

# Portables bildbasiertes Mobile Mapping System im Einsatz unter Tage – Systemaufbau, Georeferenzierungs- und Genauigkeitsuntersuchungen

STEFAN BLASER<sup>1</sup>, STEPHAN NEBIKER<sup>1</sup> & DOMINIK WISLER<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Mit der fortschreitenden Urbanisierung gewinnen die Erstellung und der Werterhalt unterirdischer Bauten und Infrastrukturen zunehmend an Bedeutung. Mit bildbasierten Webdiensten mit 3D-Messfunktionalität – im Ansatz vergleichbar mit Street View – lassen sich aufwändige oft gefährliche Feldbegehungen und Messarbeiten ins Büro verlagern. Für eine effiziente 3D-Erfassung von Innenräumen wurde das portable bildbasierte Mobile Mapping System BIMAGE Backpack mit einer Mehrkopf-Panoramakamera, zwei Multiprofillaserscannern sowie einer Inertialmesseinheit entwickelt. Es erfolgten Aufnahmen und Genauigkeitsuntersuchungen im Versuchsstollen Hagerbach. Ähnlich wie im Außenraum, betrug nach anschließender bildbasierter Georeferenzierung die absolute Genauigkeit zwischen 5.0 und 7.2 cm. Die für die Praxis sehr wichtige relative Messgenauigkeit betrug nach der bildbasierten Georeferenzierung sogar 3-10 mm, was einer Genauigkeitssteigerung von etwa einer Zehnerpotenz gegenüber der Georeferenzierung mittels LiDAR-SLAM entspricht. Somit ist ein großes Einsatzpotenzial für die Instandhaltung und Inventarisierung von unterirdischen Anlagen gegeben.*

## 1 Einleitung

Mit der fortschreitenden Urbanisierung und der baulichen Verdichtung gewinnt das Bauen im Untergrund zunehmend an Bedeutung. Dies gilt in besonderem Masse für die Erstellung und den Werterhalt von unterirdischen Infrastrukturbauten, wie etwa von U-Bahnnetzen. 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. Dies gilt in besonderem Masse für unterirdische Bauten und Verkehrsinfrastrukturen. Voraussetzung dafür bilden realitätsgetreue, genaue, zuverlässige und aktuelle 3D-Daten, die sich in kollaborativen digitalen Planungs- und Managementprozessen nutzen lassen. Im Außenraum werden dazu bildbasierte Webdienste mit 3D-Messfunktionalität – im Ansatz vergleichbar mit *Street View* – bereits verbreitet eingesetzt (NEBIKER 2017). Die Kombination von mobilem *Reality Capturing* in der Form von Multi-view-Stereobilddaten und daraus abgeleiteten georeferenzierten 3D-Bilddatenbanken mit webbasierten *Cloud Services* bieten eine sehr intuitive Dateninterpretation und eine hohe Benutzerfreundlichkeit mit einem breiten Spektrum an Funktionalität. Damit entwickeln sich 3D-Bilddienste zur visuellen universellen Geoinformationsplattform für Stadträume und Infrastrukturen im Außenraum. Um zukünftig auch großräumige 3D-Bilddienste für Innenräume – wie etwa Gebäudekomplexe oder Infrastrukturen im Untergrund – realisieren zu können, wurden im Forschungsprojekt *BIMAGE* eine Reihe von Hardware- und Softwarekomponenten konzi-

---

<sup>1</sup> Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Geomatik, Hofackerstrasse 30, CH-4132 Muttenz, Schweiz, E-Mail: [stefan.blaser, stephan.nebiker]@fhnw.ch, dwisler@gmx.ch

piert und untersucht. Insbesondere wurde mit dem *BIMAGE Backpack* ein vollständig funktionsfähiger Forschungsprototyp eines portablen bildbasierten Mobile Mapping Systems zur effizienten und genauen kinematischen 3D-Datenerfassung entwickelt. Die aktuelle Systemkonfiguration besteht aus einer Mehrkopf-Panoramakamera *Ladybug5*, zwei Multiprofillaserscannern *Velodyne VLP-16*, sowie einer Inertialmesseinheit *XSens MTI-300*. Während der Aufnahme berechnet ein LiDAR-SLAM-Algorithmus jeweils die Pose des Systems in einem lokalen Koordinatenbezugsrahmen. Dadurch kann die Mehrkopf-Panoramakamera nach geometrischen Bedingungen ausgelöst werden. Nach der Aufnahme liegen die Einzelbilder der Panoramakamera mit den zugehörigen Parametern der äußeren Orientierung basierend auf der SLAM-Lösung vor. Ebenso kann die Punktwolke aus dem LiDAR-SLAM für weitere Untersuchungen exportiert werden. Die Einzelbilder lassen sich mittels bildbasierter Georeferenzierung verbessern, indem die äußeren Orientierungen des SLAM als Näherungswerte in eine *Structure-from-Motion-Software* eingeführt werden und damit nachträglich eine Bündelblockausgleichung durchgeführt wird.

In diesem Beitrag wird das Potenzial eines bildbasierten portablen MMS unter Tage untersucht und aufgezeigt. Als Untersuchungsgebiet diente der Versuchsstollen Hagerbach (VSH) der Amberg Gruppe. Der VSH ist ein verzweigtes Stollensystem mit unterschiedlichen Tunnelausbaustufen. Darin sind zahlreiche im Bergbau tätige Firmen eingemietet, welche verschiedenartige Feldversuche, von der Sprengung über die Prüfung der Materialfestigkeit bis hin zu vollautomatisierten Tunnelausbauverfahren durchführen.

## 2 Bildbasiertes Mobile Mapping System

Mit Hilfe des neuen bildbasierten Mobile Mapping Systems (MMS) sollen Innenräume kinematisch erfasst und mittels georeferenzierter 3D-Bilder repräsentiert werden können, 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 georeferenzierter 3D-Bildräume beschrieben sowie deren Vorteile u.a. in der Handhabung gegenüber 3D-Punktwolken 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.) beliebig erweitern. Ein prototypisches, für Forschungszwecke ausgelegtes MMS für den Innenraum sollte einerseits portabel sein, andererseits eine ausreichende Flexibilität aufweisen, damit unterschiedliche Sensorkonfigurationen aufgebaut und untersucht werden können. Des Weiteren sollte die Umgebungssensorik den Raum möglichst vollständig abdecken. Die Navigationssensorik sollte eine präzise direkte Georeferenzierung liefern können. Im Außenraum kommt die Kombination von GNSS- und Inertialnavigationssensorik (INS) weit verbreitet zum Einsatz, was im Innenraum verunmöglicht wird, da keine GNSS-Signale empfangen werden können. Eine mögliche Alternative zur GNSS- und INS-Kombination für den Innenraum stellt 3D-LiDAR-SLAM dar (HESS et al. 2016). Mittels bildbasierter Georeferenzierung könnten die lokalen Kameraposen des LiDAR-SLAMs nochmals verbessert und in einen absoluten Koordinatenbezugsrahmen überführt werden (CAVEGN et al. 2016).

## 2.1 Systemkonfiguration

Alle Sensoren wurden an einen robusten Aluminiumrahmen montiert, welcher an einem Rucksacktraggestell befestigt ist. Die Umgebungssensorik der aktuellen Systemkonfiguration besteht aus der Mehrkopf-Panoramakamera *Ladybug5* von *FLIR*. Sie besteht aus fünf radial angeordneten Kameraköpfen mit horizontaler Blickrichtung und einer nach oben gerichteten Kamera, welche eine Auflösung von jeweils 5 MP aufweisen. Die Panoramakamera wurde leicht schräg nach hinten geneigt an den Rahmen fixiert, was durch den Vorhalt des Körpers beim Tragen der Plattform entsprechend kompensiert wird (Abb. 1, rechts, Nr. 2). Dank der Bildüberlappung der einzelnen Kameraköpfe ist die Verdeckung durch den Aluminiumrahmen minimal. Als Navigationssensorik dienen zwei Mehrprofil-Laserscanner des Typs *VLP-16* von *Velodyne*. Einer der beiden Laserscanner wurde oben am Rahmen nahezu horizontal (Abb. 1, rechts, Nr. 1), aber leicht schräg nach hinten geneigt befestigt, der zweite Laserscanner befindet sich weiter unten und wurde vertikal angeordnet (Abb. 1, rechts, Nr. 5). Diese Konfiguration verleiht der fusionierten Punktwolke die notwendige geometrische Stabilität – auch in beengten Verhältnissen wie etwa Treppenhäusern. Weiter zählt die INS *MTI-300* von *XSens* zur Navigationssensorik (Abb. 1, rechts, Nr. 7). Die beiden Punktwolken und die INS-Rohdaten werden in einem 3D-LiDAR-SLAM fusioniert und liefern dadurch die relative Position, was in Kap. 2.2 im Detail erläutert wird. Die Speisung aller Systemkomponenten erfolgt mit einem 12 V Lithium-Ionen-Akkumulator, welcher eine Kapazität von 20 Ah aufweist. Das aktuelle Systemgewicht beträgt rund 20 kg. In BLASER et al. (2018) findet sich eine detaillierte Darlegung aller Systemkomponenten mit den zugehörigen Spezifikationen.

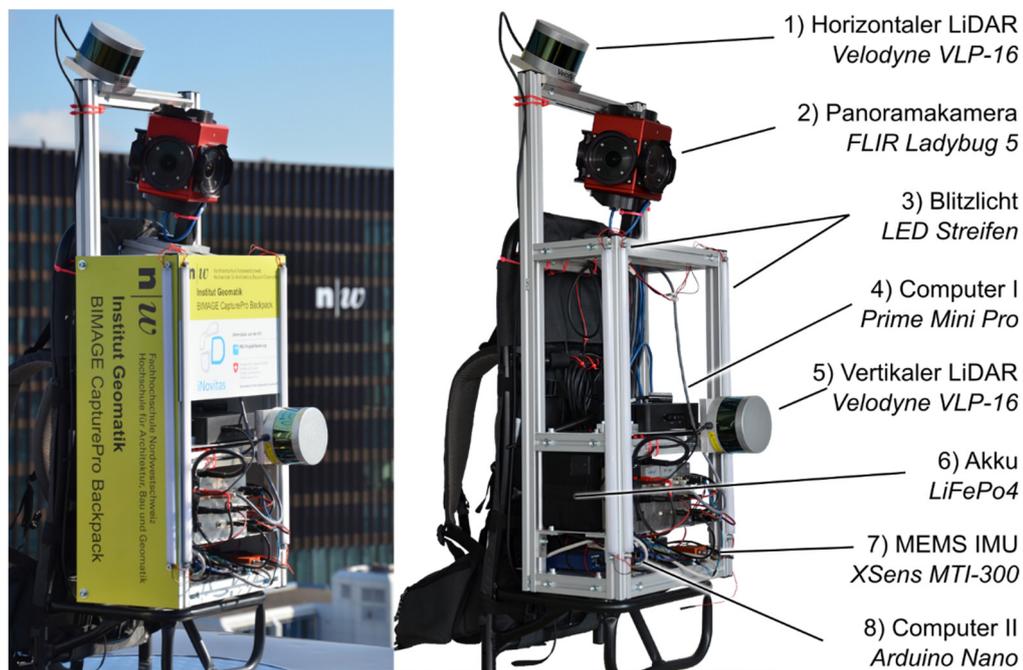


Abb. 1: Systemaufbau des tragbaren bildbasierten Mobile Mapping Systems *BIMAGE Backpack* mit Gehäuse (links) und mit der Bezeichnung aller Komponenten (rechts).

## 2.2 Sensorsynchronisation und Erfassungsssoftware

Wegen der Mobilität der Messplattform, bildet die Sensorsynchronisation ein wichtiger Bestandteil, welche direkten Einfluss auf die Messgenauigkeit hat. Die Zeitreferenz des MMS befindet sich auf dem Computer II *Arduino Nano* (Abb. 2). Mit einem elektrischen Puls pro Sekunde synchronisiert er sämtliche Navigationssensoren (LiDAR & INS), die kontinuierlich Daten erfassen (Abb. 2). Diese Daten fließen zu Computer I und werden dort auf die Festplatte gespeichert. Die Kamerasteuerung erfolgt durch die Erfassungsssoftware mit einem entsprechenden Befehl an Computer II. Dieser löst mittels elektrischem Signal die Kamera, sowie die Blitzlichter aus und sendet die genaue Bilderfassungszeit an Computer I zurück (Abb. 2).

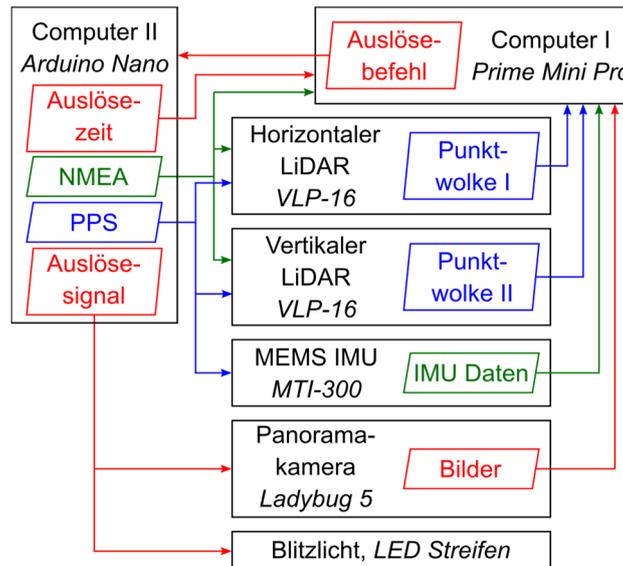


Abb. 2: Schematische Darstellung des Datenflusses und der Sensorsynchronisation.

Analog zur Hardwarekonfiguration, wurde auch die Erfassungsssoftware modular und dementsprechend flexibel aufgebaut (Abb. 3, links). Die Software fußt auf dem in der Robotik weit verbreiteten *open-source* Framework *Robot Operating System* (ROS). Neben zahlreichen Werkzeugen, Algorithmen und Treibern, weist ROS ein flexibles, Graph-basiertes Kommunikationskonzept auf. Einzelne, modular abgekapselte Anwendungen werden als *ROS-Nodes* bezeichnet (Darstellung als Ellipse). Das asynchrone Kommunikationskonzept wird unterstützt, indem die *ROS-Nodes* mit einem *ROS-Publisher* (Darstellung als roter Pfeil) Datenmitteilungen in einem vordefinierten Format an ein *ROS-Topic* (Darstellung als Rechteck) senden können. Im Gegenzug kann ein *ROS-Node* mit einem *ROS-Subscriber* (Darstellung als blauer Pfeil) ein *ROS-Topic* abonnieren und – im Falle von verfügbaren Datenmitteilungen – die Daten empfangen und entsprechend weiterverarbeiten. Auch das synchrone Kommunikationsparadigma wird unterstützt, indem ein *ROS-Node* einen *ROS-Service* (Darstellung als Rechteck) anbieten kann. Ein anderer *ROS-Node* kann diesen Service wiederum mit einer Anfrage aufrufen und anschließend eine Antwort empfangen (Darstellung mit grünen Pfeilen). QUIGLEY et al. (2009) bieten eine vertiefte Einführung in die Konzepte und Eigenschaften von ROS.

Die Rohdaten der Navigationssensorik (Laserscanner und INS) werden sowohl als *ROS-Bag-Datei* für die spätere Nachprozessierung gespeichert, als auch vom 3D-LiDAR SLAM *Google Cartographer* (HESS et al. 2016) verwendet, um die relative 3D-Systempose zu errechnen (Abb. 3, links). Aufgrund einer definierbaren Distanz- und oder Azimutdifferenz, lässt sich die

Panoramakamera über geometrische Bedingungen auslösen. Das empfangene Bild der Panoramakamera besteht aus aneinandergereihten Einzelbildern der Kameraköpfe. Entsprechende ROS-Nodes zerschneiden das Bild in seine Einzelbilder, die anschließend auf die Festplatte gespeichert werden.

Das entwickelte *BIMAGE Backpack* kann direkt in Innenräumen initialisiert werden. Der Startpunkt definiert jeweils den Ursprung des lokalen Koordinatenbezugsrahmens. Der 3D-LiDAR SLAM ermittelt einerseits die 3D-Pose des Systems in Echtzeit. Dazu werden die Punktwolken über eine Voxel-basierte Karte, welche zeitgleich im Hintergrund erstellt wird, fusioniert. Da die Voxelkarte jeweils als 2D-Visualisierung zur Verfügung steht, kann der Aufnahme fortschritt in Echtzeit mitverfolgt werden (Abb. 3, oben rechts). Für die Kameraauslösung wurden sowohl zeitliche als auch geometrische Bedingungen implementiert. Neben der Auslösung enthält die Software einige vordefinierte Kamerakonfigurationsätze für die Aufnahme unterschiedlich hell ausgeleuchteter Umgebungen (Abb. 3, unten rechts).

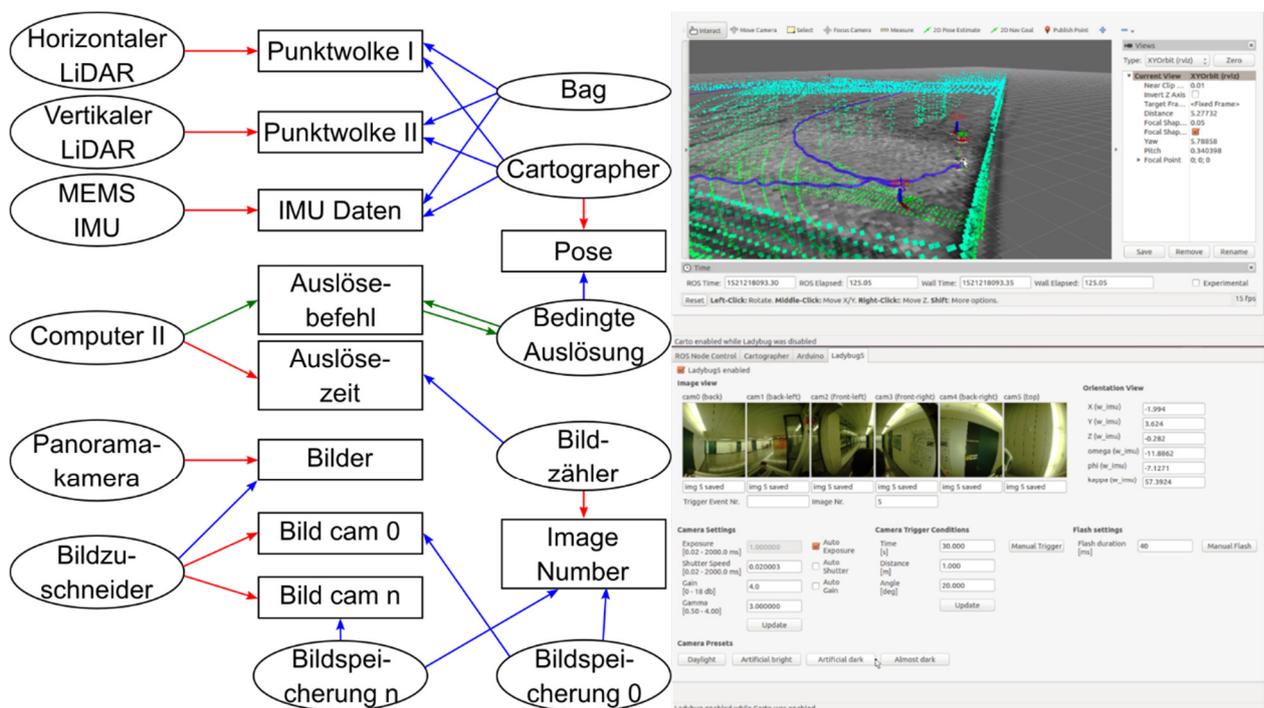


Abb. 3: Schema der implementierten Erfassungssoftware auf ROS-Basis (links). Die ROS-Nodes sind als Ellipsen dargestellt, währenddessen ROS-Topics und ROS-Services rechteckig dargestellt sind. Die roten Pfeile repräsentieren ROS-Publisher, die blauen Pfeile ROS-Subscriber und die grünen Pfeile ROS-Services. Screenshot der Cartographer SLAM Voransicht (oben rechts), Screenshot mit der Bildvoransicht, den Kameraeinstellungen und mit den Auslösebedingungen (unten rechts).

### 2.3 Auswerteprozess

Die inneren Orientierungsparameter der einzelnen Panoramakameraköpfe, sowie die relativen Orientierungen zwischen den Panoramakameraköpfen werden vorgängig in einem mit photogrammetrischen Targets bestückten Kalibrierfeld geschätzt. Für die Panoramakameraköpfe wird das äquidistante Kameramodell verwendet (ABRAHAM & FÖRSTNER 2005). In BLASER et al. (2018) wird das eingesetzte Kalibrierverfahren im Detail abgehandelt. Die Hebelarme und

Fehlausrichtungen der Panoramakamera, respektive Laserscanner bezüglich Navigationszentrum werden bisher aus dem mechanischen Konstruktionsplan übernommen. Deren analytische Kalibrierung ist zurzeit noch ausstehend.

Nach erfolgter Aufnahme wird der *Cartographer Status* des LiDAR-SLAM exportiert, welcher auch die optimierte SLAM-Trajektorie enthält. In einem ersten Schritt wird die SLAM-Trajektorie extrahiert. Um die Kameraposen zu erhalten, werden die Bildevents über den Erfassungszeitpunkt in die SLAM-Trajektorie interpoliert. Zusätzlich werden die bereits bekannten Hebelarme und Fehlausrichtungen der einzelnen Kameras bezüglich Navigationszentrum angebracht (Abb. 4). In einem davon unabhängigen Prozess werden die Bilder mit den vorkalibrierten inneren Orientierungsparametern geometrisch entzerrt. Die verzeichnungsfreien Bilder können nun den SLAM-basierten Bildposen zugeordnet werden und lassen sich bereits in einem cloudbasierten Bilddienst betrachten. Des Weiteren können damit bereits 3D-Messungen mittels räumlichem Vorwärtseinschnitt mit Bildern unterschiedlicher Auslösezeitpunkte vorgenommen werden.

In einem weiteren Schritt können jedoch die SLAM-basierten Bildposen mit einer Structure-from-motion-Pipeline (SfM) weiter verbessert werden. Dabei dienen die SLAM-basierten Bildposen als Näherungswerte. CAVEGN et al. (2018) erweiterten die von SCHÖNBERGER & FRAHM (2016) entwickelte SfM-Software COLMAP um die Möglichkeit, um einerseits äußere Orientierungen und Passpunkte einzuführen und andererseits Kamerakonfigurationen mit relativen Orientierungsparametern zu fixieren. Ab Version 1.5 von *Agisoft PhotoScan* ist dieselbe Funktionalität ebenfalls implementiert. Mit der bildbasierten Georeferenzierung lassen sich die Bildposen nicht nur verbessern, sondern ebenso in einen absoluten Bezugsrahmen überführen. Die Qualität, sowie die Robustheit der bildbasierten Georeferenzierung sind maßgeblich von den Lichtverhältnissen, der Beschaffenheit der kartierten Umgebung (Strukturierung, Reflexionen, Schatten, etc.) und der Qualität der Näherungswerte abhängig.

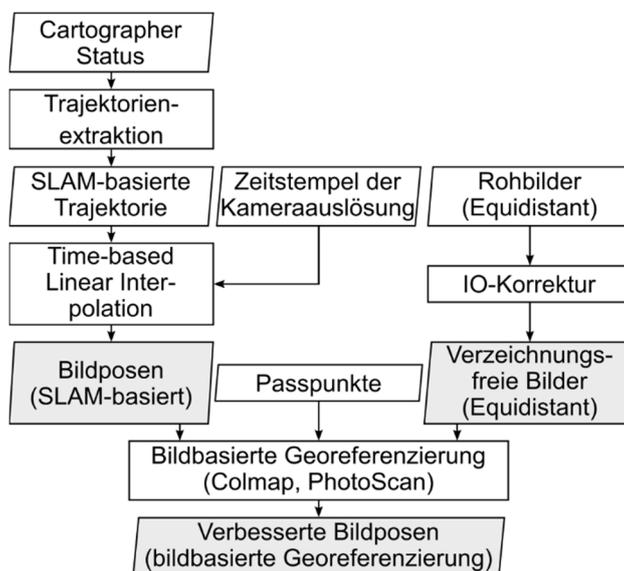


Abb. 4: Flussdiagramm mit dem SLAM- und bildbasierten Post-Mission-Datenauswertungsprozess.

### 3 Untersuchungsgebiet

Der Versuchsstollen Hagerbach (VSH) ist eine Forschungs- und Entwicklungseinrichtung, welche sich für Praxistests diverser Innovationen im Untertagebau eignet. Der VSH wurde im Jahre 1970 gegründet und befindet sich auf dem Gemeindegebiet von Flums Hochwiese (CH). Die Amberg Gruppe bietet, als Eigentümerin des VSH, verschiedenen eingemieteten Partnerfirmen ideale Rahmenbedingungen, um ein breites Spektrum an Untersuchungen im Untertagebau durchzuführen. Zusätzlich unterhält sie ein Labor für die Baustoffprüfung (VERSUCHSSTOLLEN HAGERBACH AG 2018). Über die Jahre wuchs der VSH zu einem weit verzweigten Stollensystem an. Die einzelnen Stollen sind unterschiedlich ausgeprägt und weisen beispielsweise verschiedene Ausbaustufen und Stollendurchmesser auf (Abb. 5).

#### 3.1 Referenzdaten

In RECHSTEINER & WISLER (2018) ist die tachymetrische Neubestimmung und Auswertung des gesamten Fixpunktnetzes des VSH dokumentiert. Das Fixpunktnetz des VSH besteht aus 127 mit Schraubbolzen versicherten Fixpunkten, welche mit mehreren zusammenhängenden Polygonzügen, eingemessen wurden. Die Fixpunktmessungen wurden in einem Guss nach der Methode der kleinsten Quadrate ausgeglichen und minimal gelagert, um zusätzliche Fehlereinflüsse des bestehenden, nicht streng ausgeglichenen Fixpunktnetzes zu vermeiden. Die maximale empirische Standardabweichung zwischen zwei Fixpunkten innerhalb des Netzes beträgt 4.1 mm in der Lage und 0.9 mm in der Höhe.

#### 3.2 Versuchsstollen

Die beiden Untersuchungsgebiete «Sicherheitsstollen» (Abb. 5, (1)) und der Stollen des *Swiss Center of Applied Underground Technologies* (SCAUT) (Abb. 5, (2)) sind unterschiedlich ausgeprägt. Während dem der Sicherheitsstollen verschiedene Ausbaustufen eines Straßentunnels aufweist (Abb. 6, links), befindet sich SCAUT-Stollen ein innovativer Versuchsaufbau für den effizienten Einbau von Notausgängen in Eisenbahntunneln (Abb. 6, rechts).



Abb. 5: Grundriss des Versuchsstollens Hagerbach (VSH). Die dunkelgrauen Bereiche sind ohne Hindernisse zugänglich im Gegensatz zu den hellgrauen Bereichen, welche abgeschlossen oder unbegehrbar sind. Die beiden Untersuchungsgebiete „Sicherheitsstollen“ (1) und Stollen des SCAUT (2) sind strichpunktiert umrahmt.

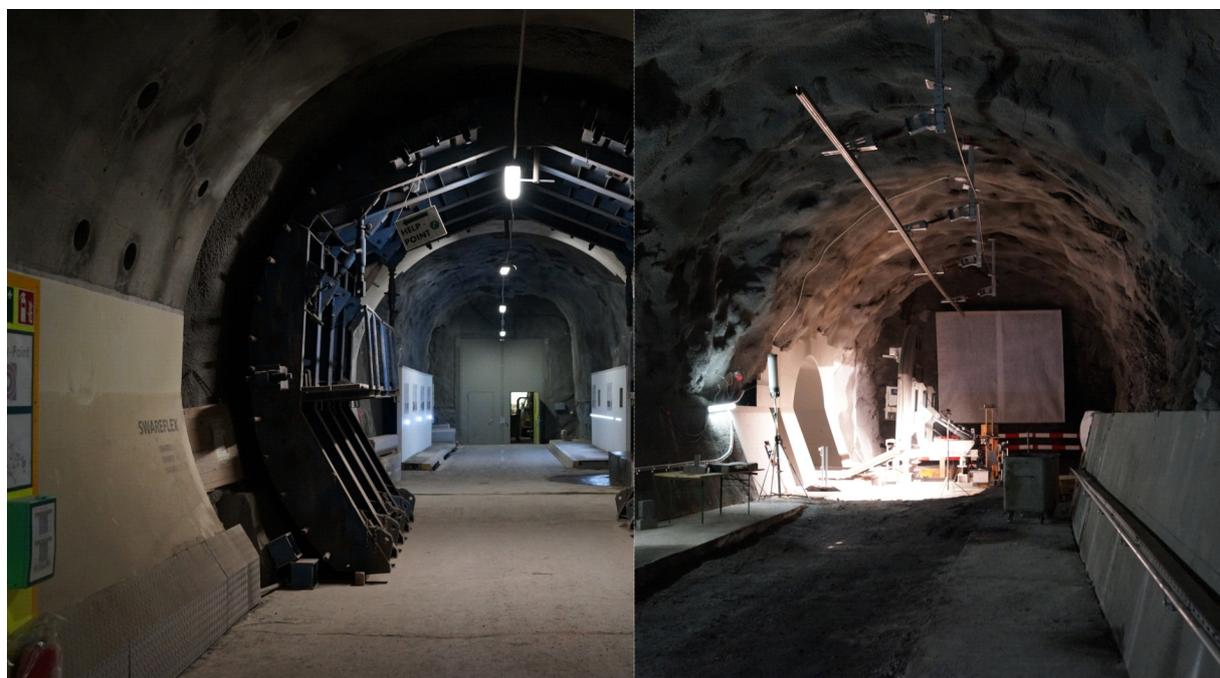


Abb. 6: Untersuchungsgebiet „Sicherheitsstollen“ (1), ausgelegt als Straßentunnel mit unterschiedlichen Ausbaustufen (links), Untersuchungsgebiet des SCAUT (2), ausgelegt als Eisenbahntunnel mit Oberleitungen und Querschlag zum Rettungsstollen (rechts).

## 4 Genauigkeitsuntersuchungen

Mit dem *BIMAGE Backpack* erfolgten Aufnahmen in beiden Untersuchungsgebieten des VSH. Aufgrund der schlechten Lichtverhältnisse im Stollen, wurden am MMS zusätzliche seitwärts gerichtete akkubetriebene Scheinwerfer angebracht. Die Panoramakamera wurde mit einer geometrischen Distanzbedingung von 2 m ausgelöst. Das erste Untersuchungsgebiet „Sicherheitsstollen“ wurde schleifenförmig erfasst (Abb. 7, links), um den Betrag eines allfälligen Schleifenschlussfehlers zu beurteilen. Im Gegensatz dazu, wurde bei der Aufnahme des zweiten Untersuchungsgebiets „SCAUT-Stollen“ zusätzlich ein weiterer Stollenabschnitt nach einer scharfen Kurve miterfasst.

Der 3D-SLAM-Algorithmus liefert neben der Trajektorie auch eine Punktwolke mit den registrierten Scans beider Multiprofillaserscanner. Diese Punktwolke eignet sich für eine erste qualitative Beurteilung der SLAM-basierten Georeferenzierung. Um die Georeferenzierung quantitativ zu beurteilen, können Differenzvektoren von Passpunktmessungen in den Bildern zu den tachymetrisch bestimmten Passpunktkoordinaten herbeigezogen werden. In einem mit *Python* entwickelten Passpunktmesswerkzeug können in mehreren aufeinanderfolgenden Bildern Messungen vorgenommen werden. Mit den zugehörigen Kameraposen lassen sich mittels Vorwärtseinschnitt die 3D-Koordinaten berechnen. Die 3D-Koordinaten befinden sich im lokalen Koordinatenbezugsrahmen der Kameraposen. Mit einem weiteren *Python*-Werkzeug können die lokalen Passpunktkoordinaten mit einer 3D-Koordinatentransformation über ausgewählte Stützpunkte in den globalen Bezugsrahmen überführt werden.

### 4.1 SLAM-basierte Georeferenzierung

Die schleifenförmige Aufnahme des Untersuchungsgebiets „Sicherheitsstollen“ (Abb. 7, links) wurde bei der ersten Gabelung unten rechts initialisiert (S) und nach einem Umlauf bei der zweiten Gabelung mit einem Überlappungsbereich am Ende abgeschlossen (E). Die Initialisierung der linienförmigen Aufnahme des „SCAUT-Stollens“ (Abb. 7, rechts) erfolgte oben rechts (S) und wurde, nach der Umkehr am Ende des SCAUT-Stollens wiederum in der Nähe des Startpunkts abgeschlossen (E).

Mit der Punktwolkenprojektion auf die XY-Ebene kann die Georeferenzierungsqualität in einem ersten Schritt visuell beurteilt werden (Abb. 7). Bei der Aufnahme des Sicherheitsstollens, welche mit den standardmäßigen LiDAR-SLAM-Parametereinstellungen erfasst wurde, ist ein großer Schleifenschlussfehler erkennbar (Abb. 7, 1a). Durch kontinuierliche Optimierung der SLAM-Parameter, insbesondere durch ein höheres Rotationsgewicht des *Ceres Scan-Matchers* und eine erhöhte Anzahl durchzuführender Graph-Optimierungen, konnte der Schleifenschluss vom Algorithmus detektiert und nachträglich korrigiert werden (Abb. 7, 1b). Die Parameteroptimierung der SLAM-Prozessierung ist in RECHSTEINER & WISLER (2018) im Detail abgehandelt. Die zweite linienförmige Aufnahme des SCAUT-Stollens wurde sowohl mit den Standard-SLAM-Parametern, als auch mit dem optimierten Parametersatz für den Sicherheitsstollen prozessiert. Die Punktwolkenprojektion des optimierten Parametersatzes (Abb. 7, 2b) weist ein geringeres Rauschen auf, als jene des Original-Parametersatzes (Abb. 7, 2a).

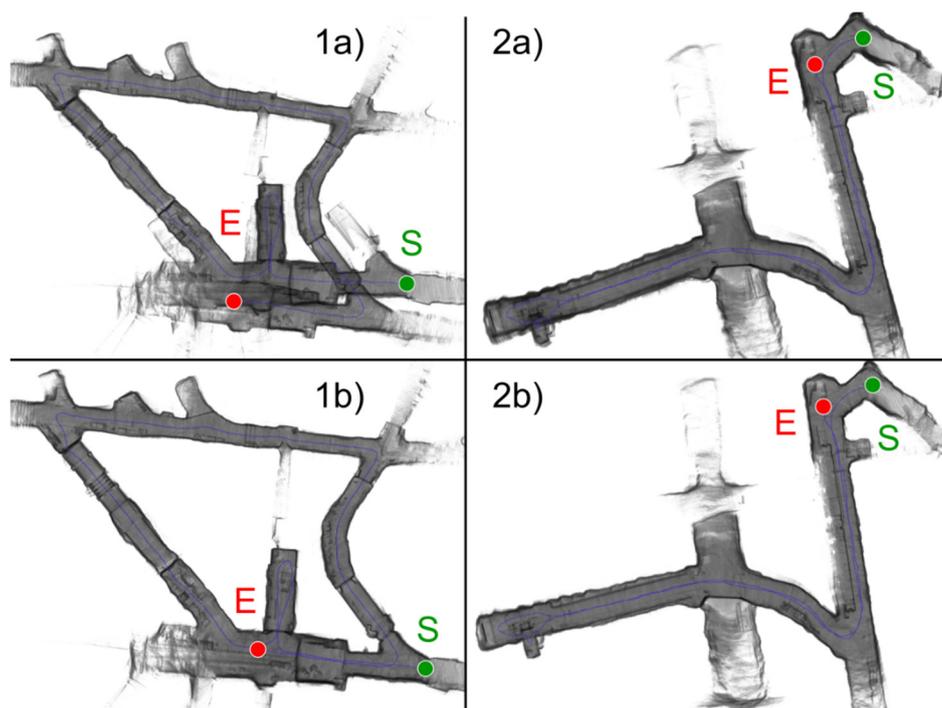


Abb. 7: Projektionen von Punktwolken des 3D-LiDAR-SLAM-Algorithmus auf die XY-Ebene. Links: Punktwolken des „Sicherheitsstollens“ (1); rechts: Punktwolken des „SCAUT-Stollens“ (2). Die Punktwolken oben (a) wurden mit dem originalen SLAM-Parametersatz prozessiert, bei den unteren Punktwolken (b) kam der optimierte Parametersatz zur Anwendung.

## 4.2 Bildbasierte Georeferenzierung

Für die anschließende bildbasierte Georeferenzierung wurden die Bilder mit den SLAM-basierten Kameraposen als Näherungswerte in die SfM-Software *Agisoft PhotoScan* eingeführt. Die vorkalibrierten inneren Orientierungen der Kameraköpfe, sowie die Hebelarme und Fehlansrichtungen zwischen den einzelnen Kameraköpfen, wurden festgesetzt. Es wurden keine zusätzlichen Passpunktmessungen in die Bündelblockausgleichung eingeführt. Somit wurde das Bündel auf den genäherten Kameraposen gelagert. Die Prozessierungszeiten und die erzielten Rückprojektionsfehler sind vergleichbar mit denjenigen von CAVEGN ET AL. (2018), die das Konzept der bildbasierten Georeferenzierung von MMS-Daten im Detail behandeln. Die resultierenden verbesserten Bildposen wurden als Basis für die 3D-Pass- und Kontrollpunktmessungen mittels Vorwärtseinschnitt verwendet. Anschließend wurden diese Punktmessungen jeweils über vier Stützpunkte vom lokalen in den globalen Bezugsrahmen transformiert (Abb. 7).

Die mittleren Kontrollpunktdifferenzen der bildbasierten Georeferenzierung zu den tachymetrisch bestimmten Referenzdaten betragen innerhalb des Sicherheitsstollens 60 mm und innerhalb des SCAUT-Stollens 72 mm. Außerhalb des SCAUT-Stollens treten stetig zunehmende systematische Abweichungen zu den Kontrollpunktkoordinaten von bis zu 540 mm auf (Abb.8, 2). Dies könnte auf eine fehlerhafte Bildverknüpfung in der starken Kurve hindeuten, oder aber durch die Lagerung im SCAUT-Stollen und die beträchtliche Extrapolation verursacht worden sein. Eine ähnlich große Abweichung tritt im Punkt außerhalb des Sicherheitsstollens auf (Abb. 8, 1). Für diese Abweichung könnten dieselben Ursachen wie im SCAUT-Stollen in Betracht gezogen werden. Zu bemerken ist, dass die Lichtverhältnisse abseits des Sicherheitsstollens deutlich schlechter waren, was die bildbasierte Georeferenzierung erschwerte.

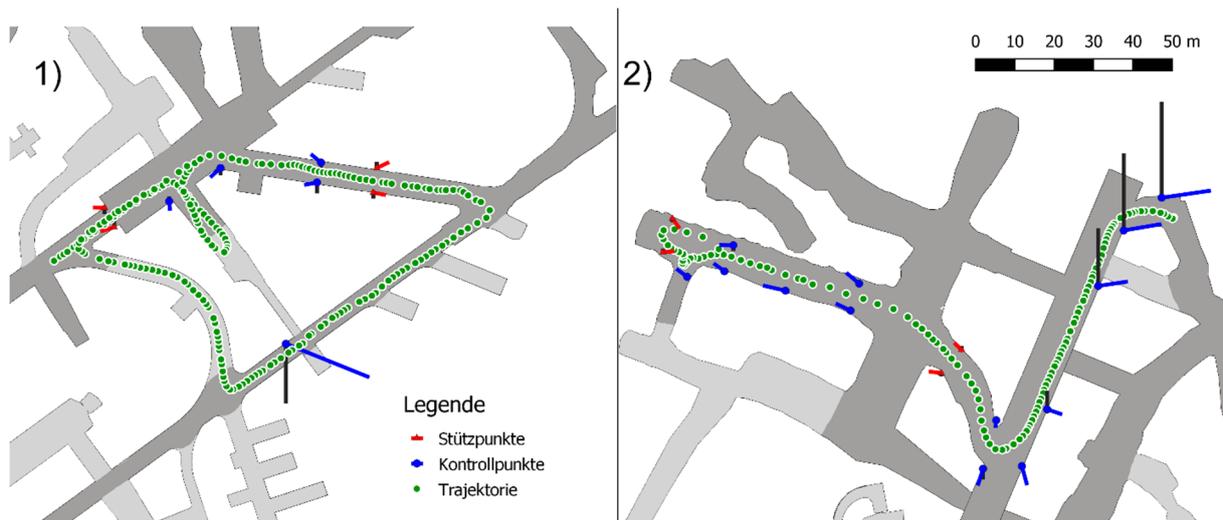


Abb. 8: Übersichtsplan der bildbasierten Georeferenzierung. Die grünen Punkte repräsentieren die Bildaufnahmestandorte. Für die Genauigkeitsuntersuchungen wurden sämtliche lokalen Punktmessungen über die roten Stützpunkte mit einer 3D-Helmertransformations in den absoluten Bezugsrahmen transformiert. Die roten und die blauen Verschiebungsvektoren repräsentieren die Lageabweichung in den Stütz- bzw. Kontrollpunkten, die schwarzen Vektoren die Höhenabweichung (Hinweis: alle Vektoren sind um Faktor 50 überzeichnet).

### 4.3 Resultate und Diskussion

Auf Basis a) der standardmäßigen Georeferenzierung mittels SLAM, b) der SLAM-Georeferenzierung mit optimierten Parametern, sowie c) der bildbasierten Georeferenzierung, wurden signalisierte Fixpunkte in je vier aufeinanderfolgenden Bildern gemessen und mittels Vorwärtseinschnitt deren 3D-Koordinaten berechnet.

#### 4.3.1 Relative Genauigkeiten

Als erstes wurden die empirischen Standardabweichungen der Vorwärtseinschnitte ausgewiesen. Sie repräsentieren die Präzision einer 3D-Koordinatenbestimmung. Die Präzision wird hauptsächlich durch die relative Orientierungsgenauigkeit aufeinanderfolgender bzw. benachbarter Bilder beeinflusst. In CAVEGN ET AL. (2018) wurde ebenfalls die Güte der kalibrierten relativen Orientierungen zwischen den einzelnen Panoramakameraköpfen beurteilt, indem dieselben Punkte jeweils in unterschiedlichen Kameraköpfen gemessen wurden. Dabei wurden keine signifikanten Abweichungen in den Passpunkten festgestellt. In diesem Beitrag wurden für die Berechnung der Vorwärtseinschnitte teilweise auch unterschiedliche Kameraköpfe verwendet. Aufgrund der Präzision lässt sich auf die erreichbare Genauigkeit einer Relativmessung, beispielsweise einer 3D-Distanz, schließen. In beiden Untersuchungsgebieten verbesserte sich die Präzision der Standard-SLAM-Lösung a) von 79-150 mm durch die Verwendung optimierter SLAM-Parameter b) auf 66-101 mm und durch bildbasierte Georeferenzierung c) nochmals signifikant auf 3-10 mm (Tab. 1 und Tab. 2). Im Untersuchungsgebiet „SCAUT-Stollen“ wurde gegenüber dem Gebiet „Sicherheitsstollen“ eine um Faktor zwei verschlechterte Präzision bei Verwendung von SLAM-basierter Georeferenzierung nachgewiesen. Grund dafür könnte der größere Stollendurchmesser sein, wodurch sich die Punktwolkendichte am Objekt, zuungunsten der Merkmalsdetektion, verringert. Umgekehrt verhält es sich bei der bildbasierten Georeferenzierung, bei welcher eine offene Umgebung mehr gemeinsame Merkmale mit besseren Schnittbedingungen zulässt.

### 4.3.2 Absolute Genauigkeiten

Um die absolute Genauigkeit zu beurteilen, wurden zuerst die gemessenen Passpunkte sämtlicher Datensätze über jeweils vier Stützpunkte (SP) (Abb. 8) mit einer 3D-Koordinatentransformation ins Referenzkoordinatensystem überführt. Anschließend wurden jeweils die Differenzvektoren zu den tachymetrisch bestimmten Referenzkoordinaten gebildet. Pro Datensatz wurden jeweils die mittleren Abweichungen für die Stützpunkte (SP), die Kontrollpunkte innerhalb des Untersuchungsgebiets (ohne Extrapolation) (KP Kerngebiet) und für sämtliche Kontrollpunkte (alle KP) separat ausgewiesen. Mit optimierten SLAM-Parametern konnte die die mittlere Abweichung aller Kontrollpunkte im „Versuchsstollen“ von 1.47 m auf 0.26 m um nahezu Faktor sechs (Tab. 1) und im „SCAUT-Stollen“ von 0.63 m auf 0.21 m um Faktor drei verringert werden. Die große Verbesserung rührt daher, dass der SLAM-Algorithmus, durch automatisch detektierte Schleifenschlüsse, systematisch auftretende Abweichungen weitgehend eliminieren konnte (siehe Kap. 4.1).

Nach der bildbasierten Georeferenzierung bewegen sich die mittleren Abweichungen innerhalb beider Untersuchungsgebiete zwischen 50 und 72 mm (Tab. 1 und Tab. 2). Dies ist vergleichbar mit erreichbaren Genauigkeiten mit bildbasiertem MMS im urbanen Straßenraum unter erschwerten Bedingungen. Für das portable bildbasierte MMS bot der VSH ebenfalls erschwerte Bedingungen: einerseits wenig geometrische Bedingungen für den LiDAR-SLAM (geringe Anzahl ausgedehnter Ebenen und gerader Kanten) und andererseits ungünstige Lichtverhältnisse für die bildbasierte Georeferenzierung. Unter einfacheren Bedingungen (strukturreiche Umgebung in Gebäuden) wurden in BLASER ET AL. (2018) mit demselben MMS um Faktor zwei bessere Genauigkeiten erreicht.

Tab. 1: Zusammenstellung der Genauigkeitsuntersuchungen im «Sicherheitsstollen» (1). Die Präzision repräsentiert die Standardabweichung der räumlichen Vorwärtseinschnitte. Die Genauigkeit steht für den mittleren Betrag der Differenzvektoren zwischen den Passpunktmessungen und den tachymetrisch bestimmten Fixpunkten.

	Präzision [mm]	Genauigkeit [mm]		
		SP	KP Kerngebiet	Alle KP
SLAM	79	177	257	1'470
SLAM opt.	66	130	153	263
Bildbasiert	10	61	60	155

Tab. 2: Zusammenstellung der Genauigkeitsuntersuchungen im «SCAUT-Stollen» (2). Die Präzision repräsentiert die Standardabweichung der räumlichen Vorwärtseinschnitte. Die Genauigkeit steht für den mittleren Betrag der Differenzvektoren zwischen den Passpunktmessungen und den tachymetrisch bestimmten Fixpunkten.

	Präzision [mm]	Genauigkeit [mm]		
		SP	KP Kerngebiet	Alle KP
SLAM	150	428	950	629
SLAM opt.	101	237	289	211
Bildbasiert	3	50	72	157

## 5 Fazit und Ausblick

Mit dem vorgestellten portablen bildbasierten MMS *BIMAGE Backpack* wurden Aufnahmen im VSH in den zwei unterschiedlich ausgeprägten Untersuchungsgebieten „Sicherheitsstollen“ und „SCAUT-Stollen“ durchgeführt. Sowohl die SLAM-basierte, als auch die bildbasierte

Georeferenzierung wurden qualitativ und quantitativ untersucht. Aufgrund der Punktwolken wurde die Georeferenzierung jeweils qualitativ beurteilt. Für die quantitative Untersuchung der Georeferenzierung wurden signalisierte Fixpunkte in mehreren Bildern gemessen und deren Koordinaten mithilfe des Vorwärtseinschnitts im lokalen Bezugsrahmen berechnet.

Die empirischen Standardabweichungen der Vorwärtseinschnitte als gutes Maß für die relative Messgenauigkeit lagen bei den SLAM-Lösungen in der Größenordnung von 66 bis 150 mm und mit der bildbasierten Georeferenzierung bei 3-10 mm. Dies entspricht einer Steigerung der relativen 3D-Messgenauigkeit in den resultierenden 3D-Bilddiensten um mehr als eine Zehnerpotenz. Die Ergebnisse zeigen auf, dass bei Relativmessungen wie etwa 3D-Distanzbestimmungen in Innenräumen, die einen Großteil der Messaufgaben ausmachen, Zentimetergenauigkeit erreichbar ist.

Für eine absolute Genauigkeitsuntersuchung wurden die in den Bildern gemessenen Fixpunkte mit einer 3D-Koordinatentransformation in den globalen Bezugsrahmen überführt und die Differenzen zu den tachymetrisch bestimmten Referenzkoordinaten ausgewiesen. Daraus ergab sich eine deutliche Genauigkeitssteigerung von der SLAM-basierten Georeferenzierung mit Standardeinstellungen zur optimierten SLAM-Lösung um einen Faktor drei bis sechs. Die anschließend durchgeführte bildbasierter Georeferenzierung ergab eine weitere Genauigkeitssteigerung um einen Faktor 2-4 mit absoluten Genauigkeiten zwischen 50 und 72 mm. Dies entspricht Genauigkeiten, die mit bildbasierten MMS im urbanen Außenraum unter erschwerten Bedingungen erreicht werden können.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen das große Einsatzpotenzial portabler Mobile Mapping Systeme für die unterschiedlichsten Anwendungen unter Tage auf. Diese reichen von der Inventarisierung und Instandhaltung bis hin zur Erstellung eines digitalen Zwillings. Um diesem Ziel näher zu kommen umfasst ein aktueller Entwicklungsschritt die robuste Berechnung der Tiefeninformation in den erfassten Bildern, sodass künftig 3D-Koordinatenmessungen direkt im 3D-Bild per Mausklick vorgenommen werden können. Des Weiteren werden Schnittstellen des 3D-Bilddatendienstes zu BIM prototypisch implementiert sowie die Interaktionsmöglichkeiten mit entsprechender BIM-Software untersucht. Künftig sollen einerseits direkt im 3D-Bilddatendienst BIM-Objekte konstruiert werden können. Andererseits sollen auch bestehende BIM-Objekte – unter anderem zur Kontrolle oder zur Visualisierung – in die 3D-Bilder augmentiert werden können.

## 6 Dank

Das Forschungsprojekt BIMAGE (18493.2 PFES-ES) wurde von der Innosuisse, der Schweizerischen Agentur für Innovationsförderung, und von der Industriepartnerin iNovitas AG finanziell unterstützt. Die Messungen im Versuchsstollen Hagerbach wurden im Rahmen eines Blockprojekts von Geomatikstudierenden der Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW durchgeführt. Das Blockprojekt im VSH wurde durch die Amberg Gruppe freundlicherweise ermöglicht und sowohl materiell als auch finanziell unterstützt.

## 7 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.
- 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.
- CAVEGN, S., BLASER, S., NEBIKER, S. & HAALA, N., 2018: Robust and Accurate Image-Based Georeferencing Exploiting Relative Orientation Constraints. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **4**(2), 57-64.
- 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.
- 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.
- 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).
- RECHSTEINER, F. & WISLER, D., 2018: Erstellung eines digitalen Zwillings des Versuchsstollens Hagerbach mittels des BIMAGE Backpacks und anderer 3D-Sensoren und Plattformen. *Bachelorthesis*, **2018**(5), Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Geomatik, (unveröffentlicht).
- SCHÖNBERGER, J. L. & FRAHM, J.-M., 2016: Structure-from-Motion Revisited. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, USA, 4104-4113.
- VERSUCHSSTOLLEN HAGERBACH AG, 2018: Versuchsstollen Hagerbach. [http://hagerbach.ch/downloads/VSH\\_Broschuere\\_deutsch\\_online.pdf](http://hagerbach.ch/downloads/VSH_Broschuere_deutsch_online.pdf), letzter Zugriff 21.12.2018.