leistungsfähiges portables Mobile Mapping im Außenraum – Genauigkeitspotential und Grenzen unterschiedlicher Georeferenzierungsansätze in der Stadt und im Wald

JONAS MEYER¹, STEFAN BLASER¹, STEPHAN NEBIKER¹, LEA FRICKER¹ & DANIEL WEBER¹

Die fortschreitende Digitalisierung führt zu tiefgreifenden Veränderungen im Infrastrukturmanagement. Mithilfe bildbasierter Webdienste – vergleichbar mit Street View – mit 3D-Messfunktionalität können zahlreiche aufwändige und gefährliche Mess-, Beurteilungs- und Planungsaufgaben vom Feld ins Büro verlagert werden. Mit portablen bildbasierten Mobile Mapping Systemen (MMS), wie dem prototypischen Messrucksack „BIMAGE Backpack“ der Fachhochschule Nordwestschweiz, können bisher unzugängliche Orte im Außenraum, wie enge Gassen in der Innenstadt oder schmale Waldwege, kinematisch erfasst werden. In diesem Beitrag werden unterschiedliche Georeferenzierungsansätze diskutiert sowie deren absolutes Genauigkeits- und Zuverlässigkeitspotenzial aufgrund ausgedehnter Aufnahmen der Innenstadt von Basel sowie von Waldgebieten untersucht. Gegenüber der direkten Georeferenzierung, wurden mit nachträglicher bildbasierter Georeferenzierung Verbesserungen um einen Faktor 5-10 erreicht. Die Mediane absoluter Differenzen zu Referenzpunkten variierten zwischen 10.2 und 11.7 cm und die Präzision von Relativmessungen betrug jeweils 3 mm. Hiermit ergibt sich ein breites Anwendungsspektrum für portable bildbasierte MMS im Außenraum.

1 Einleitung

Mit der fortschreitenden Urbanisierung sowie Digitalisierung und der baulichen Verdichtung gewinnen genaue Daten von Infrastrukturbauten zunehmend an Bedeutung. Die Digitalisierung führt zu tiefgreifenden Veränderungen im gesamten Planungs- und Bauprozess. Sie bietet insbesondere große Chancen im Management von Infrastrukturanlagen, indem zahlreiche aufwändige und potentiell gefährliche Mess-, Beurteilungs- und Planungsaufgaben vom Feld ins Büro verlagert werden können. Voraussetzung dafür bilden realitätsgetreue, genaue, zuverlässige und aktuelle 3D-Daten, die sich in kollaborativen digitalen Planungs- und Managementprozessen nutzen lassen. Im Straßen- und Schienenbereich werden dazu bildbasierte Webdienste mit 3D-Messfunktionalität – im Ansatz vergleichbar mit *Street View* – bereits verbreitet eingesetzt (NEBIKER 2017). Für die großflächige kinematische 3D-Infrastrukturerfassung eignen sich bildbasierte Mobile Mapping Systeme (MMS) mit mehreren Stereobasen (BURKHARD et al. 2012; NOVAK 1991; SCHWARZ et al. 1993), welche für die 360°-Abdeckung urbaner Gebiete um spezielle Stereo-Panorama-Konfigurationen (BLASER et al. 2017; MEILLAND et al. 2015) erweitert werden können. Die Vorteile von RGB-D Bildern von MMS mit fixen Stereobasen gegenüber texturierten Punktwolken von LiDAR-basierten MMS (HEUVEL et al. 2006; PUENTE et al. 2013) werden in

¹ FHNW Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Geomatik, Hofackerstrasse 30, CH-4132 Muttenz, Schweiz, E-Mail: [Jonas.Meyer, Stefan.Blaser, Stephan.Nebiker]@fhnw.ch, lea.delia.fricke@gmail.com, tapi@gmx.ch

NEBIKER et al. (2015) aufgezeigt und diskutiert. Im Außenraum findet für die direkte Georeferenzierung die Sensorkombination von GNSS und Inertialmesseinheit (INS) verbreiteten Einsatz. Deren Genauigkeit hängt jedoch stark von der jeweiligen GNSS-Abdeckung ab und kann auch mit hochwertigen INS-Komponenten auf mehrere Dezimeter bis Meter abfallen. Mit nachträglicher bildbasierter Georeferenzierung in Kombination mit Luftbildern sind Genauigkeiten im Dezimeterbereich erreichbar (JENDE et al. 2019). Mittels bedingter Bündelblockausgleichung und deren Lagerung auf Passpunkten lassen sich Genauigkeiten aus der direkten Georeferenzierung um einen Faktor 10 in den Zentimeterbereich verbessern (CAVEGN et al. 2018).

Frühere eigene Erfassungs- und Auswerterversuche in bewaldeten Gebieten mit portablen bildbasierten MMS (WITTMER 2017) scheiterten einerseits aufgrund eines damals zu groß gewählten Bildfolgeabstands von über 2 m, andererseits aufgrund noch fehlender alternativer robuster Georeferenzierungsansätze. Dank den Entwicklungen und Erkenntnissen der letzten Jahre, erscheint deren bildbasierte 3D-Dokumentation nun als realistisch.

Der ursprünglich für die Innenraumaufnahme konzipierte prototypische portable Messrucksack *BIMAGE Backpack* (BLASER et al. 2018) wurde für die Anwendung im Außenraum um ein mit GNSS gekoppeltes Inertialmesssystem (INS) erweitert. Somit besteht die aktuelle Systemkonfiguration aus einer Mehrkopf-Panoramakamera *Ladybug5*, zwei Multiprofillaserscannern *Velodyne VLP-16*, einer GNSS-Antenne, sowie einem INS *NovAtel SPAN CPT7*. Sämtliche Sensoren werden hardwarebasiert mit dem INS synchronisiert, welches die Zeitbasis des MMS bildet.

Die Bildposen der einzelnen Panoramakameraköpfe können nun einerseits, wie in BLASER et al. (2018) beschrieben, mit dem LiDAR-SLAM und anschließender 6 DoF-Transformation über Passpunkte, oder andererseits – dank der erweiterten Systemkonfiguration – mit direkter Georeferenzierung durch die eng gekoppelte Sensordatenfusion von GNSS und INS berechnet werden. CAVEGN et al. (2018) zeigten auf, dass sich sowohl die äußeren Orientierungen des LiDAR-SLAM, als auch jene der direkten Georeferenzierung signifikant verbessern lassen, indem die Einzelbilder der Panoramakamera mit einer leistungsfähigen Structure-from-Motion (SfM)-Pipeline prozessiert werden und somit eine Bündelblockausgleichung durchgeführt wird. Die zuvor kalibrierten relativen Orientierungen zwischen den einzelnen Panoramakameraköpfen wurden als Bedingungen in die Bündelblockausgleichung eingeführt und fixiert. Das Genauigkeitspotenzial des bildbasierten portablen MMS wurde bereits im Innenraum (BLASER et al. 2018) und unter Tage (BLASER et al. 2019a) in verschiedenen kleinräumigen Testgebieten untersucht und aufgezeigt.

In diesem Beitrag werden großflächige Untersuchungen der erweiterten Systemkonfiguration im Außenraum durchgeführt, um das Potenzial der verschiedenen zur Verfügung stehenden Georeferenzierungsansätze in unterschiedlichen Umgebungen aufzuzeigen. Neben der SLAM-basierten Georeferenzierung und der nachträglichen bildbasierten Georeferenzierung, ist dank der Systemerweiterung, zusätzlich die direkte Georeferenzierung mit GNSS und INS möglich. Ein Testgebiet befindet sich im Wald und ein weiteres Testfeld liegt in einer historischen Innenstadt mit jeweils unterschiedlichen Straßen- und Wegbreiten sowie GNSS-Signalabschattungen durch Bäume und enge, teils unbefahrte Straßenschluchten. In beiden Testgebieten bestehen tachymetrisch eingemessene Referenzpunktnetze mit 80 und 89 Fixpunkten für aussagekräftige Genauigkeitsuntersuchungen. Die großen Ausdehnungen beider Testgebiete erlauben Trajektorien mit Gesamtlängen zwischen 700 und 800 m.

Der Beitrag ist wie folgt aufgebaut: In Kapitel 2 wird das erweiterte portable bildbasierte MMS beschrieben, in Kapitel 3 werden die verschiedenen Georeferenzierungsansätze diskutiert, Kapitel 4 beinhaltet die umfangreichen Untersuchungen in der Stadt und im Wald und in Kapitel 5 werden die erzielten Resultate aufgezeigt und beurteilt.

2 Portables bildbasiertes Mobile Mapping System

Mit Hilfe des bildbasierten Mobile Mapping Systems (MMS) *BIMAGE Backpack* (BLASER et al. 2018) sollen nebst Innenräumen und unterirdischen Infrastrukturanlagen (BLASER et al. 2019b) auch enge innerstädtische Umgebungen und Wald kinematisch erfasst werden. Die Repräsentation dieser Umgebungen erfolgt mittels georeferenzierter 3D-Bilder, analog zu existierenden stereobildbasierten MMS im Außenraum (BURKHARD et al. 2012; BLASER et al. 2017). In NEBIKER et al. (2015) werden das Konzept und der Aufbau der daraus resultierenden georeferenzierten 3D-Bildräume beschrieben sowie deren besondere Eigenschaften diskutiert. Die für nahezu jedes Pixel verfügbare Tiefeninformation eines 3D-Bilds ermöglicht denkbar einfache, direkte 3D-Messungen im Bild per Mausklick. Dank bekannter äußerer Orientierung der Stereobilder, können aus den 3D-Messungen absolute 3D-Koordinaten berechnet werden. Der Ansatz des 3D-Bilds beschränkt sich jedoch nicht nur auf die zusätzliche Ebene mit Tiefeninformation, ein 3D-Bild lässt sich um weitere pixelbasierte Informationsebenen (z. B. Qualität der Tiefeninformation, Klassifikation, etc.) erweitern.

Das prototypische portable MMS *BIMAGE Backpack* wurde als Rucksack konzipiert. Dessen erste Sensorkonfiguration für die Innenraumaufnahme ist in BLASER et al. (2018) im Detail dokumentiert. Sämtliche Sensoren wurden an einen robusten Aluminiumrahmen montiert, welcher wiederum an ein Rucksacktraggestell befestigt wurde. Die Mehrkopf-Panoramakamera *Ladybug5* von *FLIR* (Abb. 1, Nr. 3), bestehend aus sechs einzelnen Kameraköpfen mit Fischaugenoptik und einer Auflösung von je 5 MP, bildet die Umgebungssensorik. Als Navigationssensorik dienen zwei Multiprofillaserscanner *VLP-16* von *Velodyne*, wobei je einer der beiden Laserscanner horizontal und der zweite vertikal ausgerichtet ist (Abb. 1, Nr. 2 & 5). Diese Konfiguration verleiht der fusionierten Punktwolke die notwendige geometrische Stabilität – auch in beengten Verhältnissen, wie etwa in Treppenhäusern. Des Weiteren war in der ersten Konfiguration für die Innenraumaufnahme die Inertialmesssensorik (INS) *XSens MTI-300* in das MMS integriert. Mit dem 3D-LiDAR-SLAM-Algorithmus *Google Cartographer* (HESS et al. 2016) werden die Rohdaten beider Laserscanner und jene der INS fusioniert, woraus sich die relativen 3D-Systemposen ergeben. Die Sensorsynchronisation wurde in der ersten Konfiguration mit dem Einplatinencomputer *Arduino Nano* gesteuert. Mit einem elektrischen Impuls pro Sekunde werden die Navigationssensoren (LiDAR & INS), die kontinuierlich Daten erfassen, synchronisiert. Ein zweiter leistungsstarker Mini-Computer dient sowohl der Ausführung der Erfassungssoftware sowie der Speicherung der Rohdaten für den nachträglichen Auswertungsprozess. Der flexible mechanische Aufbau, wie auch die modulare Architektur der Erfassungssoftware mit dem weit verbreiteten open-source Framework Robot Operating System (ROS) (QUIGLEY et al. 2009), ermöglichen den Austausch von einzelnen Sensorkomponenten mit geringem Aufwand.

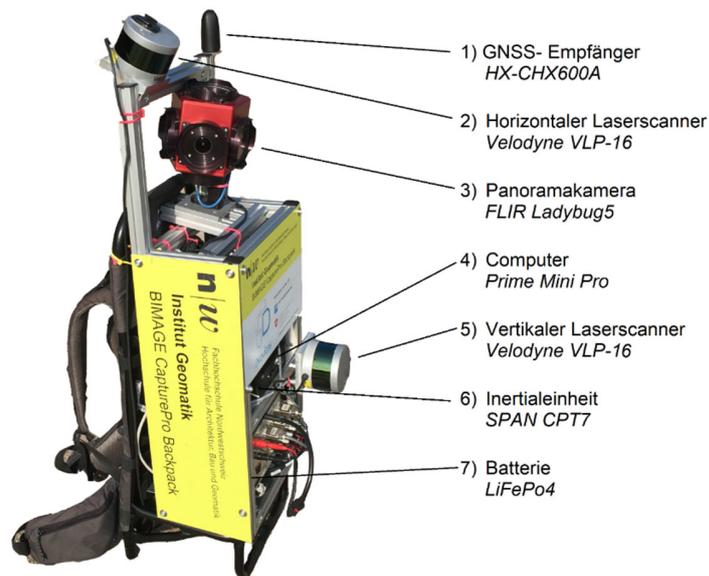


Abb. 1: Außen- und innenraumfähige Systemkonfiguration des portablen Mobile Mapping Systems *BIMAGE Backpack* mit Bezeichnung der Komponenten (FRICKER & WEBER, 2019)

Für Aufnahmen sowohl im Außen- wie auch im Innenraum, wurde einerseits das INS *XSens MIT-300* durch das mit GNSS gekoppelte INS *NovAtel SPAN CPT7* (NOVATEL INC. 2020) (Abb. 1, Nr. 6) ersetzt und dementsprechend um die GNSS-Antenne *HX-CHX600A* erweitert (Abb. 1, Nr. 1). Zusätzlich zur SLAM-basierten Systemnavigation für Innenräume, steht mit dem neuen INS, nun die mit GNSS und INS gekoppelte Systemnavigation zur Verfügung. Da das neue INS die Zeitbasis des MMS bildet und die hardwarebasierte Sensorsynchronisation unterstützt, konnte der Einplatinencomputer *Arduino Nano* weggelassen werden. Für die nachträgliche Datenauswertung wurde die in Tab. 1 aufgeführte Hardware verwendet.

Tab. 1: Verwendete Hardware für nachträgliche Datenauswertungen

	Prozessor	Grafikkarte	Arbeitsspeicher
Dell Precision Tower 7910	Intel Xeon E5-2623, 4 Core @ 3.0 GHz	nVidia GeForce GTX 1080	32 GB

3 Georeferenzierungsansätze

Die **direkte Georeferenzierung** (SCHWARZ, 1993) wird heutzutage verbreitet für die Erfassung von georeferenzierten Bilddaten mittels MMS eingesetzt. Aus der Sensordatenfusion von INS- und GNSS-Daten resultieren die Trajektorien, über den Bildauslösezeitpunkt werden die Bildposen in die Trajektorien interpoliert. Aufgrund der Verwendung von GNSS-Daten ist die direkte Georeferenzierung nur im Außenraum anwendbar. Sie weist ein Genauigkeitspotential von einigen Zentimeter bis mehreren Dezimeter auf (CAVEGN et al. 2016). Die erreichbare Genauigkeit sowie die Robustheit dieses Ansatzes sind stark von der Verfügbarkeit von GNSS-Signalen abhängig. Die direkte Georeferenzierung ist echtzeitfähig und geht mit dem geringsten Aufwand

für die nachträgliche Prozessierung einher. Die Prozessierungszeit ist kürzer als die Erfassungszeit und es werden aufgrund der Integration von GNSS-Daten keine Passpunkte benötigt (Tab. 2). Einen alternativen Georeferenzierungsansatz bieten SLAM-Algorithmen (DURRANT-WHYTE & BAILEY, 2006). Ursprünglich für die Navigation von Robotern in Innenräumen entwickelt, lokalisieren SLAM-Algorithmen die Position eines Sensors in der gleichzeitig erfassten Umgebung. Zur Entstehung und Ausprägungen von SLAM-Algorithmen wie beispielsweise Visual SLAM oder LiDAR SLAM geben CADENA et al. (2016) einen guten Überblick. Mit einem Genauigkeitspotential von einem Dezimeter ist die **SLAM-basierte Georeferenzierung** (Blaser et al. 2018) ähnlich genau wie die direkte Georeferenzierung. Die erreichbare Genauigkeit und Robustheit sind einerseits von der Geometrie der erfassten Umgebungsobjekte (z.B. regelmäßig oder unregelmäßig) und andererseits von der Distanz zu den Objekten abhängig. Ebenfalls eine Auswirkung auf die Genauigkeit hat die Länge der erfassten Schleifen. Im Gegensatz zur direkten Georeferenzierung ist die SLAM-basierte Georeferenzierung im Außenraum, im Innenraum sowie im Untergrund anwendbar. Wie die direkte Georeferenzierung ist die SLAM-basierte Georeferenzierung echtzeitfähig. Bei der nachträglichen Prozessierung ist mit einer leicht höheren Prozessierungszeit als der Erfassungszeit zu rechnen. Zusätzlich sind Passpunkte für die Transformation in den globalen Bezugsrahmen zu bestimmen (Tab. 2).

Tab. 2: Gegenüberstellung der zu untersuchenden Georeferenzierungsansätze

	Direkt	SLAM-basiert (LiDAR)	Bildbasiert
Genauigkeitspotential (3D-Position)	Dezimeter bis Zentimeter	Dezimeter	Zentimeter
Anwendungsspektrum	Außenraum	Außenraum Innenraum Untergrund	Außenraum Innenraum Untergrund
Robustheit	Abhängig von GNSS-Verfügbarkeit	Abhängig von geometrischer Umgebungsbeschaffenheit	Abhängig von radiometrischer Umgebungsbeschaffenheit, Qualität der Näherungsposen
Aufwand	Echtzeitfähig, nachträglicher Prozessierungsaufwand < Erfassungszeit, Passpunkte nicht notwendig	Echtzeitfähig, nachträglicher Prozessierungsaufwand > Erfassungszeit, Passpunkte notwendig für Transformation in globalen Bezugsrahmen	Nicht echtzeitfähig, nachträglicher Prozessierungsaufwand >> Erfassungszeit, Passpunkte notwendig für Transformation in globalen Bezugsrahmen

Für die **bildbasierte Georeferenzierung** werden die Bilder mit zugehörigen Näherungsposen sowie kalibrierten Hebelarmen und Fehlrichtungen zwischen den Kameraköpfen in eine leistungsfähige Structure-from-Motion (SfM)-Pipeline eingeführt. Durch Anwendung einer Bündelblockausgleichung, werden die Bilder über zuvor automatisch generierte Verknüpfungspunkte gegenseitig orientiert. Unter Einbezug von Passpunktmessungen können die Bildposen in den absoluten Bezugsrahmen überführt werden. Mit der bildbasierten Georeferenzierung sind Genauigkeiten im Zentimeterbereich erreichbar (CAVEGN et al. 2018). Wobei die Genauigkeit und die Robustheit dieses Ansatzes von den Lichtverhältnissen, der Beschaffenheit der kartierten

Umgebung (Strukturierung, Reflexionen, Schatten etc.) sowie der Qualität der Näherungsposen abhängig ist. Die bildbasierte Georeferenzierung findet im Außenraum, im Innenraum und im Untergrund Anwendung. Sie benötigt ein Mehrfaches der Erfassungszeit für die nachträgliche Prozessierung sowie die zusätzliche Bestimmung von Passpunkten für die Transformation in den globalen Bezugsrahmen (Tab. 2). Somit ist die bildbasierte Georeferenzierung der rechenaufwändigste Ansatz. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Näherungsposen aus der direkten (CAVEGN et al. 2018) und aus der SLAM-basierten Georeferenzierung (BLASER et al. 2018) mithilfe der bildbasierten Georeferenzierung signifikant verbessert werden können.

4 Untersuchungen

Für die Untersuchungen wurde jeweils ein ausgedehntes repräsentatives Untersuchungsgebiet in einem Waldgebiet im Raum Basel sowie in der historischen Innenstadt von Basel ausgewählt. Im Wald wie auch in der Innenstadt ist die Befahrbarkeit oftmals nicht gegeben. Zudem ist der GNSS-Empfang, aufgrund von Signalabschattungen durch Gebäude oder Bäume, in beiden Szenarien oft sehr stark eingeschränkt. Dies hat einen bedeutenden Einfluss auf die direkte Georeferenzierung, welche den momentan üblichen Ansatz für MMS im Außenraum darstellt. Die folgenden Untersuchungen mit dem portablen MMS *BIMAGE Backpack* sollen die Grenzen und das Genauigkeitspotential unterschiedlicher Georeferenzierungsansätze unter realistischen Bedingungen im Außenraum aufzeigen. Wir untersuchten, inwiefern die SLAM-basierte Georeferenzierung eine Alternative zur direkten Georeferenzierung darstellt. Des Weiteren untersuchten wir die Genauigkeitssteigerung der direkten Georeferenzierung durch die nachträgliche Anwendung einer bildbasierten Georeferenzierung. Das Genauigkeitspotential der bildbasierten Georeferenzierung mit Näherungswerten aus der SLAM-basierten Georeferenzierung wurde bereits im Innenraum (BLASER et al. 2018) und unter Tage (BLASER et al. 2019b) in verschiedenen kleinräumigen Testgebieten nachgewiesen.

4.1 Innenstadt

Das Testgebiet in der Basler Innenstadt verfügt über typische Ausprägungen von Plätzen, Straßen und Gassen wie sie in historisch gewachsenen Städten zu finden sind. Die schleifenförmige Trajektorie, mit einer Länge von 800 m (Abb. 2, Mitte & Tab. 3), beginnt und endet auf dem Barfüsserplatz (Abb. 2, Bild 1). Der ca. 70 x 50 m große Platz, weist eine gute GNSS-Abdeckung auf und eignet sich daher optimal für die Initialisierung des portablen MMS. Das Testgebiet Innenstadt beinhaltet unterschiedlich breite Straßen und Gassen. Auf Abb. 2, Bild 2 ist eine enge Gasse mit alten Stadtgebäuden auf der einen Seite und einer hohen Mauer mit wenig Struktur auf der anderen Seite zu erkennen. Die Gasse weist eine Steigung von rund 16 % auf. Weiter verfügt das Testgebiet über Fußgängerzonen gesäumt von modernen Gebäuden mit Gewerbenutzung im Erdgeschoss (Abb. 2, Bild 3). Im Bereich von Abb. 2, Bild 4 wird eine breite Straße mit historischen und modernen Stadtgebäuden beidseitig erfasst. Diese Straße hat ein hohes Tram- und Fahrradverkehrsaufkommen.

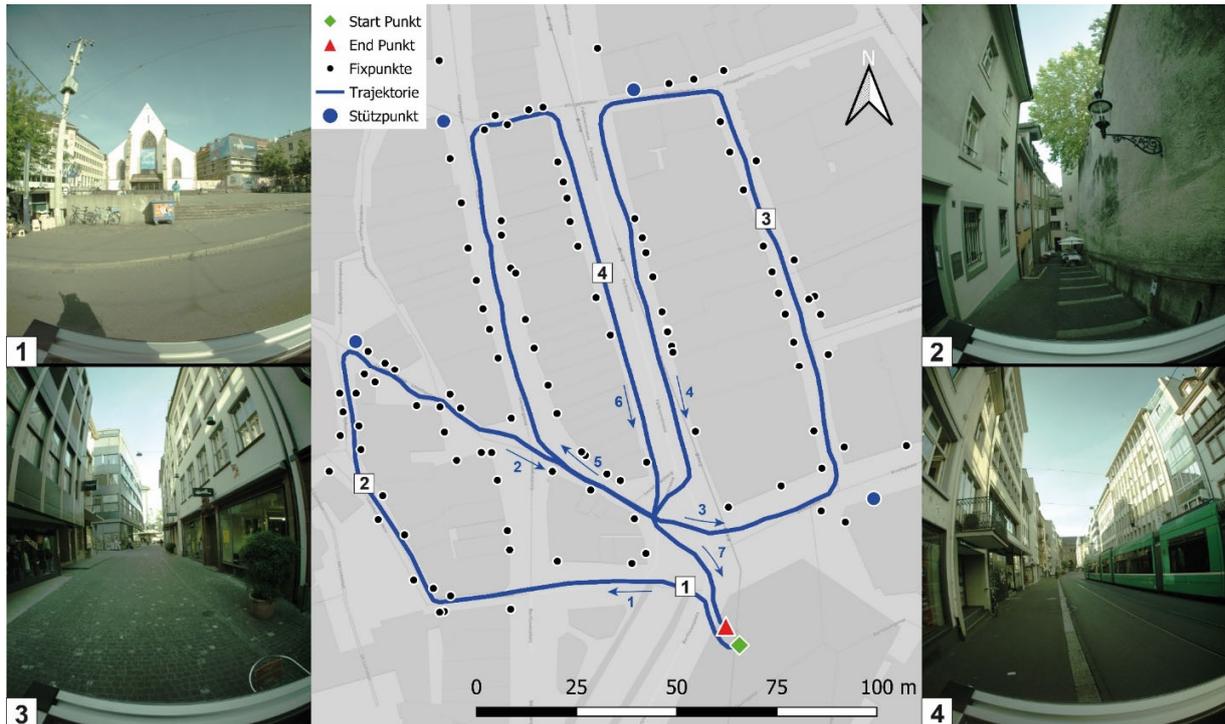


Abb. 2: Karte des Testgebiet Innenstadt mit Messbildern zur Veranschaulichung der Bedingungen vor Ort

Vor der Erfassung wurde im Untersuchungsgebiet (Abb. 2, Mitte) ein Fixpunktnetz als Referenz für die Genauigkeitsuntersuchungen angelegt (FRICKER & WEBER, 2019). Die 80 größtenteils natürlichen Fixpunkte (klar definierte Punkte an Fassaden, Verkehrsschildern etc.) und die wenigen mit photogrammetrischen Zielmarken versicherten Zusatzpunkte wurden tachymetrisch eingemessen und an das sehr genaue Fixpunktnetz der amtlichen Vermessung Basel-Stadt angeschlossen, wobei eine Fixpunktkoordinatengenauigkeit von ca. 5 mm erreicht wurde (Tab. 3). Zu Beginn und am Ende der Kampagne wurde das portable MMS jeweils auf dem Barfüsserplatz initialisiert. Dies ermöglicht die nachträgliche beidseitige Auswertung der Trajektorie des Inertialmesssystems. Bei der Initialisierung des Inertialmesssystems wird dessen Ausrichtung gegenüber dem Weltkoordinatensystem basierend auf GNSS-Messungen berechnet (INS-Lösung) (NOVATEL INC. 2020). Für eine ausreichend genaue INS-Lösung sind einige Runden mit schnellem Gehen in einem Gebiet mit guter GNSS-Abdeckung erforderlich, wobei Abrupte Dreh- und Schwenkbewegungen zu vermeiden sind.

Nach erfolgreicher Initialisierung wurde die Trajektorie mit einer Gesamtlänge von 800 m in einem Guss abgeschrieben und wiederum auf dem Barfüsserplatz abgeschlossen (Abb. 2). Die Speicherung der sechs einzelnen Panoramarahbilder nimmt jeweils etwa eine Sekunde in Anspruch. Um den angestrebten Bildfolgeabstand von einem Meter zu erzielen, musste die Aufnahme mit einer langsamen Gehgeschwindigkeit von maximal 1 m/s erfolgen.

Tab. 3: Fakten zum Testgebiet Innenstadt

Bildaufnahmestandorte:	721	Anzahl Fixpunkte:	80
Einzelbilder:	4326	Genauigkeit Fixpunkte:	5 mm
Länge Trajektorie	800 m	Anzahl Schleifen:	3
Datenmenge Punktwolke	14 GB	Erfassungszeit:	25 min

4.2 Wald

Im Testgebiet Wald wurde die Trajektorie so gelegt, dass sowohl verschiedenartige Wege wie auch unterschiedlich dichter Bewuchs erfasst werden. Ausgangs- und Endpunkt der Trajektorie befinden sich außerhalb des Waldes auf einer Autobahnbrücke (Abb. 3, Bild 1). Dies ermöglichte aufgrund der dortigen geringen GNSS-Signalabschattung eine gute Systeminitialisierung. Die definierte Trajektorie führt über breite Forstwege (Abb. 3, Bilder 2, 4 & 5) sowie schmale Trampelpfade (Abb. 3, Bilder 3 & 5), zusätzlich variiert die Dichte des Waldes stark. Abb. 3, Bilder 3 & 5 zeigen dichten Wald mit vielen Büschen während bei Abb. 3, Bild 2 lichter, vereinzelt mit Sträuchern durchmischter Wald vorherrscht.

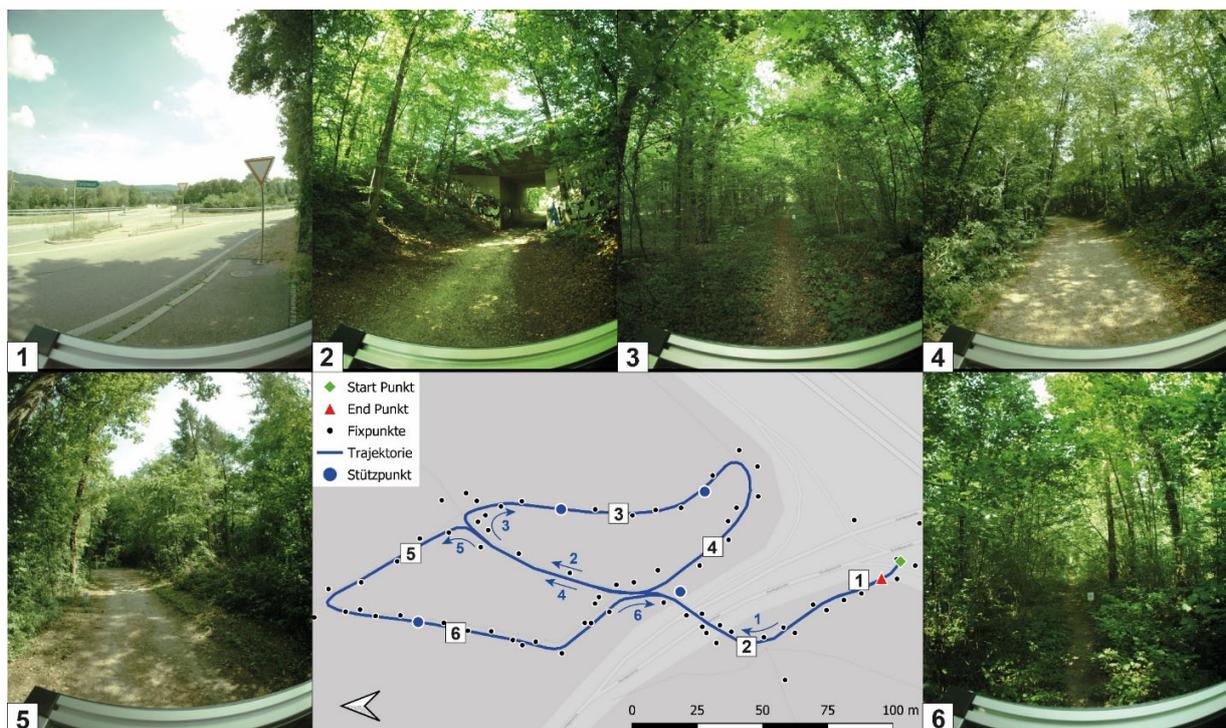


Abb. 3: Karte des Testgebiet Wald mit Messbildern zur Veranschaulichung der Bedingungen vor Ort

In FRICKER & WEBER (2019) ist die tachymetrische Bestimmung und Auswertung des Fixpunktnetzes dokumentiert. Sämtliche Fixpunkte wurden mit A4-grossen laminierten photogrammetrischen Zielmarken versichert, welche an Baumstämme sowie an eingeschlagene Pfähle befestigt wurden. Das Fixpunktnetz umfasst 89 Fixpunkte, welche tachymetrisch mit einem geschlossenen Polygonzug eingemessen wurden. Die Ausgleichung erfolgte in einem Guss nach der Methode der

kleinsten Quadrate. Es resultierte eine Genauigkeit von 5 mm in Lage und Höhe (Tab. 4). Der Ablauf der Datenerfassung mit dem portablen MMS erfolgte analog dem Testgebiet in der Stadt.

Tab. 4: Fakten zum Testgebiet Wald

Bildaufnahmestandorte:	843	Anzahl Fixpunkte:	89
Anzahl Einzelbilder:	5052	Genauigkeit Fixpunkte:	5 mm
Länge Trajektorie	740 m	Anzahl Schleifen:	2
Datenmenge Punktwolke	16 GB	Erfassungszeit:	24 min

4.3 Untersuchungssystematik

Mit den nachfolgenden Untersuchungen sollen primär die Genauigkeitspotenziale für absolute 3D-Koordinatenmessungen sowie für lokale relative 3D-Messungen (z. B. 3D-Distanz oder 3D-Flächenmessung) der verschiedenen Georeferenzierungsmethoden ermittelt und einander gegenübergestellt werden.

4.3.1 3D-Koordinatenbestimmung

Das Genauigkeitspotenzial für absolute 3D-Koordinatenmessungen wurde, analog BLASER et al. (2018), mittels Differenzen zwischen Koordinatenmessungen aus den erfassten Daten und den Referenzkoordinaten der Fixpunkte ermittelt. Die Koordinatenmessungen in den Daten des portablen MMS erfolgten mit räumlichen Vorwärtseinschnitten aus Bildmessungen mit jeweils vier verschiedenen Kamerastandorten. Dabei wurden für die Untersuchung sämtlicher Georeferenzierungsmethoden stets dieselben Bildmessungen verwendet und jeweils die entsprechenden Bildposen ausgetauscht.

Wie bei vorhergehenden Untersuchungen (BLASER et al. 2018; BLASER et al. 2019a) wurde das Genauigkeitspotenzial für relative 3D-Messungen mit den zur Georeferenzierungsmethode und Untersuchungsgebiet zugehörigen Standardabweichungen der Vorwärtseinschnitte beurteilt.

4.3.2 Lagerung

Die lokalen Bildposen der SLAM-basierten sowie der bildbasierten Georeferenzierung wurden pro Untersuchungsgebiet mit jeweils vier identischen Stützpunkten (Abb. 2 & Abb. 3) mit einer 6 DoF-Koordinatentransformation ins Referenzkoordinatensystem überführt. Die Bildposen der direkten Georeferenzierung wurden nicht transformiert, da sie bereits im Referenzkoordinatensystem vorlagen. Allfällig systematisch vorliegende Translationen und Rotationen der direkten Georeferenzierung wurden bei der Untersuchung der direkten Georeferenzierung somit nicht berücksichtigt.

4.3.3 Auswerteprozesse

Die Datenauswerteprozesse für die SLAM-basierte sowie die bildbasierte Georeferenzierung sind bereits in BLASER et al. (2018) im Detail beschrieben (Abb. 4). Für die Auswertung der direkten Georeferenzierung (Abb. 4, Mitte) mit *NovAtel Inertial Explorer* werden die GNSS-Rohdaten des portablen MMS, die GNSS-Rohdaten einer Referenzstation sowie die Rohdaten des INS benötigt. Die Trajektorie wird mit eng gekoppelter Sensordatenfusion (engl. *tightly-coupled*) in einem Kalman-Filter beidseitig prozessiert.

Bei der SLAM-basierten Georeferenzierung mit *Google Cartographer* wird in einem ersten Schritt die Trajektorie vom *Cartographer Status* extrahiert. Anschließend werden die Bildposen mit den Zeitstempeln der Kameraauslösung linear interpoliert (Abb. 4, links). Durch entsprechende 6 DoF-Transformation und Anbringen der Hebelarme und Fehlrichtungen, lassen sich die äußeren Orientierungen Bilder der einzelnen Kameraköpfe im Referenzkoordinatensystem berechnen. Für die bildbasierte Georeferenzierung mit der SfM-Pipeline *Agisoft Metashape* werden die Kameraposen der direkten Georeferenzierung als Initialwerte verwendet. Die verzeichnungsfreien Einzelbilder im äquidistanten Kameramodell (ABRAHAM & FÖRSTNER 2005) werden als Mehrkamerasystem mit festgesetzten relativen Orientierungen zwischen den Kameraköpfen in die SfM-Pipeline mit Bündelblockausgleichung eingeführt.

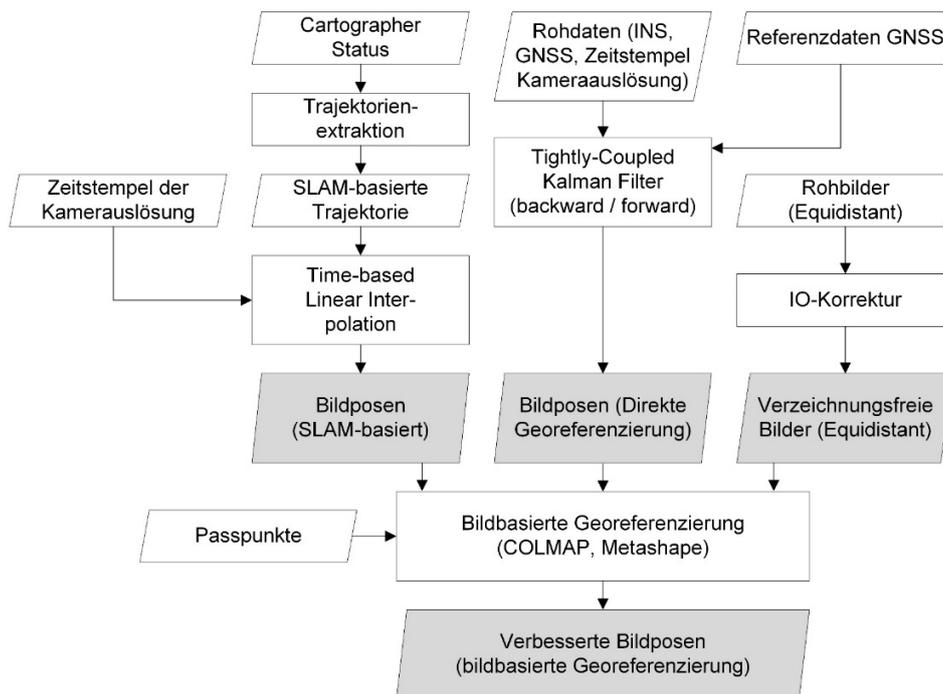


Abb. 4: Flussdiagramm des nachträglichen Datenauswertungsprozesses

5 Resultate

Als erstes wurden die empirischen Standardabweichungen der Vorwärtseinschnitte berechnet. Sie repräsentieren die Präzision einer 3D-Koordinatenbestimmung. Die Präzision ist vorwiegend von der relativen Orientierungsgenauigkeit aufeinanderfolgender bzw. benachbarter Bilder abhängig. Aufgrund der Präzision lässt sich auf die erreichbare Genauigkeit einer für die praktische Nutzung typische Relativmessung, beispielsweise einer 3D-Distanz schließen.

Die GNSS-Verfügbarkeit, die Geometrie der erfassten Objekte, die Lichtverhältnisse und die Beschaffenheit der kartierten Umgebung (Tab. 2), führten bei sämtlichen Georeferenzierungsansätzen in beiden Testgebieten zu Ausreißern. Daher wurden der Median sowie der MAD (engl.: *median absolute deviation*) als robuste Qualitätsmasse verwendet.

Sowohl in der Stadt als auch im Wald weist die direkte Georeferenzierung einen um Faktor drei verbesserten Medianwert der Präzision gegenüber der SLAM-basierten Georeferenzierung auf (Abb. 5 & Tab. 5). Die Präzision der direkten Georeferenzierung lässt sich mithilfe der bildbasierten Georeferenzierung von 0.034 m auf 0.003 m in der Stadt und von 0.023 m auf 0.003 m im Wald verbessern, was in etwa einem Faktor zehn entspricht (Tab. 5).

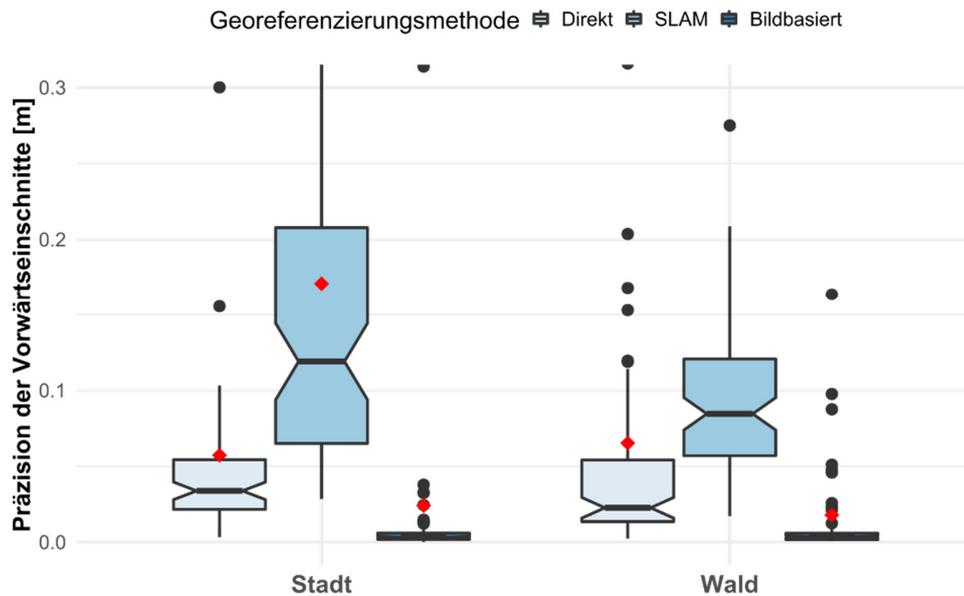


Abb. 5: Boxplot der Präzision der Vorwärtseinschnitte, aufgeteilt nach Testgebiete Stadt und Wald und geordnet nach Georeferenzierungsmethoden Direkt, SLAM, bildbasiert. Der rote Punkt definiert den Mittelwert, schwarze Punkte repräsentieren Ausreißer.

Tab. 5: Zusammenstellung der statistischen Kennzahlen zur Präzision der Vorwärtseinschnitte. Die direkte Georeferenzierung wurde nicht transformiert, die SLAM-basierte sowie die bildbasierte Georeferenzierung wurden auf je vier Stützpunkten gelagert.

	Stadt			Wald		
	Direkt	SLAM	bildbasiert	Direkt	SLAM	bildbasiert
n	80	80	80	89	89	89
min(x) [m]	0.003	0.028	0.000	0.002	0.017	0.001
Max(x) [m]	1.223	1.146	1.202	0.712	101.431	0.747
Mittelwert \bar{x} [m]	0.057	0.171	0.024	0.065	1.278	0.018
Stdabw(\bar{x}) [m]	0.138	0.191	0.138	0.130	10.739	0.081
Median \tilde{x} [m]	0.034	0.119	0.003	0.023	0.084	0.003
MAD [m]	0.015	0.056	0.002	0.012	0.031	0.002

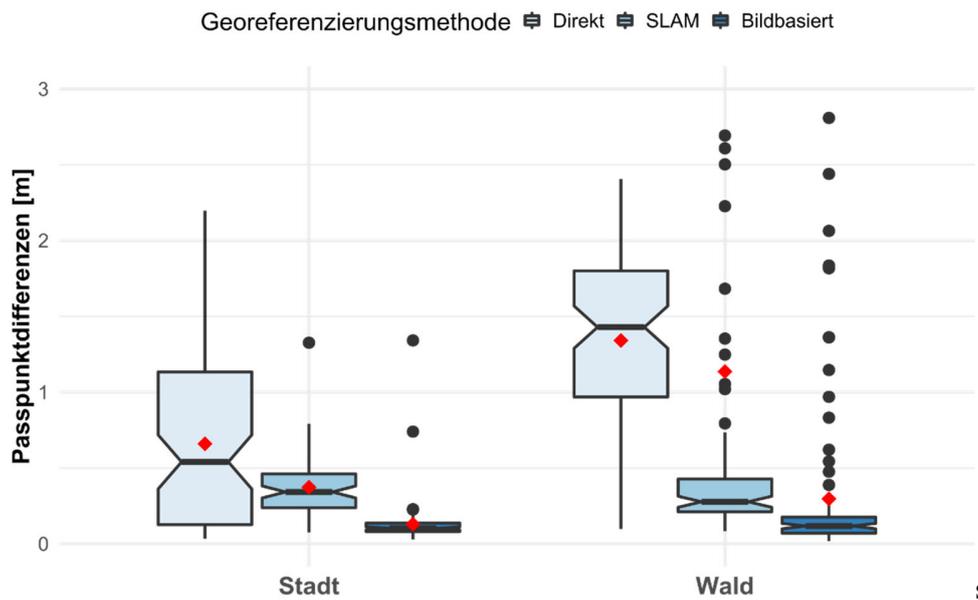


Abb. 6: Boxplot der absoluten Passpunktdifferenzen, aufgeteilt nach Testgebiete Stadt und Wald und geordnet nach Georeferenzierungsmethoden Direkt, SLAM, bildbasiert. Der rote Punkt definiert den Mittelwert, schwarze Punkte repräsentieren Ausreißer.

Tab. 6: Zusammenstellung der statistischen Kennzahlen der absoluten Genauigkeitsuntersuchungen. Die direkte Georeferenzierung wurde nicht transformiert, die SLAM-basierte sowie die bildbasierte Georeferenzierung wurden auf je vier Stützpunkten gelagert.

	Stadt			Wald		
	Direkt	SLAM	bildbasiert	Direkt	SLAM	bildbasiert
n	80	80	80	89	89	89
min(x) [m]	0.034	0.076	0.029	0.098	0.083	0.018
Max(x) [m]	2.197	1.326	1.341	2.406	56.386	2.809
Mittelwert \bar{x} [m]	0.659	0.373	0.129	1.341	1.136	0.296
Stdabw(\bar{x}) [m]	0.557	0.202	0.159	0.609	5.965	0.540
Median \tilde{x} [m]	0.540	0.342	0.102	1.429	0.277	0.117
MAD [m]	0.439	0.114	0.027	0.406	0.096	0.056

Zur Beurteilung der absoluten Genauigkeiten der verschiedenen Georeferenzierungsansätze wurden Passpunktdifferenzen berechnet. Im Gegensatz zur SLAM- und bildbasierten Georeferenzierung wurde die direkte Georeferenzierung nicht über die vier Stützpunkte (Abb. 2 & Abb. 3) transformiert.

Die direkte Georeferenzierung weist sowohl in der Stadt als auch im Wald die geringste absolute Genauigkeit auf, wobei der Medianwert des Testgebiets Wald um beinahe Faktor drei schlechter ist als jener in der Stadt (Abb. 6 & Tab. 6). Dies könnte die größere GNSS-Signalabschattung im Wald als Ursache haben. Des Weiteren liegen die Mediane der absoluten Genauigkeiten von der SLAM-basierten und bildbasierten Georeferenzierung beider Testgebiete in denselben Genauigkeitsbereichen. Vergleiche der Standardabweichungen und der maximalen Werte (Tab. 6) zeigen, dass die SLAM-basierte und die direkte Georeferenzierung im Wald jeweils deutlich mehr Ausreißer aufweisen als in der Stadt. Zu erklären ist dies einerseits durch den verwendeten, primär für Innenräume konzipierten, SLAM-Algorithmus *Google Cartographer* (HESS et al. 2016).

Aufgrund zahlreicher orthogonaler Kanten und Ebenen in der Innenstadt, liefert der SLAM-Algorithmus in der Stadt robustere Systemposen als im Wald. Zudem ist in der Stadt eine größere Anzahl eindeutig identifizierbarer und stabiler Verknüpfungspunkte für die bildbasierte Georeferenzierung verfügbar, was zu einer geringeren Anzahl an Ausreißern führt.

In der Stadt führte die SLAM-basierte Georeferenzierung gegenüber der direkten Georeferenzierung zu einer Verbesserung des Medians um einen Faktor 1.5 von 0.54 m auf 0.34 m, während dem die Verbesserung im Wald von 1.43 m auf 0.28 m dem Faktor 5 entspricht (Tab. 6). Mit der bildbasierten Georeferenzierung konnten die Passpunktdifferenzen im Vergleich mit der direkten Georeferenzierung in der Stadt von 0.54 m auf 0.10 m um Faktor 5 und im Wald von 1.43 m auf 0.12 m um Faktor 12 verringert werden (Tab. 6). Die Verbesserung der SLAM-basierten zur bildbasierten Georeferenzierung beträgt in beiden Testgebieten Faktor drei. Diese Verbesserung entspricht den Resultaten von BLASER et al. (2019b) welche im Untergrund erzielt wurden.

Im Vergleich mit TANG et al. (2016), welche die SLAM-basierte Erfassung von Waldbeständen untersuchten, liegen unsere Resultate ebenfalls in einem ähnlichen Genauigkeitsbereich. TANG et al. (2016) erreichen mit ihrem mobilen fahrzeugbasierten Laserscanning-System eine 2D-Positionsgenauigkeit von 0.32 m bei einer 300 m langen Trajektorie. Ihre Resultate sind in deren Größenordnung mit unseren Ergebnissen vergleichbar. Jedoch unterscheiden sich die Arbeiten im verwendeten SLAM-Algorithmus, in den unterschiedlichen Ausprägungen des Waldes sowie in den unterschiedlichen Qualitätsmassen der Genauigkeitsuntersuchungen.

6 Fazit & Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrags wurde das prototypische portable bildbasiert MMS «BIMAGE Backpack» um ein mit GNSS kombiniertes INS erweitert, sodass neben der SLAM-basierten und bildbasierten Georeferenzierung auch die direkte Georeferenzierung im Außenraum ermöglicht wird. Die verfügbaren Georeferenzierungsansätze wurden diskutiert und anhand derer Einsatzgebiet, Genauigkeitspotenzial und Aufwand einander gegenübergestellt. Das Einsatzgebiet der direkten Georeferenzierung beschränkt sich auf den Außenraum und deren Genauigkeit hängt stark von der GNSS-Verfügbarkeit ab und kann zwischen dem Zentimeter- und dem Meterbereich variieren. Die direkte Georeferenzierung geht mit der geringsten nachträglichen Rechenzeit einher. Für die SLAM-basierte Georeferenzierung ist der Rechenaufwand gegenüber der Erfassungszeit leicht erhöht. Der rechenaufwändigste Ansatz ist die bildbasierte Georeferenzierung, hierbei übersteigt die nachträgliche Rechenzeit die Erfassungszeit um ein Mehrfaches. Die SLAM-basierte sowie die bildbasierte Georeferenzierung können sowohl im Innen- als auch im Außenraum eingesetzt werden. Das Genauigkeitspotenzial der SLAM-basierten Georeferenzierung ist im Wesentlichen von der geometrischen und jenes der bildbasierten Georeferenzierung von der radiometrischen Umgebungsbeschaffenheit abhängig. Die lokalen Szenen der SLAM- und bildbasierten Georeferenzierung lassen sich über Passpunkte mit einer 6 DoF-Transformation in den globalen Bezugsrahmen überführen.

Die verschiedenen Georeferenzierungsansätze wurden anhand großflächiger Aufnahmen im urbanen Raum mit engen, teilweise nicht befahrbaren Gassen und tiefen Straßenschluchten, sowie im Wald mit unterschiedlich dichtem Bewuchs empirisch evaluiert. Die Trajektorienlängen betragen zwischen 700 und 800 m. Für die Beurteilung des absoluten Genauigkeitspotenzials wurden die

Passpunktkoordinaten mit Vorwärtseinschnitten basierend auf Bildmessungen von jeweils vier unabhängigen Standpunkten berechnet. Mit den Differenzen zu den Referenzkoordinaten wurde das absolute Koordinatengenauigkeitspotenzial untersucht. Die Standardabweichungen der Vorwärtseinschnitte dienen als gutes Maß für die Genauigkeit von lokalen Relativmessungen, beispielsweise 3D-Distanzen.

Der Median der Differenzen zwischen direkter Georeferenzierung und Referenzkoordinaten betrug in der Stadt 0.54 m und im Wald aufgrund der größeren GNSS-Signalabschattung 1.43 m. Mit der SLAM-basierter Georeferenzierung wurde eine Verbesserung der Medianabweichungen um Faktor 2-5 nachgewiesen. Die entsprechenden Medianabweichungen der bildbasierten Georeferenzierung betrugen 0.10 und 0.12 m, was einer Verbesserung um Faktor 5-10 gegenüber der direkten Georeferenzierung entspricht. Somit konnten die Ergebnisse der bildbasierten Georeferenzierung im urbanen Raum von CAVEGN et al. (2018) auch mit einem portablen System bestätigt werden. Die Ergebnisse im Wald mit SLAM-basierter Georeferenzierung sind mit den Resultaten von TANG et al. (2015) vergleichbar. Im Wald wurden jedoch sowohl bei der bildbasierten als auch bei der SLAM-basierten Georeferenzierung eine große Anzahl von Ausreißern festgestellt. Dies ist vermutlich auf die herausfordernde Umgebung zurückzuführen. Die Mediane der Standardabweichungen der Vorwärtseinschnitte mit der bildbasierten Georeferenzierung betrugen sowohl in der Stadt als auch im Wald je 3 mm. Im Untergrund (BLASER et al. 2019b) sowie im Innenraum (BLASER et al. 2018) wurden vergleichbare Resultate erzielt. Die Ergebnisse zeigen das große Potenzial von alternativen Georeferenzierungsstrategien auf, wodurch die kinematische bildbasierte Erfassung von bisher unzugänglichen Gebieten ermöglicht wird.

In weiteren Untersuchungen wird die Kombination der unterschiedlichen Georeferenzierungsstrategien angestrebt, um neben der Genauigkeit auch die Robustheit der Georeferenzierung unter variierenden Umgebungsbedingungen weiter zu verbessern. Ein weiterer Schritt umfasst die Kalibrierung des Gesamtsensorsystems, wobei die analytische Schätzung der Hebelarme zwischen den Laserscannern und der Panoramakamera noch ausstehend sind. Ein aktueller Entwicklungsschritt umfasst die robuste Rekonstruktion der Tiefeninformation in den erfassten Bildern, damit künftig Koordinatenmessungen im 3D-Bild per Mausclick vorgenommen werden können, was die Handhabung von 3D-Bilddiensten für das Infrastrukturmanagement wesentlich vereinfacht. Weitere Forschungsinitiativen beinhalten die visuelle Lokalisierung auf der Basis von 3D-Bilddiensten sowie die bildbasierte Georeferenzierung von Bildern unterschiedlicher Zeitstände.

7 Dank

Das Forschungsprojekt *cloudIO* (32411.1 IP-ICT) wurde von der Innosuisse, der Schweizerischen Agentur für Innovationsförderung, und von der Industriepartnerin iNovitas AG finanziell unterstützt.

8 Literaturverzeichnis

- ABRAHAM, S. & FÖRSTNER, W., 2005: Fish-eye-stereo calibration and epipolar rectification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **59**(5), 278-288.
- BLASER, S., CAVEGN, S. & NEBIKER, S., 2018: Development of a Portable High Performance Mobile Mapping System using the Robot Operating System. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **4**(1), 13-20.
- BLASER, S., NEBIKER, S. & CAVEGN, S., 2017: System Design, Calibration and Performance Analysis of a Novel 360° Stereo Panoramic Mobile Mapping System. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **4**(1/W1), 207-213.
- BLASER, S., NEBIKER, S. & WISLER, D., 2019a: Portables bildbasiertes Mobile Mapping System im Einsatz unter Tage – Systemaufbau, Georeferenzierungs- und Genauigkeitsuntersuchungen. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 28*, T. Kersten (Hrsg.), 39. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 20.-22. März 2019 in Wien, 458-471.
- BLASER, S., NEBIKER, S. & WISLER, D., 2019b: Portable Image-based High Performance Mobile Mapping System in Underground Environments – System Configuration and Performance Evaluation. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **4**(2/W5), 255-262.
- BURKHARD, J., CAVEGN, S., BARMETTLER, A. & NEBIKER, S., 2012: Stereovision Mobile Mapping: System Design and Performance Evaluation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **39**, Part B5, 453-458.
- CADENA, C., CARLONE, L., CARRILLO, H., LATIF, Y., SCARAMUZZA, D., NEIRA, J., REID, I.D. & LEONARD, J.J., 2016: Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age. *IEEE Transactions on Robotics* **32**(6), 1309-1332.
- CAVEGN, S., NEBIKER, S. & HAALA, N., 2016: A Systematic Comparison of direct Georeferencing in Challenging Urban Areas. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **41**(B1), 529-536, doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B1-529-2016.
- CAVEGN, S., BLASER, S., NEBIKER, S. & HAALA, N., 2018: Robust and Accurate Image-Based Georeferencing Exploiting Relative Orientation Constraints. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **4**(2), 57-64.
- DURRANT-WHYTE, H. & BAILEY, T., 2006: Simultaneous localization and mapping: part I. *IEEE Robotics & Automation Magazine* **13**(2), 99-110.
- FRICKER, L. & WEBER, D., 2019: Portables Mobile Mapping im Aussenraum. *Bachelorthesis, 2019*(2), Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Geomatik, (unveröffentlicht).
- HESS, W., KOHLER, D., RAPP, H. & ANDOR, D., 2016: Real-Time Loop Closure in 2D LIDAR SLAM. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Stockholm, Sweden, 1271-1278.
- HEUVEL, F.A. VAN DEN, VERWAAL, R. & BEERS, B., 2006: Calibration of Fisheye Camera Systems and the Reduction of Chromatic Aberration. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Dresden, Germany* **36**(5).

- MEILLAND, M., COMPORT, A.I. & RIVES, P., 2015: Dense Omnidirectional RGB-D Mapping of Large-scale Outdoor Environments for Real-time Localization and Autonomous Navigation. *Journal of Field Robotics* **32**(4), 474-503.
- JENDE, P.L.H., 2019: Position estimation of mobile mapping imaging sensors using aerial imagery. Dissertation, Enschede: University of Twente, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), doi: 10.3990/1.9789036548847.
- NEBIKER, S., 2017: 3D Imagery for Infrastructure Management – Mobile Mapping meets the Cloud. The 56th Photogrammetric Week. Stuttgart: University of Stuttgart, Institute for Photogrammetry.
- NEBIKER, S., CAVEGN, S. & LOESCH, B., 2015: Cloud-Based Geospatial 3D Image Spaces—A Powerful Urban Model for the Smart City. *ISPRS International Journal of Geo-Information* **4**(4), 2267-2291.
- NOVAK, N., 1991: The Ohio State University Mapping System: the stereo vision system component. Proceedings of the 47th Annual Meeting, Institute of Navigation, Williamsburg, VA, June 10–12 (1991), 121-124.
- NOVATEL INC., 2020: SPAN CPT7. <https://www.novatel.com/assets/Documents/Papers/SPAN-CPT7-PS.pdf>, letzter Zugriff 15.01.2020.
- PUENTE, I., GONZÁLEZ-JORGE, H., MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, J. & ARIAS, P., 2013: Review of mobile mapping and surveying technologies. *Measurement* **46**(7), 2127-2145.
- QUIGLEY, M., CONLEY, K., GERKEY, B., FAUST, J., FOOTE, T., LEIBS, J., BERGER, E., WHEELER, R. & NG, A., 2009: ROS: an open-source Robot Operating System. ICRA workshop on open source software **3**(3.2).
- TANG, J., CHEN, Y., KUKKO, A., KAARTINEN, H., JAAKOLA, A., KHORAMSHAHI, E., HAKALA, T., HYYPPÄ, J., HOLOPAINEN, M. & HYYPPÄ, H., 2015: SLAM-Aided Stem Mapping for Forest Inventory with Small-Footprint Mobile LiDAR. *Forests* **6**(12), 4588-4606.
- WITTMER, S., 2017: INS- und bildbasierte Messmethoden für bewaldete Gebiete. Masterthesis, **2016**(7), Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Geomatik, (unveröffentlicht).
- SCHWARZ, K.P., MARTELL, H.E., EL-SHEIMY, N., LI, R., CHAPMAN, M.A. & COSANDIER, D., 1993: VIASAT - A Mobile Highway Survey System of High Accuracy. Proceedings of the Vehicle Navigation and Information Systems Conference, Ottawa, 476-481.