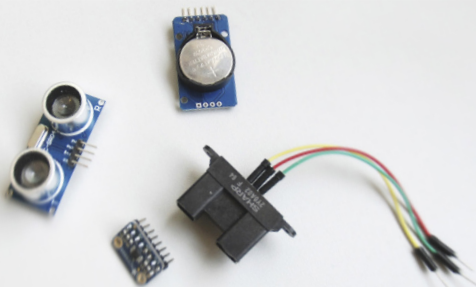


Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“

MST 2018 – Multisensortechnologie: Low-Cost Sensoren im Verbund

Beiträge zum 176. DVW-Seminar am
13. und 14. September 2018 in Hamburg



Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“

MST 2018 – Multisensortechnologie: Low-Cost Sensoren im Verbund

Beiträge zum 176. DVW-Seminar am
13. und 14. September 2018 in Hamburg

Redaktion:

Eike Barnefske, Annette Scheider und Harald Sternberg

Herausgeber:

DVW – Gesellschaft für Geodäsie,
Geoinformation und Landmanagement e.V.



Schriftenreihe des DVW
Band 92
Wißner-Verlag

Herausgeber:
DVW – Gesellschaft für Geodäsie,
Geoinformation und Landmanagement e. V.

www.dvw.de
INTERGEO®

Schriftenreihe des DVW
Band 92

Tipps zur Navigation in der PDF-Datei:

Die PDF enthält zur Navigation Lesezeichen und Hyperlinks.
Der Mausklick auf ein Lesezeichen führt zur ersten Seite des angewählten Beitrags.
Der Mausklick auf einen dunkelblau markierten Abbildungs- oder Tabellenverweis im Text führt zur verknüpften Abbildung oder Tabelle. Zurück zur ursprünglichen Stelle im Text gelangt man mit dem Klick auf den dunkelblau markierten Verweis in der Abbildungsunterschrift oder Tabellenüberschrift.
Internetadressen und E-Mail-Adressen sind ebenfalls mit Hyperlinks hinterlegt.
Kostenfreier PDF-Download unter www.geodaesie.info.

Zitierhinweis:

[Nachname, Vorname]: [Titel des Beitrags]. In: DVW e.V. (Hrsg.):
MST 2018 – Multisensortechnologie: Low-Cost Sensoren im Verbund.
DVW-Schriftenreihe, Band 92, Augsburg, 2018, S. x–y.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-95786-170-2
ISSN 0940-4260

© Wißner-Verlag, Augsburg 2018
www.geodaesie.info

Herstellung: Wißner-Verlag, Augsburg
Bildnachweis Cover: Eike Barnefske, HCU

Das Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt. Jede
Verwertung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen
bedarf deshalb der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Verlags.

Inhalt

Vorwort	5
---------	---

Session 1: Grundlagen und Algorithmen

Lasse Klingbeil Heiner Kuhlmann Mobile Multisensorsysteme: Sensoren, Verfahren, Anwendungen – Ein Überblick	9
Gerhard Kleemaier Multisensorsystem Totalstation	25
Bernd Eissfeller Thomas Pany Architectures of GNSS/INS Integrations – Theoretical Approach and Practical Tests	37

Session 2: Anwendungen Teil 1 (Land, Luft, Wasser)

Horst Hellbrück Torsten Teubler Gunther Ardel Autonome Unterwasserfahrzeuge und Kommunikationssysteme	59
Otto Heunecke Thorsten Strübing Stop & Go Messsysteme zur Gleisabsteckung und Gleisabnahme	77
Frank Knospe Rico Richter Erfassung, Analyse und Auswertung mobiler Multisensorik im Straßenraum: Ein Erfahrungsbericht	91

Session 3: Sensorik und Kommunikation

Thomas Wiemann Felix Igelbrink Joachim Hertzberg Markerlose Kalibrierung einer Linienkamera zur Erzeugung hyperspektral annotierter 3D-Punktwolken mit einem terrestrischen Laserscanner	101
--	-----

Eike Barnefske Harald Sternberg Spezielle Vermessungslösungen für den barrierefreien Ausbau einer Haltestelle der Hamburger Hochbahn	109
--	-----

Catia Real Ehrlich Jörg Blankenbach Echtzeit-Indoor-Positionierung für Fußgänger mit multisensoralen Smartphones	121
--	-----

Session 4: Anwendungen Teil 2 (Navigation, Überwachung, Geosensoren)

Jinyue Wang Martin Wachsmuth Martin Metzner Volker Schwieger Die digitale Straßenkarte als Sensor	137
--	-----

Philipp Engel Karl Foppe Uwe Köster Multisensorsystem zur Erfassung von Turmschwingungen an der Marienkirche Neubrandenburg	167
---	-----

Gunnar Gräfe Hochgenaue Qualitätssicherung für Trajektorien und deren Anwendung in Projekten der kinematischen Ingenieurvermessung	179
--	-----

Alexandra Avram Erick González-Rodríguez Henry Conrad Volker Schwieger Multi-Sensor-System for Navigation	191
--	-----

Vorwort

Dieses 176. DVW-Seminar setzt eine Tradition des Arbeitskreises 3 des DVW „Messmethoden und Systeme“ fort: Kinematische Messmethoden in der Ingenieur- und Industrievermessung (1996), Hybride Vermessungssysteme (1998), Kinematische Messmethoden (2004) und Multi-Sensor-Systeme – Bewegte Zufallsfelder (2014). Dieses Jahr legen die Organisatoren aufgrund aktueller Entwicklungen einen Schwerpunkt auf Low-Cost Sensoren, deren kombinierten und häufig kinematischen Einsatz in der Geodäsie und dabei insbesondere in der Ingenieurgeodäsie. Das diesjährige Thema lautet

Multisensortechnologie: Low-Cost Sensoren im Verbund.

Jedes moderne geodätische Messinstrument ist ein Multi-Sensor-System, nicht jedes kann aber als Low-Cost System bezeichnet werden. Typische Beispiele für Low-Cost sind die microelectromechanical systems (MEMS), die inzwischen sehr häufig in geodätischen, aber auch anderen Messsystemen sowie Geosensornetzen verbaut werden. Das Seminar bietet einen Überblick zu Multisensorsystemen, Beiträge zu mathematischen Modellen zur Sensorfusion sowie zu Kommunikations-, Kalibrier- und Synchronisationsaspekten. Dabei werden letztere am Beispiel eines zentralen ingenieurgeodätischen Instruments, der Totalstation, erläutert. Klassische Anwendungen wie die Gleisaufnahme, die Straßenerfassung sowie Überwachungsaufgaben werden mit Multisensorsystemen betrieben und Lösungen vorgestellt. Interessante weitere Anwendungen finden Unterwasser, im Auftrag von Verkehrsbetrieben und in der kinematischen Ingenieurvermessung statt. Ein Seminarschwerpunkt liegt auf der kinematischen Positionsbestimmung für Fußgänger und Fahrzeuge. Neben der Sensorfusion in kompakten oder gänzlich neuentwickelten Multisensorsystemen wird auch die Berücksichtigung der Informationen aus der digitalen Straßenkarte für die Positionsbestimmung beleuchtet.

Wir danken den Autoren für die fristgerechte Übermittlung aller Beiträge. Wir hoffen weiterhin, dass dieser Band der DVW-Schriftenreihe auch im Nachgang zum Seminar gute Dienste leisten wird. Den Teilnehmern aus Praxis und Forschung wird während des Seminars die Möglichkeit zur Teilnahme an interessanten Vorträgen, zum Austausch und zur fachbezogenen Diskussion gegeben. Wir hoffen, dass diese Möglichkeiten reichlich genutzt werden.

Hamburg und Stuttgart, im Juli 2018

Harald Sternberg

Volker Schwieger

Session 1:

Grundlagen und Algorithmen

Mobile Multisensorsysteme: Sensoren, Verfahren, Anwendungen – Ein Überblick

Lasse Klingbeil | Heiner Kuhlmann

1 Einleitung

Die Grundidee bei der Anwendung mobiler Multisensorsysteme ist die Vermessung der Umgebung mit Hilfe von Sensoren, die sich auf einer bewegten Plattform befinden. *Vermessung der Umgebung* bedeutet dabei zunächst sehr allgemein die Generierung räumlich aufgelöster Informationen über die Umgebung oder Objekte darin. Die Art der Information wird dabei von der Art des Sensors bestimmt, der auf der mobilen Sensorplattform befestigt ist.

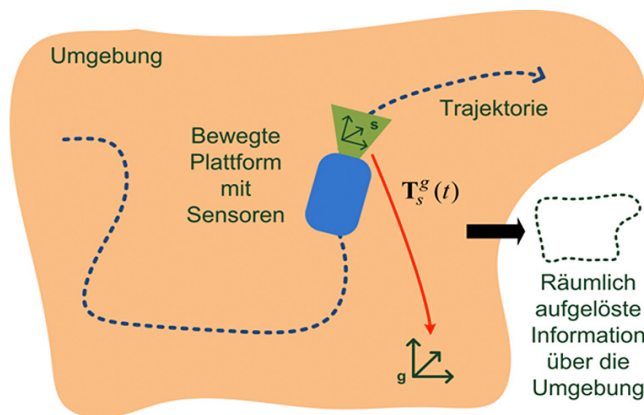


Abb. 1:
Schematische
Darstellung
eines mobilen
Multisensor-
systems

Mit einem Laserscanner lassen sich zum Beispiel Winkel und Abstände zu Objekten der Umgebung messen, um daraus z. B. dreidimensionale Modelle zu generieren. Mit Kameras und entsprechenden photogrammetrischen Methoden ist das ebenfalls möglich, wobei hier zusätzlich noch radiometrische Informationen über den Zustand der Objekte erfasst werden können (z. B. Farbe oder Reflektivität des Sonnenlichts bei verschiedenen Wellenlängen). Andere Sensoren ermöglichen die räumlich aufgelöste Erfassung des Schwerfeldes, der Temperatur oder des Luftdrucks.

In allen Fällen ist es notwendig, dass zu den Zeitpunkten der Messung die Position und Orientierung des jeweiligen Sensors bekannt sind. Nur so können

die Messungen, die im Koordinatensystem des Sensors aufgenommen werden, in das übergeordnete globale Koordinatensystem überführt werden, in dem die Informationen letztendlich gesammelt und dargestellt werden sollen. Die bewegte Plattform muss also zusätzlich zu den Sensoren zur Beobachtung des Objektraumes weitere Sensoren zur Bestimmung der Trajektorie der Plattform enthalten, wobei die Trajektorie hier die Position und die Orientierung umfasst (Abb. 1).

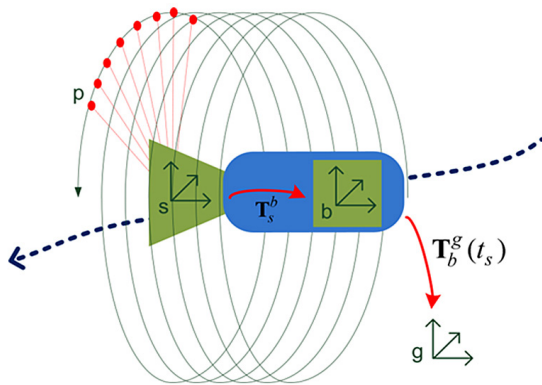


Abb. 2:
Idealisierte Darstellung
des kinematischen Laser-
scannings

Ein idealisiertes Beispiel für ein mobiles Multisensorsystem ist in Abb. 2 dargestellt. Die bewegte Plattform enthält einen Laserscanner, der im Profilmodus betrieben wird und in schneller Abfolge Distanzmessungen durchführt, die durch die Bewegung der Plattform die Umgebung spiralförmig abscannen. Weiterhin enthält die Plattform einen Sensor zur Trajektorienbestimmung. Dieser liefert zu jedem Zeitpunkt t_s , an dem der Laserscanner eine Distanzmessung durchführt, die Position und Orientierung der Plattform im übergeordneten Koordinatensystem der Umgebung $T_b^g(t_s)$. Bestimmt der Laserscanner also über Distanz- und Winkelmessung einen Punkt p' in seinem lokalen Koordinatensystem, kann dieser mit Hilfe der Trajektorieninformation in das globale Koordinatensystem der Umgebung transformiert werden, wenn zusätzlich die Transformation T_s^b zwischen dem Sensorkoordinatensystem und dem Plattformkoordinatensystem bekannt ist:

$$p^g = T_b^g(t_s) T_s^b p^s$$

Anhand dieser Formel lassen sich die Problemstellungen, die sich bei der Entwicklung, dem Aufbau und dem Betrieb kinematischer Multisensorsysteme ergeben, erläutern:

Objektraumsensorik: Die Wahl der Sensorik zur lokalen Beobachtung (\mathbf{p}^s) der Umgebung wird durch die Anwendung bestimmt. Klassischerweise kommen hier Laserscanner oder Kameras zum Einsatz, prinzipiell können hier natürlich auch nicht geometrische Sensoren, wie z. B. Thermometer oder Strahlungssensoren eingesetzt werden.

Trajektorienbestimmung: Die Trajektorie der bewegten Plattform muss in einem übergeordneten Koordinatensystem bekannt sein (\mathbf{T}_b^g), und zwar zu den Zeitpunkten t_s der Messungen der Objektraumsensorik. Hierzu werden üblicherweise weitere Sensoren wie GNSS-Empfänger und Inertialsensoren verwendet. Zur Fusion der Sensordaten werden kommen z. B. Kalman Filter zum Einsatz.

Systemkalibrierung: Bei der Systemkalibrierung werden die Transformationen \mathbf{T}_s^b zwischen den Objektraumsensoren und dem Plattformkoordinatensystem bestimmt, um die kinematische Kette zwischen der lokalen Objektraumbeobachtung und globalen Koordinatensystem zu schließen. Ebenfalls zur Systemkalibrierung gehört die Bestimmung der relativen Lage zwischen allen Navigationssensoren, sowie die Erzeugung einer gemeinsamen Zeitbasis aller Sensoren.

Qualitätsbeurteilung: Die Bestimmung der Genauigkeit der resultierenden Informationen (\mathbf{p}^g) ist eine große Herausforderung. Durch die komplexe Verarbeitungskette, bei der üblicherweise mehrere Algorithmen und Sensoren zum Einsatz kommen, ist eine analytische Betrachtung der Abweichung und deren Einfluss auf das Endergebnis nahezu unmöglich.

In diesem Beitrag soll auf die oben genannten Aspekte überblicksartig eingegangen werden. Eine detaillierte Betrachtung ist an dieser Stelle nicht vorgesehen.

2 Objektraumsensorik/Anwendungen

Die wohl klassischsten mobilen Multisensorsysteme sind luftgebundene Systeme aus dem Bereich der Luftbildvermessung und der Fernerkundung (Kraus 2004). Üblicherweise werden hier die Daten von Sensoren zur Erfassung elektromagnetischer Strahlung (Kameras, Spektrometer) mit Hilfe der bekannten Positionen und Orientierung eben dieser Sensoren zu Karten zusammengefasst. Die Ergebnisse solcher Befliegungen sind z. B. 3D-Punktwolken, digitale Geländemodelle, Orthophotos oder Vegetationskarten. In den letzten Jahren haben luftgebundene Systeme durch die hohe Verfügbarkeit von kostengünstigen und vergleichsweise einfach zu verwendenden UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) einen

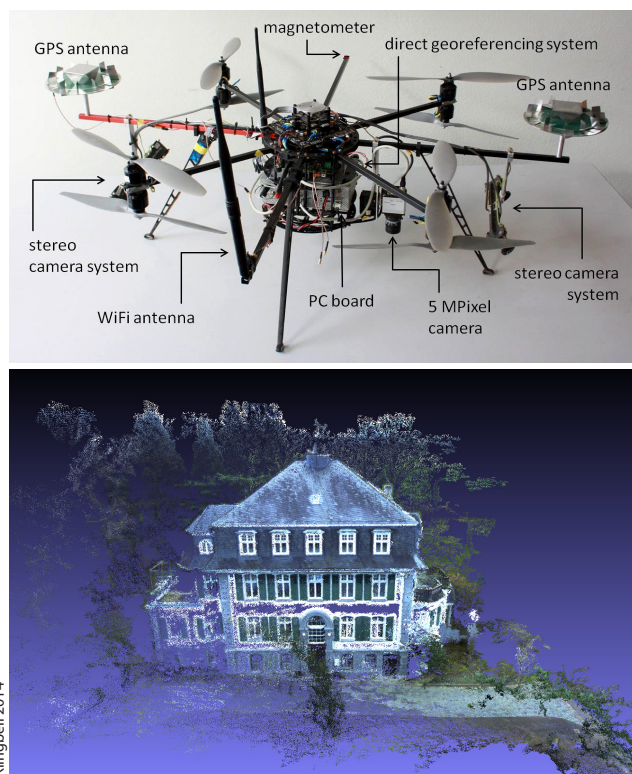


Abb. 3:

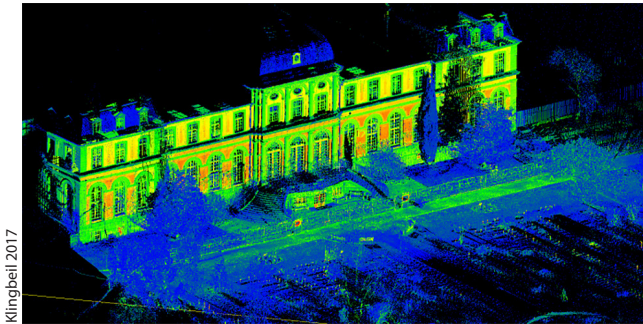
Oben: UAV zur
3D-Vermessung in
Echtzeit
Unten: Georeferen-
zierte Punkt-
wolke
als Ergebnis einer
UAV Befliegung

bemerkenswerten Aufschwung erfahren (siehe [Abb. 3](#)). Prinzipiell hat beim Einsatz von UAVs im Vergleich zu früheren Luftbildphotogrammetrie hinsichtlich der Methoden und Verfahren nicht sehr viel verändert, der Einsatz größtenteils sehr günstiger Sensorik bringt jedoch besondere Herausforderungen mit sich, insbesondere bei der Trajektorienbestimmung (Eling 2015).

Ebenfalls einen starken Aufschwung erlebten Systeme zum kinematischen Laserscanning. Diese auch als Mobile Mapping Systeme bezeichneten Plattformen enthalten meist eine sehr hochwertige Inertialsensoreinheit, ein oder zwei GNSS-Empfänger, einen oder mehrere Laserscanner sowie Kameras (siehe [Abb. 4](#) und [Abb. 5](#)). Die Laserscanner sind dabei üblicherweise Profils Scanner, die für hohe Scanraten optimiert sind, um die Profildichte bei hohen Geschwindigkeiten möglichst hoch zu halten. Die Bestimmung der Trajektorien geschieht üblicherweise im Nachhinein mit Hilfe der GNSS-Empfänger und der Inertialsensoren als direkte Georeferenzierung. In seltenen Fällen wird die Georeferenzierung der Daten durch Passpunkte verbessert.



Abb. 4:
Fahrzeuggebundenes System mit hochwertiger IMU, Profillaserscanner und GNSS-Empfänger mit eigener Referenzstation



Klingbeil 2017

Abb. 5:
3D-Punktwolke.
Ergebnis einer Messung mit dem oben gezeigten System

Zur Untersuchung der Wasserwege über und unter Wasser werden auch Schiffe als Multisensorsysteme eingesetzt (Wirth und Brueggemann 2011). Über Wasser kommen hier wie bei den oben genannten Fahrzeugen Profil-Laserscanner zum Einsatz, unter Wasser lässt sich die Fahrrinne mit Hilfe eines Fächerecholots dreidimensional erfassen. Zusätzlich zu der schon erwähnten Kombination aus GNSS-Empfängern und Inertialsensoren kommen hier zur Trajektorienbestimmung noch andere Sensoren, wie das Dopplerlog oder Windmesser zum Einsatz.

Bei den oben genannten Anwendungen werden die Sensordaten üblicherweise im Nachhinein, also im Postprocessing, ausgewertet. Weitere Herausforderungen ergeben sich, wenn die Ergebnisse in Echtzeit während der Fahrt oder des Fluges zur Verfügung stehen müssen. Beispiele dafür sind Absteckungsanwendungen, wie z.B. die Baumaschinensteuerung oder die koordinatengesteuerte Rübenaussaat (Schulze Lammers 2017). In beiden Beispielen ist es notwendig, aus der Bewegung heraus, zum Zeitpunkt der Erreichung einer vorher definierten Position bzw. Orientierung, eine Aktion auszuführen. Andere Beispiele für die Echtzeitanwendungen sind die Unterstützung der Entscheidungsfindung in

Katastrophenfällen durch Beobachtungen aus der Luft oder die sogenannte Exploration, eine Disziplin der mobilen Robotik, in der ein autonomes System aufbauend auf bisherigen Kartierungsergebnissen eine hinsichtlich verschiedener Zielparameter (z. B. Vollständigkeit und Genauigkeit) optimale Kartierung vornimmt (Stachniss 2009).

3 Trajektorienbestimmung

Die Bestimmung der Plattformtrajektorie ist das zentrale Element eines mobilen Multisensorsystems. Dazu gibt es zahlreiche Sensoren, Messverfahren und Auswertemethoden, über die im Folgenden ein Überblick gegeben werden soll. Das Ziel der Trajektorienbestimmung ist die Bestimmung aller sechs Freiheitsgrade der Bewegung der Plattform, also die Position und Rotation bezogen auf ein übergeordnetes globales Koordinatensystem, und zwar zu jedem Zeitpunkt. Je nach Anwendung und Messverfahren kann die Auswertung der dafür erfassten Sensordaten entweder in Echtzeit oder im Postprocessing geschehen.

3.1 Messverfahren und Sensoren

Die unterschiedlichen Messverfahren lassen sich in relative und absolute Verfahren unterteilen. Bei relativen Verfahren werden nur Änderungen von Positionen, Strecken oder Rotationen erfasst, so dass der absolute Bezug nicht bekannt ist. Das hat die Nachteile, dass zum einen für eine absolute Bestimmung die absolute Position und Orientierung der Plattform zu irgendeinem Zeitpunkt in der Vergangenheit bekannt gewesen sein musste (Initialisierung) und zum anderen, dass die Unsicherheit dieser absoluten Bestimmung mit der Zeit wächst. Im Gegensatz dazu können mit absoluten Verfahren die absolute Position oder Rotation direkt bestimmt werden. Die Kombination verschiedener absoluter und relativer Verfahren mit Hilfe von Filteralgorithmen, wie z. B. dem Kalman-Filter entspricht dem Stand, der heutzutage in den meisten Systemen zum Einsatz kommt.

Eine weitere Möglichkeit zur Unterteilung der Verfahren ist die in direkte und indirekte Verfahren. Die Berechnung der Trajektorie mit Hilfe von zu diesem Zweck am Sensorsystem befestigten Inertialsensoren und GNSS-Empfängern wird hier als direktes Verfahren bezeichnet. Im Gegensatz dazu wird bei indirekten Verfahren die Bestimmung der Trajektorie mit Hilfe der Objektraumsensoren (z. B. Kamera oder Laserscanner) durchgeführt. Das geschieht, wie zum Beispiel bei der Bündelausgleichung in der klassischen Luftbildphotogrammetrie, meist in einem zeitaufwändigen Postprocessing-Schritt und erfordert häufig eine vorherige Manipulation der Umgebung, wie z. B. die Ausbringung von

Tab. 1: Mögliche Kategorisierung der verschiedenen Messverfahren zur Trajektorienbestimmung

	Direkte Verfahren	Indirekte Verfahren
Relative Verfahren	Inertialnavigation Koppelortung Odometrie GNSS-Geschwindigkeiten	Scan-Matching (Laser) Visuelle Odometrie (Kamera)
Absolute Verfahren	GNSS Neigungssensorik Kompass	Passpunkte/Landmarken (Laser, Kamera) Bündelausgleichung (Kamera) SLAM (Laser, Kamera) Map-Matching (Laser, Kamera, Trajektorie)

Passpunkten. In letzter Zeit ist jedoch durch Fortschritte in der Verarbeitung von Bildern und Punktwolken sowie durch die immer stärker werdende verfügbare Rechenleistung, die Einbindung von Objektraumbeobachtungen in die Trajektorienbestimmung auch in Echtzeit möglich geworden. Diese im Bereich der mobilen Robotik schon weit verbreiteten Verfahren erhalten immer mehr Einzug in die Trajektorienbestimmung mobiler Multisensorsysteme, insbesondere, wenn die Anwendungs- oder Umgebungsbedingungen die Verfügbarkeit von GNSS-Beobachtungen verringern. Die Tab. 1 zeigt eine mögliche Kategorisierung der verschiedenen Messverfahren zur Trajektorienbestimmung.

Die relativen Verfahren beobachten im Vergleich zu absoluten Verfahren lediglich Bewegungsänderungen. Sehr häufig werden Inertialsensoren eingesetzt, die in Form von Drehratensensoren die Drehgeschwindigkeit eines Objektes messen, und in Form von Beschleunigungssensoren dessen Beschleunigung, beides relativ zum Inertialsystem. Beide Größen können unter Anbringung verschiedener Korrekturen und unter der Annahme bekannter Startwerte zu einer Positions- und Orientierungsinformation verrechnet werden (Strapdown-Algorithmus). Ebenfalls häufig im Einsatz sind Odometer, die die zurückgelegte Strecke entlang der Fahrtrichtung bestimmen können. In indirekten Verfahren wie Scan-Matching (Lu 1997) oder Visuelle Odometrie (Scaramuzza 2011) werden aus Objektraumbeobachtungen wie Kamerabildern und Laserscans die Transformationen (Translation und Rotation) zwischen zwei aufeinanderfolgenden Aufnahmezeitpunkt bestimmt, so dass diese wie ein relativer Bewegungssensor in die Zustandsschätzung integriert werden können.

Die oben genannten relativen Verfahren haben den Nachteil, dass zum einen die absoluten Startwerte bekannt sein müssen, und zum anderen die Unsicherheit der resultierenden Posenschätzung mit der Zeit immer größer wird. Daher

werden zusätzlich absolute Verfahren wie GNSS, Neigungssensorik oder ein Kompass eingesetzt. Beispiele für indirekte Verfahren, die absolute Informationen liefern, sind die Verwendung von Passpunkten oder Methoden, die mit Hilfe von Objektraumbeobachtungen die eigene Pose relativ zu einer bekannten oder zeitgleich geschätzten Karte bestimmen (SLAM, Simultaneous Localization and Mapping). Um relative und absolute Verfahren optimal zu Verknüpfen und eventuell verfügbare Vorinformation in die Schätzung einzubinden werden Sensorfusions- und Filteralgorithmen eingesetzt.

3.2 Filterung und Sensorfusion

Würden wir die Position und Orientierung eines statischen Objektes möglichst genau und zuverlässig bestimmen wollen, würden wir eine Vielzahl verschiedener unabhängiger Messungen mehrfach durchführen und so eine hohe Überbestimmung erreichen. Im Falle der eben beschriebenen absoluten Verfahren und im Falle eines sich bewegenden Objektes ist diese Überbestimmung nicht ohne weiteres erreichbar. So würden zum Beispiel die drei Freiheitsgrade der Position in einer einzelnen Epoche nur durch die Messungen des GNSS-Empfängers beobachtet werden können. Unter Umständen sind diese, abgesehen von zufälligen Beobachtungsabweichungen, zusätzlich noch durch systematische Abweichungen oder grobe Fehler überlagert. Es gibt drei Möglichkeiten mit dieser fehlenden Redundanz umzugehen:

Die Einbeziehung von Modellwissen über das System: Sich bewegende Plattformen können aufgrund ihrer Massenträgheit nicht beliebig schnelle Positions- und Orientierungsänderungen vornehmen. Es lässt sich also für die Trajektorie in einem bestimmten Zeitabschnitt eine Glattheitsannahme treffen. Allgemeiner formuliert bedeutet das: Wenn wir wissen, welchen Zustand (inklusive der Unsicherheit darüber) ein System zum letzten Zeitpunkt hatte, und wir eine Ahnung davon haben, was seitdem passiert sein könnte (z. B. über ein Systemmodell oder relative Messverfahren), so können wir diese Informationen als Vorbedingung in die Schätzung des aktuellen Zustandes einfließen lassen und so eine verbesserte Genauigkeit und Zuverlässigkeit erreichen.

Einbindung zusätzlicher Sensoren: Die Fusion möglichst vieler verschiedener Messverfahren, ob relativ oder absolut, direkt oder indirekt, in die Schätzung unter statistisch korrekter Berücksichtigung der individuellen Unsicherheiten dieser Verfahren erhöht ebenfalls die Genauigkeit und Zuverlässigkeit.

Einbindung von Modellwissen über die Umgebung: Einige der indirekten Verfahren benötigen Informationen über die Umgebung, z. B. in Form einer Karte.

Diese kann, wie in Fall von SLAM, während des Schätzvorgangs erzeugt werden, oder wie im Fall von Passpunkten vorher bekannt sein. Das Modellwissen kann im Falle indirekter Verfahren die Anzahl unabhängiger Messungen erhöhen oder diese erst ermöglichen. Gleichzeitig kann es als die Bewegung einschränkende Nebenbedingung in die Trajektorienschätzung eingehen und diese so verbessern. Rekursive Bayes-Schätzverfahren, z. B. in Form von Kalman-Filtern oder dessen Varianten, bieten das methodische Gerüst, um alle drei genannten Möglichkeiten gleichzeitig umzusetzen (Wendel 2007, Thrun 2005).

4 Systemkalibrierung

Unabhängig davon, ob die Trajektorie der Plattform in Echtzeit oder im Postprocessing berechnet wird, ob sie nur Sensoren wie GNSS und Inertialsensoren oder auch die Objektraumsensoren wie Laserscanner und Kameras verwendet, ist die räumliche und zeitliche Zuordnung aller Beobachtungen, die von den Sensoren des Systems durchgeführt werden, eine wichtige Voraussetzung für den Betrieb von Multisensorsystemen. Da fehlerhafte Zuordnungen sich als systematische Abweichungen im Endprodukt der Datenaufnahme (z. B. einer Punktwolke) äußern, wird die Herstellung dieser Zuordnung, insbesondere der räumlichen, meist Systemkalibrierung genannt. Die Kalibrierung der Einzelsensoren, also die Bestimmung sensorinterner systematischer Abweichungen, wie z. B. die Zielachs- und Kippachsabweichung beim Laserscanner, wird üblicherweise mit gesonderten Verfahren, meist schon vom Hersteller, bestimmt.

4.1 Räumliche Kalibrierung

Bei der räumlichen Kalibrierung wird die Transformation (Rotation und Translation) eines jeden einzelnen Sensors bezüglich eines gemeinsamen Plattformkoordinatensystems bestimmt. Es gibt zahlreiche Arbeiten über die Kalibrierung von Multisensorsystemen. Ein guter Überblick ist z. B. in Lichti und Skalous (2010) gegeben. Bei der Kalibrierung zwischen einem Laserscanner und dem Plattformsystem werden oft Referenzgeometrien mit dem Scanner beobachtet, die im Plattformkoordinatensystem bekannt sind. Letzteres lässt sich zum Beispiel erreichen, indem die Referenzobjekte und die Plattform mit einem Messgerät in einem übergeordneten System eingemessen werden (Strübing und Neumann 2013, Keller 2015, Hartmann et al. 2017, Heinz et al. 2017). Als Objekte eignen sich vor allem Körper, deren Form sich leicht parametrisieren lässt. Die meisten Kalibrierverfahren arbeiten daher mit Ebenen. Die Kalibrierung von Kameras funktioniert in einer ähnlichen Weise, die Kamera beobachtet Punkte, Linien oder Flächen, die im Plattformsystem bekannt sind (Zhang und Pless 2004,

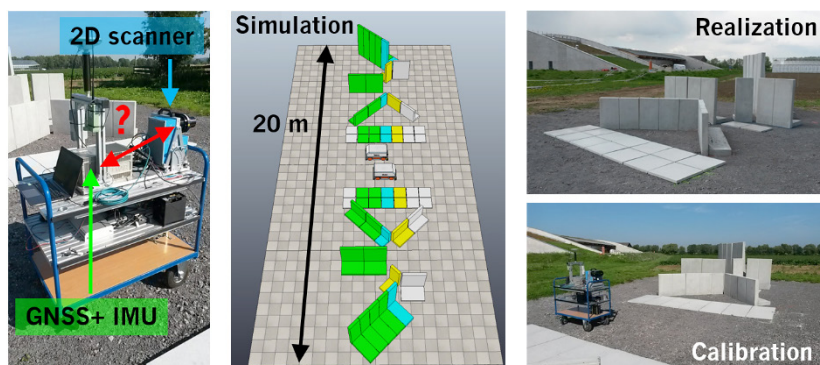


Abb. 6: Umsetzung eines ebenenbasierten Kalibrationsverfahrens

Naroditsky et al. 2011, Geiger et al. 2012, Gong et al. 2013). Der Aufwand dieser *Laborverfahren* ist jedoch sehr hoch.

Abb. 6 zeigt beispielhaft ein ebenenbasiertes Kalibrierfeld zur Kalibrierung von Multisensorsystemen. Die Ebenen sind mit einem terrestrischen Laserscanner sehr präzise ermessen und ermöglichen die Bestimmung der Transformation zwischen Profillaserscanner und Plattformsystem des Multisensorsystems.

4.2 Datensynchronisierung

Eine weitere wichtige Aufgabe ist die Synchronisierung der Sensordaten. Das Ziel der Synchronisierung ist es, jede Beobachtung so mit einem Zeitstempel zu versehen, dass alle Sensoren die gleiche Zeitbasis haben. Wie sich eine Synchronisierungsabweichung zwischen der Georeferenzierung und der Kamera oder dem Laserscanner auswirkt, hängt von der Geschwindigkeit der Plattform ab. Eine unberücksichtigte Verzögerung von einer Millisekunde führt bei Schrittgeschwindigkeit zu einer Abweichung von einem Millimeter und bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h zu knapp drei Zentimetern. Ebenfalls wichtig ist die Synchronisierung aller zur Trajektorienbestimmung eingesetzten Sensoren, da diese korrekt miteinander fusioniert werden müssen. Das ist bei unterschiedlichen Messverfahren, die auch noch variable zeitliche Berechnungszeiten benötigen können, insbesondere für den Echtzeitbetrieb eine große Herausforderung.

Ein Grund für die Schwierigkeit der Synchronisierung liegt in den vielen unterschiedlichen Messprinzipien und Schnittstellen der einzelnen Sensoren. Einige Sensoren führen auf Basis eines angelegten Signals (Trigger) eine Messung durch, so dass diese Beobachtung recht einfach der Zeitbasis des signalauslösenden Systems zugeordnet werden kann. Manche Sensoren (z. B. Kompaktkameras) benötigen allerdings nach dem Trigger noch eine unbestimmte und

variable Zeit bis zur eigentlichen Messung, sodass eine exakte Synchronisierung nahezu unmöglich ist. Einige Sensoren führen ihre Messung zwar ungetriggert aus (z. B. mit einer bestimmten Frequenz, die durch eine eigene Uhr vorgegeben ist), erzeugen aber zum Zeitpunkt ihrer Messung ein Signal, was wiederum von einem anderen System zur Generierung eines Zeitstempels verwendet werden kann. Nahezu unmöglich ist eine exakte Synchronisierung, wenn der Beobachtungszeitpunkt nur durch die Ankunft der Sensordaten im PC bestimmt werden kann. Die Verwendung serieller Schnittstellen wie USB und die Benutzung von nicht echtzeitfähigen Betriebssystemen erzeugen zu viele unbekannte und variable Zeitverzögerungen zwischen dem Beobachtungszeitpunkt und dem Dateneingang.

Ein ideales System zur Synchronisierung mehrerer Sensorsysteme hat somit folgende Eigenschaften:

1. Es hat eine Uhr, die über die Zeit sehr stabil ist oder regelmäßig mit Hilfe eines Frequenznormals synchronisiert wird.
2. Es ist in der Lage, zu definierten Zeitpunkten Signale zu erzeugen, die zum Auslösen von anderen Sensoren genutzt werden können.
3. Es ist in der Lage, Signale von anderen Sensoren zu empfangen und den genauen Zeitpunkt des Empfangs (z. B. die steigende Flanke des Signals) zu bestimmen und zu speichern.

Die Rolle des in Punkt 1 genannten Frequenznormals wird bei mobilen Multisensorsystem häufig durch das GPS eingenommen. Die meisten GPS-Empfänger stellen ein sogenanntes PPS-Signal (Pulse-Per-Second) zur Verfügung, welches zum einen eine sehr genaue Zeitmessung erlaubt und zum anderen die Zeitbasis definiert, auf die sich die GPS Beobachtungen beziehen. Punkt 2 und 3 können nur mit Systemen realisiert werden, die zeitdeterministisch arbeiten und einen direkten Zugriff auf einzelne Signalleitungen bieten.

5 Qualitätsbeurteilung

Die Qualität der Objektraumsensorik, die Genauigkeit der Trajektorienbestimmung, die Systemkalibrierung und die Datensynchronisation haben alle Einfluss auf die Genauigkeit des Ergebnisses. Die einzelnen Unsicherheiten hängen auf teilweise komplexe Weise voneinander ab und sind in den meisten Fällen nicht normalverteilt. Außerdem sind systematische nicht-modellierte Abweichungen, wie z. B. durch Mehrwegeeffekte in den GNSS-Beobachtungen, zu erwarten. Eine analytische Bestimmung der Kovarianzmatrix aller Messpunkte ist daher nahezu unmöglich. Dennoch ist sie für einige Anwendungen, wie z. B. die

Deformationsanalyse oder wenn eine bestimmte Genauigkeit garantiert werden soll, wünschenswert oder sogar notwendig.

Eine Möglichkeit zur Evaluierung der Genauigkeit ist ein Vergleich mit Sollwerten, die mit anderen Verfahren aufgenommen wurden. Im Falle kinematisch aufgenommener Punktwolken könnten das z. B. die Positionen einzelner Passpunkte sein (Barber et al. 2008, Kaartinen et al. 2012, Kukko et al. 2012). Diese Passpunkte können künstliche, in die Örtlichkeit eingebrachte Messmarken sein, aber auch natürliche Objekte, die sich in normalen Einsatzgebieten der Systeme vermehrt finden lassen (z. B. Gebäudeecken, Kanaldeckel, Straßenlaternen, Fahrbahnmarkierungen etc.). Weiterhin können auch gemessene Punktwolken mit Sollpunktwolken direkt verglichen werden, wobei hier die üblichen Schwierigkeiten beim Punktwolkenvergleich auftreten (Holst 2017).

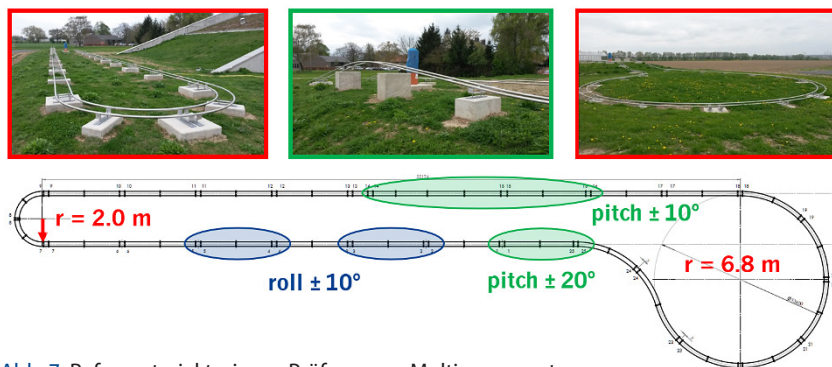


Abb. 7: Referenztrajektorie zur Prüfung von Multisensorsystemen

Alle diese Verfahren haben gemeinsam, dass Rückschlüsse auf die Ursache der Abweichung sehr schwierig sind. Es ist daher erstrebenswert eine Testumgebung zu haben, in der zum einen verschiedenen Objekte so angeordnet sind, dass ihre Beobachtung Rückschlüsse auf die Ursache von Abweichungen ermöglicht (Rieger et al. 2010, Sternberg und Keller 2013), und zum anderen einzelne Aspekte der Vermessung gesondert evaluiert, z. B. durch die Verwendung einer Referenztrajektorie. Ein solches Testfeld ist am Institut für Geodäsie und Geo-information der Universität Bonn schon größtenteils realisiert worden. Neben dem bereits in Abb. 6 gezeigten Kalibrierfeld enthält es weitere große und kleine Testobjekte, sowie eine Schienenbahn, durch die das Multisensorsystem auf einer Referenztrajektorie bewegt werden kann (Abb. 7). Die Bahn ist so konstruiert, dass sie neben der Positionsänderung alle Freiheitsgrade der Rotation einzeln variiert. Auf diese Weise ist eine Evaluierung der Trajektorienbestimmung möglich. Automatisierte Prüf- und Analyseverfahren befinden sich zurzeit in der Entwicklung.

6 Zusammenfassung

Mobile Multisensorsysteme zur zeiteffizienten Vermessung großflächiger Umgebungen haben sich in den letzten Jahren mehr und mehr etabliert. Häufig werden dabei schnelle hochgenaue Laserscanner, sowie hochpreisige Inertialsensorsysteme eingesetzt. Die Verfahren zur Trajektorienschätzung sind dabei prinzipiell bekannt, so dass im Falle eines gut kalibrierten Systems im Postprocessing Genauigkeit im Bereich weniger Zentimeter erreicht werden können. Es gibt jedoch noch einige Bereiche, in denen Forschungsbedarf besteht:

- Rigorose Qualitätsanalyse der Ergebnisse, im besten Fall Bestimmung der vollen Kovarianzmatrix,
- Verbesserung der Trajektorienbestimmung unter schlechten GNSS-Bedingungen, insbesondere im Hinblick auf Mehrwegeeffekte,
- Einsatz von Low-Cost Sensorik, sowohl für die Trajektorienbestimmung als auch für die Objektraumbeobachtung,
- Echtzeitvermessung, insbesondere in Verbindung mit mobilen Robotern.

Literatur

- Barber, D.; Mills, J.; Smith-Voysey, S. (2008): Geometric validation of a ground-based mobile laserscanning system. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 63, 128–141.
- Eling, C.; Klingbeil, L.; Kuhlmann, H. (2015): Real-Time Single-Frequency GPS/MEMS-IMU Attitude Determination of Lightweight UAVs. Sensors 2015, 15, 26212–26235. www.mdpi.com/1424-8220/15/10/26212.
- Geiger, A.; Moosmann, F.; Car, Ö.; Schuster, B. (2012): Automatic Camera and Range Sensor Calibration using a single Shot. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 3936–3943.
- Gong, X.; Lin, Y.; Liu, J. (2013): 3D LIDAR-Camera Extrinsic Calibration Using an Arbitrary Trihedron. Sensors 13 (2), 1902–1918.
- Hartmann, J.; Paffenholz, J.-A.; Strübing, T.; Neumann, I. (2017): Determination of Position and Orientation of LiDAR Sensors on Multisensor Platforms. In: Journal of Surveying Engineering 2017 (04017012), 1–11.
- Heinz, E.; Eling, C.; Wieland, M.; Klingbeil, L.; Kuhlmann, H. (2015): Development, Calibration and Evaluation of a Portable and Direct Georeferenced Laser Scanning System for Kinematic 3D Mapping. In: Journal of Applied Geodesy, 9 (4), 227.
- Heinz, E.; Eling, C.; Wieland, M.; Klingbeil, L.; Kuhlmann, H. (2017): Analysis of Different Reference Plane Setups for the Calibration of a Mobile Laser Scanning System. In: Lienhart, W. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 17, Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, Austria, 131–146, Wichmann Verlag.
- Holst, C.; Klingbeil, L.; Esser, F.; Kuhlmann, H. (2017): Using point cloud comparisons for revealing deformations of natural and artificial objects. 7th International Conference on Engineering Surveying (INGEO), 18–20 October 2017, Lisbon, Portugal.

- Kaartinen, H.; Hyypä, J.; Kukko, A.; Jaakkola, A. und Hyypä, H. (2012): Benchmarking the Performance of Mobile Laser Scanning Systems Using a Permanent Test Field. *Sensors* 12 (12), 12814–12835.
- Keller, F. (2015): Entwicklung eines forschungsorientierten Multi-Sensor-Systems zum kinematischen Laserscanning innerhalb von Gebäuden. Ph.D. thesis, HafenCity Universität Hamburg, Arbeitsgebiet Ingenieurgeodäsie und geodätische Messtechnik.
- Keller, F.; Sternberg, H. (2013): Multi-Sensor Platform for Indoor Mobile Mapping: System Calibration and Using a Total Station for Indoor Applications. In: *Remote Sensing* 5 (11), 5805–5824.
- Klingbeil, L.; Eling, C.; Heinz, E.; Wieland, M.; Kuhlmann, H. (2017): Direct Georeferencing for Portable Mapping Systems: In the Air and on the Ground. In: *Journal of Surveying Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 2017, 143, 04017010. DOI: [10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000229](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000229).
- Klingbeil, L.; Nieuwenhuisen, M.; Schneider, J.; Eling, C.; Droschel, D.; Holz, D.; Läbe, T.; Förstner, W.; Behnke, S.; Kuhlmann, H. (2014): Towards Autonomous Navigation of an UAV-based Mobile Mapping System. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Machine Control & Guidance*, 2014, 136–147.
- Kraus, K. (2004): *Photogrammetrie, Bd. 1 – Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. 7 edn. Walter de Gruyter Verlag.
- Kukko, A.; Kaartinen, H.; Hyypä, J.; Chen, Y. (2012): Multiplatform Mobile Laser Scanning: Usability and Performance. *Sensors* 12 (12), 11712–11733.
- Lichti, D.; Skaloud, J. (2010): Registration and calibration. In: G. Vosselman, Maas, H. G. (eds.): *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing (2010).
- Lu, F.; Milios, E.; Robot (1997): Pose estimation in unknown environments by matching 2d range scans. In: *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 18(3), 249–275.
- Maddern, W.; Harrison, A.; Newman, P. (2012): Lost in Translation (and Rotation): Rapid Extrinsic Calibration for 2D and 3D LIDARs. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 3096–3102.
- Naroditsky, O.; Patterson, A.; Daniilidis, K. (2011): Automatic Alignment of a Camera with a Line Scan LIDAR System. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 3429–3434.
- Rieger, P.; Studnicka, N.; Pfennigbauer, M.; Zach, G. (2010): Bore-sight alignment method for mobile laser scanning systems. In: *Journal of Applied Geodesy* 4 (1), 13–21.
- Scaramuzza, D.; Fraundorfer, F. (2011): Visual odometry: Part i – the first 30 years and fundamentals. *IEEE Robotics*.
- Stachniss, C. (2009): *Robotic Mapping and Exploration*, vol. 55. Springer.
- Strübing, T.; Neumann, I. (2013): Positions- und Orientierungsschätzung von Lidarsensoren auf Multisensorplattformen. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 3/2013, 138. Jg., 210–221.
- Thrun, S.; Burgard, W.; Fox, D. (2005): *Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*. The MIT Press.
- Wendel, J. (2007): *Integrierte Navigationssysteme – Sensordatenfusion, GPS und Inertiale Navigation*. Oldenbourg, München.

- Wirth, H.; Brueggemann, T. (2011): The development of a multiple transducer multibeam echo sounder system for very shallow waters. In: FIG working week “bridging the gap between cultures”.
- Zhang, Q.; Pless, R. (2004): Extrinsic Calibration of a Camera and Laser Range Finder (improves camera calibration). Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2004), 2301–2306.

Kontakt

Dr. rer. nat. Lasse Klingbeil
Institut für Geodäsie und Geoinformation, Universität Bonn
Nussallee 17, 53115 Bonn
klingbeil@igg.uni-bonn.de

Multisensorsystem Totalstation

Gerhard Kleemaier

1 Anwendungsgebiete der Totalstation

Moderne Totalstationen bieten eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten dar. Neben der klassischen Kataster- und Grundstücksvermessung werden diese Instrumente auch für hochgenaue Ingenieursaufgaben, wie zum Beispiel im Monitoring von künstlichen und natürlichen Objekten verwendet (Abb. 1).

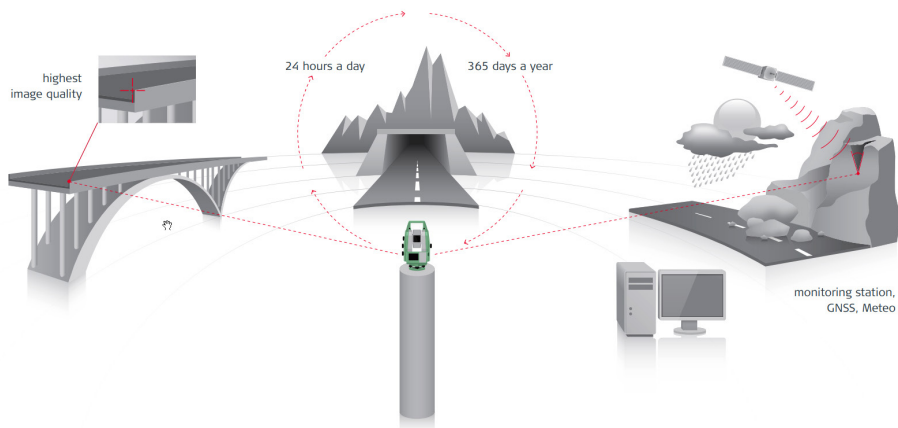


Abb. 1: Monitoring-Applikationen mittels Totalstationen

1.1 Beobachtungsgrößen

Die Totalstation oder MultiStation dient zur hochgenauen Polarpunktbestimmung. Die Realisierung der Polarkoordinaten erfolgt dabei aus Messungen einzelner Beobachtungen in so genannten Subsystemen. Wesentlich sind hierbei die Bestimmung der Winkelwerte (Horizontalrichtung und Vertikalwinkel), Distanz, automatische Zielfindung und -verfolgung, Motorsteuerung, Neigung und der Verarbeitung der Daten (Prozessierung und Ausgabe).

Dieser Auszug zeigt, dass mittlerweile eine Vielzahl von Beobachtungen herangezogen wird, welche in weiterer Folge mittels verschiedener mathematischer Funktionen und Algorithmen miteinander verarbeitet werden, um letztendlich den gesuchten Messpunkt im Raum zu bestimmen.

1.2 Von statischen zu kinematischen Anwendungen

Die klassischen Vermessungsinstrumente wie Totalstationen kamen ursprünglich nur in statischen, quasi-statischen und „Stop & Go“ Verfahren zur Anwendung. Durch die stetig leistungsfähiger werdende Sensorik finden Totalstationen vermehrt aber auch im kinematischen Anwendungsbereich Einzug (Abb. 2).



Abb. 2: Auszug verschiedener kinematischer Anwendungsgebiete einer Totalstation.
(Bild links: Amberg Tamping 2017; Bild Mitte: SCCS 2017)

Solche Messsysteme werden dabei unter anderem in der Maschinensteuerung für Baumaschinen und im Bereich des „Precision Farming“ oder auch bei verschiedenen Spezialanwendungen, wo höchste Genauigkeit von Land-, Wasser- und Luftfahrzeugen gefordert wird, eingesetzt (Stempfhuber 2004).

Durch diese Veränderung der Anwendungsgebiete gewinnt die exakte zeitliche Komponente neben der räumlichen Lage immer mehr an Bedeutung als essenzieller, nicht zu vernachlässigender Parameter um Objekt- und Prozessbewegungen zuverlässig zu beschreiben.

Neben der Veränderung der Charakteristika der beobachteten Objekte, von statischen zu kinematischen Zielen, wandelt sich auch die Verwendung der Messergebnisse der Totalstation. Wurden sie anfangs meist noch als finales Ergebnis betrachtet, werden sie immer häufiger im Verbund mit anderen Messsensoren wie Kameras, Radar, Echolot, etc., als übergeordnetes Steuer- bzw. Navigationselement eingesetzt. Dieser Umstand bedingt auch, dass die Relevanz des zeitlichen Bezugs zur weiteren Verarbeitung unabdingbar ist.

1.3 Problematik der Zeitsynchronisation einzelner Messdaten

Bei der Verwendung von Totalstationen werden dabei in allen Anwendungen einzelne, diskrete Punkte gemessen, welche in weiterer Folge zur Bewegung des Objekts zusammengefasst werden und somit dessen Trajektorie bestimmt werden kann.

Da die Verwendung von Totalstationen früher hauptsächlich für den statischen sowie quasi-statischen Anwendungsfall angedacht war, wirkt sich eine „großzügige“ zeitliche Synchronisation der einzelnen Messdaten in diesen Fällen nicht systematisch auf die Messergebnisse aus.

Wie bereits eingangs erwähnt, liefern verschiedene, zum Teil separat gesteuerte Sensoren unterschiedliche Beobachtungsgrößen (einzelne Subsysteme). Um nun an die benötigten diskreten Messpunkte zu gelangen, müssen diese einzelnen Beobachtungen in weiterer Folge via spezieller Algorithmen miteinander verbunden werden.

Im Falle sich bewegnender Objekte und vor dem Hintergrund der Anforderung akkurater Messungen muss der zeitliche Bezug dieser Messdaten, abhängig von den Bewegungseigenschaften des beobachteten Objekts, ebenfalls in ausreichender Genauigkeit vorliegen.

Die Eigenheit der Messungen stellt dabei die größte Schwierigkeit der exakten Synchronisation dieser dar. Einerseits besitzen viele Sensoren eigene Zeitnehmer, um die grundsätzliche Funktionsweise des Sensors zu gewährleisten. Die Messungen laufen dabei an sich asynchron. Andererseits beanspruchen die einzelnen Sensoren unterschiedliche und darüber hinaus zum Teil veränderliche Zeitspannen, um den benötigten Messwert zu liefern. So hängt die Messdauer der Distanzmessung von folgenden verschiedenen zum Teil nicht beeinflussbaren Faktoren ab:

- Geschwindigkeit und Beschleunigung des beobachteten Objekts
- Geforderte Messgenauigkeit
- Gegenwärtige Umweltbedingungen
- Entfernung Totalstation–Objekt
- Typ des Prismas

Eine exakte Synchronisation der einzelnen Messdaten stellt bei der Verfolgung sich bewegnender Objekte einen Eckpfeiler hinsichtlich der Genauigkeit dar. Findet kein ausreichend genauer zeitlicher Abgleich statt, werden je nach Bewegungseigenschaften des Objekts falsche Messwerte miteinander kombiniert, was in einer fehlerhaften Berechnung der räumlichen Lage des Objekts resultiert (Abb. 3).

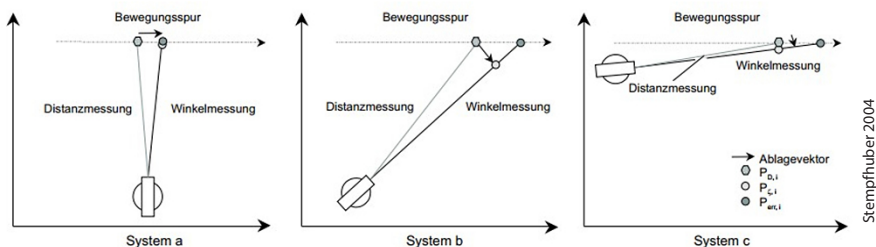


Abb. 3: Auswirkung eines Zeitversatzes bei unterschiedlichen geometrischen Anordnungen

Neben dieser „internen“ Synchronisation der Subsysteme, welche maßgeblich die Genauigkeit der berechneten Bewegungstrajektorie des beobachteten Objekts definiert, stellt sich bei kinematischen Anwendungen der Totalstation auch die Frage der Echtzeit der gelieferten Koordinaten, da die gelieferten Positionen in weiterer Folge oftmals für die Steuerung weiterer Abläufe verwendet werden.

Als Beispiel sei hier die Steuerung eines Graders genannt, welcher auf Basis der aktuellen Messdaten der Totalstation die Schar, also den Schild zur Begradigung des Unterbaus, bewegt. Der Zeitversatz zwischen dem Zeitpunkt, wo eine Messung durchgeführt wird bis zum dem Zeitpunkt wo diese Messung dem Anwender zur Verfügung steht wird im Allgemeinen als Latenz- oder Totzeit bezeichnet. Dieser Zeitversatz wirkt sich zwar nicht direkt auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung aus, stellt aber für den Anspruch eines Echtzeit-Systems einen entscheidenden Faktor dar.

1.4 Auswirkung einer unzureichenden Synchronisation

Wie im vorigen Kapitel erläutert, ist eine zeitliche Synchronisation der einzelnen Messdaten bei Beobachtung eines sich bewegenden Objektes essenziell. Die Anforderungen an eine solche Zeitsynchronisation hängen dabei vor allem von den Bewegungseigenschaften des beobachteten Objektes ab. Prinzipiell gilt, je schneller sich das Objekt bewegt bzw. beschleunigt wird, desto genauer müssen die einzelnen Messdaten zeitlich aufeinander abgestimmt sein.

Betrachtet man eine horizontale Kreisbewegung eines Prismas mit konstanter Geschwindigkeit erscheint die gemessene Trajektorie bei unzureichender zeitlicher Synchronisation der Messdaten als Ellipse (Abb. 4).

Da Winkel und Distanzwerte nicht zur gleichen Zeit vorliegen jedoch zur Berechnung der Position des Reflektors verwendet werden, ergeben sich

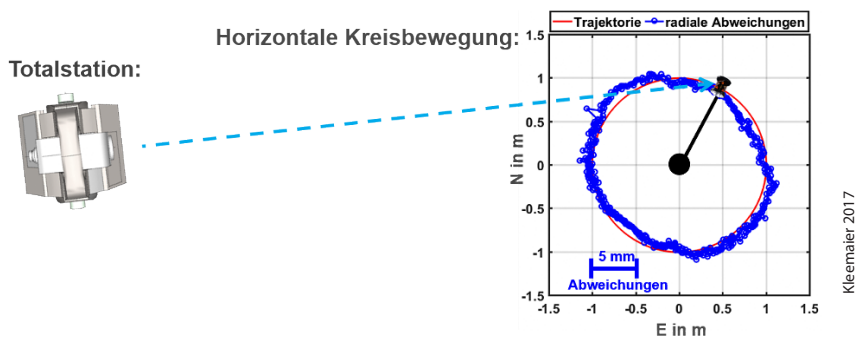


Abb. 4: Überhöhte Darstellung der Auswirkung einer unzureichenden Synchronisation einzelner Messwerte bei einer Kreisbewegung

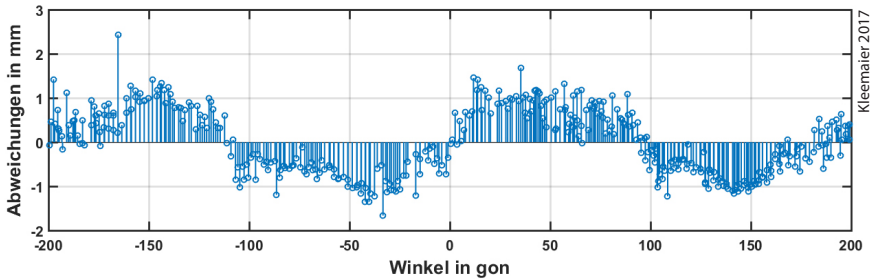


Abb. 5: Radiale Abweichungen der gemessenen Trajektorie gegenüber der Solltrajektorie

systematische radiale Abweichungen von der Solltrajektorie. Diese sind in Abb. 5 dargestellt. Die Größe der Abweichung ist dabei abhängig vom Testsetup sowie von der Genauigkeit der Synchronisation der einzelnen Subsysteme.

Zusätzliche entscheidende Faktoren stellen dabei auch die Messfrequenz und Messdauer der einzelnen Sensoren dar.

Da die gelieferten Positionen der Totalstation oftmals direkt weiterverarbeitet werden und nicht das Endergebnis darstellen, muss auch die Latenz- oder Totzeit des gelieferten Ergebnisses ausreichend klein sein um die Anforderungen des jeweiligen Regelkreises zu erfüllen.

Die Abb. 6 zeigt dabei die Auswirkungen der Latenzzeit. Wie bereits erwähnt, definiert die Latenzzeit in diesem System die Zeitdifferenz zwischen der eigentlichen Messung bis zu dem Zeitpunkt, zu dem die Messwerte bzw. das Messresultat zur Verfügung stehen.

Neben der Eigenschaft der Totalstation bzw. der einzelnen Messsensoren spielt hierbei auch der verwendete Algorithmus der internen Sensorsynchronisation eine Rolle. Zusätzlich kann, je nachdem wie die Systemarchitektur angelegt

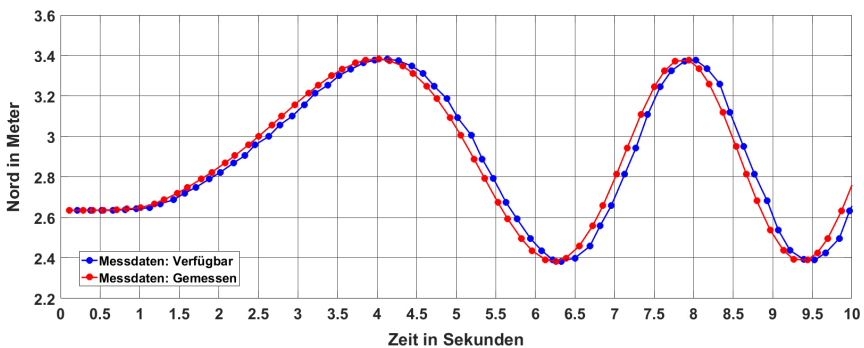


Abb. 6: Darstellung der Latenzzeit als Zeitversatz zwischen der eigentlichen Messung bis die Messdaten zur Verfügung stehen.

ist, die Kommunikation von und zur Totalstation ebenfalls einen signifikanten Einfluss haben. In Abb. 7 werden nochmals die unterschiedlichen Einflussfaktoren bei einer Fernsteuerung einer Totalstation auf die gesamte „Messdauer“, das heißt von Start der Messung bis zu dem Zeitpunkt wo das Ergebnis zur Verfügung steht, dargestellt.

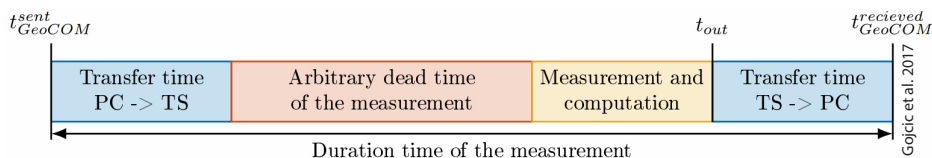


Abb. 7: Schematische Darstellung der Dauer bis ein Messwert verfügbar ist.

Erwähnt sei an dieser Stelle nochmals, dass die Messdauer der einzelnen Sensoren, wie zum Beispiel des Distanzmessers (in Abb. 7 rot gekennzeichnet), variieren kann und nicht konstant sein muss.

2 Sensorsynchronisation bei Leica Totalstationen und MultiStationen

Als Hersteller von Totalstationen und MultiStationen hat Leica Geosystems zwangsläufig auch mit der Problematik der korrekten Synchronisation der Messdaten verschiedener Sensoren sowie der Realisierung der Anforderungen eine Echtzeit-Systems zu tun und steht vor der Aufgabe diese bestmöglich zu lösen.

2.1 Systemarchitektur

Betrachtet man moderne Totalstationen des Herstellers Leica Geosystems so kann die Systemarchitektur vereinfacht auf drei Komponenten aufgeteilt werden. In Abb. 8 sind die drei Hauptkomponenten der Systemarchitektur, Teleskop, Stütze/Sensorboard sowie Anwendungsboard schematisch dargestellt.

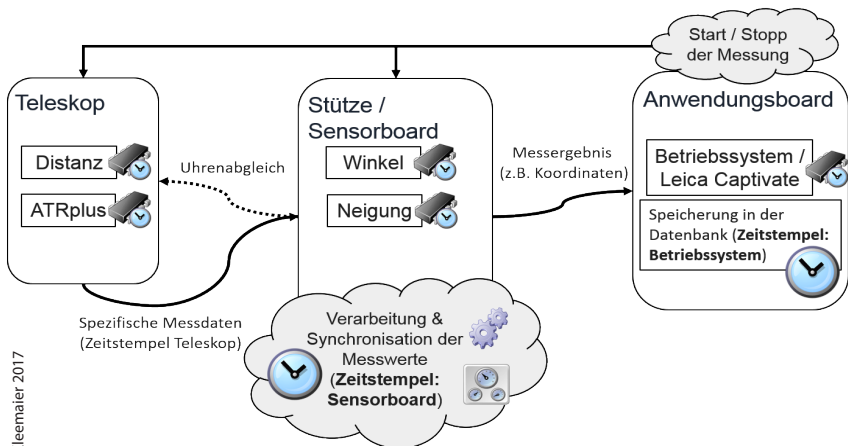
Vereinfacht gesagt werden in diesen drei Komponenten die notwendigen Daten gesammelt, verarbeitet und weitergeleitet bzw. ausgegeben. Neben diesen Teilsystemen sei noch auf weitere Subsysteme wie die Motorregelung verwiesen, welche hier aber nicht näher behandelt wird. Abb. 9 zeigt schematisch die einflussreichsten Subsysteme, welche bei der Polarpunktbestimmung zusammenarbeiten. Während die Initialisierung der Messung sowie die Speicherung der letztendlich berechneten Koordinaten im Applikationsboard stattfindet, werden die Daten der jeweiligen Subsysteme im Sensorboard miteinander verarbeitet und synchronisiert.



Abb. 8:
Schematische Darstellung einzelner Komponenten der Systemarchitektur von Leica Totalstationen

Ein wichtiger und nicht zu vernachlässigender Arbeitsschritt ist auch die Abstimmung der unterschiedlichen Uhren, welche Verwendung finden. Wie bei jedem Multisensorsystem wo mehrere Uhren, welche meist noch unterschiedliche Driftraten aufweisen, verbaut sind, müssen diese noch um eine etwaige unterschiedliche Drift bereinigt werden. Ansonsten würde die Synchronisation der einzelnen Messdaten wiederum einen systematischen Fehler aufweisen.

Mit der letzten Generation der Totalstationen und MultiStationen wurde dabei die Systemarchitektur bzw. im Speziellen die Verarbeitung nochmals überarbeitet und die Synchronisation nochmals näher zu den Sensoren vom Applikationsboard in das Sensorboard verlagert. Das ermöglicht unter anderem die Verwendung der vollen zeitlichen Auflösung (Messfrequenz) der einzelnen



Kleemaier 2017

Abb. 9: Vereinfachte schematische Darstellung des Datenflusses innerhalb einer Leica Totalstation

Sensoren und erlaubt einen engeren Regelkreis der Motorisierung und somit Verfolgung eines Objekts.

Eine vereinfachte Darstellung der Synchronisation von Winkel- und Distanzwert sowie der automatischen Zielerfassung ist in [Abb. 10](#) dargestellt.

2.2 Synchronisation der Messdaten

Prinzipiell besitzt jede Beobachtung einen eigenen Zeitstempel welche vom entsprechenden Subsystem vergeben wird. Jedoch steht neben dem Zeitpunkt der Speicherung des Ergebnisses dem Anwender nur der Zeitpunkt der Synchronisation der Messdaten zur Verfügung. Dabei gilt es zu beachten, dass die beiden Zeitstempel nicht miteinander synchronisiert sind und unterschiedliche Eigen-

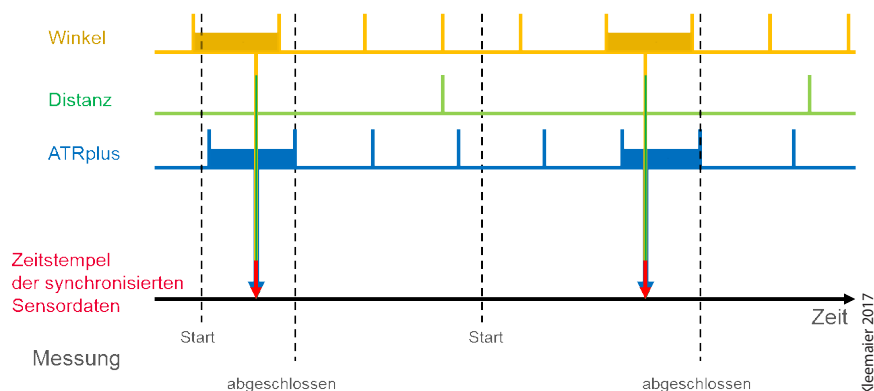


Abb. 10: Schematische Darstellung der Synchronisation einzelner Subsysteme

schaften aufweisen. Während der Zeitpunkt der Speicherung den Zeitgeber vom vorhandenen Betriebssystem verwendet, in diesem Fall Windows EC7, und eine absolute Zeit, inkl. Zeitzonen, mit einer temporalen Auflösung von 1/10 Sekunde darstellt, stellt das Sensorboard einen relativen Zeitpunkt zur Verfügung. Dieser bezieht sich immer auf den Startzeitpunkt der Totalstation und wird in Millisekunden ausgegeben.

In [Abb. 10](#) ist schematisch dargestellt, wie aus den einzelnen „Sensorzeitpunkten“ der Zeitpunkt der Synchronisation der in der Regel asynchron verlaufenden Messungen zustande kommt.

Beim so genannten Tracking, also kontinuierlichen Messung von Winkel- und Distanzwerten zu einem Objekt, liefern die einzelnen Subsysteme durchgehend ihre Messdaten mit maximaler Frequenz an das Sensorboard. In [Abb. 10](#) ist dieser Vorgang über die orange, grüne und blaue Linie Zeitlinie für den Winkelabgriff, Distanzmessung und automatische Zielerfassung dargestellt. Wird nun

eine vollständige Messung angefordert, dargestellt über die schwarz-strichlierten Linien, so „wartet“ die Totalstation bis die nächste gültige Distanzmessung verfügbar ist. Liegt nun ein gültiger Distanzwert vor, wird noch der darauffolgende Winkelwert sowie die dazugehörige ATRplus Ablage abgewartet.

Wie bereits erläutert laufen diese Prozesse asynchron ab. Somit werden alle Messdaten, welche zur weiteren Berechnung verwendet werden, in der Regel zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgezeichnet. Bei Betrachtung eines sich bewegendes Objekts führt dies abhängig von der Geschwindigkeit und Entfernung des beobachteten Objekts zwangsläufig zu Restfehlern des Ergebnisses. Um diese Restabweichungen zu minimieren, werden alle benötigten Messdaten auf den gleichen Zeitpunkt interpoliert. Aufgrund der Tatsache, dass sowohl die Winkelwerte als auch die ATRplus Ablagen mit einer wesentlich höheren Frequenz bestimmt werden können als die Distanzmessung, ist naheliegend, dass der Zeitpunkt der Distanzmessung als Zeitpunkt für die Interpolation der anderen Messdaten herangezogen wird.

Die Interpolation aller benötigten Werte auf einen Zeitpunkt hat den großen Vorteil, dass die Genauigkeit der berechneten Koordinaten des beobachteten Objekts signifikant erhöht werden, wobei ein minimaler Interpolationsfehler, abhängig von der Bewegungscharakteristik auftreten kann. Dieser ist in der Regel aber nicht signifikant. Dem großen Vorteil des Genauigkeitsgewinns steht dabei eine geringere Erhöhung der Latenzzeit gegenüber. Diese Auswirkung ist überhöht in Abb. 11 dargestellt. In dieser Abbildung sind die 2D-Koordinaten eines Prismas, welches sich auf einem rotierenden Arm befindet, dargestellt. Als Referenz für die „wahre“ Trajektorie dient in diesem Fall ein Leica AT960 Absolute Laser Tracker. Verglichen wurde in diesem Fall die gemessene Trajektorie

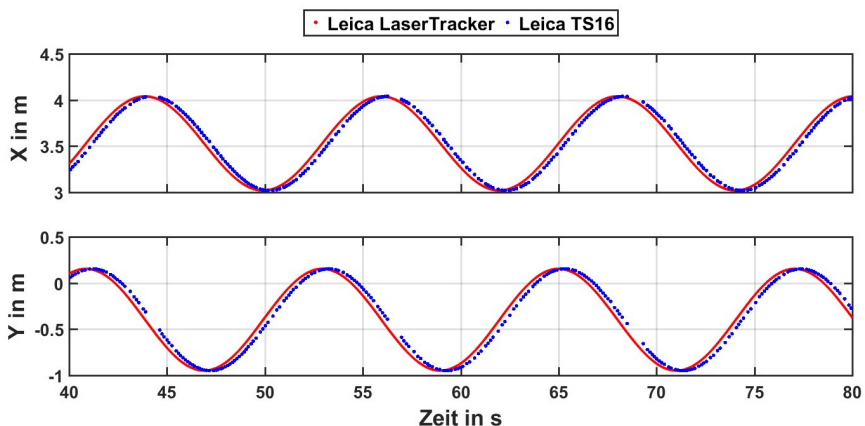


Abb. 11: Darstellung der Auswirkung der Latenzzeit

eines Leica Viva TS16, welcher die Messdaten an einen Computer via Bluetooth übertragen hat.

Zu erkennen ist dabei die Zeitspanne welche benötigt wird, bis der Messwert am Computer verfügbar ist. Zu beachten gilt hier, dass die Funkverbindung zwischen Totalstation und Computer maßgeblich die Verzögerungszeit mitbestimmt. Verzögerungszeiten aufgrund kabelloser Übertragungen können dabei ein Vielfaches gegenüber jener beim kabelgebundenen Übertragen betragen. Grundsätzlich kann man hier von Größenordnungen von 20 ms bis 150 ms sprechen, wobei entsprechenden Umgebungsbedingungen auch diese Werte nochmals erhöhen können.

2.3 Externe Zeitstempel

Wird eine Totalstation nun im Verbund mit weiterer, externer Sensorik wie zum Beispiel Neigungsmessern, Hodometern, GNSS, LIDAR oder anderen Totalstationen verwendet, müssen die von der Totalstation gelieferten Daten entsprechend, vor allem zeitlich, zugeordnet werden.

Dieselbe Problematik, welche sich schon bei der Synchronisation der Messdaten innerhalb der Totalstation entsteht, gilt es natürlich auch hier zu beachten. In einem Verbund mehrerer Sensoren unter Einsatz unterschiedlicher Zeitnehmer muss neben dem zeitlichen Offset auch eine etwaige Drift der Uhren berücksichtigt werden.

2.3.1 Verfügbare Zeitstempel moderner Leica Totalstationen

Moderne Totalstationen von Leica Geosystems bieten hierfür unterschiedliche Möglichkeiten, den Messdaten mit entsprechenden Zeitpunkten zu versehen. Diese bringen je nach Anwendungsgebiet und Anforderung ihre Vor- und Nachteile ein, welche entsprechend abgewogen werden müssen (Kleemaier 2017).

■ Datenstream via GSI-Output

Mittels eines einfachen Terminalprogrammes können gemessenen Punkt direkt in verschiedenen Formaten ausgegeben werden. Dabei gilt zu beachten, dass hier der Zeitpunkt der Speicherung, also des Betriebssystems welches auf der Totalstation läuft, ausgegeben wird. Dieser Zeitpunkt muss nicht zwingend mit dem exakten Messzeitpunkt übereinstimmen, liefert jedoch einen absoluten Zeitwert.

Ebenso gilt bei Anwendung dieser Option, dass nur gespeicherte Punkte ausgegeben werden. Das bedeutet, dass alle Messdaten auf dem internen Speicher der Totalstation liegen und diese via Terminalprogramm mit bis zu 10 Hz ausgelesen werden, sobald sie verfügbar sind.

- **„Request-Response“ Kommunikation via GeoCOM**

Als weitere Möglichkeit Messdaten der Totalstation zu erhalten, bietet Leica Geosystems die Option der Datenabfrage via GeoCOM. Diese Schnittstelle ermöglicht die Abfrage einzelner Messdaten sobald diese verfügbar sind. Die Vorteile dieser Art der Kommunikation liegen in der Variabilität der geforderten Daten, sowie der Möglichkeit den internen Zeitstempel der Synchronisation der Messdaten am Sensorboard zu erhalten. Dabei muss beachtet werden, dass dieser Zeitpunkt, wie bereits im Kap. 2.1 erwähnt, ein relativer Zeitwert, mit Referenz des Startens der Totalstation, darstellt. Zusätzlich können hierbei jedoch auch die Computer (GeoCOM client) Zeitpunkte der Abfrage und der Antwort der Totalstation (GeoCOM server) mitaufgezeichnet und verwendet werden. Neben den verschiedenen Zeitpunkten ermöglicht diese Schnittstelle die Ausgabe verschiedener Messdaten mit bis zu 20 Hz bei bestimmten Totalstationen (z. B. Leica Nova MS60). Die Synchronisation der unterschiedlichen Zeitstempel muss bei Verwendung dieser Option jedoch selbstständig durchgeführt werden.

- **Datenstream via „Measure & Stream“ Applikation**

Diese Applikation ist eigens für das „Streamen“ von Daten und gleichzeitige Interagieren des Nutzers mit der Totalstation entwickelt worden. Dabei können verschiedene Formate und Datensätze individuell ausgewählt und an eine weitere Schnittstelle weitergeleitet werden. Dabei wird einerseits eine Applikation direkt auf der Totalstation und andererseits eine Steuereinheit am Computer (Client) verwendet. Dabei wird automatische der interne Zeitstempel des Sensorboards, Zeitpunkt der Synchronisation der Messdaten, mit jener der Steuereinheit, Computer, durchgeführt und erlaubt daher die sofortige Darstellung des exakten Messzeitpunkts in einer absoluten Zeitskala, welche auch für eine weitere externe Synchronisation mit anderer Sensorik verwendet werden kann. Zu erwähnen ist in diesem Fall jedoch, dass die Aktualisierungsrate bei dieser Variante aktuell mit 5 Hz limitiert ist.

2.4 Fazit

Die Kombination der Charakteristik moderner Totalstationen, dass verschiedenste Sensoren miteinander verbunden werden um das gewünschte Ergebnis zu erzielen, mit der Veränderung der Bewegungseigenschaften der beobachteten Objekte von statischen zu kinematische Anwendung, stellt sich als nicht so trivial heraus. Unterschiedliche Sensorsysteme mit eigenen teils unabhängigen Zeitnehmer müssen, um ein akkurates Ergebnis zu liefern, miteinander in Einklang gebracht werden. Dabei spielt vor allem die zeitliche Komponente eine entscheidende Rolle. Uhrenoffsets und -driftraten müssen dabei ebenso berück-

sichtig werden wie der Umstand, dass einzelne Messdaten nicht zu den exakt identischen Zeitpunkten beobachtet werden können.

Da dieses Multisensorsystem Totalstation nun auch vermehrt Einzug als einzelne Komponente in ein weiteres übergeordnetes Netzwerk von Sensoren findet, ist es essenziell, den gelieferten Zeitpunkt der Totalstation sowie aller anderen verwendeten externen Sensoren zu kennen, um eben diese wiederum akkurat in Einklang zu bringen. Hier bietet Leica Geosystems für ihre Totalstationen und MultiStations verschiedene Möglichkeiten an, um eine externe Synchronisation der gelieferten Messdaten zu liefern, welche abhängig vom Anwendungsgebiet zu wählen ist.

Literatur

- Amberg Tamping (2017): Amberg Tamping – Innovative Vermessungslösungen für den Bahnbau. Broschüre. Amberg Technologies AG, Schweiz.
- Gojcic, Z.; Kalenjuk, S.; Lienhart, W. (2017): Synchronization routine for real-time synchronization of robotic total stations. In: TS4 – Concepts, New Technology and Software Development I, INGENIO 2017 – 7th International Conference on Engineering Surveying, Lisbon, Portugal, 183–191.
- Kleemaier, G. (2017): Totalstationen und die vierte Dimension. Vortrag, VDV-Seminarreihe „Mit der ZEIT gehen – die 4. Dimension“. Fulda-Künzell, Deutschland.
- SCCS (2017): www.sccssurvey.co.uk/surveying-equipment-instruments/hydrographic.html, letzter Zugriff 07/2017.
- Stempfhuber, W. (2004): Ein integritätswahrendes Messsystem für kinematische Anwendungen. Dissertation, Institut für Geodäsie, GIS und Landmanagement, Technische Universität München, Deutschland.

Kontakt

Dipl.-Ing. Gerhard Kleemaier
Leica Geosystems AG
Heinrich-Wild-Strasse, 9435 Heerbrugg, Schweiz
gerhard.kleemaier@leica-geosystems.com

Architectures of GNSS/INS Integrations – Theoretical Approach and Practical Tests

Bernd Eissfeller | Thomas Pany

1 Abstract

Today integrated GNSS/INS systems are used for many applications in navigation and geodesy. Based on the complementary error behaviour of both sensors higher performance levels are possible. But the gain in accuracy, availability, integrity and continuity depends also on the architecture of integration. Following the US view and discussions the possible methods are separated into three different types called “loose and tight”, “ultra-tight” and “deep-coupling”.

After a short introduction the paper deals firstly with the definition and description of GNSS/INS coupling principles. In a more theoretical approach the typical characteristics are mentioned. Furthermore the individual processing algorithms and data flows are presented and compared to each other. In this context also models for the realisation of the deep coupling principle are derived, driven by the correlator signals of the GNSS receiver. In a next step the properties of the different architectures are used to assign the main navigation applications to the mentioned coupling principles.

A simulation tool representing the aiding of INS sensors with GNSS raw data allows investigations about the error behaviour of this kind of integration. Results of different scenarios varying the type of inertial sensor, the satellite constellation and the navigation environment enable a detailed evaluation of the potential application fields.

The more practical part of the paper gives an overview about the different realisations of GNSS/INS integration at the University FAF Munich and presents current results of simulation programs and field tests in static, car and aircraft environments. According to the “loose-coupling” principle at first design and navigation results of a GNSS/IMU attitude system are presented. As an example for high precision positioning a system developed for determination of railway tracks combining differential carrier-phase GNSS, high precision INS and ultra-sonic sensors are discussed. An integration on acceleration level is implemented in an airborne vector gravimetry system using numerous GNSS observations and inertial raw data. Some results of current flight tests give an overview about the expected system performance.

Finally the design and implementation of an “ultra-tightly-coupled” GNSS/INS system is demonstrated. Using simulation algorithms and results of practical tests in a car navigation environment the advantages but also difficulties of this method are highlighted.

A conclusion sums up the possibilities of modern GNSS/INS integration techniques.

2 Introduction

According to its measurement principle INS systems provide an autonomous solution for position, velocity and attitude with high data rate and bandwidth. From this point of view an inertial sensor is the optimal choice for most of the applications in navigation and positioning. Its typical error behaviour, however, causes only a short-term stability of a high accuracy level. In opposite to that the properties of GNSS systems as another possible navigation system are completely different. In this case the user depends on a complex ground and space infrastructure, but the solution is characterized by a long-time error stability and a high accuracy level. Additionally timing requirements can be fulfilled. These are the main reasons for the successful use of integrated GNSS/INS systems in many applications providing a higher performance level in comparison to the stand-alone solutions.

Furthermore for the combination of GNSS and INS measurements the different types of raw data must be taken into account. On one hand GNSS receivers provide code and phase observations or Doppler frequency offsets to all satellites in view. In a next step the user position and velocity can be derived based on the known satellite orbits. On the other hand strap-down inertial sensors measure three dimensional specific forces and angular rates concerning defined sensor axes. Known initial values of position and velocity as well as sophisticated alignment algorithms and gravity field reductions allow a real-time update of position, velocity and attitude by integration of observed accelerations. Thereby error behaviour, type of raw data and required processing steps influence the navigation performance of each sensor, which can be expressed in the categories of accuracy, availability, integrity and continuity. In a coupled system the sensors compensate the disadvantages of each other. A better navigation solution can be provided.

Depending on the application requirements different coupling architectures must be taken into account, emphasizing also different properties of the provided navigation solution. These integration principles are presented in the next chapter.

3 Architectures of GNSS/INS Integration

3.1 Loose and Tight Coupling

Most of GNSS/INS integrations are loosely coupled, giving a great deal of performance in return for simplicity of integration. In this case the sensors themselves are completely independent of each other. Using inertial data beside of initial conditions a so called strap-down computation generates the current INS solution for position, velocity and attitude. Following the positioning approach

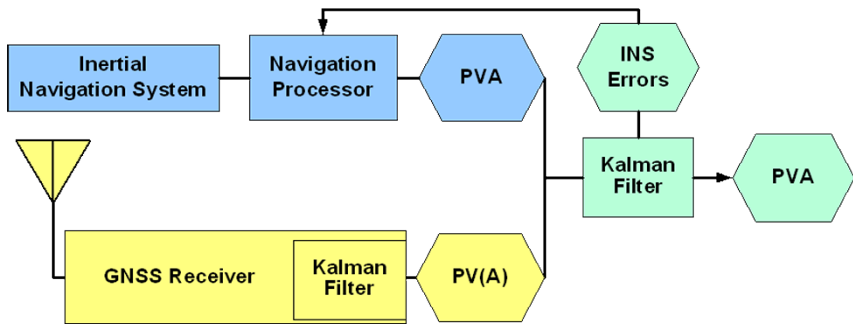


Fig. 1: Loose coupling principle (position approach)

also the GNSS systems provides a navigation result containing position, velocity and time in case of multi-antenna systems also attitude using a Kalman filter algorithm. Both solutions are combined by a second integrated Kalman filter providing on the one hand estimations of integrated navigation solution and on the other hand current error states of the inertial sensor like biases or scale factors. These errors are used in a recursive manner to improve the accuracy of the inertial navigation solution (Fig. 1).

A corresponding error and observation model can be described as:

$$\begin{aligned}
 \dot{\mathbf{x}}_{INS} &= \mathbf{F}_{INS} \mathbf{x}_{INS} + \mathbf{G}_{INS} \boldsymbol{\varepsilon}_{INS} \\
 \mathbf{l} &= \mathbf{L}_{GPS} - \mathbf{L}_{INS} = -\boldsymbol{\delta} \mathbf{L}_{INS} + \boldsymbol{\varepsilon}_{GPS} \\
 \mathbf{l} &= \mathbf{H} \mathbf{x}_{INS} + \boldsymbol{\varepsilon}_{GPS}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Where: $\dot{\mathbf{x}}_{INS}$ state vector containing navigation and sensor errors
 \mathbf{F}_{INS} dynamics matrix
 \mathbf{G}_{INS} noise input matrix
 $\boldsymbol{\varepsilon}$ sensor noise
 \mathbf{l} linear observation vector
 \mathbf{L} vector of navigation results (position, velocity, attitude or P-V-A)
 \mathbf{H} observation matrix

It is straight forward that by integration on P-V level (loose coupling) the observation matrix \mathbf{H} is diagonal and could be a unit matrix, depending on the choice of coordinates. A disadvantage of this method is the cascaded structure of two Kalman filters. Following equation 1 the time-correlations between the GNSS positioning and velocity results have to be taken into account by some method: either the update time interval is made larger as time correlation-time constant or the time-correlations are modelled by coloured noise, which however leads to a bigger state vector. Otherwise the integration processing results in a sub-optimal estimation procedure.

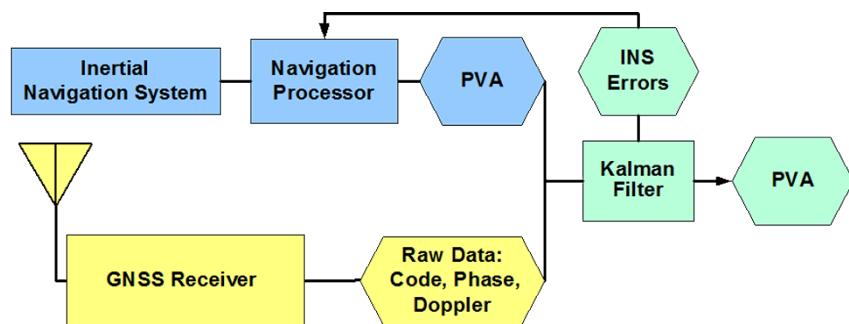


Fig. 2: Tight coupling principle (observation approach)

A second approach is called tight coupling (Fig. 2). This concept is avoiding the de-correlation problem by Kalman filter integration on observation level. Instead of the calculated navigation solution now the observation vector \mathbf{L} is set up by uncorrelated GNSS raw data (pseudoranges, carrier-phases and/or Doppler measurements). The estimation processing is implemented in one centralized filter. Also in this case the general equations (see formula 1) are used. The only difference with respect to P-V up-date is that the \mathbf{H} -matrix is losing diagonal form, but otherwise the integration concept is not changed. Merely on the one hand the state vector must be extended by GNSS clock errors and ambiguity terms and on the other hand the observation matrix must be adapted.

In comparison to a (D)GNSS stand-alone solution the loose and tight coupling architectures increase the accuracy of the navigation system, caused by the opposed error behaviour of both sensors. In this context the inertial sensors act as an active low pass filter for GNSS noise effects. Additionally the availability can be improved, because during GNSS outages the navigation solution is provided by the INS. As both sensors are independent relatively simple procedures are possible to realise the principle. Furthermore a mutual control of navigation results is possible in order to increase the integrity of the combined sensor system. Moreover the implementation of the observation approach (tight coupling)

allows an INS aiding also in situations of less than four available satellites and the INS results can aid the GNSS phase ambiguity determination. In conclusion the loose/tight coupling principle is especially suitable for applications with high accuracy, integrity and data rate requirements using the interpolation capacity of high frequency INS results.

3.2 Ultra-Tight Coupling

The most important goal of the so called ultra-tight coupling integration principle is the improvement of GNSS availability especially in high dynamic environment or in observation conditions with low signal-to-noise ratio by feed-back of inertial data into the tracking loop of the receiver. For that purpose it is necessary to modify the signal processing of the GNSS receiver in a direct way. In order to derive pseudoranges between satellites and receiver replicas of PRN code and carrier frequency plus Doppler off-set must be locally generated and correlated with the incoming satellite signal. The signal generation is provided by a numerical controlled oscillator (NCO). The frequency alignment is controlled in a closed loop configuration. The generic structure of a delay (DLL) or phase lock loop (PLL) for tracking a single satellite is presented in Fig. 3. Only if this control loop is in lock pseudoranges and carrier phases (integrated Doppler) can be obtained. If the tracking loop error $E(p)$ exceeds a defined threshold the receiver channel loses lock. The DLL error σ_{DLL} depends on thermal noise σ_T , oscillator Allan variance σ_A , oscillator vibrations σ_V and the dynamic stress error $e(\infty)$.

Neglecting the oscillator errors a rule of thumb for a lock-in condition concerning a second order delay lock loop tracking the C/A- or Y-code is given in formula 2.

$$\sigma_{DLL} = T_c \sqrt{\frac{B_L}{2C/N_0}} + \frac{\varepsilon(t)}{3} \leq \frac{T_c}{6} \quad (2)$$

$$\varepsilon(\infty) = \frac{\ddot{x}_0}{(1.885B_L)^2}$$

Where: σ_{DLL} total DLL tracking error
 T_c chip spacing (C/A code = 293 m, P(Y) code 29,3 m)
 B_L tracking loop bandwidth
 C/N_0 signal-to-noise ratio
 $\varepsilon(\infty)$ dynamical steady-state tracking error
 x_0 range receiver-satellite

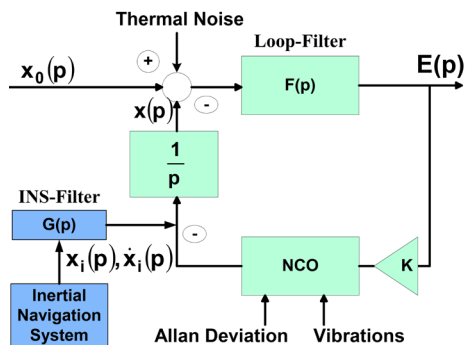


Fig. 3: Aided GNSS tracking loop

ured by an IMU. In a next step this signal is subtracted from the tracking loop. In this case in the formula calculating the dynamical stress error the pseudorange acceleration can be replaced by the INS sensor errors. In simple terms the remaining steady-state error of the loop is no longer dependent on the range-acceleration \ddot{x}_0 itself, but after compensation only on the acceleration error of the IMU, which may be orders of magnitude smaller:

$$\varepsilon(\infty) = \frac{\delta f_{IMU}}{(1.885 B_L)^2} \quad (3)$$

$$\delta f_{IMU} = B + g\alpha(0) + gDt$$

Where: B accelerometer bias
 D gyro drift
 $\alpha(0)$ initial misalignment error

Depending on the performance of the used INS it is possible to decrease the tracking loop bandwidth without exceeding the lock-in condition. Moreover GNSS observations are also available in areas with bad signal-to-noise ratios.

Beside of the tracking loop aiding also the reacquisition time of satellite signal after a complete signal loss can be reduced. The known current velocity of the navigation object can be transformed into expected frequency uncertainties. So only a very small search space on frequency axis can be assumed. In conclusion the ultra-tight coupling principle (Fig. 4) especially fulfils the requirements of high dynamic applications. In comparison to lower coupling levels the anti-jamming capability and availability of the integrated system is improved.

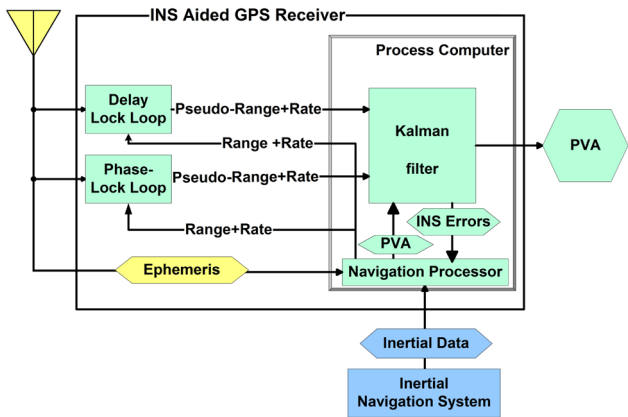
An overview about possible loop and signal parameters that allow stable tracking operation according to equation 2 is presented in Tab. 1. Development

The influence of thermal noise can only be reduced by a smaller tracking loop bandwidth. Using an unaided GNSS receiver this variation, however, causes an increase of the dynamical stress error. The same effect can be observed by investigating the behaviour of a carrier-phase tracking loop.

Following the principle of ultra-tight coupling the acceleration of the pseudorange is measured

Tab. 1: P(Y)-code tracking loop performance using inertial aiding

System design	INS category (drift, bias)	Effective g [m/s ²]	Bandwidth B_L [Hz]	Min. C/N_0 [dB-Hz]
DLL unaided	N/A	90	2.0	20
DLL + MEMS INS	10 °/h, 1 mg	0.4	0.2	7.3
DLL+ FOG INS	1 °/h, 0.1 mg	0.04	0.06	2.3
DLL+ RLG INS	0.01 °/h, 0.01 mg	0.004	0.02	-2.6


Fig. 4:
Ultra-tight coupling
principle

history has shown that ultra-tight coupling in real world is not as efficient as it was expected: There is always a lever arm between antenna and IMU causing differences in applied acceleration fields. Closing the loop bandwidth implies a higher performance oscillator.

3.3 Deep Coupling

The deep coupling principle represents the highest level of GNSS/INS integration. In this case the integration filter is one element of the tracking loop itself replacing the passive loop filter (Fig. 5). Using data provided by the inertial navigation system it calculates on the one hand the integrated navigation solution on the other hand it controls the update of the oscillator and the tracking loop. The observation updates are based directly on the detector signals I, Q generated by the correlation process between incoming and replicated signal. These updates are carried out with the typical frequency of the tracking loop processing between 50 and 200 Hz, whereas the dynamic error models are computed with 100 to 200 Hz. Caused by the very short prediction time of

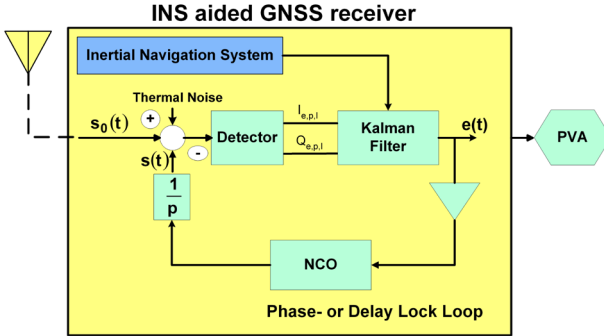


Fig. 5:
Deep coupling principle

max. 20 msec (pre-detection integration time interval) also low performance inertial sensors can be used in this architecture.

The basic approach in deep coupling will be outlined in the following. We start the considerations with the non-linear GPS signal models which are available at the output of the autocorrelation process:

$$\begin{aligned}
 I_k &= \frac{S}{N} D_k \frac{\sin(\pi \Delta f_k T)}{(\pi \Delta f_k T)} R(\Delta \tau_k) \cos(\Delta \varphi_k) + \eta_k \\
 Q_k &= \frac{S}{N} D_k \frac{\sin(\pi \Delta f_k T)}{(\pi \Delta f_k T)} R(\Delta \tau_k) \sin(\Delta \varphi_k) + \xi_k \\
 \frac{S}{N} &= \sqrt{\frac{C}{N_0 B_L}} \quad R(\Delta \tau) = 1 - \frac{|\Delta \tau|}{T_c}
 \end{aligned} \tag{4}$$

Where: I, Q in-phase, quadra-phase signal component
 S/N signal-to-noise ratio
 C/N_0 carrier-to-noise ratio in 1 Hz bandwidth
 B_L single-sided noise bandwidth of the tracking loop
 D_k navigation data bit
 $R(\Delta \tau_k)$ autocorrelation function des C/A or P(Y)-codes
 T_c chip-length of the code-chip
 Δf_k frequency error
 $\Delta \tau_k$ synchronization (range error) error
 $\Delta \varphi_k$ carrier-phase error
 η_k, ξ_k noise components (AWGN), $E\{\eta_k\} = E\{\xi_k\} = 0$, $E\{\eta_{k2}\} = E\{\xi_{k2}\} = 1$
 T coherent integration time interval ($T = 0.020$ s, typically)
 k discrete time

The signal expressions are highly non-linear, which leads in some implementations to the application of the Extended Kalman filter. Alternatively, a linearization is possible by linearization at an operation point or by applying additional mathematical functions on the signals in order to remove some non-linearities (conventional detectors). The next step is then to relate the I- and Q-components to the position and velocity error states:

$$\begin{aligned}\Delta\tau_k &\cong \frac{\partial\tau_k}{\partial x_k}\Delta x_k + \frac{\partial\tau_k}{\partial y_k}\Delta y_k + \frac{\partial\tau_k}{\partial z_k}\Delta z_k + \Delta C_k \\ \Delta\theta_k &\cong \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\partial\tau_k}{\partial x_k}\Delta x_k + \frac{\partial\tau_k}{\partial y_k}\Delta y_k + \frac{\partial\tau_k}{\partial z_k}\Delta z_k + B_k + \Delta C_k \right) \\ \Delta f_k &\cong -\frac{f}{c} \left(\frac{\partial\dot{\tau}_k}{\partial x_k}\Delta x_k + \frac{\partial\dot{\tau}_k}{\partial y_k}\Delta y_k + \frac{\partial\dot{\tau}_k}{\partial z_k}\Delta z_k + \frac{\partial\dot{\tau}_k}{\partial \dot{x}_k}\Delta \dot{x}_k + \frac{\partial\dot{\tau}_k}{\partial \dot{y}_k}\Delta \dot{y}_k + \frac{\partial\dot{\tau}_k}{\partial \dot{z}_k}\Delta \dot{z}_k + \Delta \dot{C}_k \right)\end{aligned}\quad (5)$$

This means from each tracked satellite we get in minimum a pair of I- and Q-observations, which contain information about the position, velocity, clock and carrier ambiguity states. These observations are then combined with a dynamic error model of the IMU error states. In a linear or non-linear Kalman filter formulation the unknowns are estimated. Thus, all tracking loops are processed in a parallel unified process. Based on the estimated unknowns the tracking loop corrections Δf_k , $\Delta\tau_k$, $\Delta\phi_k$ are re-computed and are applied to the current operation points of the correlators, with the effect of improved time and frequency synchronization between the received signal and the local replicas. The main advantages are that each tracking loop of the receiver is not independent any longer (Vector Delay Lock Loop) on a single satellite as it is the case of a conventional receiver. Even in the case of small S/N-ratio, e.g. by jamming or interference, for a specific satellite feed-back or steering command values for the loop can still be generated and the loop doesn't loose lock very early. Deep coupling can be considered as real signal aiding. The improvement in anti-jam is more as 10 dB with respect to ultra-tight coupling, but is very difficult to assess.

4 Simulation of aided Inertial Navigation

The presented tool simulates an INS tightly coupled with GNSS range and range rate measurements. INS specification parameters (Tab. 2), satellite orbit information, GNSS antenna patterns and the user trajectory are read from simple ASCII-files. Based on this information, navigation and sensor errors are estimated in a Kalman filter as described in the following.

Tab. 2: Simulated INS errors

Parameter	Value, (Correlation time)
Random-Walk Gyro	$0.0015^\circ / \sqrt{h}$
Accelerometer noise	5 μg , (Kalman cycle)
Gyro drift	0.003 o/h, 3600 s
Gyro scale factor	0.2 ppm, 3600 s
Accelerometer bias	25 μg , 3600 s
Accelerometer scale factor	120 ppm, 3600 s

Based on the latitude of the user, a fine alignment is simulated, using typical coarse alignment angles of the specific INS. With the achieved angles and their accuracy the navigation starts. Height stabilization is done by implementation of a conventional baro-inertial loop.

The basic element of the Kalman filter is the standard Schmidt dynamics matrix. This matrix is extended to estimate instrument errors and furthermore GNSS clock errors. The according state-vector contains 24 elements. To control instrument noise a sensor noise vector and its spectral density matrix with sensor-typical values are set up along with a noise input matrix, which maps the sensor noise to values in the state vector and its covariance matrix.

Without GNSS updates the Kalman filter only predicts the navigation errors. An example is given in Fig. 6. Effects of Schuler- and Foucault-frequency as well as the earth rotation rate can be verified.

If GNSS data is available the filter performs an update. In this case the observation vector contains differences in ranges and range rates based on GNSS measurements and current navigation parameters. The GNSS observations are obtained by simulating a dual frequency receiver using standard error models for tropospheric and ionospheric influences on the signal, satellite orbits and tracking loop noise. For each observation a standard deviation is estimated.

Simulations were performed with performance parameters of an LN-100 and an LN-200. The results of the static user without GPS aiding show characteristics and limitations of the used INS. Fig. 7 presents the propagation of the latitude

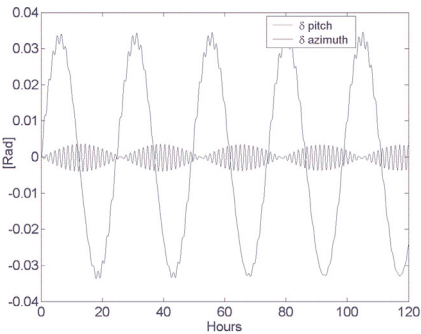


Fig. 6: Effects of a fixed gyro bias (1°/h)

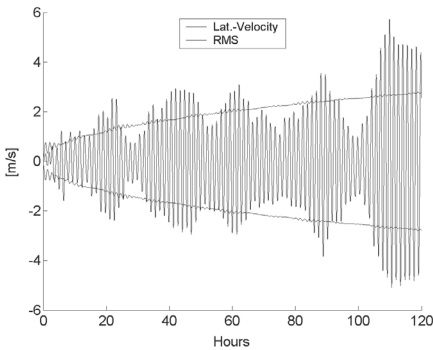


Fig. 7: Latitude velocity (free-running INS)

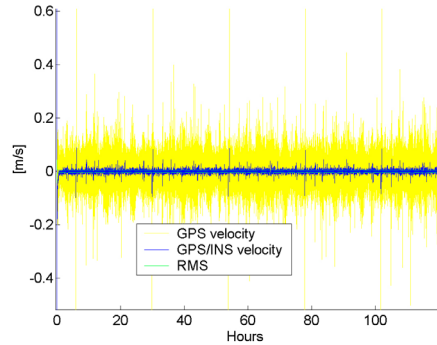


Fig. 8: Integrated latitude velocity

velocity error of the simulated LN-100 INS. The error is oscillating within its RMS band. In Fig. 8 the long-term stability of the corresponding GNSS error is demonstrated. Using the integrated system the accuracy can be increased to the level of 1 cm/s.

Various simulations were carried out using different dynamical conditions (e.g. static user, car and aircraft environment). Especially the improved observability of INS sensor error in case of high dynamics must be pointed out. This behaviour is confirmed in Fig. 9 and Fig. 10 representing the estimation of accelerometer errors. During high dynamic aircraft manoeuvres the RMS error is reduced significantly.

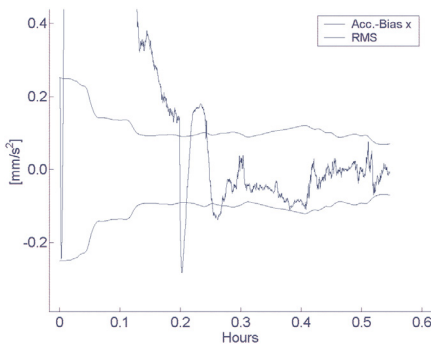


Fig. 9: Accelerometer bias (dynamic case)

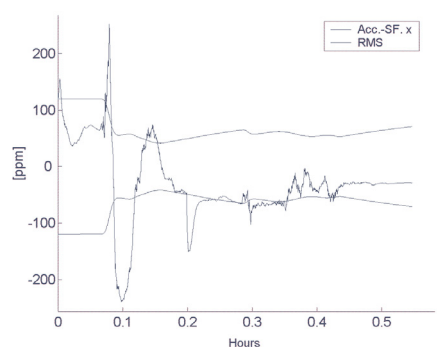


Fig. 10: Accelerometer scale factor (dynamic case)

5 Practical Implementations

5.1 Attitude Determination

Using multi-antenna systems GNSS provides also attitude solutions based on the interferometric principle. The accuracy depends on the baseline length between reference and rover antennas. If an application allows only short baseline lengths GNSS errors like receiver noise and multipath effects degrade the accuracy of

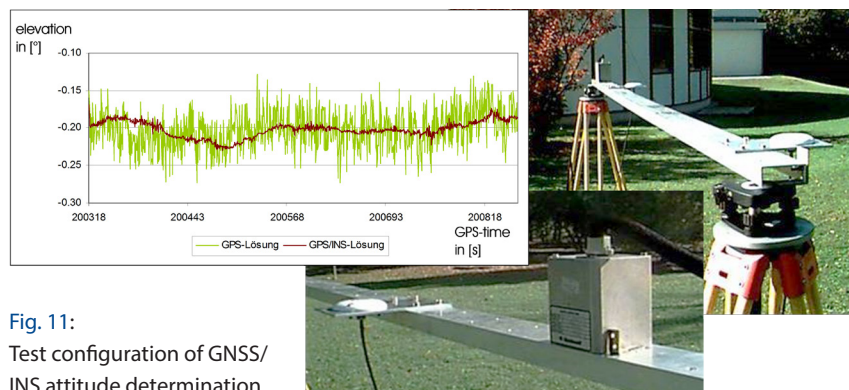


Fig. 11:
Test configuration of GNSS/
INS attitude determination

the attitude solution. Moreover GNSS outages yield in some applications to numerous periods without any navigation result. Another problem is the integrity of the system. Errors in the ambiguity determination after a signal reacquisition cause wrong attitude results. Using GNSS stand-alone systems the user is not able to detect the system instability. In this context some investigations are carried out with a NOVATEL Beeline two-antenna system and a DQI MEMS IMU (gyro drift $20^\circ/\text{h}$) in static and dynamic environments (Fig. 11). Varying satellite constellation, baseline length and observation environment the performance of the loosely coupled system in comparison to the GNSS results is evaluated.

As presented in the graph of Fig. 11 the total effects of receiver noise are nearly eliminated in the integrated result for azimuth and elevation. Also the influence of multipath effects can be reduced if the filter parameters are adapted to the expected values. With the described category of inertial sensors GNSS outages up to 90 s can be bridged without a significant decrease in accuracy. In Tab. 3 an overview of the investigated attitude performance is presented. It must be emphasized, that a significant improvement is only possible if INS aiding is provided especially in system availability and data rate. Instead of this an increase in available satellites in former times with GLONASS in the future with GALILEO shows only small positive effects.

Tab. 3: Performance of attitude results

	GPS	GPS/ GLONASS	GPS + IMU	GPS/GLONASS + IMU
Accuracy (6 m baseline) σ (azimuth)	0.03°–0.05°	0.03°–0.05°	0.01°–0.03°	0.01°–0.03°
Accuracy (6 m baseline) σ (elevation)	0.05°–0.08°	0.05°–0.08°	0.02°–0.04°	0.02°–0.04°
Availability	+	++	++++	+++++
Data rate	2–10 Hz	2–10 Hz	100 Hz	100 Hz

5.2 High Precision Positioning

An example for a practical implementation of the loose coupling architecture for high precision positioning is the track irregularity measurement system (TIMS) developed in the context of our sensor fusion activities. The system design is based on the integration of differential GPS with an inertial navigation system. The primary task of the system is to acquire high-precision data for post-processing. To determine the higher dynamics of the measurement platform, a precise inertial navigation system (SAGEM, Sigma 30) is used. The INS position is then augmented using carrier phase observations of the differential GPS system to eliminate inertial errors. Surveying of the rail heads is done by use of ultrasonic sensors in two perpendicular directions. The distance between

**Fig. 12: System design for railway measurements**

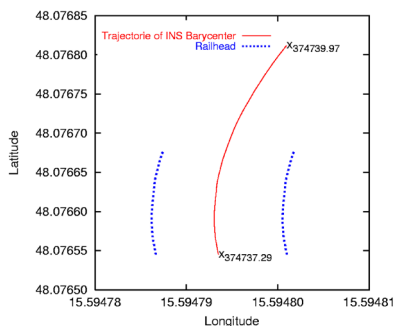


Fig. 13: Observation results

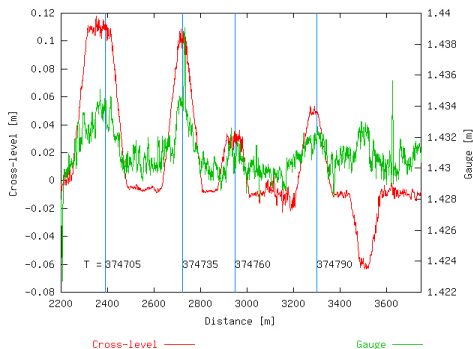


Fig. 14: Derived values for railway applications

platform and rail heads is measured in horizontal and vertical directions. Considering attitude and position of the platform determined by the position system and known lever arms between all system components, the absolute position of both railheads can be derived. Pictures of the system design are given in Fig. 12.

Based on computed railhead positions the geometric line characteristics of the investigated track can be derived. Examples are the curvature, the cross-level, defined as the vertical height difference between left and right track and the distance between both tracks called gauge. In the scope of this project practical test were carried out on a test track of 20 km in Austria in cooperation with the Austrian railway company ÖBB. Considering a train speed of 30 km/h a position resolution of 20 cm is feasible. The following graphs show some results of this measurement campaign. In Fig. 13 an example of the continuously derived positions, INS barycentre and railheads, is presented. Fig. 14 demonstrates the changes in gauge and cross-level along the test track. The height difference during curve areas is detected very significant. The synchronous expansion of the gauge can be interpreted as mechanical wear of the track.

In summary the described railway application is a verification of the high accuracy potential of loosely coupled GNSS/INS integrations.

5.3 Airborne Gravimetry

Another application based on GNSS and INS sensors is the airborne gravimetry. In comparison and in extension to satellite based and terrestrial methods the principle of airborne vector gravimetry seems to be an optimal solution to determine the significant regional gravity changes. The goal is to provide the full vector of gravity g , respectively of the corresponding gravity anomaly δg , in a navigation coordinate system (n-frame) (Fig. 15). According to the require-

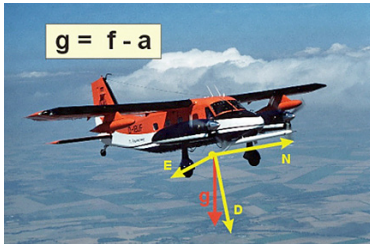


Fig. 15: Principle of airborne gravimetry

ments of most applications an accuracy of 10^{-5} m/s^2 with a spatial resolution between 1 km and 100 km should be achieved.

The fundamental equation of airborne gravimetry is Newton's second law of motion. In an inertial coordinate frame the kinematical acceleration \mathbf{a} (= second time derivative of the position \mathbf{x}) can be computed by the sum of specific force \mathbf{f} and gravity \mathbf{g} .

In a strap-down INS approach the specific forces \mathbf{f} are provided by an accelerometer and a gyro triad permanently fixed to the body of the aircraft. In order to calculate the kinematical acceleration \mathbf{a} of the aircraft GNSS observations in a DGPS configuration are used. The general processing structure of airborne gravimetry is presented in Fig. 16. First a separate pre-processing is carried out with transformation and low-pass filter operations to reduce the noise effects of both sensors. In opposite to navigation applications here the integration of both data streams is done using a Kalman filter on acceleration level. Both the INS errors and the gravity signal are estimated during the filtering process. For that purpose it is necessary, that they can be splitted in the frequency domain. The required category of error stability is only provided by high-precision INS. Furthermore by post-processing algorithms the separation of time-dependent INS errors and space-dependent gravity signal can be completed

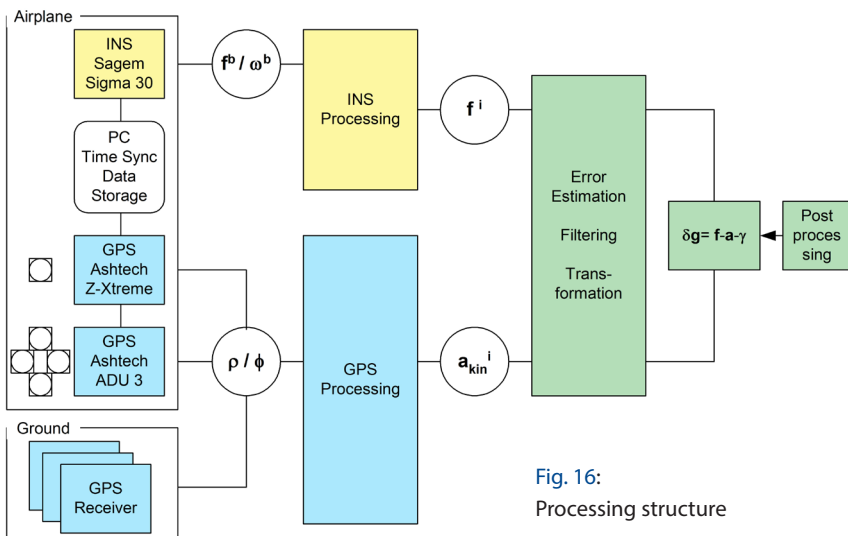


Fig. 16:
Processing structure

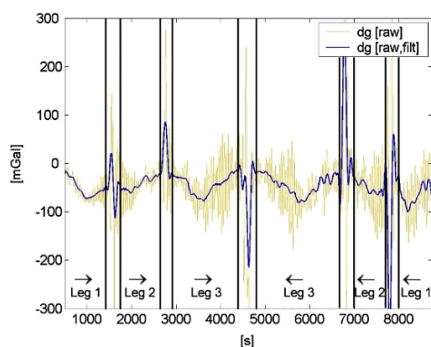


Fig. 17: Results of Airborne Gravimetry Flight Tests (DO 128-6, Magdeburg, 2004)

backward direction is shown in the Fig. 17. The significant correlation between identical legs can already be seen without estimation of INS errors. In this application the abnormal gravity field is the main point of interest. For navigation purposes it is an additional error source.

5.4 Ultra-Tight Coupling Investigations

For the implementation of a practical test system of the ultra-tight coupling principle GNSS receiver and inertial measurement unit have to provide special requirements. Especially the signal processing in the receiver tracking loops between detector and oscillator element must be modified. This includes also an interface of the additional IMU data. Furthermore a ultra-tight coupled system requires real-time data processing, because a time delay of the dynamical information provided by the IMU causes an additional error in the receiver tracking loop. Based on theoretical and numerical simulations the design of our test system is shown in Fig. 18. The inertial sensor is an LN200 IMU with a gyro drift of 1 °/h usable also for aiding of phase tracking loops. The MITEL GNSS receiver card allows the necessary processing modifications by additional software developments. The main parts of the central processing software are the transformation of inertial data into navigation data using a strap-down computation, the estimation of IMU errors using integrated position and velocity observations, the calculation of pseudorange velocity and acceleration and the control of data streams between different sensors.

The practical tests are carried out in a car test environment presented in Fig. 19. Important investigation aspects are the improvement in reacquisition time and in tracking capacity of the receiver control loops. In both cases the be-

using e. g. crossover points in the flight trajectory.

In order to approve the performance of the described airborne gravimetry system practical flight test are carried out with a Do 128-6 aircraft in March 2004 in the middle of Germany near Magdeburg. The average speed was 70 m/s with height over ground of 300 m. The test area has a dimension of 120 to 80 km with a gravity disturbance of 60 mGal ($= 0.0006 \text{ m/s}^2$). The raw gravity signal of a 150 minutes test flight with 3 legs flown in forward and

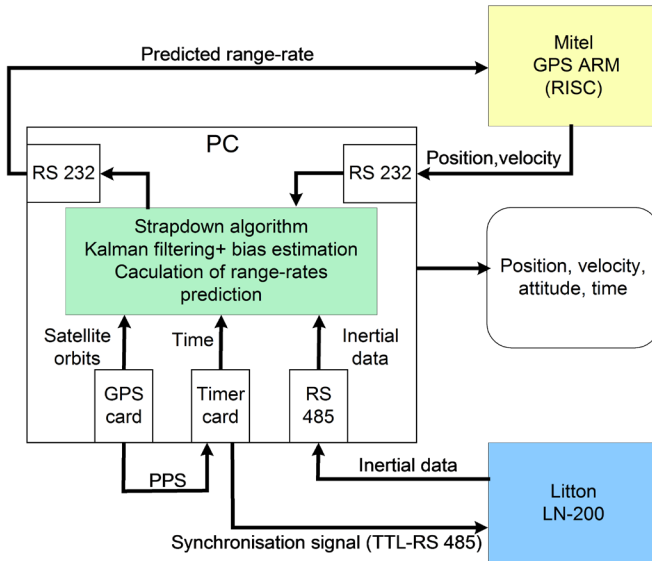


Fig. 18:
System design

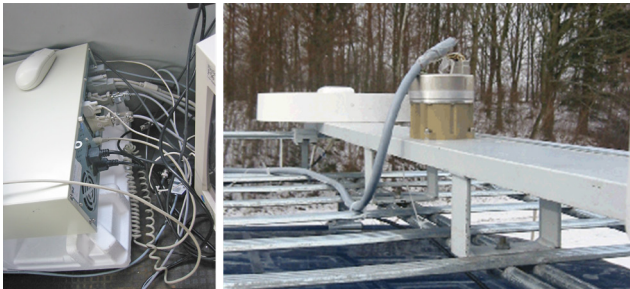


Fig. 19: Practical
Implementation

haviour of an unaided channel is compared with an aided one tracking the same satellite. Fig. 20 shows the difference of acquisition time (1 = Code and Carrier tracked, 2 = Bit synchronized, 3 = Frame synchronized) in regard to satellite 15 with a low elevation angle. A significant decrease of reacquisition time can be detected especially in cases of low signal-to-noise ratio. One criteria of the signal tracking stability is also the ability of the tracking loop to adjust the frequency of the replicated signal to the incoming signal in a dynamical environment. The detected output frequencies during a dynamical test are plotted in Fig. 21 concerning different properties of the used tracking channel. The frequency lock loop with a bandwidth of 1 Hz is able to adjust the signal in perfect way. If this bandwidth is reduced to 0.01 Hz the tracking capacity is nearly lost. Using inertial aiding for the most part the loop stability can be guaranteed also with the

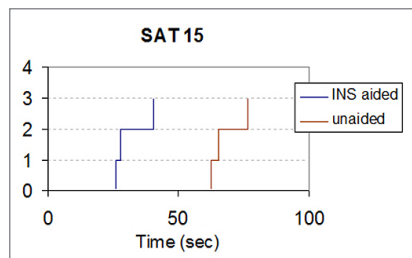


Fig. 20: Recacquisition time

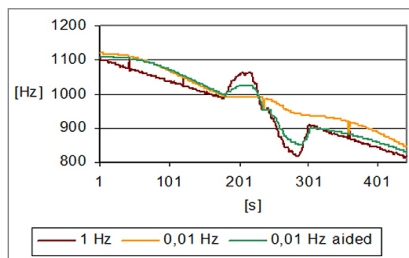


Fig. 21: Tracking loop stability

low bandwidth value. Thereby the increased availability as the main advantage of ultra-tight coupled systems can be verified in practical tests.

6 Conclusion

As shown before the integration of GNSS and INS sensors can be implemented using three different general principles. The gain in performance of the integrated system depends not only on the sensors types but also on the way of coupling. If accuracy or integrity requirements are emphasized the loose coupling must be preferred. If the applications are focused on a high availability, especially in conditions of high dynamics or low signal-to-noise ratios, the ultra-tight or deep coupling should be taken into account. In this case only short time stability must be guaranteed by the inertial sensor. So primarily low-cost units based on MEMS technology can provide the inertial data. But the full performance gain of the more sophisticated integration principles is only reachable if also the GNSS receiver is adapted to the new system design, e. g. instead of the thermal noise now the oscillator stability is the most important criteria for tracking loop stability. Also the change from scalar to vector tracking loops following the deep coupling principle must be mentioned in this context. Finally the described practical test systems approve that the integration with inertial data expand the possible applications of GNSS systems. Positioning and navigations tasks become more accurate and efficient.

References

- Abbot, A.; Lillo, W.; Douglas, R. (2000): Ultra-Tight GPS/IMU Coupling Method. ION Technical Meeting, January.
- Cox, D. B. (1980): Integration of GPS with Inertial Navigation Systems, Global Positioning System. Papers Published in Navigation, Vol. 1, Institute of Navigation, Alexandria, VA.

- Gustafson, D.; Dowdle, J.; Flueckiger, K. (2000): A Deeply Integrated Adaptive GPS-Based Navigator with Extended Range Code Tracking. IEEE PLANS.
- Huddle, J. R. (1971): Application of Kalman Filtering Theory to Augmented Inertial Navigation Systems. Strapdown Inertial Systems, Chapter 11, Agard Lecture Series, No. 95, Springfield, VA.
- Kreye, C.; Eissfeller, B.; Lück, T.; Sanroma, D. (2002): Development and Performance Analysis of a Tightly Coupled GNSS/INS-System. Proc. of the 9th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 27–29 May 2002.
- Kreye, C.; Hein, G. W. (2003): GNSS Based Kinematic Acceleration Determination for Airborne Vector Gravimetry – Methods and Results. Proceedings of ION GPS/GNSS 2003, Portland, Oregon, USA.
- Litton, G. (1993): LN-100G Product Description. Document, No. 20714B, Woodland Hills, California.
- Lück, T.; Kreye, C.; Eissfeller, B. (2001): Measurement of Line Characteristics and of Track Irregularities by Means of DGPS and INS. University of Calgary. International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, Banff, Alberta, Canada, June 5–8 2001.
- NAVSTAR GPS Joint Program Office (1998): Guidelines for the Global Positioning System (GPS) Receiver Application Module (GRAM). El Segundo, CA, Internet Version, unclassified.
- Spilker, J. J. (1996): Fundamentals of Signal Tracking Theory. In: Global Positioning System: Theory and Applications, Vol. I. Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 163, AIAA, Washington, DC.

Contact

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Eissfeller | Univ.-Prof. Mag. Dr. habil. Thomas Pany
 Universität der Bundeswehr München
 Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg
bernd.eissfeller@unibw.de | thomas.pany@unibw.de

Session 2:

Anwendungen Teil 1

(Land, Luft, Wasser)

Autonome Unterwasserfahrzeuge und Kommunikationssysteme

Horst Hellbrück | Torsten Teubler | Gunther Ardel

1 Einleitung

Im Verbundprojekt BOSS (Bionic Observation and Survey System) sind im Teilprojekt BOSS COGNET (Cognition und Network) der Fachhochschule Lübeck Lösungen für neuartige intelligente autonome Systeme geschaffen worden, die aus einem Verbund von bionischen Unterwasserfahrzeugen bestehen. Das Projekt BOSS als Verbundprojekt mit EvoLogics GmbH als Projektkoordinator, Sea & Sun Technology GmbH und der Fachhochschule Lübeck wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert.

Wesentliche Ziele von BOSS COGNET sind die Entwicklung eines dynamischen, mobilen Unterwasser-Intranets (UW-Intranets) auf Basis von heterogener, flexibler Ad-Hoc-Vernetzung und die Integration dieses UW-Intranets in das Internet. Ein wesentliches, darauf aufbauendes Ziel ist es einen bionischen Schwarmverbund zu befähigen, kooperativ Aufgaben zu lösen. Dieser Schwarmverbund wird im Projekt BOSS durch die EvoLogics GmbH prototypisch durch die Entwicklung von bionischen Unterwasserfahrzeugen umgesetzt. Die entwickelten Fahrzeuge stellen in Anlehnung an die Form und Bionik von Manta-Rochen künstliche Mantas dar, die als schwarmfähige autonome Unterwasserfahrzeuge (AUV, Autonomous Underwater Vehicle) konzipiert wurden.

In dem Artikel stellen wir die Unterwasserfahrzeuge und die Sensorik des Messsystems vor, zeigen die autonomen Steuerungsfunktionen der AUVs und Lösungen für die Kommunikation, sowie Anwendungen der AUVs bzw. des AUV-Verbunds.

2 Unterwasserfahrzeuge und Sensorik

In dem Teilprojekt der FH Lübeck wird ein Unterwasser-Intranet mittels mobiler Ad-Hoc-Vernetzung entwickelt, das mittels Gateway einer Boje oder eines AUVs mit dem Internet verbunden ist. Die Herausforderung der Vernetzung liegt in der Heterogenität der Systeme und in der Integration von drahtloser Unterwasserkommunikation im Nah- und Fernbereich. In der Unterwasserkommunikation werden für alle typischen Reichweiten Akustikmodems eingesetzt.

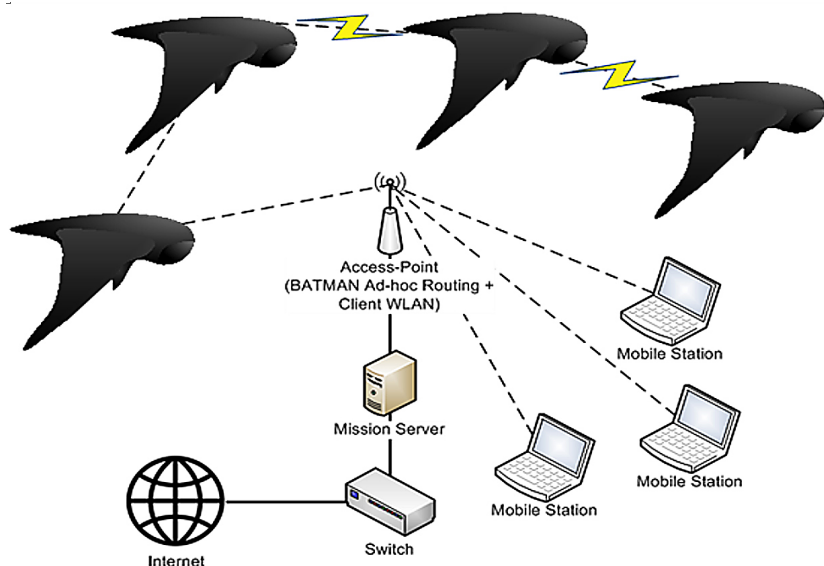


Abb. 1: Konzept des BOSS-Gesamtsystems

EvoLogics hat die Funktionen Command Link und Data Link zur Kommunikation und Ultra Short Baseline (USBL) zur Navigation in Form eines USBL-Modems integriert, das als Basis für Unterwassernetze dient. Mit den Modems lassen sich Ad-Hoc-Netze als Infrastruktur mobiler Systeme zur Kommunikation und Navigation nutzen. Drahtlose Nahfeldkommunikation zwischen Unterwasserfahrzeugen und stationärer Infrastruktur wird mit optischen und elektromagnetischen Modems umgesetzt. Wichtige Elemente der IKT-Technologien sind damit unter Wasser schon vorhanden. Es fehlen jedoch die Verknüpfung und Vernetzung dieser Technologien zu einem mobilen Unterwasser-Intranet, inklusive einer breitbandigen Nahbereichskommunikation als flankierende Technologie (siehe auch Hellbrück et al. 2018).

Die Unterwassersensorik ist meist mit eigenen Datenloggern versehen. Der nächste Schritt sind modular und dynamisch in eine Kommunikationsinfrastruktur integrierbare Systeme. Die Schlüsseltechnologie für Kooperationen im Team oder Schwarm ist daher die Vernetzung der Systeme und die Interaktion mit mobiler und stationärer Infrastruktur. Ziel von BOSS ist es dezentral und flexibel operierende, autarke AUV-Systeme zu schaffen. Existierende Verfahren für Akustik in Unterwasserumgebungen dienen als Basis für die Implementierung des BOSS-Gesamtsystems nach Abb. 1. Diese Verfahren werden in einem systemischen Ansatz zu einem heterogenen Intranet integriert und um eine breitbandige Nahbereich-UW-Kommunikation ergänzt.

Die Schwarmforschung beschränkt sich zurzeit hauptsächlich auf Untersuchungen der Natur und deren Nachbildung in Simulationen. Projekte mit autonomen Landrobotern, die man mit Missionen füttert und die diese selbstorganisierend umsetzen, sind weltweit in der Erforschung. Es gibt bisher noch keine vorgefertigten Lösungen, die man einfach auf die Gegebenheiten übertragen kann. Es gibt theoretische Arbeiten über autonome Unterwasserroboterschwärme, die meist mittels Simulationen evaluiert wurden.

3 Steuerung

Als Basis des mobilen Ad-Hoc-Netzes und der transmedialen Kommunikation wurde die Software DUNE gewählt. DUNE stellt eine für AUVs passende Kommunikationsmöglichkeit zur Verfügung. Dabei werden Nachrichten zwischen den Komponenten ausgetauscht. DUNE ermöglicht eine transparente Kommunikation im und mit dem BOSS-System. DUNE ist dabei sehr flexibel und kann beliebig um eigene Komponenten erweitert werden.

In Abb. 2 ist die Kommunikationsinfrastruktur eines Mantas mit seinen wesentlichen Komponenten gezeigt. Ausgeführt wird DUNE jeweils auf den Steuerungsrechnern Engine-CPU und Payload-CPU. Die Engine-CPU führt die Low-Level-Steuerung des Mantas aus, die Payload-CPU ist für die Aufgaben autonomes Agieren, Sensorfusion, fahrzeugübergreifende Kommunikation und für Daten-Logging zuständig. Die beiden Steuerrechner im Fahrzeug kommunizieren über Ethernet.

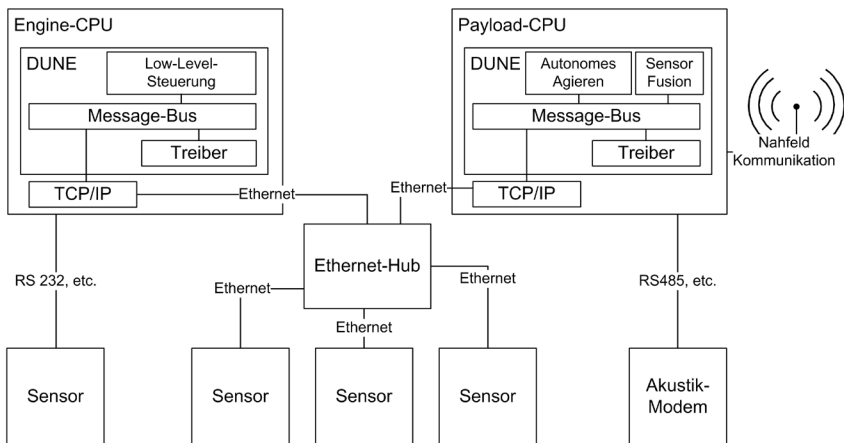


Abb. 2: Komponenten und Kommunikationsinfrastruktur in einem Manta

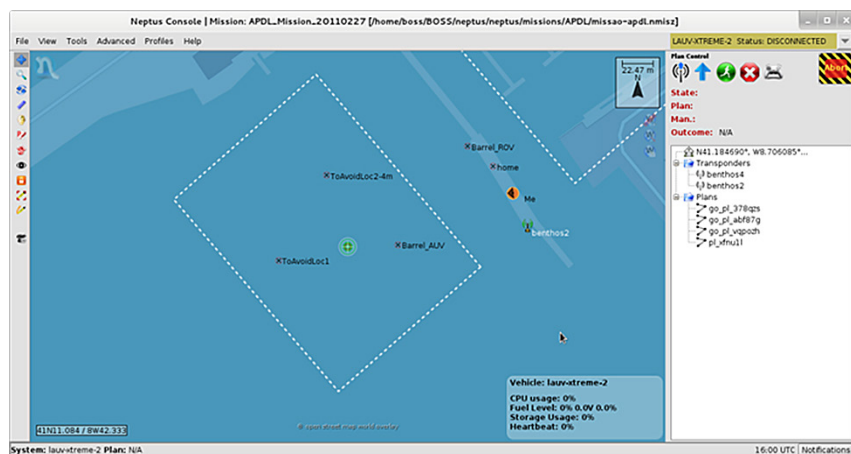


Abb. 3: Neptus-Benutzeroberfläche zur Missionsplanung und Visualisierung

Das autonome Agieren wurde mittels Expertensystem implementiert. Das Expertensystem kommuniziert ebenfalls durch Nachrichtenaustausch mit den Sensoren und Aktoren, um Entscheidungen zu treffen und zu steuern.

Als Benutzeroberfläche für die Missionsplanung und Visualisierung wird die Software Neptus verwendet (Abb. 3). Neptus integriert sich in die Kommunikationsinfrastruktur von DUNE. Ebenso wie DUNE lässt sich auch Neptus durch eigene Komponenten erweitern.

3.1 Expertensystem

Die Entwicklung und Umsetzung des Expertensystems für die Mantas basiert auf zwei Säulen. Erstens wurde die technische Integration des Expertensystems in das Gesamtsystem vollzogen, zweitens wurden Basisfunktionalitäten des Expertensystems mittels Simulationen entwickelt. Die technische Integration beinhaltet vor allem die Kommunikation von DUNE und Neptus mit dem Expertensystem. Das Expertensystem steuert die Mantas, indem Pläne manipuliert werden. Ein Plan im Sinne von DUNE und Neptus ist eine Abfolge von vorgegebenen Manövern. Vorgegebene Pläne werden durch das Fahrzeug ausgeführt. Sollten die Sensoren des Fahrzeugs etwas detektieren, was der Ausführung eines vorgegebenen Plans im Wege steht, so muss der aktuelle Plan gestoppt und automatisch durch einen neuen geeigneten Plan ersetzt werden.

Die Auswahl des Expertensystems erfolgt aufgrund der Anforderungen, die durch die Aufgaben und durch die Hardware vorgegeben sind. Es wurden geeignete Kandidaten von Expertensystemen verglichen, mit dem Ziel, aufgrund der gestellten Anforderungen ein geeignetes Expertensystem zur Realisierung

des autonomen Agierens auszuwählen. Das Expertensystem CLIPS (C Language Integrated Production System) hat dabei geringere Anforderungen an die Hardware als andere Expertensysteme, und es lässt sich einfach in das Gesamtsystem bestehend aus DUNE und Neptus integrieren. Ein weiterer Vorteil von CLIPS ist, dass die Regeln im Expertensystem dynamisch geändert werden können.

Zentrales Element der Implementierung ist das DUNE-CLIPS-Interface nach Teubler et al. (2015). Das DUNE-CLIPS-Interface stellt eine API bereit, um Daten aus DUNE in Form von IMC-Nachrichten (Inter Module Communication) in Fakten für das Expertensystem zu konvertieren. Die Konvertierung von IMC-Nachrichten zu Fakten ist aufwendig und an neue Versionen der IMC-Middleware anzupassen. Derzeit gibt es mehr als 200 IMC-Nachrichtentypen, die im Expertensystem verarbeitet werden könnten. Eine Implementierung der Konvertierung von Hand ist zeitintensiv, fehleranfällig und nicht

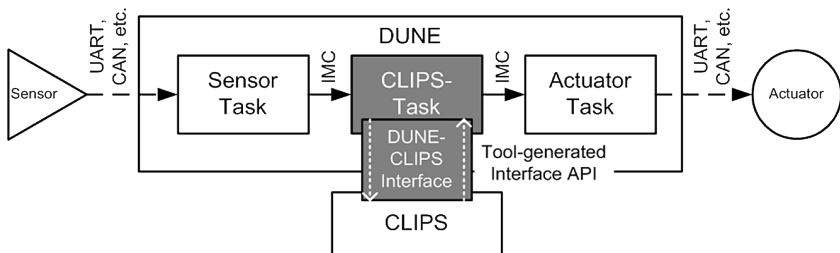


Abb. 4: Architektur und Datenfluss des DUNE-CLIPS-Interfaces

zukunftssicher. Für die Konvertierung wurde deshalb ein Code-Generator geschrieben, der die Implementierung des DUNE-CLIPS-Interfaces vollständig automatisiert. Er konvertiert die IMC-Nachrichten, deren Beschreibungen in einem XML-Format vorliegen, automatisch zu Fakten im Expertensystem.

In Abb. 4 ist die Architektur der Software und des Datenflusses in DUNE und CLIPS über das DUNE-CLIPS-Interface schematisch dargestellt. Abb. 4 zeigt von links nach rechts einen Sensor sowie einen Sensor Task von DUNE, der die Informationen des Sensors über ein Protokoll wie UART oder CAN empfängt. Bei dem Sensor Task handelt es sich um eine Hardwareabstraktion für die Software. Der Sensor Task verschickt eine Nachricht an den CLIPS-Task. Der CLIPS-Task implementiert das DUNE-CLIPS-Interface und leitet die Informationen aus der IMC-Nachricht an CLIPS weiter. CLIPS wendet die Regeln an und erzeugt über das DUNE-CLIPS-Interface eine IMC-Nachricht, die z. B. an einen Aktuator Task weitergegeben wird, der wiederum z. B. einen Thruster-Motor oder ein Ruder steuert. Ein Aktuator Task stellt die Hardwareabstraktion für einen Aktuator dar.

3.2 Modell

Für die Steuerung des Systems ist es essenziell, ein Modell des Systems zu beschreiben und abzubilden. Das Modell beinhaltet nicht nur die mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Systems, sondern auch die Beschreibung des Zustands des Systems, die aus den elektrischen und mechanischen Funktionen abgeleitet werden können. Damit lässt sich z. B. ein Fehlverhalten oder ein Fehler des Systems erkennen.

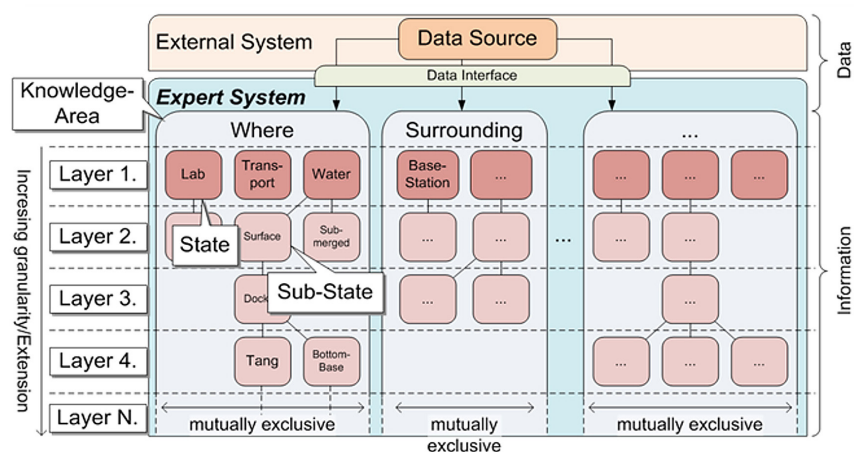


Abb. 5: Konzept des Expertensystems zur Modellbildung

Korrelationen können zur Bewertung der Funktionsfähigkeit des Systems herangezogen werden, wobei zu beachten ist, dass diese sich situativ verändern können. Wenn die Korrelation stabil bleibt, lässt sich z. B. ein defekter Sensor mittels Korrelation erkennen. Diese Korrelationen werden in Regeln für das Expertensystem übersetzt. Die Methodik, um aus den Daten Regeln abzuleiten, basiert auf Association Rule Learning (ARL). Beim ARL werden aus einer Menge von Parametern automatisiert korrelierende Parameter bestimmt. Damit wird das System selbstlernend.

Um ARL umzusetzen wird eine Selbstbeschreibung des Systems Manta benötigt, die eine Ontologie als Basis hat. Eine Ontologie ist ein Graph, die auch das Expertensystem direkt verarbeiten kann. Ontologien werden über Tripel Subjekt, Prädikat, Objekt beschrieben. So ergibt sich ein selbstbeschreibender Graph, den man mit den Regeln, wie sie im Expertensystem verwendet werden, traversieren kann. Die Ontologie stellt die Basis für Anwendungen und Regeln des Expertensystems dar.

Zustände werden in einem Systemmodell in Kategorien oder Bereiche gruppiert. So gibt es z.B. Kategorien für „Was macht das AUV“ und „Wo ist das AUV“. Diese Bereiche repräsentieren das Wissen des AUV. Jeder Kategorie sind Zustände zugeordnet, die durch weitere Unterzustände flexibel erweitert werden können. Unterzustände sind als Verfeinerung von Zuständen zu verstehen. Auch Unterzustände werden während der Weiterentwicklung hinzugefügt. Abb. 5 zeigt das Konzept des Expertensystems. Die Gesamtheit der Zustände bildet dabei ein „Bewusstsein“. DUNE, welches die Sensordaten bereitstellt, kann nach Teubler et al. (2016) als peripheres Nervensystem verstanden werden. Das Systemmodell ist eine wichtige Basis für das robuste autonome Navigieren.

3.3 Simulation

Da die Entwicklung von Algorithmen und Regeln im Prototyp nur sehr spät im Projekt durchgeführt werden können und sehr aufwändig ist, bietet sich ein Simulationsmodell für Simulationen zur Umsetzung der komplexen Funktionalität des Mantas an, wie etwa das autonome Agieren und Navigieren. Die Entwicklung des autonomen Agierens der Mantas ist ein integrativer Prozess, bei dem Regelsätze ständig verbessert und angepasst werden. Diese Entwicklung kann nur zum Teil theoretisch oder mit einer Simulation in DUNE nachvollzogen werden, da realistische Stimuli und Kontextinformationen wie z. B. Sensordaten fehlen. Andererseits ist es auch nicht immer möglich, für diese Entwicklung ein

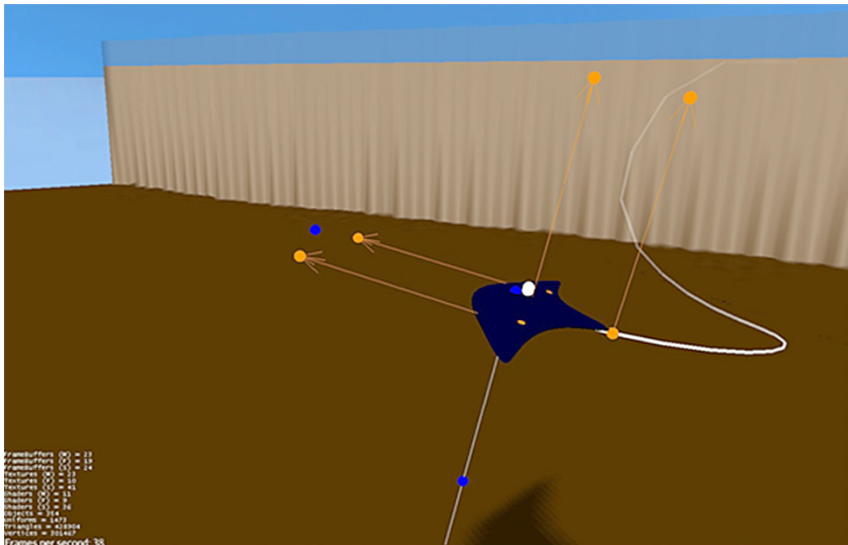


Abb. 6: Simulation eines Mantas in MARS

echtes AUV zu benutzen, da der Einsatz in einer kontrollierbaren Umgebung, wie z. B. einem Bassin, mit hohen Kosten und hohem Aufwand verbunden ist.

Zum Entwickeln und Testen des autonomen Agierens wurde deshalb der Simulator MARS (Marine Robotics Simulator) eingesetzt, der ein ausreichend realistisches physikalisches Verhalten eines AUVs modellieren kann (Abb. 6). Hierzu wurde ein Modell des Mantas in MARS entwickelt. Dieses Modell wurde um physikalische Eigenschaften des echten Mantas erweitert. Bei Simulationen mit MARS werden die Komponenten des autonomen Agierens auf der Zielhardware des Mantas ausgeführt. Die Kommunikation zwischen MARS und der Zielhardware findet ebenfalls über IMC-Nachrichten statt. Hierzu wurde die von DUNE verwendete Middleware IMC in MARS integriert. So können Steuerbefehle an den Simulator gesendet oder Sensordaten vom Simulator zu DUNE geschickt werden.

4 Lösungen für Kommunikationssysteme

Die Fachhochschule Lübeck entwickelte in dem Teilprojekt Prototypen zur breitbandigen Überwasser- und Unterwasserkommunikation im Nahbereich, die anschließend als Kleinserie gefertigt wurden, und entwickelte die Vernetzung der Komponenten zu einem Gesamtsystem.

4.1 Nahfeldkommunikation

Für die Kommunikation zwischen AUVs sowie zwischen AUVs und Infrastruktur wurden akustische Verfahren eingesetzt, sowie eine Nahfeldkommunikation implementiert und erprobt. Es wurden zwei Varianten entwickelt und auf hohe Datenraten optimiert: eine elektrische Variante und ein optisches Verfahren. Die modulare Architektur der umgesetzten Module zeigt Abb. 7. Eine weitergehende Beschreibung des optischen Kommunikationsmoduls findet sich in Ardel et al. (2017) und zur elektrischen Kommunikation in Esemann et al. (2014) und Ardel et al. (2016).

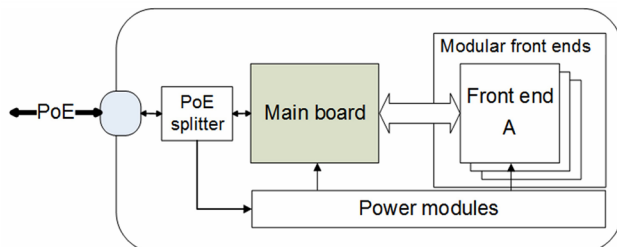


Abb. 7:
Hardwarearchitektur der entwickelten Nahfeldkommunikation

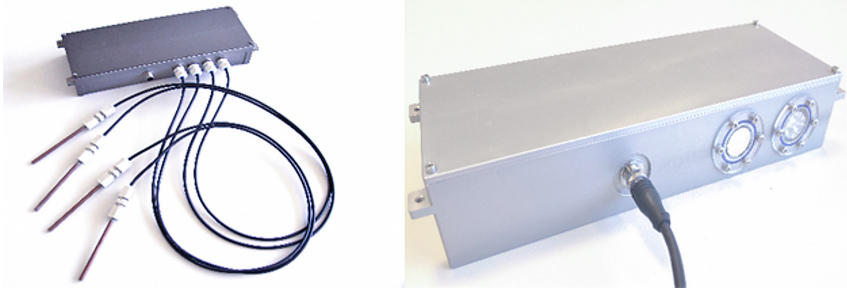


Abb. 8: In Kleinserie gefertigtes elektrisches (links) und optisches (rechts) Kommunikationsmodul

Die elektrische UW-Kommunikation wurde mittels OFDM-Verfahren auf eine Reichweite in der Ostsee von maximal 8 m und auf eine Datenrate von 60 bis 100 kbit/s optimiert. Eine maximale Datenrate von 300 kbit/s wird bis zu einer Distanz von 5 m erreicht. Das in den Manta integrierbare elektrische und optische Kommunikationsmodul zeigt Abb. 8.

Um die Funktion auch im eingebauten Zustand im Manta zu testen, wurden in einem Test die elektromagnetischen Interferenzen gemessen, die der Manta erzeugt. Dazu wurde das elektrische Kommunikationsmodul in einen Manta nach Abb. 9 integriert. Die Testergebnisse zeigten, dass ein erfolgreicher Empfang aufgrund der Eigenstörungen durch die Leistungselektronik und Motoren des empfangenden Mantas so nicht möglich ist, da der Empfangsdynamikbereich der AD-Wandlung übersteuert. Eine Abschirmung der Störungen wird dieses Problem zukünftig beheben, da bei OFDM Frequenzen selektiv je nach Bedarf verwendet werden können.

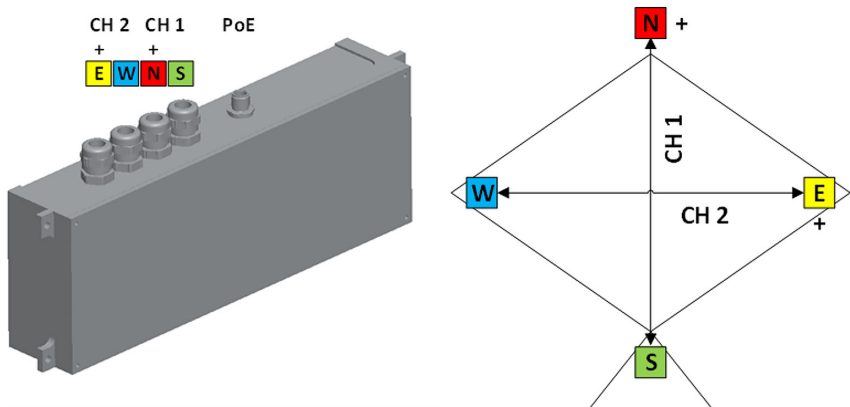


Abb. 9: Schema der Integration eines elektrischen Kommunikationsmoduls in einen Manta

In einem weiteren Versuch wurden Tests zur elektrischen UW-Kommunikation durchgeführt, die die Erprobung des Mantas in Interaktion mit der Dockingstation iLARS (intelligent Launch And Recovery System; siehe auch [Abb. 13](#)) betrafen. Dabei wurde die Kommunikation erfolgreich in der realen Manta-Systemarchitektur getestet. Im Nahbereich der Dockingstation von bis zu 3 m wurden Testdaten zwischen iLARS und sich näherndem Manta mit einer Datenrate von maximal 200 kbit/s und einer Bitfehlerrate von unter 0,1 % unidirektional vom Manta zur Dockingstation gesendet.

Die optische UW-Kommunikation wurde in klarem und trübem Wasser erfolgreich getestet. Ebenso wie die elektrische Variante wurden die optischen UW-Module mit OFDM betrieben. Mit analoger OFDM-Modulation wurde eine Datenrate von 2 Mbit/s bei Distanzen kleiner als 5 m erreicht, und eine Datenrate von 500 kbit/s über eine Distanz von 15 m, bei moderaten Tageslichtverhältnissen bzw. ausgeleuchtetem Wasserbecken. In der trüben Ostsee sind über eine Distanz von 6 m unter guter Ausrichtung zwischen Sender und Empfänger noch bis zu 300 kbit/s erreichbar.

4.2 Vernetzung (über/unter Wasser, intern)

Ein besonderes Merkmal der Fahrzeugvernetzung ist die Verwendung eines neuartigen WLAN-Protokolls zur Ad-Hoc-Vernetzung. Im Gegensatz zur Standardfunktionsweise von WLAN mit Access Point und Clientstationen können die Mantas ohne einen zentralen Access Point kommunizieren. Die Firmware Gluon ist auf der genutzten WLAN-Hardware installiert und basiert auf dem bekannten Open Source Routerbetriebssystem OpenWRT. Damit können die Fahrzeuge ohne Access Point über WLAN mittels eines sogenannten Multi-Hop-Routings kommunizieren. Mantas fungieren dabei auch als Vermittlungsstation für die Kommunikation zwischen anderen Fahrzeugen.

Um die Systemgrenzen zwischen den beiden Medien Luft und Wasser zu überwinden, bildet das Überwasser-WLAN mit der elektrischen Unterwasserkommunikation ein Luft-Wasser-Relais. Dabei wird eine transparente Kommunikationslösung geschaffen, weil sich das WLAN Ad-Hoc-Routing nahtlos mit der Unterwasserkommunikation vereint. Das Netz der Mantas erscheint wie ein geschwichtetes Ethernet-Netzwerk. Der Vorteil an einem geschwichteten Netz ist, dass Fahrzeuge transparent über eine IP-Adresse erreichbar sind, egal ob sie in direkter Funkreichweite der Basisstation sind, oder über einen anderen Manta eine indirekte Verbindung aufgebaut wird. Schematisch veranschaulicht [Abb. 10](#) die interne Vernetzung eines Mantas mit zugehörigen Überwasser- und Unterwasserkommunikationsschnittstellen. Die Hauptkomponenten des Mantas sind mittels Ethernet vernetzt. Im Manta sind die Komponenten über einen zentralen Switch verbunden. Die Kommunikation nach außen erfolgt über einen Router.

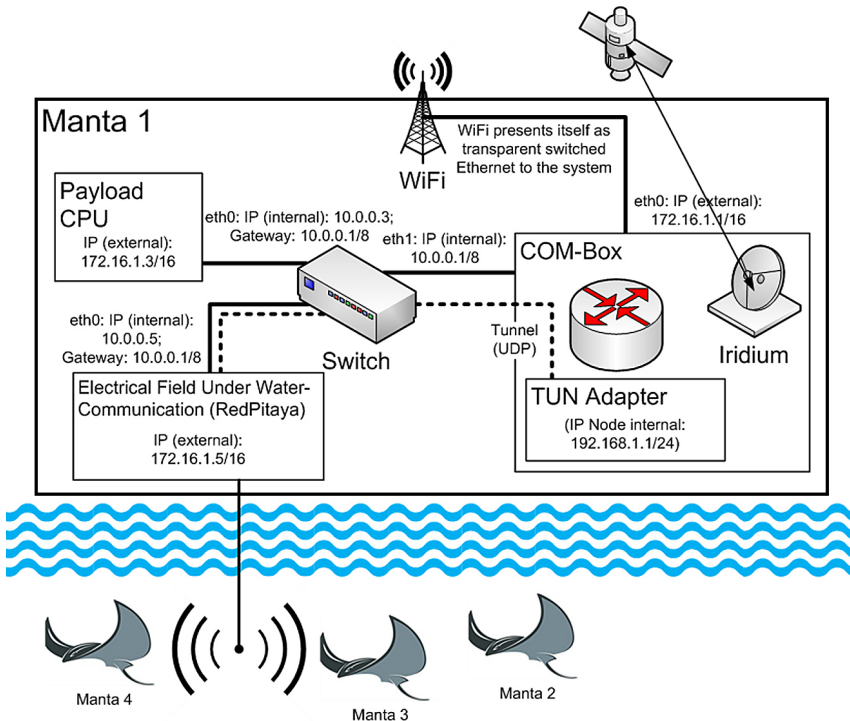


Abb. 10: Interne Vernetzung eines Mantas mit Überwasser- und Unterwasserkommunikationsschnittstellen

Das Modul zur Überwasserkommunikation (COM-Box in Abb. 10) wird in Abb. 11 gezeigt und beinhaltet eine WLAN-Schnittstelle, eine Iridium-Schnittstelle zur Satellitenkommunikation, einen GPS-Empfänger zur Navigationsunterstützung eines Mantas und einen Steuerungsrechner mit Routerfunktion. Wie in Abb. 12 dargestellt, kann beispielsweise eine Kommunikation zwischen der Basisstation und Manta 2 erfolgen, wobei die Basisstation und Manta 2 nicht in Funkreichweite sind, indem Manta 1 als Relais für die Kommunikation dient.

Die transparente Vernetzung erleichtert die Konfiguration des Gesamtsystems. Experimente in der Testumgebung belegten die reibungslose Funktion der gewählten Lösung. Die adaptive Ad-Hoc-Vernetzung mittels Multi-Hop-Routing erlaubt eine einfache und robuste Kommunikation zwischen autonomen Unterwasserfahrzeugen.

Zusätzlich lässt sich die Berge- und Aussetzvorrichtung iLARS in das Netzwerk integrieren. Ebenso wie bei den Mantas ist ein zentraler Ethernet-Switch vorhanden, an den ein Steuerungsrechner und die elektrische Nahfeldkommunikation angeschlossen sind. Der Access Point (Bullet) und der Steuerungs-

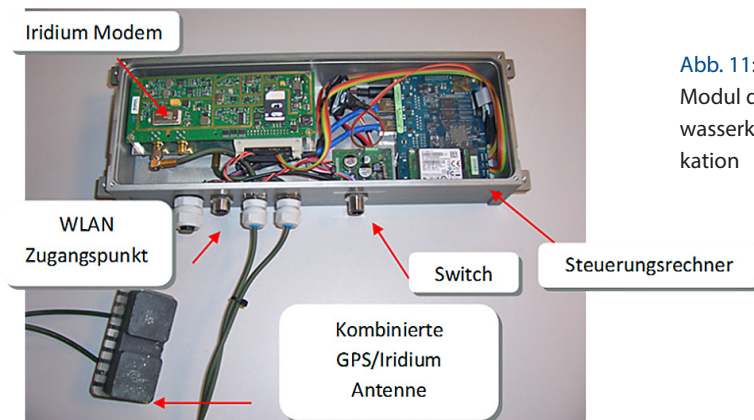


Abb. 11:
Modul der Über-
wasserkommuni-
kation

rechner (Kontron) sind Teil der Überwasserkommunikation des Mantas und sind ebenso in iLARS integriert (Abb. 13). Zusätzlich ist an dem Switch ein akustisches Modem angeschlossen, das direkt mit dem Steuerungsrechner kommuniziert und eine Verbindung zu weiter entfernten Mantas aufbauen kann.

Die Ad-Hoc-Kommunikation über WLAN wurde während einer Ostseerprobung getestet. Dabei wurde die Kommunikation zwischen Manta und einem mit einem WLAN Access Point ausgestatteten Laptop getestet. Die Kommunikation war über eine Distanz von ca. 50 m an der Wasseroberfläche problemlos möglich. Der Manta war im abgetauchten Zustand erwartungsgemäß über WLAN nicht mehr erreichbar. Unmittelbar nach dem Auftauchen wurde die Verbindung automatisch wiederhergestellt. Bei den Versuchen wurde auch die WLAN-Verbindung zwischen der Basisstation iLARS, einem aufgetauch-

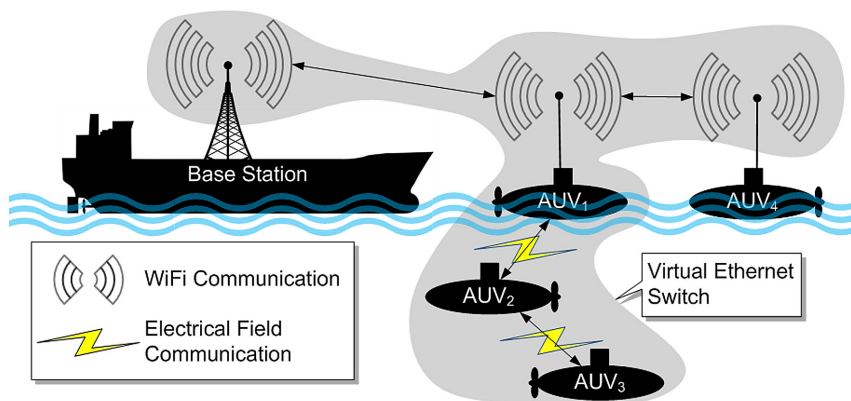


Abb. 12: Vernetzung des BOSS-Gesamtsystems

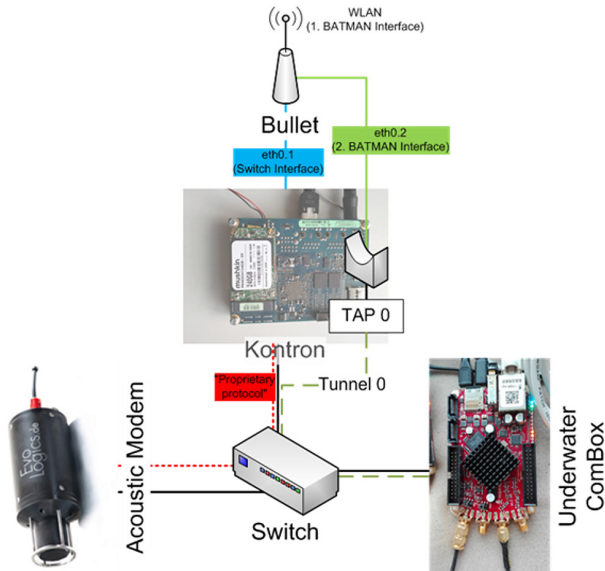


Abb. 13:
Aufbau der Bergungs- und Aussetzvorbereitung iLARS

ten Manta-Fahrzeug und einem weiteren Überwasserkommunikationsmodul erfolgreich getestet. In den Versuchen wurden zwei wichtige realitätsnahe Anwendungsfälle der Vernetzung erprobt. Erstens wurden die GPS-Daten über den GPS-Empfänger ermittelt und anschließend per Iridium an eine spezifische E-Mail-Adresse versandt. Im zweiten Fall wurden die GPS-Daten per WLAN an den ersten Manta gesendet, von dem sie an die Basisstation weitergereicht wurden.

4.3 Testbed und Maintenance

Um Integrationstests von Hard- und Software durchzuführen, wurde das Gesamtsystem durch schrittweise Integration der Komponenten aufgebaut. Hierfür wurde nach Teubler et al. (2016a) ein Testbed aufgesetzt, bei dem sich über einen Testbed-Hauptrechner eine Verbindung mit jedem Steuerungsrechner per serieller Schnittstelle herstellen lässt. Dies erlaubt z. B. die Netzwerkkonfiguration der Steuerungsrechner automatisiert zu ändern, wenn eine Konfiguration, wie sie im Manta eingesetzt wird, getestet werden soll. Das um die elektrische Nahfeldkommunikation erweiterte Testbed ermöglicht es, die transmediale Kommunikation und das Multi-Hop-Routing der Unterwasserkommunikation auch experimentell zu untersuchen. Die Testumgebung enthält auch den Mission Server (Abb. 1). Hierzu wurde der Testbed-Hauptrechner mit einem Access Point ausgestattet, welcher sich in das Ad-Hoc-Netz der Mantas integriert. Der Access

Point ist so konfiguriert, dass sich Clients, z.B. Laptops als mobile Stationen, mit dem WLAN-Netz verbinden können. So kann auf die Mantas bzw. auf die BOSS-Infrastruktur zugegriffen werden.

Als Ergänzung zum Testbed wurden, wie in Kap. 3.3. gezeigt, Simulationen eingesetzt, mit denen die Funktionalität von Verfahren zur autonomen Steuerung von Unterwasserfahrzeugen ebenfalls getestet wurde.

5 Autonomes Messsystem

In diesem Kapitel zeigen wir beispielhaft die Anwendungen unseres autonomen Messsystems.

Um das autonome Navigieren durch das integrierte Expertensystem zu untersuchen, wurde eine Anwendung für das Messsystem mit DUNE umgesetzt, bei der ein AUV einem Salzgradienten folgt, ohne dabei eine Maximaltiefe von 15 m zu überschreiten. Die Tiefenänderung, die das AUV dabei vollzieht, ist in Abb. 14 dargestellt. Dazu wurden im Expertensystem vier unabhängige Regeln implementiert, um das Verhalten in Abb. 14 zu erreichen. Es gibt je eine Regel für Steigen, Tauchen und Folgen des Gradienten, sowie eine Regel zum Steigen, wenn das AUV die Maximaltiefe erreicht hat. Diese Regeln sind ausreichend, um dem Salzgradienten zu folgen und nicht tiefer als die vorgegebene Maximaltiefe zu tauchen. Bei dieser Lösung fällt auf, dass das AUV fortwährend taucht und wieder steigt, sobald das AUV die Maximaltiefe erreicht, weil es dem Salzgradienten weiter folgen will, dieser jedoch ggf. unter 15 m verläuft. Um diesem Verhalten entgegenzuwirken, wurde eine fünfte Regel implementiert, die das AUV die Tiefe halten lässt, wenn die Salinität zu hoch und die Maximaltiefe erreicht ist. Dieses Beispiel zeigt eine der Stärken von CLIPS. Es lassen sich Regeln inkrementell hinzufügen, ohne auf einen Kontrollfluss oder auf die Ordnung von Anweisungen zu achten, wie es bei konventioneller Programmierung der Fall ist.

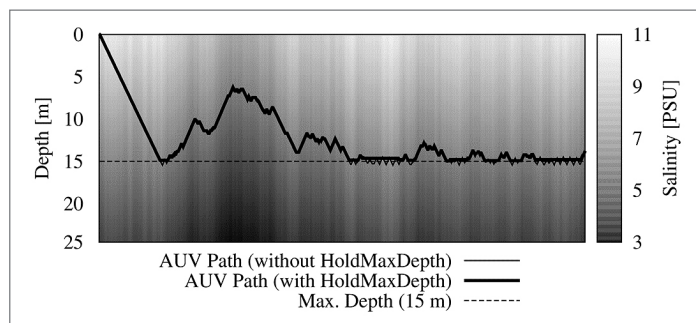


Abb. 14:
Profilsicht eines
AUV-Pfades,
welches
einem Salz-
gradienten
folgt.

Eine weitere wichtige Funktion zum autonomen Navigieren ist das Reagieren auf Hindernisse. Mittels wiederverwendbarer Module für das Expertensystem zur Steuerung und Kontrolle des AUVs wurde exemplarisch ein Verfahren zur Kollisionsvermeidung implementiert und mit DUNE getestet. Abb. 15 zeigt das Ergebnis der Simulation des Expertensystems. Man sieht den Pfad des simulierten AUVs, wie es mit Hilfe des Verfahrens zur Kollisionsvermeidung ein Areal mit Hindernissen durchläuft.

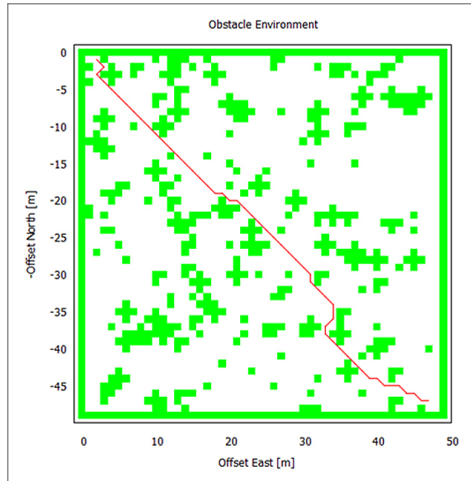


Abb. 15: Pfad eines AUV durch ein Areal mit Hindernissen

In den Anwendungsfällen mit dem BOSS-System gehen wir davon aus, dass Missionen im Vorfeld geplant werden, die AUVs jedoch autonom auf Störungen bzw. Abweichungen reagieren. Abb. 16 zeigt eine geplante Mission eines AUVs in Neptus in einer Simulation. Der gewählte Plan führt das AUV jedoch direkt auf ein Hindernis. Das Hindernis wird durch das Voraussonar detektiert und kurz vor dem Auftreffen auf das Hindernis dreht das AUV ab (Abb. 17). Im Expertensystem wird dabei ein neuer Plan erstellt und an DUNE kommuniziert. Wie in Abb. 18 gezeigt, ist der neue Plan auf dem AUV verfügbar und kann mit Neptus ausgelesen werden. Das Auslesen durch den Benutzer ist eine sehr nützliche Funktion in der Praxis, da so das autonome Agieren vom Nutzer überprüft werden kann und damit die Entscheidungen des Expertensystems nachvollziehbar sind.

Die Kooperation der Mantas untereinander wird ebenfalls über den Austausch von Nachrichten über die umgesetzten Protokolle realisiert. So können beispielsweise durch das Expertensystem erstellte Pläne durch Kommunikationsmittel von DUNE von einem Manta auf andere Mantas übertragen werden.

Das autonome Verhalten der Mantas setzt voraus, dass sie ein Verständnis für ihre Umgebung entwickeln. Dazu dienen die Sensorik und dessen Fusion zum intelligenten Gesamtsystem. Die Sensorik besteht aus USBL und Akustikmodem, Altimeter, Front-, Side-Scan- und Multibeam-Sonar, Doppler Velocity Log, 3D-Videosystem, CTD-Sonde und Multiparametersonde. Diese Daten lassen sich ebenfalls über die multimedialen Kommunikationsschnittstellen austauschen. Die Daten der Sensoren werden zu einem Gesamtbild verarbeitet und fusioniert. Ein vereinfachtes Abbild des Systems ist in Abb. 19 dargestellt.

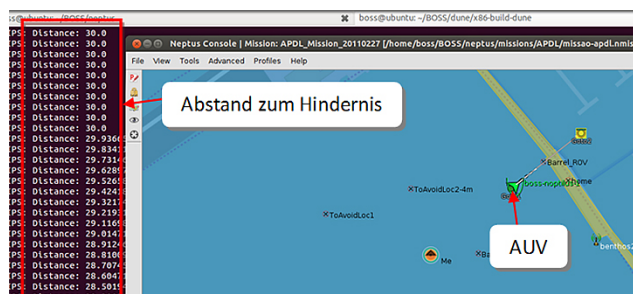


Abb. 16:
Das AUV detektiert ein Hindernis mit dem Voraussonar.

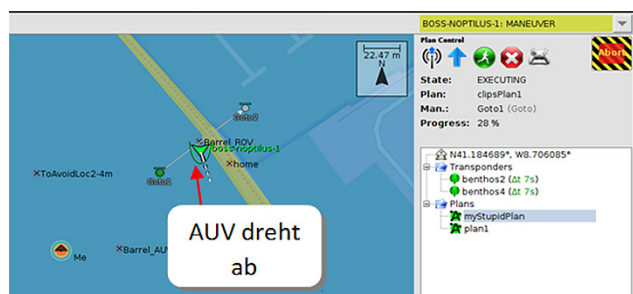


Abb. 17:
Das AUV dreht aufgrund der Sonardaten vor dem Hindernis ab.

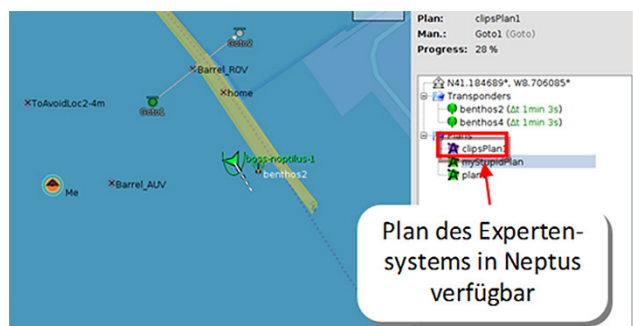


Abb. 18:
Ein neuer Plan wurde in CLIPS erstellt und ist in Neptus verfügbar.

Wichtig für die Umsetzung der Fusion der Sensordaten ist, dass eine hohe Anzahl an Nachrichten im Expertensystem verarbeitet werden können. Alte Nachrichten werden dabei vom Expertensystem aktiv gelöscht, wenn sie von diesem nicht mehr benötigt werden. Hier stellte sich die Frage, wie viele Nachrichten pro Sekunde das Expertensystem auf der Hardware des Mantas verarbeiten kann. Die Ergebnisse sind in Abb. 20 dargestellt. Auf der x-Achse sind die unterschiedlichen Nachrichtenaufkommen (Nachrichten pro Sekunde) dargestellt. Die unterschiedlichen Werte für die Nachrichtenaufkommen repräsentieren unterschiedliche, erwartete Entwicklungsstände des Expertensystems. Auf der y-Achse sind die CPU-Auslastung respektive der Speicherauslastung in Prozent aufgetragen.

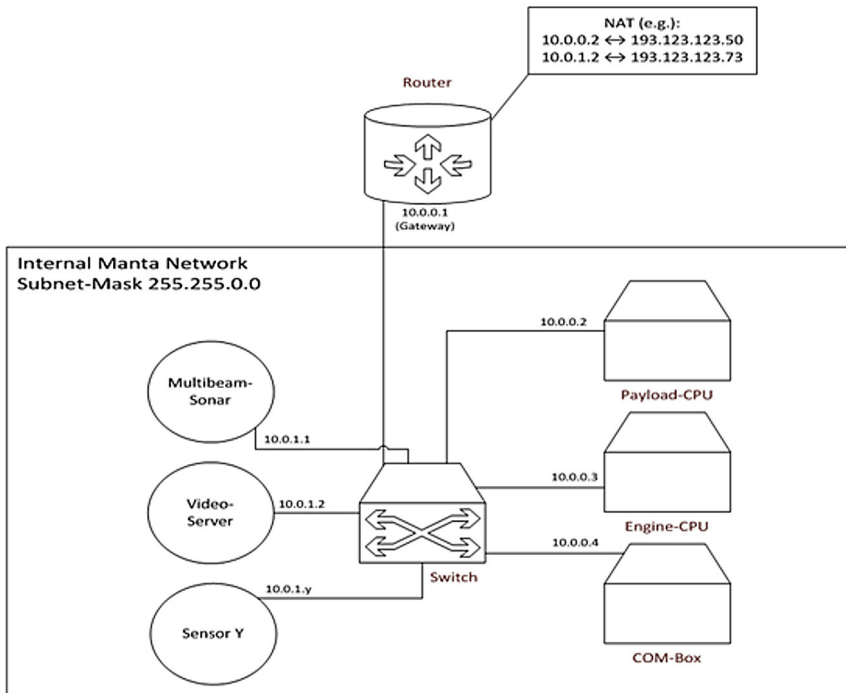
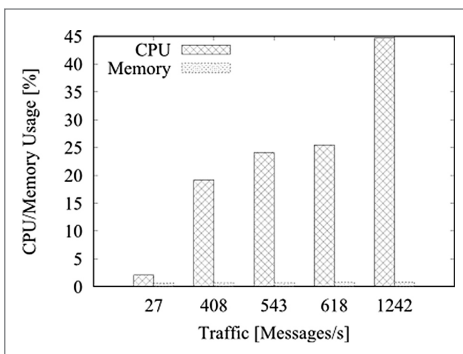


Abb. 19: Vernetzung und Datenfluss

Bei einem Nachrichtenaufkommen von mehr als 2000 Nachrichten pro Sekunde (nicht dargestellt) steigt die CPU-Last auf 100 % und das Expertensystem ist nicht mehr in der Lage, die Nachrichten zu löschen. Nach dem jetzigen Kenntnisstand gehen wir von einem Nachrichtenaufkommen von ca. 500 Nachrichten pro Sekunde aus, die von dem Expertensystem problemlos verarbeitet werden können. Weiterhin sehen wir einen „Selbstschutzmechanismus“ des Expertensystems vor, der das Nachrichtenaufkommen drosselt, um das System zu stabilisieren.



weirden können. Weiterhin sehen wir einen „Selbstschutzmechanismus“ des Expertensystems vor, der das Nachrichtenaufkommen drosselt, um das System zu stabilisieren.

Abb. 20: CPU- und Speicherauslastung des Expertensystems

6 Zusammenfassung und Danksagung

Die hier dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Projekts BOSS COGNET zusammen mit den Firmen Sea & Sun Technology GmbH und EvoLogics GmbH erarbeitet. In dem Teilprojekt BOSS COGNET ist ein Unterwasser-Intranet zwischen Fahrzeugen und Fahrzeug/Infrastruktur geschaffen worden, das sich in das Internet integrieren lässt. Als Technik für die Unterwasserübertragung wurde eine optische und elektrische Lösung erarbeitet, die eine hohe Datenrate robust über mehrere Meter erreicht und zusammen mit der Vernetzung und der Sensorik des Fahrzeugs die Basis für die Autonomie des Schwarms der AUVs bildet. Das Projekt BOSS wurde gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Förderkennzeichen BOSS COGNET: 03SX361C).

Literatur

- Ardelt, G.; Mackenberg, M.; Hellbrück, H. (2017): Wireless Underwater Communication via Analog OFDM Modulated Light. Proceedings of the International Conference on Underwater Networks & Systems, 2017, 18:1–18:3.
- Ardelt, G.; Mackenberg, M.; Markmann, J.; Esemann, T.; Hellbrück, H. (2016): A Flexible and Modular Platform for Development of Short-Range Underwater Communication. The Eleventh International Conference on Underwater Networks and Systems, 2016.
- Esemann, T.; Ardelt, G.; Hellbrück, H. (2014): Underwater Electric Field Communication. Proceedings of the 9th ACM International Conference on Underwater Networks & Systems (WUWNET), 2014.
- Hellbrück, H.; Ardelt, G. (2018): Unterwasserkommunikation, Systemvernetzung und autonome Kommunikation im Projekt BOSS. In: DVW e. V. (Hrsg.): Hydrographie 2018 – Trend zu unbemannten Messsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 91, Wißner-Verlag, Augsburg, 159–173.
- Mackenberg, M.; Janicke, C.; Esemann, T.; Hellbrück, H. (2014): Software Defined Transceiver for Underwater Communication. Proceedings of the European Workshop on Testbed based Wireless Research, 2014.
- Taubler, T.; Anschütz, M.; Hellbrück, H. (2016): Testbed for Development of Networked Autonomous Underwater Vehicles. Oceans’16 MTS/IEEE Shanghai, 2016.
- Taubler, T.; Hellbrück, H. (2016): Design of Expert Systems for Autonomous Underwater Vehicle Control. Oceans’16 MTS/IEEE Monterey, CA, USA, 2016.
- Taubler, T.; Shuang, L.; Hellbrück, H. (2015): Integrating Expert System CLIPS into DUNE for AUV Control. Oceans’15 MTS/IEEE Genova, 2015.

Kontakt

Prof. Dr. Horst Hellbrück
Fachhochschule Lübeck
Mönkhofer Weg 239, 23562 Lübeck
hellbrueck@fh-luebeck.de

Stop & Go Messsysteme zur Gleisabsteckung und Gleisabnahme

Otto Heunecke | Thorsten Strübing

1 Einleitung

Insbesondere bei Neubaustrecken, aber auch bei Bestandsstrecken werden hohe Genauigkeitsanforderungen an die Vermessung gestellt, um die Gleistrassierung in die Örtlichkeit zu übertragen und eine bereits vorhandene Gleisgeometrie zu prüfen. Sowohl für die Absteckung als auch die Kontrolle müssen komplexe Messabläufe in hoher Anzahl wiederkehrend entlang einer Trasse ausgeführt werden. Die im Folgenden vorgestellten Stop & Go Gleismesssysteme GML (GleisMessLehre) für die prozessintegrierte Feinabsteckung eines Gleises und RACER II (Rapid Automated Control Equipment for Rails II) zur Prüfung eines bereits verlegten Gleises wurden vorrangig für die feste Fahrbahn in Tunneln in Zusammenarbeit mit dem Schweizer Ingenieurbüro Ristag Ingenieure AG entwickelt.

2 Gleisvermessung

Unter Gleisvermessung werden im Folgenden sämtliche ingenieurgeodätischen Tätigkeiten verstanden, die zur Absteckung einer Neubaustrecke oder zur Kontrolle einer Bestandsstrecke notwendig sind. Dies umfasst im Wesentlichen die messtechnische Bestimmung folgender Parameter entlang einer Trasse:

1. Lage und Höhe der Gleisachse
2. Überhöhung (Querneigung)
3. Gradienten (Längsneigung)
4. Spurweite

Messsysteme zur Erfassung der Gleisumgebung und des Lichtraumes werden nachfolgend nicht behandelt. Die genannten Gleisparameter repräsentieren die Gleistrasse an jedem Punkt entlang der Achse ([Abb. 1](#)). Da kinematische Messsysteme gegenwärtig nicht in der Lage sind, eine kontinuierliche Bestimmung dieser Parameter mit den geforderten Genauigkeiten zu leisten, werden sie mit Stop & Go Messsystemen stationsweise ermittelt. Der Abstand zwischen zwei Stationierungen ergibt sich aufgabenorientiert und wird so dicht gewählt, dass

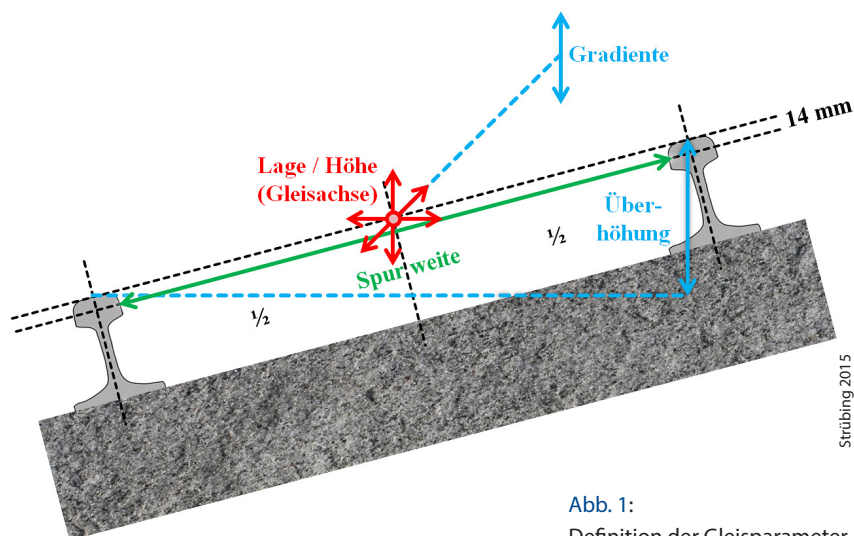


Abb. 1:
Definition der Gleisparameter

eine daraus abgeleitete Trassegeometrie wie ein Kontinuum betrachtet werden kann. Typische Abstände liegen im Bereich weniger Meter.

An jeder Station sind die absolute Lage und die Höhe der Gleisachse in einem übergeordneten Bezugssystem, dem Gleisvermarkungssystem (GVS) zu bestimmen. Üblicherweise handelt es sich um Lagekoordinaten im Koordinatenreferenzsystem des Gleisbetreibers und Gebrauchshöhen. Das GVS wird durch Festpunkte (Gleisvermarkungspunkte, GVP) realisiert. In Tunneln sind diese im Regelfall in der Ulme eingebrachte Bolzen zur Aufnahme von Prismen. Die Bestimmung der Gleisparameter Überhöhung und Gradiente erfordert die Einbindung in das GVS als horizontbezogene Referenz. Lediglich die Spurweite, definiert als Abstand zwischen den Schienen 14 mm unterhalb der Schienenoberkante, kann unabhängig davon bestimmt werden.

Die Verfahren zur Übertragung der Gleislage in die Örtlichkeit basieren auf der Absteckung von Langsehn oder Geometriehauptpunkten mit anschließender Verdichtung (Möser et al. 2000). Geometriehauptpunkte sind z.B. Bogenhauptpunkte und Punkte mit Neigungswechsel. Neben der absoluten ist vor allem die relative Gleislage von Bedeutung, bei der durch eine hohe Nachbarschaftstreue ein gleichförmiger Trassenverlauf gewährleistet wird. Nur eine hohe relative Genauigkeit ermöglicht eine sichere und verschleißarme Nutzung von Gleisen, speziell bei Hochgeschwindigkeitsstrecken.

Die Abb. 2 zeigt das Ablaufschema einer Gleisvermessung, bei der, unterschieden in Absteckung und Kontrolle an jeder Stationierung, ein Vergleich der Soll-Gleislage mit der in der Örtlichkeit gemessenen Ist-Gleislage durchgeführt

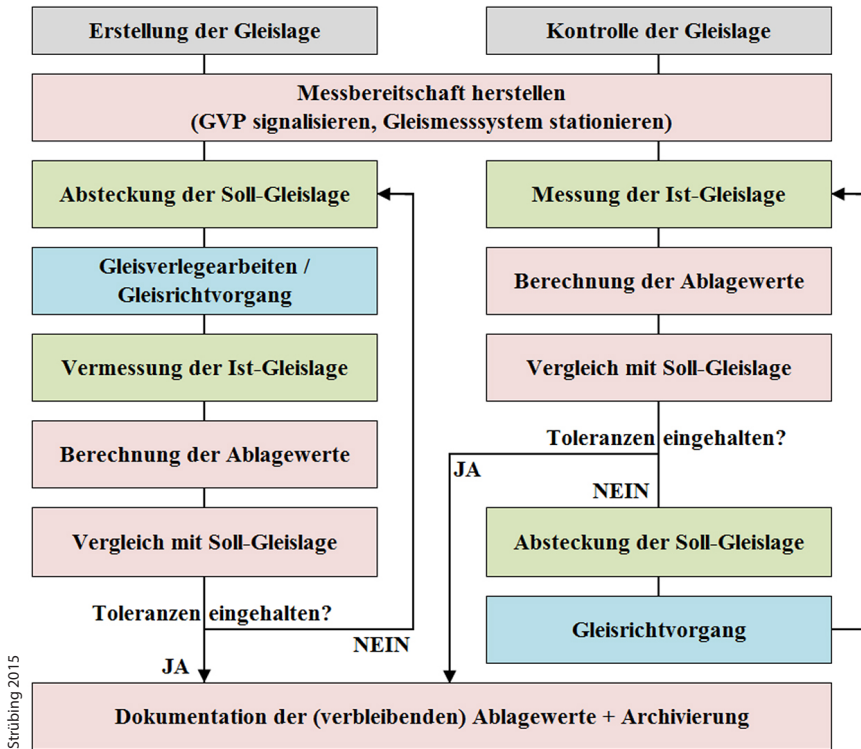


Abb. 2: Ablaufschema einer Gleisvermessung hinsichtlich der Erstellung und Kontrolle der Gleislage

wird. Durch eine kurze Abstandswahl der Stationierungen ergibt sich der besagte kontinuierliche Vergleich zwischen Planung und Realisierung einer Trasse. Während dieser Vergleich bei Kontrollmessungen, z. B. im Rahmen der Gleisabnahme oder bei wiederkehrenden Prüfungen im Betrieb, zunächst lediglich dokumentiert wird und Grundlage für etwaig einzuleitende Maßnahmen ist, bilden die entsprechenden Ablagewerte bei Neubaustrecken die Basis für den Gleisrichtvorgang im laufenden Prozess. In beiden Fällen ist letztlich zu ermitteln und zu bewerten, ob die Ablagewerte für die Gleisparameter durchgehend innerhalb der vorgegebenen Verlegetoleranzen liegen.

3 Gleisabsteckung

3.1 Grobrichten

Im Gegensatz zum Schotterbau werden beim Einbau der festen Fahrbahn durchgehende Betonschwellen oder Schwellenblocksysteme mit Vergussbeton verwendet, um die Gleise langzeitstabil und wartungsarm zu halten. Diese Vorteile bedingen erhöhte Baukosten und geringere Verlegetoleranzen gegenüber einem dynamisch gelagerten Schottergleis. Für den Transport und den Einbau der Schienenstränge und des Vergussbetons kommen im Tunnelbau Spezialmaschinen zum Einsatz.

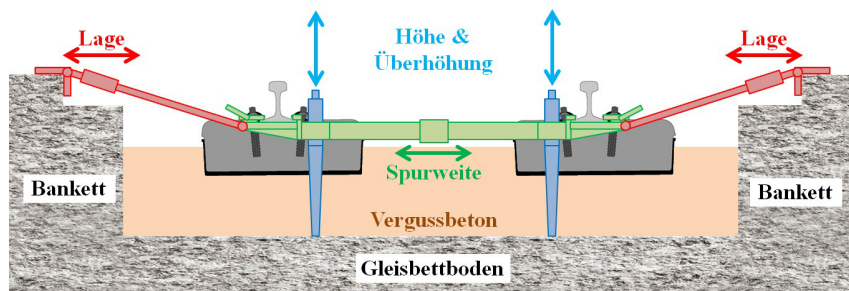


Abb. 3: Stützkonstruktion für den Einbau der festen Fahrbahn für LVT-Schwellen beim Gotthard-Basistunnel

Stellvertretend beziehen sich die nachfolgenden Ausführungen auf den Einbau der festen Fahrbahn im Gotthard-Basistunnel. Zunächst wurden jeweils 120 m Schienenstränge in den Tunnel eingezogen, grob ausgerichtet und mittels Abbrennstumpfschweißen endlos miteinander verbunden. Über ein Hilfsgleis erfolgt das Einbringen und Ablegen der LVT-Schwellen (Low Vibration Track) sowie weiterer Hilfsgerätschaften. Ein Gleisbauroboter hebt die Schienenstränge an, montiert die Schwellenblöcke und richtet die beiden Schienenstränge im Abstand der Spurweite zueinander aus. Abschließend wird eine Stützkonstruktion montiert, mit der das Gleis im Hinblick auf das Einbringen des Vergussbetons mit definiertem Abstand vom Boden gehalten und justiert werden kann (Perner 2011).

Die Abb. 3 zeigt schematisch die Stützkonstruktion für die Montage von LVT-Schwellen. Die beiden Schienenstränge werden über eine Spurstange verbunden (grün), wobei die Schienenfüße mit Klemmen fixiert werden. Die Spurweite kann über ein Gewinde in der Mitte der Spurstange frei eingestellt werden. Der Abstand des Gleises zum Boden wird über zwei vertikale Gewindestangen realisiert (blau), über welche sich die Gleisparameter Höhe und Überhöhung

einrichten lassen. Die Einrichtung der Lage der Gleisachse erfolgt über die seitlichen Spangen (rot), welche ebenfalls über Gewinde ähnlich der Spurstange verstellbar sind und das Gleis im Bankett einzwängen. Diese Stützkonstruktionen wurden in Abständen von 1,80 m verbaut.

Das Grobrichten macht zunächst der Gleisbau. Nach dem Einbringen weiterer konstruktiver Elemente wie Kontroll- und Entwässerungsschächte, der Schalung der Oberflächenentwässerung etc., erfolgt die anschließende Justierung über ein Messverfahren, bei dem ein Laserstrahl auf eine Zieltafel am Bankett ausgerichtet wird. Die Zieltafel wird ihrerseits an Vermessungspunkten ausgerichtet, welche im Vorfeld der Gleisbauarbeiten zusammen mit dem GVP vermarktet wurden. Der Gleisbau übergibt den fertiggestellten Gleisrost bereits in Annäherung an die vorgegebenen Toleranzen des Bauherrn (IG Betonstraßen 2017).

3.2 Feinrichten

Beim Feinrichten wird das Gleis zeitnah vor der Betonierung deutlich unterhalb der vorgegebenen Toleranzen justiert, um einerseits Spielraum für die verbleibenden Unwägbarkeiten beim Einbau des Vergussbetons zu gewinnen und andererseits die Einhaltung der Vorgaben sicherstellen zu können. Damit dies von dem eingesetzten Messsystem gewährleistet werden kann, sollte dessen Messunsicherheit u für die einzelnen Gleisparameter mindestens um den Faktor fünf geringer sein als die jeweilige Toleranzvorgabe (DIN 2010, Heunecke 2014). So muss beispielsweise bei einer Toleranz von $\pm 1 \text{ mm}$ ($T = 2 \text{ mm}$) das Messsystem eine Messunsicherheit von $u < 0,4 \text{ mm}$ vorweisen. Für das qualitätsgesicherte Feinrichten werden im Regelfall Gleismesswagen in Trolley-Bauweise eingesetzt.

3.3 Gleismesssystem GML

Grundlage für die Absteckung der Gleislage mit der GML (Abb. 4), bildet die vorherige Stationierung eines im Gleisbett aufgebauten Präzisionstachymeters zu mindestens acht benachbarten GVP. Die freie Stationierung wird so gut an das umgebende Festpunktfeld angepasst und ist ein einmaliger Vorgang vor dem Feinrichten eines Gleisabschnittes. Der Operateur der GML hat zudem jederzeit die Möglichkeit einer Orientierungskontrolle zu ausgewählten GVP, um den unveränderten Aufbau des Tachymeters über den Zeitraum mehrerer Stunden, wie es zum Feinrichten eines Schienenstranges erforderlich ist, verifizieren zu können.

Für das eigentliche Feinrichten misst das Tachymeter mit einer Frequenz von bis zu 3 Hz auf das mittlere Prisma des Gleismesssystems und überträgt die Messdaten über Funk an den Rechner der GML. Anhand der Koordinaten des



Abb. 4: Gleismesssystem GML auf Stützvorrichtung im Geodätischen Labor der Universität der Bundeswehr München

Prismas kann der Schienenbezug über zwei Lasertriangulationssensoren vom Typ MEL M7LL/20 sowie über Neigungssensoren vom Typ Wyler Zerotronik hergestellt werden. Die Führung der GML wird über beidseitig angebrachte federgehaltene Führungsschlitten realisiert, um eine optimale Verteilung des Anpressdrucks bei Überhöhungen zu erzielen. Als zentrale Recheneinheit ist ein Industrierechner vom Typ NI cDAQ-9136 verbaut. Die Stromversorgung erfolgt über zwei 48 V-Batterien, wie sie auch bei Elektro-Fahrrädern verwendet werden. Die Batterien dienen ferner als zusätzliche Gewichte auf den Laufrädern der GML und verbessern damit deren Auflage.

Die installierte Software auf dem Rechner der GML ermittelt aus den Tachymeterdaten und den Messdaten der übrigen Sensoren die Ablagewerte der einzelnen Gleisparameter. Dies erfolgt im ständigen Dialog mit einer Trassierungssoftware für den Soll-Ist-Vergleich. Abhängig von der gewählten Messfrequenz des Tachymeters werden die Ablagewerte stetig aktualisiert. Sowohl eine grafische als auch eine numerische Anzeige der Ablagen aller Gleisparameter ermöglicht die manuell vorzunehmende Justierung der Stützvorrichtung.

Die GML wird im Stop & Go Betrieb eingesetzt. Nachdem das Gleis an einer Stationierung justiert wurde, löst der Operateur die Bremse und verfährt die

GML zur nächsten zu richtenden Stelle. Der Richtvorgang ist iterativ, da die Justierung der aktuellen Stationierung aufgrund des starren Gleisrostes Auswirkungen auf umgebende Bereiche hat, die mitunter bereits justiert wurden. Um diese relativen Verschiebungsbeträge besser beurteilen zu können, stehen dem Operateur neben den aktuellen Ablagewerten gegenüber Soll auch die Ablagewerte zur vorangehenden Stationierung zur Verfügung. Außerdem ist es möglich, sich die Ablagen zu einer bereits gemessenen identischen Stationierung anzeigen zu lassen. Sämtliche Arbeiten sind in den Feinrichtprozess des Bauunternehmens integriert und müssen so gestaltet sein, dass ein effektiver Fortschritt der Arbeiten gegeben ist. Die GML war daher zwingend als hochautomatisiertes Echtzeit-Messsystem auszulegen.

Um die Toleranzvorgaben einer Gleisabsteckung einhalten zu können, muss – neben einer Wahl geeigneter Komponenten – das verwendete Gleismesssystem umfassend untersucht und kalibriert werden. Dazu wurden bei der GML für die einzelnen Sensoren unter Laborbedingungen Kalibrierfunktionen ermittelt, die in der Software in einer Parameterdatei hinterlegt werden. Außerdem wurde das Gesamtsystem in der Klimakammer des Geodätischen Labors der UniBw München untersucht, wobei neben der Kalibrierung der Temperatursensoren der GML auch der Ausdehnungskoeffizient der Rahmenkonstruktion bestimmt wurde. Ferner wurde das Gleismesssystem detailliert mit dem Lasertracker Leica AT-901 vermessen und es wurde eine Rahmenkonstruktion entwickelt, auf welcher die GML für eine Kontrolle des Chassis aufgesetzt werden kann. Folgende Messunsicherheiten zur Bestimmung der Gleisparameter werden durch die GML gewährleistet:

- Lage und Höhe der Gleisachse <0,2 mm
- Überhöhung (Querneigung) <0,2 mm/1,5 m
- Spurweite <0,2 mm

Die Einhaltung der Messunsicherheiten im Einsatz hängt im Wesentlichen von der Genauigkeit des polaren Anschlusses an das Tachymeter ab. Dieser polare Anschluss wird vorrangig von der Entfernung zur GML und der Zuverlässigkeit der automatischen Zielerfassung beeinflusst. Entsprechende Betrachtungen führen dazu, dass eine Mindestdistanz von 10 m und eine maximale Distanz von 60 m von der GML zum Tachymeter einzuhalten ist. Zudem muss eine hohe Standsicherheit des Tachymeters gewährleistet sein, u. a. dadurch zu verbessern, dass die Stativbeine mit Bohrungen im Gleisboden fixiert werden. Die Software der GML überwacht den Aufbau durch wiederkehrende Abfrage den Kompensator des Tachymeters und warnt den Benutzer bei Überschreitung eines voreingestellten Schwellwertes.

Die Zuverlässigkeit der Sensorik im Baustellenbetrieb ist entscheidend für die gleichbleibend hohe Qualität der Messergebnisse. Die Software der GML

warnt den Operateur durch Farbwechsel am Bildschirm, falls ein Sensor keine plausiblen Messwerte liefert. Ferner kann die Funktionsweise und Genauigkeit der Lasertriangulationssensoren und der Neigungssensoren mit einem Kalibrierungsprogramm vor Ort im Tunnel geprüft werden. Dazu werden zwei weitere Präzisionsprismen auf dem beweglichen Führungsschlitten der GML (Abb. 4), mehrfach in beiden Fernrohrlagen durch das Tachymeter gemessen. Aus diesen beiden Punkten lassen sich die Gleisparameter Spurweite und Querneigung vermittelnd ableiten und innerhalb der Messgenauigkeit des Tachymeters und bei Beachtung des Abstandes zur GML mit den anderen Sensorwerten vergleichen. Bei signifikanten Abweichungen kann der Operateur die Kalibrierung der On-board-Sensoren durch Übernahme der neuen Messwerte anpassen.

3.4 Betonieren der festen Fahrbahn

Der Vergussbeton wird im Tunnel „just in time“ im Betonzug hergestellt. Der finale Transport zur Einbaustelle erfolgt mit Betonshuttles, die sich entlang des Banketts bewegen und den Vergussbeton über Drehkübel an eine Verteilerstation übergeben. Die Schüttung erfolgt über Förderschnecken, wobei der Betonfluss mittels Flaschenrüttlern unterstützt wird. Die finale Glättung des Betons erfordert manuelles Reiben und Glätten (IG Betonstraßen 2017).

Nachdem der Beton ausreichend ausgehärtet ist, können die Stützkonstruktionen entnommen werden, wobei zunächst die seitlichen Spangen entfernt werden. Durch Lösen der äußeren Klemmen werden die Spurstangen vom Schienenstrang gelöst. Beim Einbau des Vergussbetons bleiben die Spurstangen unberührt, so dass diese seitlich aus dem Gleis entnommen werden können. Die vertikalen Gewindestangen sind allerdings vom Beton umschlossen, lassen sich aber über ein zuvor aufgetragenes Gleitmittel und mit Hilfe eines Schraubers wieder aus dem Beton ziehen. Die verbleibenden Löcher werden verfüllt. Die Stützkonstruktion ist damit vollständig wieder einsetzbar.

4 Gleiskontrolle

4.1 Zielsetzung

Beim Einbau des Vergussbetons sorgt die Stützkonstruktion dafür, dass das Gleis in der feinabgesteckten Gleislage fixiert ist. Dennoch kann es vorkommen, dass es bei der Schüttung zu Verschiebungen in Lage und Höhe kommt. Zusätzlich sorgt das Betonschwindverhalten vor allem für eine Unsicherheit bei der Höhenkomponente der Gleislage. Diese Effekte werden zwar durch die entsprechende Erfahrung beim Gleisbau weitgehend reduziert, können jedoch nicht vollständig

ausgeschlossen werden. Eine abschließende Kontrolle nach dem Aushärten des Betons, die Gleisabnahme, ist demnach unerlässlich. Die Gleisabnahme sollte ferner eine unabhängige Kontrolle sein und daher nicht mit dem gleichen Messsystem durchgeführt werden, das bei der Gleisabsteckung eingesetzt wurde.

4.2 Gleismesssystem RACER II

Anders als beim Gleismesssystem GML ist beim RACER II (Abb. 5) das Präzisionstachymeter auf dem Messwagen adaptiert. Da der Messwagen unmittelbar die Überhöhung des Gleises übernimmt, ist der Kompensator des Tachymeters zu deaktivieren. In Folge werden die polaren Messelemente zu den GVP im lokalen Koordinatensystem des Messwagens (Messwagensystem, MWS) erfasst. Die Anzahl der GVP ist prinzipiell frei wählbar. Um die für eine Stationierung erforderliche Messzeit klein zu halten, erfolgt gewöhnlich eine Beschränkung auf vier benachbarte GVP. Wie auch bei der GML wurde dazu eine Routine entwickelt, die in Abhängigkeit von der Näherungsposition die umgebenden GVP aus einer Koordinatendatei identifiziert und eine sequenzielle Anzielung durch das motorisierte, selbstzielende Tachymeter leistet. Wird ein GVP nicht gefunden, da beispielsweise die Sicht versperrt ist, wechselt das System auf einen weiteren GVP in der Nachbarschaft.

Voraussetzung für diesen vollständig automatisierten Vorgang ist allein, dass die umgebenden GVP mit Präzisionsprismen bestückt sind. Entsprechende Untersuchungen haben gezeigt, dass die Verwendung von 360°-Prismen



Strübing 2015

Abb. 5: Gleismesssystem RACER II

angesichts der Genauigkeitsanforderungen nicht ausreicht. Dies bedingt dann ein manuelles Ausrichten auf die jeweilige Stationierung des Messsystems. Über eine dreidimensionale Helmert-Transformation werden die Transformationsparameter des MWS abgeleitet. Das Tachymeter ist prinzipiell frei wählbar, jedoch muss innerhalb der Software des Gleismesssystems eine entsprechende Schnittstelle implementierbar sein.

Der Bezug zur Gleislage wird über Lasertriangulationssensoren im übergeordneten Koordinatensystem des GVS hergestellt. Diese sind durch Abdeckbleche vor Streulichteinfluss geschützt. Die vier Lasertriangulationssensoren

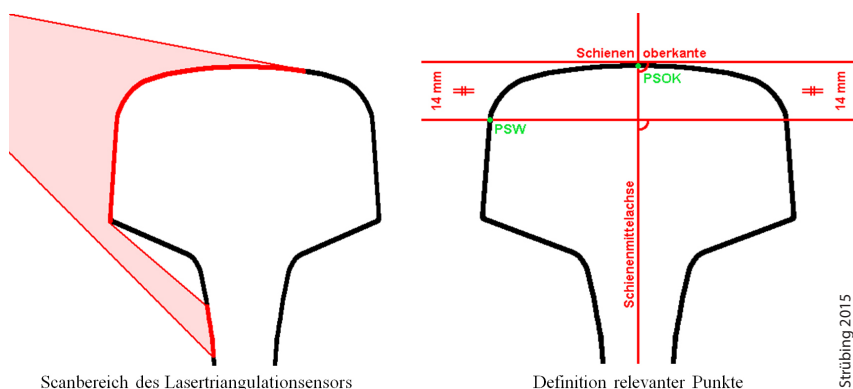


Abb. 6: Erfassung eines Schienenkopfes durch Lasertriangulationssensoren

vom Typ MEL M2-ILAN 120/60 erfassen die Innenseite des Schienenkopfes mit bis zu 100 Hz als Profillinie zu je etwa 300 Einzelpunkten (Abb. 6 links). Für die lokalen Koordinatensysteme der Lasertriangulationssensoren liegen ebenfalls Transformationsparameter vor, so dass die einzelnen Profilpunkte ins das übergeordnete GVS umgerechnet werden können (Strübing 2015). Aus den Profilpunkten im übergeordneten Koordinatensystem werden relevante Punkte extrahiert (Abb. 6 rechts), aus denen die Gleisparameter abgeleitet werden. Der RACER II verfügt auch über einen Neigungsmesser vom Typ MEAS NS-15/DMG2-U, welcher die redundante Überprüfung der Gleisparameter Querneigung und Gradienten ermöglicht.

Anders als sein Vorgänger RACER (Heister 2007) besteht der RACER II aus zwei Wagen: dem Messwagen mit der Sensorik (3 Räder) und dem Antriebswagen (4 Räder, eine motorisierte Achse). Die Aufteilung in zwei separate Wagen bietet den Vorteil, das Gewicht beim Transport aufzuteilen sowie die optionale Bestückung des Antriebswagens mit weiterer Sensorik wie beispielsweise eines Laserscanners zur Erfassung der Umgebung. Die Stromversorgung erfolgt wie bei der GML über zwei 48 V-Batterien. Dabei ist durch das Powermanagement

ein Batteriewechsel im laufenden Betrieb gegeben. Wie die GML arbeitet der RACER II im Stop & Go Betrieb, der Messvorgang verläuft jedoch aufgrund der elektrischen Antriebe des Wagens und des Tachymeters vollautomatisch. Für den Operateur verbleibt lediglich die Funktionskontrolle des Messsystems, optional im abgesetzten Betrieb gegeben via WLAN-Verbindung zu einem Tablet sowie die Bestückung und Nachführung der Prismen der GVP. Anders als beim Arbeiten mit der GML ist die Gleiskontrolle nicht in einen Bauprozess integriert.

Beim Initialisieren benötigt der RACER II lediglich eine Näherungsposition und -orientierung über die manuelle Eingabe der Stationierung und Anzielung eines Bezugspunktes zur automatisierten Ermittlung der polaren Messelemente zu den umgebenden GVP. Parallel erfolgt die Auswertung der vier Lasertriangulationssensoren und aller weiteren Onboard-Sensoren, u. a. für den Luftdruck und die Lufttemperatur. Aus den korrigierten und reduzierten Messdaten werden im Dialog mit einer Trassierungssoftware die Ablagewerte der Gleisparameter je Stationierung ermittelt, visualisiert und dokumentiert. Die numerische Wiedergabe erfolgt als Messreihen der Ablagen über der Trasse je Gleisparameter. Eine farbliche Hinterlegung der Toleranzbänder ermöglicht ein schnelles Identifizieren von Bereichen mit Überschreitungen.

Der RACER II musste neben einer obligatorischen Komponenten- und Systemkalibrierung vor seinem Ersteininsatz umfassend untersucht werden. Neben der Ermittlung von Kalibrierfunktionen für die einzelnen Sensoren wurde das Gesamtsystem in der Klimakammer des Geodätischen Labors der UniBw München durch wechselnde Temperaturen „gealtert“. Dabei wurden die Temperatursensoren des RACER II kalibriert und der Ausdehnungskoeffizient der Rahmenkonstruktion bestimmt. Wie bei der GML erfolgt die Bestimmung der Geometrie des Chassis mit dem Lasertracker Leica AT-901. Zeitnah vor den Messkampagnen ist eine diesbezügliche Re-Kalibrierung durchzuführen, um die Qualitätsanforderungen gewährleisten zu können. Die Transformationsparameter der lokalen Koordinatensysteme der vier Lasertriangulationssensoren werden im Labor indirekt über Referenzgeometrien bestimmt, die mit einem speziellen Kalibrierrahmen realisiert und mit der flächenhaft messenden T-Scan des Lasertrackers erfasst werden (Strübing 2015). Folgende Messunsicherheiten zur Bestimmung der Gleisparameter werden durch das Gleismesssystem RACER II gewährleistet:

- Lage und Höhe der Gleisachse <0,2 mm
- Überhöhung (Querneigung) <0,2 mm/1,5 m
- Spurweite <0,3 mm

Die Software des RACER II führt im Messeinsatz eine Reihe von Plausibilitätsüberprüfungen durch. Diese umfassen einerseits die Plausibilität einzelner Messwerte mit entsprechenden Filtermechanismen, andererseits die Gegenüber-

stellung redundant ermittelter Zielgrößen, die vorwiegend aus dem Einsatz der vier Lasertriangulationssensoren resultieren. Entsprechende Abweichungen werden dem Operateur signalisiert. Der Operateur kann dann z. B. wahlweise die Messdaten des Neigungsmessers oder die standardmäßig eingestellten Informationen aus der Helmert-Transformation verwenden. Sämtliche Plausibilitätsprüfungen werden pro Stationierung in einer separaten Datei gespeichert. Grundsätzlich ist bei dem RACER II kein Postprocessing erforderlich und die Ergebnisdateien des Systems können unmittelbar zur Dokumentation herangezogen werden. Bei einem Stationierungsabstand von 2,5 m liegt die Messgeschwindigkeit bei ca. 0,2 km/h, sofern die Messungen nicht durch andere Umstände wie beispielsweise Zugdurchfahrten zu unterbrechen ist.

5 Zusammenfassung

Die beiden entwickelten Gleismesssysteme GML und RACER II wurden vor ihren ersten praktischen Messeinsätzen neben den obligatorischen Laborprüfungen auch auf unterschiedlichen Teststrecken erprobt, validiert und entsprechend den gemachten Erfahrungen optimiert. Das Gleismesssystem RACER II wurde u. a. bei der Gleisabnahme von rund 114 km fester Fahrbahn im Gotthard-Basistunnel eingesetzt. Zwar sind beide Messsysteme für den Bau der festen Fahrbahn in Tunneln entwickelt, können prinzipiell aber auch für den Schotterbau und über Tage eingesetzt werden, sofern umgebende GVP vorhanden sind.

Um die hohen Genauigkeitsanforderungen bei der Gleisabsteckung und -kontrolle erfüllen zu können, sind beide Messsysteme für den Stop & Go Betrieb konzipiert. Eine Erweiterung des RACER II um eine kinematische Datenerfassung zwischen zwei Stationierungen ist zumindest hinsichtlich der Gleisparameter Spurweite, Überhöhung und Gradienten vorstellbar. Beide Messsysteme können auch für Kontrollmessungen im laufenden Betrieb eingesetzt werden. Anwendungsfelder sind beispielsweise die Beweissicherung bei Schäden oder die Verschleißdokumentation der Schienenköpfe mit der profilhaften Erfassung durch die Lasertriangulationssensoren des RACER II. Entsprechende Potenziale wurden jedoch bislang noch nicht ausgeschöpft.

Literatur

- DIN (2010): DIN-18710 – Ingenieurvermessung. ICS 07.040, Deutsches Institut für Normung, Normausschuss Bauwesen (NABau).
- Heister, H.; Liebl, W.; Pink, S.; Riesen, H.-U. (2007): RACER – ein automatisiertes, kinematisches System zur Gleisvermessung. In: Ingenieurvermessung 07 – Beiträge zum 15. internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, 55–68, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.

- Heunecke, O. (2014): Eignung geodätischer Messverfahren zur Maßkontrolle im Hochbau. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 4/2014, 139. Jg., 241–251. DOI: [10.12902/zfv-0021-2014](https://doi.org/10.12902/zfv-0021-2014).
- IG Betonstraßen (2017): Feste Fahrbahn im längsten Eisenbahntunnel der Welt – dem Gotthard Basistunnel. In: Aktuelles zu Betonstraßen und zur Verkehrsinfrastruktur – Update 47, vertrieben durch BETONSUISSE Marketing AG, Bern, u. a.
- Möser, M.; Müller, G.; Schlemmer, H.; Werner, H. (2000): Handbuch Ingenieurgeodäsie – Eisenbahnbau. 2. völlig Neubearb. und erw. Aufl., ISBN 3-87907-297-3, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Perner, R. (2011): Vergussbeton für die feste Fahrbahn im Gotthard-Basistunnel. In: Zement + Beton, Ausgabe 3/2011, 14–17, Wien.
- Strübing, T. (2015): Kalibrierung und Auswertung von lasertriangulationsbasierten Multisensorsystemen am Beispiel des Gleisvermessungssystems RACER II. Dissertation. In: Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie, Universität der Bundeswehr München, Heft 91, Neubiberg.

Kontakt

Otto Heunecke | Thorsten Strübing
Institut für Geodäsie – Geodätisches Labor
Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg
otto.heunecke@unibw.de

Erfassung, Analyse und Auswertung mobiler Multisensorik im Straßenraum: Ein Erfahrungsbericht

Frank Knospé | Rico Richter

1 Einleitung

Die kommunale Straßeninfrastruktur ist Essens Lebensader, die es zu unterhalten gilt. Der Straßenkörper hat einen Wert von 358 Millionen Euro und damit einen erheblichen Anteil am Anlagevermögen der Stadt! Neben 1552 km Straßen gilt es Infrastrukturen im Straßenraum zu betreuen, z. B. 49.000 Laternen, 60.000 Senkkästen und 62.000 Straßenbäume und mehr als 100.000 Straßenschilder. Für eine großflächige und präzise Erfassung haben sich in der Vermessungsbranche hierzu mobile Datenerfassungssysteme etabliert. Bestückt sind sie mit Laserscannern in Kombination mit kalibrierten Kameras (Mobiles Laserscan System, MLS). Charakteristisch ist das schnelle Messen im fließenden Stadtverkehr. Heutige Systeme können über 1 Million Messpunkte in der Sekunde produzieren: In Fahrzeugnähe erreicht man, auch bei Geschwindigkeiten von 50 km/h, schnell eine Punktdichte von mehr als 1500 Punkten pro Quadratmeter, so dass dichte und große 3D-Punktwolken entstehen. Jedoch wird mit einer MLS-Technologie „nur“ ein Messverfahren durch ein anderes abgelöst, solange die Ergebnisse ausschließlich zur Erstellung von Lageplänen dienen. Auch wenn der Wert von Punktwolken durch ein Mehr an Informationen eindeutig ist, fehlt aus betriebswirtschaftlicher Sicht ein finanzielles Einsparpotenzial. Ein ergänzend eingesetztes Georadarverfahren setzt genau an diesem Punkt an. Georadar ist ein mobiles, zerstörungsfreies Messverfahren und basiert auf Aussendung und Empfang elektromagnetischer Strahlen. Beim Befahren der Straßen wird der vorhandene Straßenaufbau unter der Geländeoberkante gemessen. Dadurch wird der bislang fehlende Bestandteil für eine umfassende Datenbasis zum „Bauwerk Straße“ hinzugefügt: Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften der Straßenoberfläche und des Untergrundes lassen sich herstellen – Ursache und Wirkung können durch den Straßenbauexperten erkannt werden. Der Einsatzschwerpunkt eines solchen Multisensorik-Messfahrzeugs führt im Dreiklang „Umfassende Grundlagen des Straßenaufbaus für Ausschreibungsunterlagen“, „Abnahme von Baumaßnahmen“ und „Prüfen möglicher Gewährleistungsansprüche“ zu einer Kosteneffizienz der Straßenunterhaltung und -erneuerung.

Das Geschäftsmodell hat deshalb folgende Anforderungen zu erfüllen:

- Im Start-up muss eine Produktivität und Wirtschaftlichkeit gegeben sein.
- Das Geschäftsmodell muss skalierbar sein: von einem projektbezogenen Ansatz bis zur flächendeckenden Erfassung des Straßenraumes.
- Web-gestützte Darstellung heterogener Multisensorik-Daten in einem Informationssystem.
- Ergänzung der klassischen Vermessung durch Entwicklung geoinformatischer Ansätze zur selektiven Filterung/Auswertung des Datenbestandes.
- Weiterveredelung zu (handlungsorientierten) Produkten.

2 Technologie

Seit Frühsommer 2017 ist bei der Stadt Essen eine Mobile-Multi-Sensorik (MMS) produktiv im Einsatz. Das durch die Firma AllTerra Deutschland GmbH konfigurierte Messfahrzeug besteht aus den Grundkomponenten Trimble MX8, PointGrey Ladybug 5 sowie je zwei Georadar-Hornantennen mit 1,0 und 2,0 GHz aus dem Hause GSSI ([Abb. 1](#)).

Die Außeneinheit des MX8 beinhaltet zwei Laserscanner VQ-450 der Firma Rigel mit einer Messrate von jeweils 550.000 Pkt/sek, einer Reichweite von bis zu 800 m und einer Messgenauigkeit von 8 mm (bis 50 m Entfernung) sowie eine nach vorne und drei nach hinten bzw. seitlich gerichtete 5 Megapixel Grasshopper Kameras (Website Trimble). Den höchsten Punkt am Fahrzeug bildet



Abb. 1: Mobiles-Multisensor-Messfahrzeug der Stadt Essen

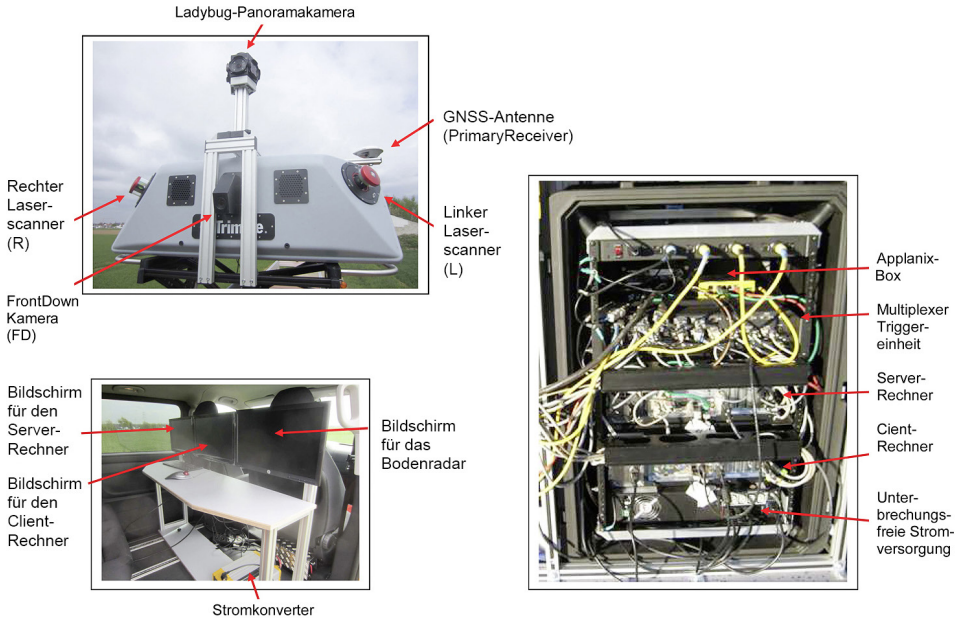


Abb. 2: Hauptkomponenten des Trimble MX8-Systems

die zusätzlich installierte 360°-Kamera (Ladybug 5, mit 6×5 Megapixel Bildsensoren), die in ca. 3,6 m über der Fahrbahn angeordnet ist. Am Heck des Messfahrzeuges verbaut sind je zwei Georadar Hornantennen mit 1,0 und 2,0 GHz, die mit dem Hochleistungs-Multi-Kanal-Steuergerät SIR 30 von GSSI verbunden sind. Damit können in Fahrtrichtung gleichzeitig zwei Schnitte durch den Straßenuntergrund gemessen werden. Die höherfrequente Antenne erzielt eine zentimetergenaue Auflösung und ist mit einer Wirtktiefe von bis zu ca. 0,70 m besonders für die Detektion der gebundenen Schichten der Straße geeignet. Die Erfassung der ungebundenen Schichten liegt bei der 1,0 GHz Antenne, die bis zu 1,20 m Tiefe in einer Auflösung von 3 cm messen kann.

Die exakte Positionsbestimmung des Fahrzeuges erfolgt über eine inertielle Messeinheit (IMU) innerhalb der MX8-Box, zwei GNSS-Antennen sowie ein Radsensor zur Erfassung von Wegstreckendaten (*Distance Measurement Instrument*; DMI). Sie gehören zum Applanix-Positionierungssystem POS LV 520 (*Position and Orientation Solution for Land Vehicles*, Abb. 2). Im Wageninneren sind Server- u. Client-PC, drei Monitore, die Applanix-Box (Empfang und Speicherung der Positionsdaten von IMU, GNSS und Radsensordaten), die Multiplexer-Trigger-Einheit zur Steuerung der Datenströme und eine unterbrechungsfreie Stromversorgung mit einem 12V-230V-Wandler verbaut. Bedient

wird das Gesamtsystem über Steuerungsprogramme der Sensoren, wobei die Hauptsteuerung (Trigger) über die Erfassungssoftware der Ladybug 360°-Kamera läuft. Mit einem Klick werden sämtliche Kamera- und Scanner gestartet. Die Daten werden je Sensor in getrennten Verzeichnissen auf dem Server gespeichert und umfassen ca. 45 GB je Kilometer.

3 Datenauswertung

Die hohe Detaillierung und der Informationsgehalt von 3D-Punktwolken und Georadargramme versetzen den Betrachter ins Staunen. Jedoch fehlen in marktverfügbaren Softwareprodukten vielfach Automatismen zur Auswertung bzw. Analytik. Dementsprechend dienen die Datengrundlagen aus dem MMS dem Experten häufig nur als Konstruktionsgrundlage. Die Bearbeitungen erfolgen mit zwei Innendienstmitarbeitern, die getrennt voneinander Laserscan- und Georadarauswertungen weitgehend händisch durchführen. Dies führt zu einem erheblichen Zeitaufwand bei der Datenauswertung. Das Verhältnis zwischen Erfassungs- (Außendienst) und Auswertungszeit (Innendienst), z. B. zur Erstellung eines Lageplans, liegt in der Regel bei 1 : 20 und mehr.

Im Bereich der automatischen Klassifikation von Laserscanpunktwolken werden eigene Ansätze verfolgt, die im Ergebnis Spurrillen, Löcher und Risse als standardisierte Produkte berechnen, indem die Oberflächenstruktur der 3D-Punktwolke analysiert wird (Abb. 3).

Zur Auswertung von Georadaraufzeichnungen des Straßenuntergrundes werden die Amplituden der Frequenzausschläge an einer GPS-Position betrachtet. Schichten können entweder positive oder negative Amplituden besitzen – Schichtgrenzen sind dementsprechend anhand der Veränderung des Vorzeichens einer Amplitude zu erkennen. Die Amplituden in Abb. 4 sind in Rot (positiv) und Blau (negativ) dargestellt. Deutlich zeigen sich Schichtungen und Heterogenität. Die Inhomogenität kommunaler Straßen führt im Rahmen einer automatisierten Klassifikation zu Fehlinterpretationen, so dass derzeit eine händisch-interaktive Interpretation erfolgt. Dabei dienen Bohrkern der Ansprache von physikalischen und chemischen Materialeigenschaften. Gezielt können im Radarbild „typische“ oder „auffällige“ Bereiche ausgewählt werden, an denen eine Bohrung erfolgen soll. Im Computer entsteht aus Radargramm und Bohrkernansprache eine quasi lückenlose und flächendeckende Berechnung des Straßenuntergrundes in Schnitten. Aussagen über Schichtdicken, -verteilungen und -anordnungen können berechnet werden. Darüber hinaus werden eventuell auftretende Irregularitäten in Form von Störungen oder Hohlräumen detektiert. Im Ergebnis liegt eine umfassende Basis für Grundsatzbeurteilungen und Kostenprognosen zur Sanierung des Straßenuntergrundes vor.

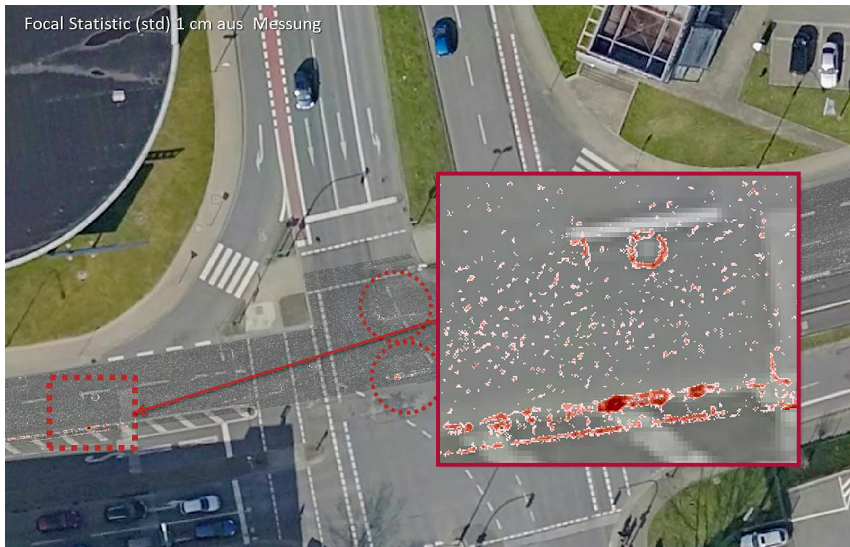


Abb. 3: Klassifikation von Laserscanpunktwolken

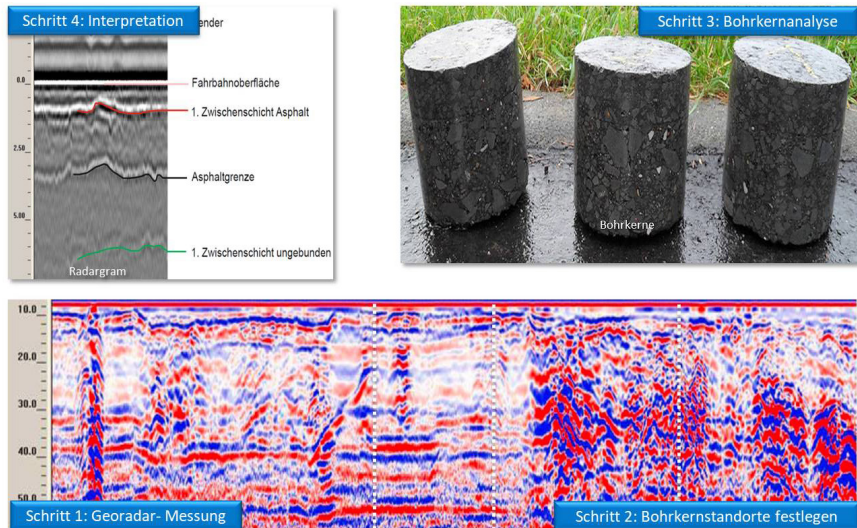


Abb. 4: Arbeitsschritte der Interpretation eines Radargramms

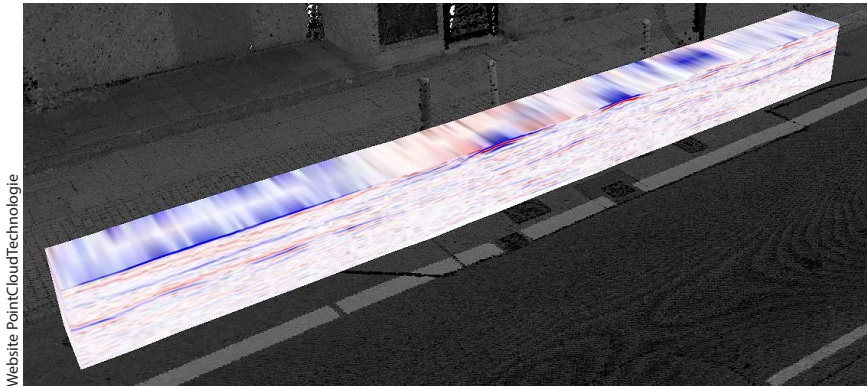
4 Resümee und Ausblick

Eine mobile Datenerfassung mittels MMS hat sich bereits nach wenigen Wochen als alltagstauglich und robust bewährt. Ein Messtrupp, bestehend aus einem Fahrer und einem Operator, kann im fließenden Verkehr ohne zusätzliches Sicherungsfahrzeug eine Datenerfassung durchführen. Die Ergebnisse der Messungen können – mit Ausnahme der Radargramme – mit der Software Orbit Mobile Map Publisher zeitnah aufbereitet, problemlos verwaltet und im Web dargestellt werden (vgl. Website Orbit). An einer Verknüpfung zwischen den Auswertungsergebnissen der unterschiedlichen Sensoren wird geforscht: hat das in der Straßenoberfläche detektierte Loch eine Entstehung durch exogene



Abb. 5: 3D-Visualisierung der 3D-Punktwolke des MMS und gefahrene Trajektorie (orange)

Beanspruchung oder durch Schäden im Straßenaufbau? D.h. neben der Erarbeitung von Workflows für die Auswertestrategie jedes einzelnen Sensors müssen sich die Ergebnisse aller Sensoren korrelieren lassen. Abb. 5 zeigt die 3D-Punktwolke für einen Straßenabschnitt mit der dazugehörigen Trajektorie der Befahrung. Die Fusion von 3D-Punktwolke und Georadargrammen ist in Abb. 6 dargestellt. Für den gewählten Ausschnitt lässt sich beispielsweise die auffällige Charakteristik im Georadargramm auf vorhandene Senkkästen zurückführen, die in der Punktwolke sichtbar sind. Durch die fusionierte Visualisierung können somit effiziente Entscheidungsgrundlagen für die Straßenerhaltung erstellt werden.



Website PointCloudTechnologie

Abb. 6: Detailansicht 3D-Punktwolke und extrudierte Georadargramme

Zusammenfassend wird deutlich, dass die Erfassung und Analyse des Straßenraumes basierend auf mobiler Multisensorik neue und kosteneffiziente Möglichkeiten der Bewirtschaftung bietet. Wesentliche Herausforderungen sind vor allem automatisierte Analyseverfahren in Kombination mit adaptiven Visualisierungslösungen, die unterschiedliche Sensorquellen fusioniert betrachten und auch im Hinblick auf große Datenmengen skalieren. Dies ist deshalb notwendig, da bereits bei einer flächendeckenden Erfassung des Essener Stadtgebietes über 70 TB Daten entstehen – geplant ist zudem eine Historisierung von Daten, die in einem zweijährigen Tonus erhoben werden sollen.

Literatur

Website Orbit: http://demo.orbitgt.com/3d_mapping (siehe Trimble MX8 Demo Essen), letzter Zugriff 05/2018.

Website PointCloudTechnologie: <https://youtu.be/AFTFu6E7sRs>, letzter Zugriff 07/2018.

Website Trimble: www.trimble.com/imaging/pdf/Trimble_MX8_Datasheet.pdf, letzter Zugriff 05/2018.

Kontakt

Dr. rer. nat. Frank Knospe
Amt für Geoinformation, Vermessung und Kataster
Lindenallee 10, 45127 Essen
frank.knospe@amt62.essen.de

Rico Richter
Hasso-Plattner-Institut
Prof.-Dr.-Helmert-Straße 2–3, 14482 Potsdam
rico.richter@hpi.de

Session 3:

Sensorik und Kommunikation

Markerlose Kalibrierung einer Linienkamera zur Erzeugung hyperspektral annotierter 3D-Punktwolken mit einem terrestrischen Laserscanner

Thomas Wiemann | Felix Igelbrink | Joachim Hertzberg

1 Einleitung

In diesem Beitrag beschreiben wir ein Verfahren zur markerlosen Co-Kalibrierung einer hyperspektralen Linienkamera mit einem terrestrischen Laserscanner. Ähnlich der Kalibrierung gegen eine konventionelle RGB-Kamera sollen die 3D-Messpunkte des Laserscanners mit den gemessenen Spektren der Hyperspektralkamera assoziiert werden. Hyperspektralkameras teilen das Spektrum des einfallenden Lichts in diskrete Wellenlängenbereiche auf, in denen die Intensität des einfallenden Lichts pro Bereich detektiert wird. Dies erlaubt es, die charakteristische Intensitätsverteilung des von den in der Umgebung vorhandenen Materialien reflektierten Lichts über die verfügbaren Spektralbereiche zu erfassen. Technisch wird dazu das einfallende Licht mittels eines Prismas aufgeteilt und auf einen CCD-Chip geleitet, der die Intensität für jeden Pixel misst. Dabei spiegelt eine Dimension der Pixelmatrix die räumliche Verteilung wieder, die andere die spektrale Verteilung. Dementsprechend verhält sich so eine Kamera wie eine Zeilenkamera mit vielen hyperspektralen Kanälen.

Ein erster Ansatz zur Kalibrierung eines solchen Systems wurde in Wiemann et al. (2018) vorgestellt. Hier geschah die Kalibrierung mittels eines Referenzmusters in OpenCV im Lochkameramodell. Obwohl sich mit diesem Ansatz bereits passable Ergebnisse erreichen ließen, hatte es zwei entscheidende Nachteile. Zum einen musste das Referenzmuster sowohl in den Hyperspektraldaten als auch in den Laserdaten gefunden werden. Aufgrund der geringen räumlichen Auflösung der Kamera war es in vielen Situationen schwierig, das Referenzmuster sicher zu erkennen. Zum anderen zeigte sich, dass mit dem Lochkameramodell nicht alle Verzerrungen korrekt ausgeglichen werden konnten.

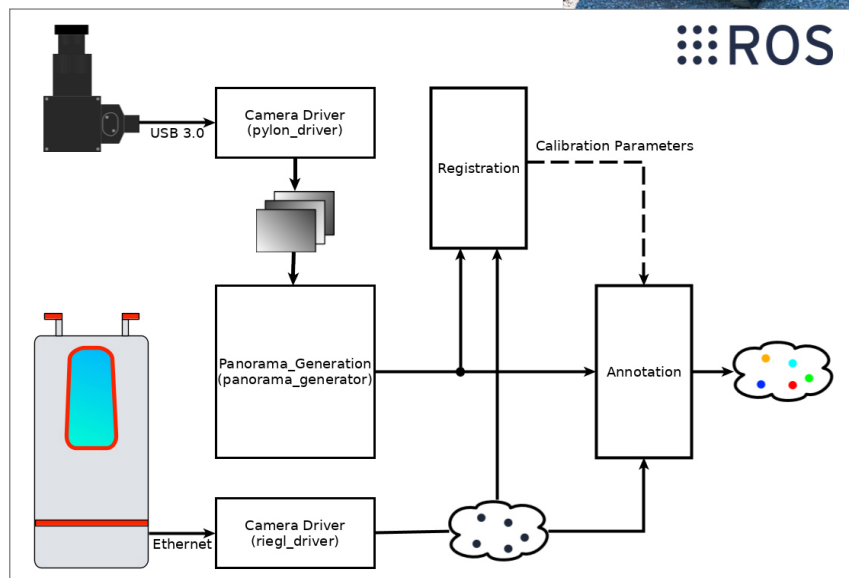
In diesem Artikel zeigen wir einen weiterführenden Ansatz, der diese Probleme löst. Die extrinsische Kalibrierung der Hyperspektralkamera gegen den Laserscanner erfolgt nun markerlos, so dass eine Neukalibrierung des Systems direkt im Einsatz ohne die Einbringung von künstlichen Markern möglich ist. Dazu werden die einzelnen Bilder der Kamera zunächst zu einem konsistenten

„Hyperspektralpanorama“ zusammengesetzt. Mit Hilfe eines Panoramamodells werden dann die Daten aus beiden Sensoren mittels eines Mutual-Information-Ansatzes zur Deckung gebracht. Im Folgenden beschreiben wir den Aufbau unseres Referenzsystems, den Ansatz zur Kalibrierung der beiden Sensoren und zeigen erste Ergebnisse von durchgeführten Messungen.

2 Aufbau des Messsystems

Das hier vorgestellte Messsystem besteht aus einem Riegl VZ 400i Laserscanner sowie einer Resonon PikaL-Hyperspektralkamera mit 150 diskreten Spektralkanälen im Bereich von 400 bis 1000 Nanometer und einer räumlichen (vertikalen) Auflösung von 900 Pixeln pro Linie. Der Aufbau des Systems ist in Abb. 1 dargestellt.

Abb. 1: Aufbau und Sensorik der Roboterplattform Pluto (rechts) sowie eine schematische Übersicht der implementierten Softwarekomponenten und des Ablaufs der Kalibrierung (unten)



Der Laserscanner ist hier auf einer mobilen Roboterplattform installiert, die mit dem Robot Operating System (ROS) betrieben wird. ROS stellt Mechanismen zur Synchronisation von Sensordaten aus verschiedenen Quellen zur Verfügung. Hier verwenden wir eigene Treiber für Scanner und Kamera. Der Kamerascanner setzt die Linien der Hyperspektralkamera während der Drehbewegung des Laserscanners zu einem konsistenten Panoramabild zusammen. Die Daten von beiden Sensoren werden dann je nach gewähltem Betriebsmodus entweder zur Kalibrierung oder zur Einfärbung der Punktwolken verwendet.

3 Automatische Kalibrierung

3.1 Erzeugung von Referenzbildern zur Kalibrierung

Für die extrinsische Kalibrierung müssen die Daten des Laserscanners mit denen der Kamera verglichen werden können. Dazu werden die 3D-Punkte p_i des Scanners mit einem passenden Panoramamodell nach Schneider und Maas (2006) auf eine Zylinderoberfläche projiziert, die den Parametern der verwendeten Kamera entspricht. Eine Skizze dieses Modells ist in [Abb. 2](#) dargestellt.

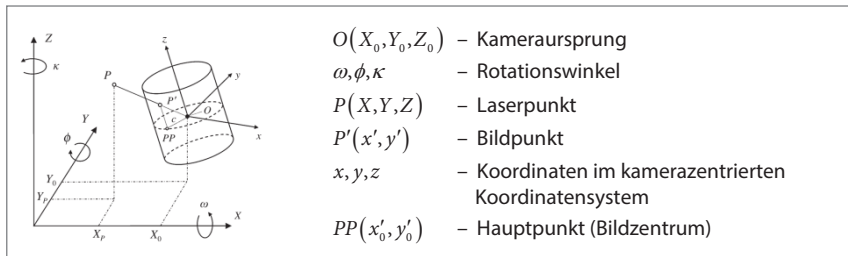


Abb. 2: Zylindrisches Kameramodell nach Schneider und Maas (2006), das zur Projektion der 3D-Punkte verwendet wird.

Daraus ergeben sich die folgenden Projektionsgleichungen für die Koordinaten x'_i und y'_i auf der Zylinderoberfläche:

$$\begin{aligned}
 p_i &= R^{-1}(P_i - O), \quad R(\omega, \phi, \kappa), \quad O(X_0, Y_0, Z_0) \\
 x'_i &= x'_0 - \tan^{-1} \left(\frac{-y_i}{x_i} \right) \\
 y'_i &= y'_0 - \frac{z_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Diese Zylinderkoordinaten werden anschließend in die Pixelkoordinaten eines Bildes umgewandelt:

$$\begin{aligned} x_i^{\text{image}} &= \frac{x_i' + \min_j x_j'}{I_x}, & y_i^{\text{image}} &= \frac{R_y}{2} - \frac{y_i'}{I_y} \\ I_x &= \frac{\max_i x_i' - \min_i x_i'}{R_x}, & I_y &= \frac{\max_i y_i' - \min_i y_i'}{R_y} \end{aligned} \quad (2)$$

R_x und R_y spezifizieren dabei die Auflösung des generierten Bildes in Pixeln.

Das resultierende synthetische Bild des Laserscanners wird dann mit dem Panoramabild der Hyperspektralkamera verglichen. Dazu wird aus den Hyperspektraldaten ein RGB- bzw. Graustufenbild abgeleitet. Dieses kann gewonnen werden, indem die Intensitäten entsprechender Spektralbereiche (z. B. rot: 570 nm, grün: 540 nm, blau: 440 nm) als RGB-Werte interpretiert werden. Ein Beispiel für ein so erzeugtes Pseudo-RGB-Bild ist in [Abb. 3](#) gezeigt.



Abb. 3: Beispiel für ein Pseudo RGB-Panorama, das aus den Liniendaten der Hyperspektralkamera zusammengesetzt wurde.

Die Idee hinter diesem Ansatz ist, dass sich trotz unterschiedlicher Bilddomänen gemeinsame Strukturen in beiden Bildern finden lassen. Dazu projizieren wir den normalisierten Reflektanzwert jedes 3D-Punktes des Laserscanners im Sichtbereich der Kamera in die Pixelkoordinaten der angenommenen zylindrischen Panoramakamera. Ausgehend von einer passenden Initialschätzung der Ausrichtung der Kamera, werden anschließend die Modellparameter optimiert, bis Kamera- und Laserscannerbild optimal zueinander passen. Ein Beispiel für ein solches Bildpaar zeigt [Abb. 4](#). Die Optimierung der Modellparameter erfolgt dabei mit einem Mutual-Information-Ansatz, dessen Implementierung im Folgenden vorgestellt wird.



Abb. 4: Projektion der Intensitätswerte der 3D-Punkte in das synthetische Panoramabild (links) und das mit der Kamera aufgenommene Referenzbild (rechts). Die schwarzen Anteile im linken Bild entstehen durch die Unterschiedlichen Blickwinkel der Sensoren.

3.2 Extrinsische Kalibrierung mittels Mutual Information

Der Vergleich der Bilder zur Optimierung der Modellparameter basiert auf der sogenannten Normalized Mutual Information (NMI). Diese beschreibt die statistische Abhängigkeit zwischen zwei Zufallsvariablen M, N basierend auf der Shannon Entropie (Shannon 2001). Hier betrachten wir die Histogramme der Grauwertverteilung in beiden Bilddomänen als Approximation der Zufallsverteilungen. Die NMI wird wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned}
 H(M) &= - \sum_{m \in M} p_M(m) \log \frac{1}{p_M(m)} \\
 H(N) &= - \sum_{n \in N} p_N(n) \log \frac{1}{p_N(n)} \\
 H(M, N) &= - \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} p_{M, N}(m, n) \log \frac{1}{p_{M, N}(m, n)} \\
 NMI(M, N) &= \frac{H(N) + H(M)}{H(M, N)}
 \end{aligned} \tag{3}$$

Die eigentliche Kalibrierung ist hier ein Optimierungsproblem, bei dem ein die NMI maximierender Parametersatz des Kameramodells gesucht wird:

$$\begin{aligned}
 \hat{\Theta} &= \arg \max_{\Theta} NMI(M, N, \Theta) \\
 \Theta &= \{X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa, x'_0, y'_0\}
 \end{aligned} \tag{4}$$

Durch die Diskretisierung der verwendeten Histogramme und den dadurch entstehenden Fehler in der Approximation der Zufallsverteilung weist die

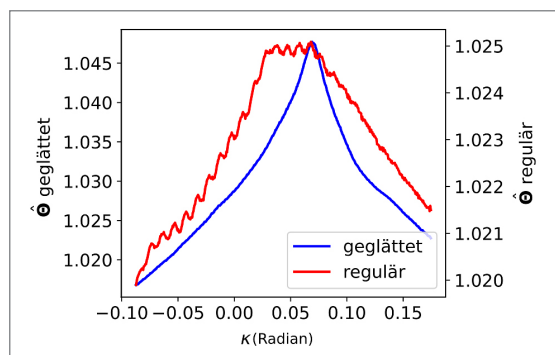


Abb. 5:

Verlauf der Zielfunktion vor- und nach der Faltung der Eingabehistogramme mit einem Gaußfilter

Zielfunktion viele lokale Maxima auf, was das Auffinden der global optimalen Lösung erschwert. Um die Auswirkung dieser lokalen Maxima zu verringern, werden die Eingangsbilder vor der Histogrammerstellung mit einem Gaußfilter gefaltet. Zusätzlich wird die Bin-Anzahl der Histogramme signifikant verkleinert, um den Einfluss von Rauschen auf die Approximation der Zufallsverteilung zu verringern.

Die resultierenden Zielfunktionen für einen Modellparameter sind in Abb. 5 gezeigt. Die gefaltete Zielfunktion weist offensichtlich nur ein einzelnes Maximum auf, dessen Position mit dem Maximum der nicht-gefalteten Zielfunktion übereinstimmt. Dies stellt sicher, dass das verwendete Optimierungsverfahren mit hoher Wahrscheinlichkeit im globalen Maximum konvergiert. Um die Datenbasis zu erweitern, findet die Kalibrierung nicht nur mit einem Bildpaar, sondern mit den gemeinsamen Verteilungen mehrerer Bildpaare statt. Dadurch erhöht sich zwar der Rechenaufwand, die Robustheit der Kalibrierung wird aber signifikant erhöht.

Die eigentliche Optimierung erfolgt mit einem Standard-Optimierungsverfahren. Wir haben hier Partikelschwarmoptimierung (PSO) und das Verfahren nach Nelder-Mead (Olson und Nelson 1976) evaluiert, die beide keine Gradienteninformationen benötigen und daher auch für nicht-stetige Zielfunktionen, wie im vorliegenden Fall, geeignet sind. Da ein Optimierungsschritt durch die Projektion der 3D-Punkte und die Berechnung der Histogramme für hohe Bildauflösungen sehr rechenaufwändig ist, haben wir diese Schritte in CUDA zur Berechnung auf GPUs implementiert. Dadurch ist es möglich, das Optimierungsproblem in wenigen Sekunden zu lösen. Die Rechenzeiten der verschiedenen Verfahren für einen und zehn Scans sind in Tab. 1 aufgeführt. Zur Bewertung der Qualität der Kalibrierung, haben wir jeweils manuell zehn korrespondierende Punkte nach der Optimierung in den Bildern bestimmt und den Abstand zueinander ermittelt. Die so berechneten mittleren Abstandswerte zeigt die letzte Spalte der Tabelle. Insgesamt zeigt sich, die die Reduzierung der Bins zu deutlich

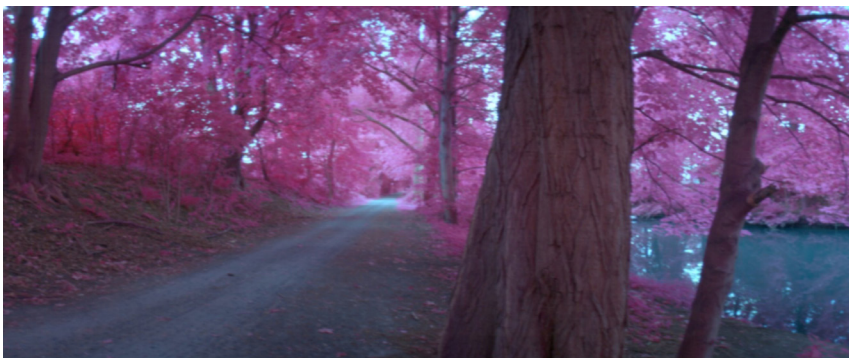
Tab. 1: Laufzeiten und durchschnittlicher Pixelfehler der getesteten Implementierungen

Methode	1 Scan	10 Scans	Pixelfehler
PSO (CPU)	6,30 h	> 40 h	1,37
PSO (GPU)	323,23 s	2379,28 s	1,37
Nelder-Mead (GPU, 256 Bins)	5,62 s	60,51 s	794,77
Nelder-Mead (GPU, 16 Bins)	9,03 s	84,88 s	1,90

robusteren Ergebnissen führt. Dies ist auf die signifikante Reduzierung des Einflusses lokaler Maxima auf die Zielfunktion zurückzuführen.

4 Anwendungsbeispiele

Im Folgenden präsentieren wir zwei beispielhafte Einfärbungen von hyperspektral annotierten Punktwolken. Im ersten Beispiel ([Abb. 6](#)) wurde der Anteil des roten und nahen Infrarotbereichs der Daten durch Falschfarben hervorgehoben (rot: 850 nm, grün: 660 nm, blau: 540 nm). In diesem Bild bildet der Rotkanal den nahen Infrarotbereich ab, der Grünkanal den roten Spektralbereich und der Blaukanal den grünen Anteil ab. Dadurch werden Materialien, die im nahen Infrarotbereich abstrahlen, besonders hervorgehoben. Dies ist insbesondere für das Chlorophyll der Pflanzen der Fall, weshalb diese besonders hervorkommen. Diese Aktivität kann durch die sogenannten NDVI-Wert (Normalized Difference Vegetation Index) noch weiter hervorgehoben werden, wie in [Abb. 7](#) dargestellt ist.

**Abb. 6:** Hervorhebung der Farbanteile im roten und nahen infraroten Spektralbereich

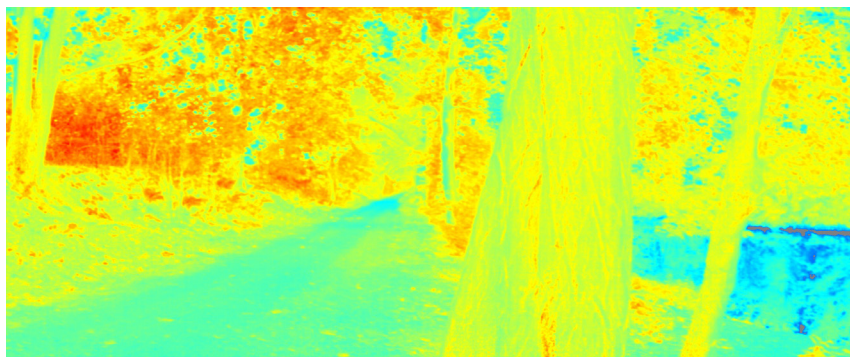


Abb. 7: Darstellung der NDVI-Werte der einzelnen Punkte, die aus den Hyperspektraldaten ermittelt wurden.

Literatur

- Olsson, D. M.; Nelson, L. S. (1975): The Nelder-Mead simplex procedure for function minimization. *Technometrics*, 17(1), 45–51.
- Schneider D.; Maas, H. A. (2016): geometric model for linear-array-based terrestrial panoramic cameras. *The Photogrammetric Record*, 21(115), 198–210.
- Shannon, C. A (2001): Mathematical theory of communication. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 5(1), 3–55.
- Wiemann, T.; Heiden, C.; Diederichsen, R.; Pütz, S.; Hertzberg, J.(2018): Erzeugung hyperspektraler Punktwolken auf einem mobilen Roboter. In: Luhmann/Müller (eds.): *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018*, Wichmann Verlag.

Kontakt

Dr. Thomas Wiemann
Universität Osnabrück, Institut für Informatik
Wachsbleiche 27, 49090 Osnabrück
twiemann@uni-osnabrueck.de

Spezielle Vermessungslösungen für den barrierefreien Ausbau einer Haltestelle der Hamburger Hochbahn

Eike Barnefske | Harald Sternberg

1 Einleitung

Die Hamburger Hochbahn AG (HHa), einer der Betreiber des öffentlichen Personennahverkehrs in der Region Hamburg, hat die Aufgabe alle Hochbahnhaltestellen bis ins Jahr 2024 barrierefrei umzubauen. Für den Umbau sind neben dem Einbau von Aufzügen auch Teil- oder Vollerhöhungen von Bahnsteigen notwendig, damit die vorhandene Stufe zwischen Bahnsteig und Zug ausgeglichen wird.



Abb. 1:

Spalt zwischen Zug und Bahnsteig, der aufgrund der Bahnsteigerhöhung Breiten von bis zu 20 cm einnehmen kann.

Um den Spalt zwischen Zug und Kante gering zu halten, sollten die Bahnsteige möglichst in der Geraden liegen (Abb. 1). In stark gekrümmten Gleisen ergeben sich durch die Bogenstellung Spaltmaße bis 20 cm. Ein Überwinden dieses Spaltes kann für Rollstuhlfahrer, Kinderwagen oder bewegungseingeschränkte Personen ein erhebliches Sicherheitsrisiko darstellen. Diesen Spalt durch ausklappbare Stufen oder Rampen zu schließen, wird von der HHa aufgrund der Vielzahl von verschiedenen Zügen und Haltestellensituationen sowie den hohen Anforderungen an einen störungsfreien und sicheren Betrieb ausgeschlossen. Eine Minimierung des Spaltes kann z. B. individuell je Haltestelle, durch das Einbringen von beweglichem und trittfestem Füllmaterial (Gap-Fillern), erfolgen.

Die optimale Breite des Gap-Fillers für Bahnsteige in Kurvenlagen kann aufgrund vieler unbekannter und stark variierender Einflussfaktoren nicht

modelliert werden, so dass diese Breite messtechnisch zu bestimmen ist. Um alle möglichen, variierenden Einflussgrößen, wie den Beladungszustand von Zügen oder die Zuggeschwindigkeit, zu berücksichtigen, ist der Abstand zwischen Zug und Bahnsteig mit einer engen räumlichen Auflösung über einen Zeitraum von etwa einem halben Jahr sensorisch erfasst worden. Das Ein- und Ausfahren eines Zugs soll dabei zeitgleich hochaufgelöst erfasst werden, da sich der Zug durch das Bremsen und Beschleunigen neigt. Für diesen Zweck wurde ein Geosensornetzwerk (GeoSN), basierend auf Low-Cost Sensoren, entwickelt und an zwei Haltestellen zum Einsatz gebracht. Ergänzend zu den Messungen mit dem GeoSN wurden Laserscans im Profilmodus durchgeführt. Die Laserscans können nur in den Betriebspausen durchgeführt werden, aber stellen eine wichtige Größe für die Validierung des GeoSN dar.

2 Low-Cost Geosensorsysteme und MEMS

Ein GeoSN ist eine Verbindung von verschiedenen Sensoren mit denen Messgrößen an einem bestimmten Ort aufgezeichnet werden können. Diese Größen sind zum einen nicht geodätisch, wie z. B. Temperatur oder Niederschlag, und zum anderen geodätisch, wenn eine Positionsveränderung der Messstellen oder eine geometrische Messgröße bestimmt wird (Schwieger und Sternberg 2014). Der Einsatz von GeoSN ist effektiv, wenn über einen längeren Zeitraum an einer Vielzahl von Messstellen mit einer hohen Aufzeichnungsrate Beobachtungen durchzuführen sind. Mit der Anzahl der Messstellen steigen die Installationskosten für GeoSN an, so dass GeoSN auf Basis von Low-Cost Sensoren von großem Interesse und ein aktueller Forschungsgegenstand sind.

Anwendung finden Low-Cost GNSS-Sensoren in Glabsch et al. (2009) bei der Überwachung von Rutschhängen und in ausgedehnten Gebieten mit dem Ziel, ökonomische und zuverlässige Überwachungsmessungen durchzuführen. Zudem ist eine Alarmierung bei gefährlichen Bewegungen abzusetzen. Weitere Untersuchungen zu Low-Cost GNSS-Sensoren werden bei Zhang (2016) vorgenommen, um Genauigkeits- und Zuverlässigkeitssteigerung durch ergänzende Hardware und verbesserte Auswertelgorithmen zu erzielen.

Bei Anwendungen von Low-Cost Sensoren in Multisensorsystemen und GeoSN sind Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) sehr häufig im Einsatz. MEMS erfüllen die gleichen Funktionen wie hochwertige Sensoren, sind aber stark verkleinert und werden in industrieller Massenproduktion hergestellt. Die MEMS sind nicht für hochgenaue Messungen ausgelegt und i. d. R. liegen für diese Sensoren keine genauen Kennzahlen zur Leistung oder eine Kalibrierung vor. Vorteile der MEMS sind neben den geringen Kosten, die kompakte Bauweise, das geringe Gewicht sowie der geringe Energiebedarf (Wild-Pfeiffer und

Schäfer 2011). In Smartphones sind MEMS verbaut und werden für die Entwicklung von Indoor-Positionierungs- und Navigationssystemen (Willemssen et al. 2014) sowie bei Untersuchungen zur Bauwerksüberwachung (Engel et al. 2018) eingesetzt. Weitere Arbeiten mit Low-Cost Sensoren in GeoSN beschreiben den Nachbau von hochwertigen Messsystemen mit MEMS. Ein Low-Cost GeonSN in Form eines ground-based Radars mit MEMS Sensoren wird in Eppinger et al. (2016) vorgestellt. Von besonderem Interesse sind dabei Untersuchungen zur Leistung der MEMS. Die Entwicklung von Kalibrierverfahren für solche Sensoren sowie das Auswerten der resultierenden, stark rauschenden und teilweise unzuverlässigen Messwerte der Low-Cost Sensoren sind aktuelle Forschungsfragen (Willemssen et al. 2016).

3 Konzept für das Low-Cost GeoSN

Das Bestimmen der Spaltbreiten zwischen Zug und Bahnsteigkante kann aufgrund der Rahmenbedingungen in den Haltestellen effektiv mit einem GeoSN gelöst werden. Die große Anzahl von bis zu 60 Messstellen, die zeitgleich messen

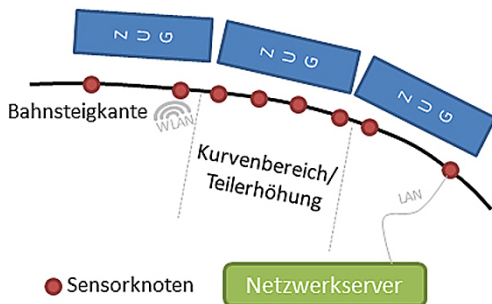


Abb. 2:

GeoSN für Abstands- und Berührungsmessungen in verschiedenen Konfigurationen mit zentraler Infrastruktur

müssen, lässt nur ein Sensornetzwerk aus autonomen Sensorknoten zu, die zu geringen Kosten hergestellt werden können. Das GeoSN besteht aus kleinen Sensorknoten, die an der Bahnsteigkante, an den Stellen von Interesse, installiert werden und die die gemessenen Daten speichern. Nach Beendigung einer Messung werden die Daten als Block oder einzelne Werte nach einer Vorauswertung an einen Netzwerkserver übertragen. Alarmierungsnachrichten können zudem generiert und versendet werden. Die Datenübertragung erfolgt über LAN- und WLAN-Verbindungen (Abb. 2).

Neben den messtechnischen Anforderungen sind Vorgaben für die Sicherheit der Fahrgäste und den störungsfreien Fahrbetrieb einzuhalten. Sensoren, die mit Lasern messen, sind wegen einer potenziellen Augengefährdung in vielen

Bereichen ausgeschlossen, so dass die Distanzmessungen mit Ultraschallsensoren erfolgen. Ein Sensorknoten besteht mindestens aus einem Ultraschalldistanzsensor (z. B. HC-SR04), einem Microcontroller (z. B. Arduino Mega) sowie einem SD-Kartenmodul ([Abb. 3 links](#)). Die Kosten eines solchen Sensorknoten liegen unter 30 Euro. Die Sensorknoten sind so gehalten, dass eine Erweiterung und ein Umbau der Sensorknoten einfach möglich sind. Erweiterungen und

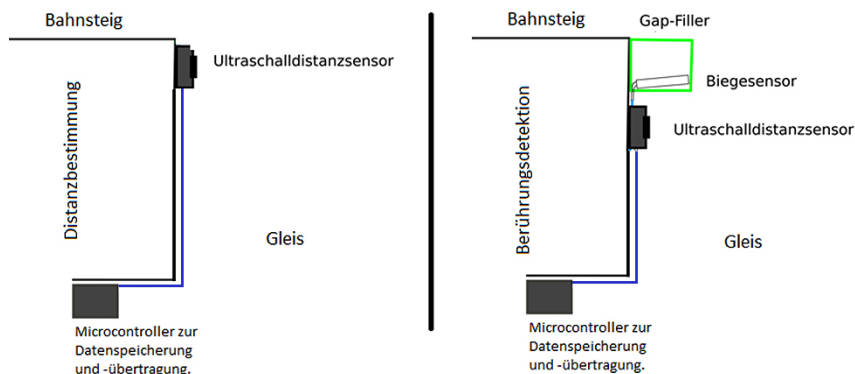


Abb. 3: Aufbau der Sensorknoten zur Distanzbestimmung (links) und zur Berührungsdetektion (rechts)

Umbauten wurden im Rahmen des Projekts mehrfach vorgenommen um das Messsystem zu verbessern und auf neue Anforderungen einzugehen, wodurch der Messablauf angepasst werden muss. Nach dem Einbau der Gap-Filler am Bahnsteig ist der Sensorknoten zur Detektion von Berührungen von Zügen am Gap-Filler umgebaut worden. Hierfür sind eine Echtzeituhr, ein LAN-Modul und Biegesensoren installiert worden ([Abb. 3 rechts](#)). Die notwendige Software für die Steuerung der Sensorknoten und die Datenaufzeichnung ist mit den Softwarebibliotheken von Arduino (C++-basiert) umgesetzt worden (Arduino-Guide 2015).

Die Distanz- und Biegesensoren weisen aufgrund ihrer Charakteristik eine geringe Genauigkeit auf und variieren in ihrer Leistung von Sensor zu Sensor sehr stark. Um diese Nachteile zu eliminieren, wird der Nullpunktfehler für jeden Distanzsensor nach dem Einbau in ein Schutzgehäuse mit einer Messlehre, dessen Größe die typische Messweite von etwa 15 mm ist, bestimmt ([Abb. 4](#)). Distanzmessfehler, die auf eine sich ändernde Schallgeschwindigkeit durch Temperaturänderungen zurückzuführen sind, wurden in Kälte- und Klimakammern analysiert. Diese Untersuchungen zeigen, dass Korrekturen bei Messungen im Innenbereich vernachlässigt werden können, da die Änderungen in der Größe des Messrauschens liegen. Für Messungen im Außenbereich ist bei

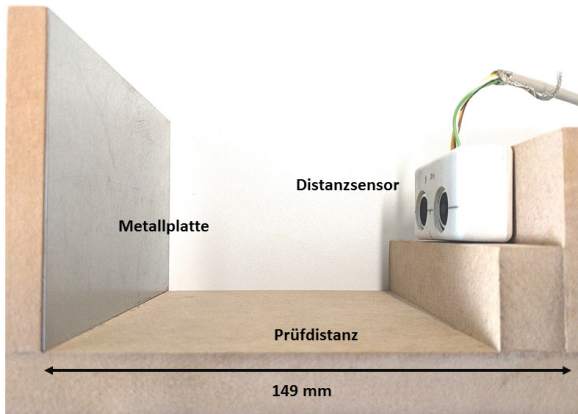


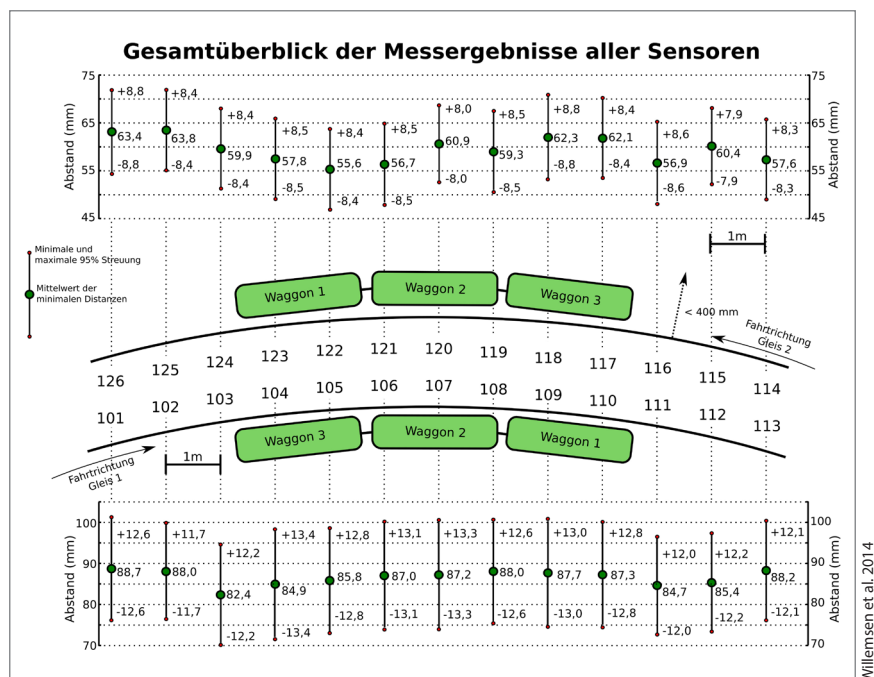
Abb. 4:
Prüflhre zur Bestimmung der systemischen Streckenmessfehler (hier Nullpunktfehler)

Temperaturen von weniger als 0 °C die Schallgeschwindigkeit anzupassen und so die Distanzmessung zu korrigieren.

Die Biegesensoren messen einen elektrischen Widerstandswert, der abhängig von der Größe der Biegung ist. Die Biegesensoren werden in einen Gap-Filler eingeklebt, so dass nicht mehr die Biegung des Sensors, sondern die Eindringtiefe eines Zuges in den Gap-Filler bestimmt wird. Der Gap-Filler besteht aus horizontal biegbaren Lamellen. Die Größe der Biegung der Lamellen steht in einer Beziehung zur Eindringtiefe eines Zuges, die durch eine Kalibrierung bei festen Eindringtiefen eines Probekörpers bestimmt wird. Sollen aus den erfassten Widerstandswerten Eindringtiefen mit einer hohen Auflösung von 1 bis 2 mm bestimmt werden, ist ein exponentieller Zusammenhang festzustellen. Für eine grobe Auflösung und eine maximalen Eindringtiefe von bis zu 20 mm kann eine annähernd lineare Beziehung zwischen Eindringtiefe und Widerstandswert angewendet werden. Für die Fragestellung ob keine (< 5 mm), leichte (5 bis 10 mm) oder starke (> 10 mm) Berührungen vorliegen, kann mit dem linearen Modell und einer Look-Up-Tabelle für jeden Sensor verfahren werden.

4 Auswertung und Messergebnisse des GeoSN

Das GeoSN wird zum einen für das Bestimmen von Abständen und zum anderen für das Detektieren von Zugberührungen am Gap-Filler eingesetzt. Die Abstandsmessungen werden für die Wahl der Gap-Filler-Breite herangezogen. Von Interesse sind jeweils die kürzesten Distanzen, die in einer Vielzahl der Fälle während der Ein- und Ausfahrten der Züge registriert werden. Während der Durchfahrt eines Zuges werden Messungen mit 5 bis 10 Hz auf den gesamten Zug (bis 30 km/h schnell) und auf alle Anbauteile, wie Trittstufen und Schläuche,



Willemsen et al. 2014

Abb. 5: Bestimmte Breiten des Spalts zwischen Bahnsteig und Zug jedes Sensorknotens für die zwei Gleise der Haltestelle Klosterstern in Hamburg-Eppendorf

durchgeführt. Die große Anzahl von mehr als 15.000 Zugfahrten innerhalb des Messzeitraums stellt sicher, dass alle relevanten Elemente und Zustände der Züge erfasst werden. An den einzelnen Messstellen an einer Bahnsteigkante, werden verschiedene Abstände für die kürzesten Distanzen registriert (Abb. 5). Gründe für diese Variation der Abstände liegen im zufälligen Messrauschen der Sensoren, in der gekrümmten Form des Bahnsteigs und in der unterschiedlichen Geschwindigkeit, mit der ein Zug eine Messstelle passiert.

Die Mittelwerte der Distanzen liegen in der inneren Kurve bei 82 bis 88 mm und in der äußeren Kurve bei 55 bis 63 mm (Abb. 5). Die Streuung der Distanzen bei 95 % aller Messungen beträgt in der innen Kurve bis zu 13 mm und in der Außenkurve bis zu 8 mm. Aufgrund dieser Messungen kann in der äußeren Kurve ein Bereich von 47 mm und in der inneren Kurve von 70 mm festgestellt werden, in denen keine Berührungen durch den Zug zu erwarten sind. Eine geringe Anzahl von leichten Berührungen, von bis zu 5 % aller Züge, wird als tolerierbar angesehen, um den Spalt möglichst zu reduzieren. Die Gap-Filler-Breiten werden für die innere Kurve mit 75 mm und für die äußere Kurve mit 50 mm festgelegt.

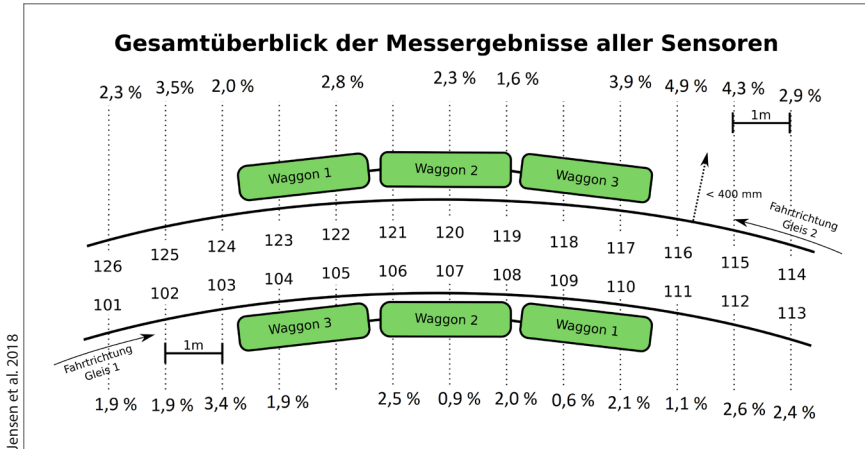


Abb. 6: Nachweis der Berührungen durch Messungen mit Biegesensoren

In der Phase des Probebetriebs ist, neben anderen Untersuchungen, der Nachweis zu erbringen, dass weniger als 5 % aller Züge die installierten Gap-Filler berühren. Dieser Nachweis wird durch GeoSN erbracht, indem Biegesensoren in den Gap-Fillern an den Messstellen der Distanzmessungen installiert werden. Werden starke Berührungen registriert, wird zusätzlich eine E-Mail-Alarmierung aktiviert, so dass Züge und Bahnsteig zeitnah überprüft werden können. Die einzelnen Ergebnisse der Messstellen zeigen, dass der Grenzwert von 5 % der erlaubten Berührungen eingehalten wird (Abb. 6).

Ein erweitertes GeoSN mit 60 Sensorknoten ist aktuell im Einsatz, um Informationen für eine vollständige Erhöhung eines Bahnsteiges zu liefern. Dieses GeoSN besteht aus Sensorknoten, die sowohl im geschützten Innenbereich, aber auch im ungeschützten Außenbereich installiert sind. Zwischenergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass durch den Einfluss der Witterung das Messrauschen erhöht wird und grobe Messfehler, insbesondere durch den Niederschlag, hervorgerufen werden. Eine Reduzierung dieser Messfehler ist möglich, wenn Messwerte, zu Zeiten in denen ungünstige Witterungsverhältnisse herrschen, nicht in der Auswertung berücksichtigt werden. Zudem werden Messwerte in Zeiten mit trockenem und windstillem Wetter in der Auswertung stärker gewichtet. Ergänzend werden Kontrolluntersuchungen in den Betriebspausen in Form von Profillaserscans durchgeführt.

5 Profillaserscans

Profillaserscans können als Erweiterung des GeoSN in Bereichen, in denen sich keine Fahrgäste aufhalten (z. B. Tunnelanlagen und Kehrgleisen) oder zur Kontrolle am Bahnsteig in den Betriebspausen eingesetzt werden. Erste Untersuchungen zum Einsatz von Profilsfans wurden mit dem Z+F Imager 5010 im Profilmodus durchgeführt. Hierfür sind Abstände zu drei Kanten an der Fahrzeugkarosserie zu messen, in dem das Querprofil eines fahrenden Zuges mit dem Laserscanner erfasst wird (Abb. 7). Diese Messungen liefern Informationen

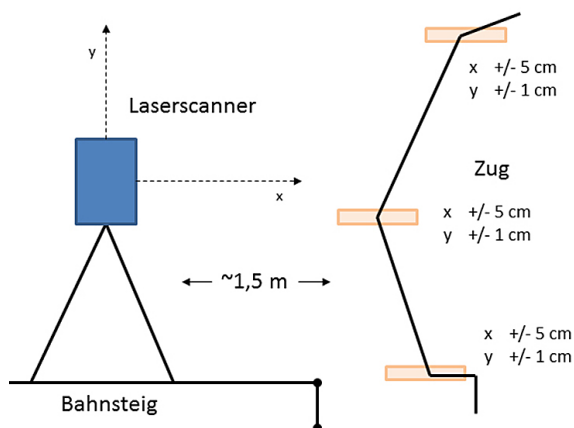


Abb. 7:
Messaufbau und Auswertung der Profilsfans

über das Bewegungsverhalten des Zuges an einer Position von Interesse (z. B. am Übergang zwischen Gerade und Kreisbogen der Gleisachse). Durch das Erfassen von fester Infrastruktur (z. B. Bahnsteigkanten) können in einem Scan Abstände zwischen Zug und Objekten sowie deren Änderungen bestimmt werden. Eine absolute Georeferenzierung des Scanners im Haltestellenkoordinatensystem und der so hergestellte Bezug zur Gleisachse ist für weitere Untersuchungen notwendig.

Die Auswertung des Profilsfans liefert drei Kanten der Karosserie eines Zuges. Die Lage der Kanten wird in den Profilsfans näherungsweise bestimmt und durch ein Koordinatenpaar (x, y) beschrieben. Um dieses Koordinatenpaar wird ein $10 \times 2 \text{ cm}$ großer Bereich gelegt und aus den horizontalen Abständen in dem Bereich wird der Mittelwert in x -Richtung bestimmt (Abb. 7). Die Vorgabe eines Bereiches ist notwendig, da neben Änderungen in x -Richtung auch kleiner Änderungen der Kante in der Höhe (y -Richtung) auftreten. Diese Distanz, reduziert um den horizontalen Abstand vom Laserscanner zur Bahnsteigkante, ist der horizontale Abstand zwischen Zug und Bahnsteigkante in jedem Profil.

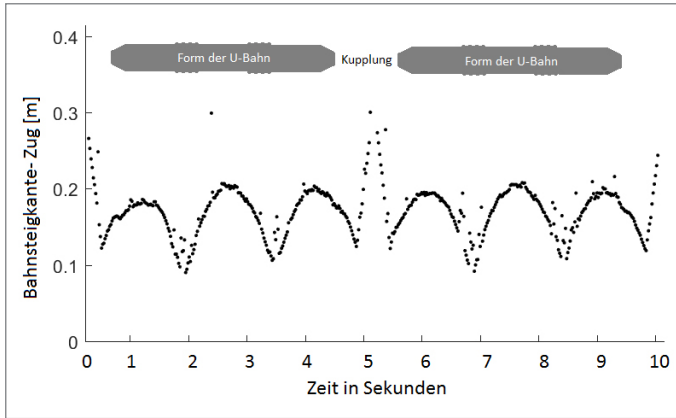


Abb. 8:
Profillaser-
scan, der die
Änderung
der Abstände
zwischen Zug
und Bahn-
steigkante
über die Zeit
darstellt (mitt-
lere Kante des
Zuges).

Die bestimmten Abstände aus den Profilschans nehmen für die abgetasteten Kanten am Zug Minimalwerte an. Dieser Abstand verändert sich während der Durchfahrt eines Zuges aufgrund der Geometrie des Zuges und des Fahrverhaltens (Neigung des Zuges in der Kurve). Abb. 8 stellt exemplarisch die Veränderung des Abstands während der Fahrt eines Zuges an der mittleren Kante des Zugprofils in einer Außenkurve dar. Durch die starren Waggons vergrößert sich der Abstand zwischen Zug und Bahnsteigkante in der Mitte der Waggons und verringert sich zu den Gelenken/Achsen hin, an denen sich der Zug in Richtung des Bahnsteigs bewegt. Der erfasste Zug besteht aus zwei gekuppelten Zugteilen, die auf Höhe der Mittelkante nicht verbunden sind, so dass im Profil eine Lücke auftritt. Das Abtasten einer gesamten Seite des Zuges mit einem Laserscanner gibt Aufschluss über das tatsächliche Bewegungsverhalten und kann zur Überprüfung der aktuellen Modellierungen und Annahmen herangezogen werden.

Der Einsatz von Laserscannern führt schon nach kurzer Beobachtungszeit zu sehr großen Mengen an Beobachtungsdaten, die nicht immer für die Klärung einer Fragestellung benötigt werden. Insbesondere erhöht sich der Auswertungsaufwand, da leistungsfähige Hardware, Expertenwissen und manuelle Nachbearbeitungen der Daten notwendig sind. Im Verlauf des Projekts mit der HHA konnten die Vor- und Nachteile von Laserscans bei Abstandsmessungen zu bewegten Objekten untersucht werden. Durch einen zielgerichteten Einsatz können Laserscanner, aufgrund der höheren Genauigkeit und Messraten, das bestehende GeoSN sinnvoll ergänzen. Für eine mögliche Erweiterung des GeoSN wird zukünftig die Eignung von Low-Cost Laserscannern und Time of Flight (ToF) Systemen untersucht.

6 Fazit und Ausblick

Das Ziel, ein Messverfahren zur Bestimmung von Abständen zwischen einer festen Bahnsteigkante und einem ein- und ausfahrenden Zug für den barrierefreien Ausbau von Haltestellen zu entwickeln, kann mit einem Low-Cost GeoSN erreicht werden. Das Low-Cost GeoSN kann aufgrund seiner Modularität für die Bestimmung von Breiten der Gap-Filler sowie zur Überprüfung der Anzahl und Intensität von Berührungen eines Zuges mit dem Gap-Filler eingesetzt werden. Erweiterungen des GeoSN um Sensoren der Datenerfassung, -übertragung, -auswertung, und -speicherung sind effizient implementierbar. Verfahren zur Kalibrierung der Low-Cost Ultraschalldistanzsensoren und Biegesensoren wurden entwickelt und angewendet. Neben der Installation zusätzlicher Sensoren in den einzelnen Sensorknoten zur Steigerung der Netzwerkleistung, wurde das GeoSN in der Anzahl der Messstellen für eine zweite Haltestelle ausgebaut. Hier wird zudem der Einsatz im Außenbereich erprobt sowie Strategien für den Einsatz bei Niederschlag, Wind und kalten Temperaturen untersucht.

Zur Validierung der Distanzmessung des GeoSN werden an einzelnen Positionen Profillaserscans durchgeführt und ausgewertet. Laserscans werden im Projekt aufgrund von Sicherheitsbedenken und dem erheblich gesteigerten Auswertungsaufwand bislang noch nicht im GeoSN durchgeführt. Aufgrund von aktuellen Untersuchungen ist ein zielgerichteter Einsatz von Low-Cost Laserscannern oder ToF-Systemen vorstellbar und wird zukünftig näher untersucht.

Literatur

- Engel, P.; Foppe, K.; Köster, U. (2018): Multisensorsystem zur Erfassung von Turmschwingungen an der Marienkirche Neubrandenburg. In: DVW e. V. (Hrsg.): MST 2018 – Multisensortechnologie: Low-Cost Sensoren im Verbund. DVW-Schriftenreihe, Band 92, Wißner-Verlag, Augsburg. (Dieser Tagungsband).
- Eppinger, G.; Sternberg, H.; Keller, F. (2016): Geosensornetzwerk mit Radartechnik. Geomonitoring, Clausthal.
- Glabsch, J.; Heunecke, O.; Schuhbäck, S. (2009): Monitoring the Hornbergl landslide using a recently developed low cost GNSS sensor network. In: Journal of Applied Geodesy, 3(3), 179–192.
- Jensen, E.; Barnefske, E.; Sternberg (2018): Multisensorsysteme mit MEMS Sensoren am Beispiel der Bestimmung von Gap-Filler-Breiten. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 3/2018, 143. Jg., 172–176. DOI: [10.12902/zfv-0209-2018](https://doi.org/10.12902/zfv-0209-2018).
- Schwieger, V.; Sternberg, H. (2014): Multi-Sensor-Systeme in der Ingenieurgeodäsie – Grundlagen und Überblick. In: DVW e. V. (Hrsg.): Multi-Sensor-Systeme – Bewegte Zukunftsfelder. DVW-Schriftenreihe, Band 75, Wißner-Verlag, Augsburg, 3–23.

- Wild-Pfeifer, F; Schäfer, B (2011): MEMS-Sensoren, auch für die Geodäsie. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 1/2011, 136. Jg., 30–39.
- Willemsen, T.; Eppinger, G.; Sternberg, H. (2017): MEMS in der Ingenieurgeodäsie – Low-Cost-Sensorik zur Bewältigung komplexer Aufgaben. Lienhart, W. (Hrsg.) (2017): Ingenieurvermessung 17. Beiträge zum 18. Internat. Ingenieurvermessungskurs, Herbert Wichmann Verlag, 147–162.
- Willemsen, T.; Keller, F.; Sternberg, H. (2014): Indoor-Positionierung und -Navigation mit Smartphone. In: DVW e. V. (Hrsg.): Multi-Sensor-Systeme – Bewegte Zukunftsfelder. DVW-Schriftenreihe, Band 75, Wißner-Verlag, Augsburg, 175–190.
- Zhang, L. (2016): Qualitätssteigerung von Low-Cost-GPS Zeitreihen für Monitoring Applikationen durch zeitlich-räumliche Korrelationsanalyse. DGK, Reihe C, bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Dissertation, C. H. Beck Verlag.

Kontakt

Eike Barnefske, M.Sc. | Prof. Dr.-Ing. Harald Sternberg
HafenCity Universität Hamburg
Überseeallee 16, 20457 Hamburg
eike.barnefske@hcu-hamburg.de | harald.sternberg@hcu-hamburg.de
www.hcu-hamburg.de

Echtzeit-Indoor-Positionierung für Fußgänger mit multisensoralen Smartphones

Catia Real Ehrlich | Jörg Blankenbach

1 Einleitung

Das Wissen über den physischen Standort eines Objektes oder einer Person innerhalb von Gebäuden (Indoor) ist für viele Anwendungen nützlich, zum Beispiel für die Fußgängernavigation (z. B. Indoor Location Services), für das Facility Management (z. B. Wartung und Inspektion), für das Katastrophenmanagement (z. B. Lokalisierung von Rettungsteams) oder auch für Anwendungen im Bauwesen (z. B. Baufortschrittsdokumentation). Im Außenbereich werden in der Regel satellitengestützte Ortungssysteme (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) für Lokalisierungszwecke eingesetzt. Trotz der Verwendung von „hochempfindlichen“ GNSS-Empfängern ist es aufgrund der Ausbreitungscharakteristik der Satellitensignale innerhalb von Gebäuden kaum möglich, eine flächendeckende und zuverlässige Innenraumpositionierung zu erhalten (Eissfeller et al. 2005, Zhang et al. 2010). Folglich wurden in den vergangenen Jahren alternative Indoor-Positionierungssysteme (IPS) unter Verwendung verschiedener Kommunikations- und Informationstechnologien entwickelt, wie beispielsweise Radiofrequenz-Identifikation (RFID), drahtlose lokale Funknetzwerke (WLAN), Ultrabreitband (UWB), Infrarot (IR) oder Ultraschall (vgl. u. a. Blankenbach 2017 und Mautz 2012). Die derzeit existierenden Systeme (vgl. u. a. Hafner et al. 2014 oder Neges et al. 2015) basieren jedoch häufig auf speziellen Hardwareeinheiten und/oder benötigen zusätzliche Infrastrukturen, um die Positionsfehler infolge von Signalstörungen zu kompensieren und die Genauigkeit sowie Zuverlässigkeit der Navigation in Innenräumen zu verbessern. Eine praktische Lösung für die Innenraumpositionierung sollte jedoch ein System sein, das auf weitverbreitete Sensoren und bestehende oder einfach bereitstellbare Infrastrukturen zurückgreift. Smartphones, als weit verbreitete kostengünstige Multisensorgeräte, scheinen eine vielversprechende Plattform für Anwendungen zur Indoor-Lokalisierung im Massenmarkt zu sein. Durch die Verwendung von Smartphones werden keine zusätzlichen tragbaren Sensoren benötigt, wodurch die Nutzerakzeptanz der Indoor-Lokalisierung erhöht wird.

In diesem Beitrag wird ein Echtzeit-Fußgänger-Tracking-System in Gebäuden auf der Basis von Smartphonesensoren vorgestellt, das in seiner Grundform unabhängig von zusätzlichen Infrastrukturen ist, jedoch für eine Verbesserung der Positionsschätzung durch externe IPS erweitert werden kann (Abb. 1). Analog zur konventionellen Trägheitsnavigation werden die im Smartphone integrierten Sensoren als Basis genutzt, um die Bewegungen des Benutzers zu bestimmen.

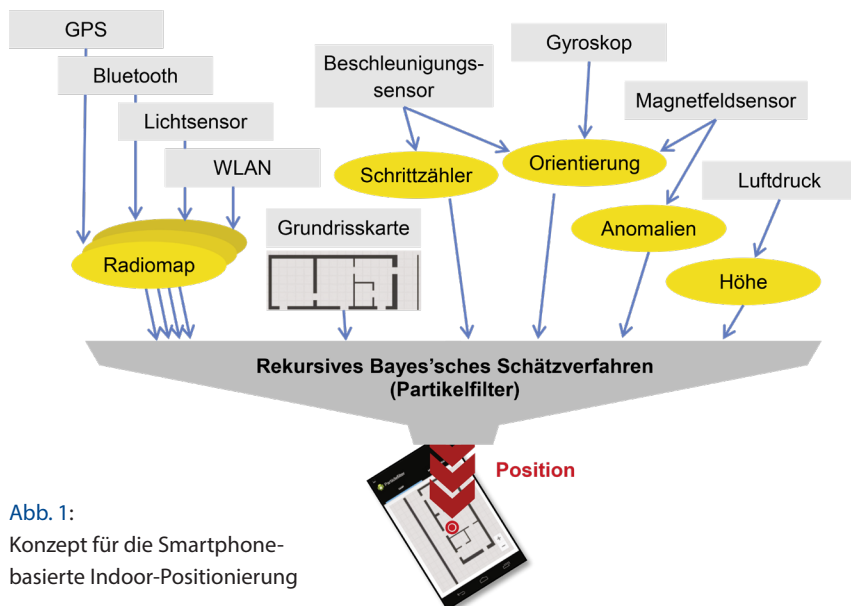


Abb. 1:
Konzept für die Smartphone-
basierte Indoor-Positionierung

Ein wesentlicher Nachteil der eingebauten Low-Cost Sensoren sind jedoch die hohen Messunsicherheiten, welche die Positionsschätzung negativ beeinflussen. Im vorliegenden Ansatz werden die Unsicherheiten in einer sequenziellen Monte-Carlo-basierten Technik (Partikelfilter) berücksichtigt, welche die Position in einem Gebäude mithilfe von Stichproben (Partikeln) rekursiv schätzt. Das Partikelfilter ermöglicht darüber hinaus die Zusammenführung verschiedener sensorischer sowie nicht-sensorischer Daten und führt zu innovativen Strategien für die Indoor-Lokalisierung (Thrun et al. 2005). So ist es möglich, unzulässige Partikelstandorte (z. B. in Wänden) oder Partikelbewegungen (z. B. das Durchqueren von Wänden) durch die Integration eines Gebäudemodells aus der Positionsschätzung zu entfernen. Des Weiteren kann die Positionsschätzung durch die Integration bestehender lokaler IPS unterstützt werden. Im Fokus steht im vorliegenden Fall die Zusammenführung der Messungen von BLE Beacons und WLAN Access Points.

2 Multisensorale Smartphones

Die hoch entwickelte Technologie von Smartphones ermöglicht den Einsatz diverser kostengünstiger Sensoren. Heutige Smartphone verfügen neben einem GNSS-Empfänger über diverse (MEMS-)Sensoren, wie z.B. ein Beschleunigungssensor, ein Magnetfeldsensor (Magnetometer), ein Gyroskop oder ein Barometer. Mit diesen Sensoren können die Personenbewegungen direkt aus den Sensordaten extrahiert werden (vgl. u. a. Willemsen 2016, Real Ehrlich et al. 2016, Ebner et al. 2015). Zum Beispiel erfasst der Beschleunigungssensor den aktuellen Gerätezustand in Bezug auf die Schwerkraft und kann somit zur Erkennung von Translationsbewegungen verwendet werden. Auf diese Weise ist es möglich, die Anzahl der Schritte sowie die Schrittweite von Fußgängern zu schätzen, um so auf die zurückgelegte Distanz zu schließen.

Für die Bewegungsrichtung (Heading) kann das Magnetometer eingesetzt werden. In Kombination mit dem Beschleunigungssensor kann die absolute Orientierung bezogen auf den magnetischen Norden bestimmt werden. Diese Berechnung ist jedoch nur in einem stationären Zustand gültig, in dem das Beschleunigungssignal ausschließlich durch die Schwerkraft beeinflusst wird. Eine weitere Herausforderung besteht darin, das Nutzsignal von Störungen und Fehlereinflüssen (z.B. Offset- und Driftfehler) zu trennen. Insbesondere wird das Magnetometer durch stationäre und transiente magnetische Interferenzen im Gebäude (hervorgerufen z.B. durch Aufzüge, Radiatoren oder Betonarmierung) beeinflusst. Das Gyroskop hingegen erfasst die Drehbewegungen des Geräts und kann zur Bestimmung der Orientierungsänderung in der Bewegung genutzt werden. Ähnlich wie beim Beschleunigungssensor wird das Gyroskopsignal durch Störungen verfälscht. Um den Einfluss von Fehlern zu reduzieren, werden die Daten der drei Sensoren fusioniert (vgl. Lawitzki 2014).

Das eingebettete Barometer liefert Daten zum atmosphärischen Luftdruck und kann somit zur Schätzung der Höhe und demnach zur Stockwerksbestimmung herangezogen werden. Um die verschiedenen Einflüsse auf die atmosphärischen Druckmessungen zu berücksichtigen, kann eine Wetterstation innerhalb des Gebäudes platziert werden, die als Referenz für die Kalibrierung dient. Derart ist es möglich, eine absolute Genauigkeit in der Höhenbestimmung von 1 bis 2 m zu erreichen (Real Ehrlich et al. 2016), was für die Etagenbestimmung ausreicht.

3 Sensorkalibrierung

Zur Sicherstellung, dass die Sensordaten frei von systematischen Einflüssen sind, werden üblicherweise Kalibrierungen (z.B. Offset- und Driftuntersuchungen)

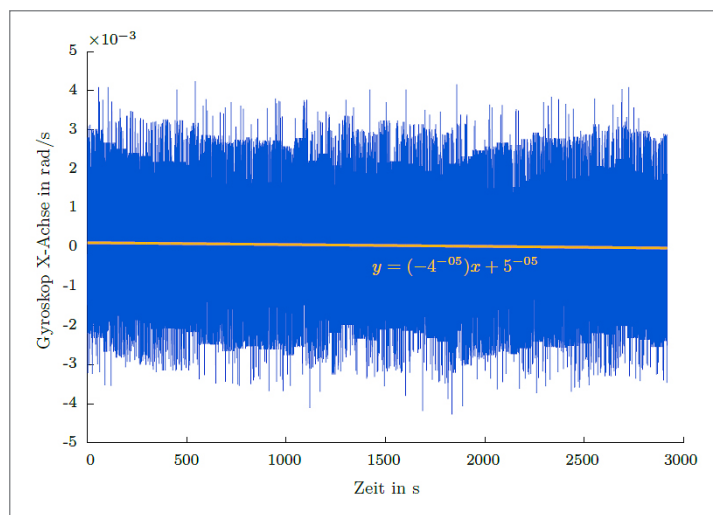


Abb. 2:
Stark ver-
raushtes
Gyroskop-
signal

durchgeführt (vgl. auch Willemsen 2016). Eigene Untersuchungen haben ergeben, dass bei modernen Smartphones bereits werkseitige Sensorkalibrierungen erfolgen und entsprechende Korrekturen an den Sensorwerten angebracht werden. Es zeigt sich dabei jedoch auch, dass teilweise noch Restsystematiken in den Daten vorhanden sind, die instationär sind und sich aufgrund des hohen Sensorrauschens der Low-Cost Komponenten außerhalb des Labors nicht immer signifikant bestimmen lassen. Abb. 2 zeigt beispielhaft eine Kalibriermessung des Gyroskops eines Smartphone Modells vom Typ LG Nexus 5.

Da für die Fußgängernavigation im Gebäude in der Regel eine „raum-scharfe“ Positionierungsgenauigkeit ausreichend ist und das erhöhte Sensorrauschens der Low-Cost Sensoren sowie weitere inhärente Fehlereinflüsse im Bauwerk die erzielbare Genauigkeit im stärkeren Maße beeinflussen, kann bei den hier vorliegenden Smartphone Modellen auf eine über die werkseitige Kalibrierung hinausgehende Sensorkalibrierung verzichtet werden.

4 Sequenzielle Monte Carlo (SMC) Lokalisierung

Ist die Ausgangsposition bekannt, kann nach dem Prinzip der Koppelnavigation (vgl. u. a. Wendel 2011) die tatsächliche Position anhand der aus den Sensordaten extrahierten Nutzerbewegungen (zurückgelegte Distanz und Heading) im Stockwerk geschätzt werden. Die Startposition ist jedoch meist unbekannt. Darüber hinaus führen Sensorfehler und Störeinflüsse zu unzuverlässigen Positionsschätzungen. Zur Unterstützung des Lokalisierungsprozesses kann ein

Gebäudemodell integriert werden, das neben der Nutzung als Karte zur Orientierung, auch zur Überprüfung der Nutzerbewegungen dienen kann. Das Gebäudemodell enthält Daten über die Gebäudestruktur (Räume, Wände, Öffnungen, etc.) und demzufolge auch Informationen über zulässige Bereiche und Durchgänge für Fußgänger. Um eine große Vielfalt linearer und nicht-linearer Informationen zu kombinieren, wird eine Bayes'sche Filterung basierend auf der sequenziellen Monte Carlo Lokalisierung, auch als Partikelfilter bekannt, verwendet (Dellaert et al. 1999, Thrun et al. 2005). Das Partikelfilter ist eine stochastische Technik zur rekursiven Schätzung des aktuellen Zustands dynamischer Systeme unter Verwendung der Vorhersage von Wahrscheinlichkeiten (Gordon et al. 1993). Die Grundidee besteht darin, die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion eines Systems durch eine große Anzahl von N unabhängigen, gewichteten Stichproben (Partikeln) anzunähern. Die nachfolgende Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion beschreibt den Zustand x_k zum Zeitpunkt t_k basierend auf der Dirac-Delta-Funktion $\delta(x)$:

$$p(x_k | Z_k) \approx \sum_{i=1}^N w_k^i \delta(x_k - x_k^i) \quad (1)$$

mit Z_k Beobachtungssätze, gesammelt vom Zeitschritt 0 bis k
 x_k^i Partikel i aus der a-posteriori-Wahrscheinlichkeit
 w_k^i Gewicht eines Teilchens i

Das Prinzip des Partikelfilters ist in vier Schritte unterteilt. Während der *Initialisierung* werden (Hunderte bis Tausende) Partikel zufällig über die gesamte Gebäudefläche verteilt. In der *Prediction Sampling* Phase wird eine neue Position für jedes einzelne Partikel vorhergesagt, indem die vergangenen gemessenen Beobachtungen nach dem Prinzip der Koppelnavigation berechnet werden. Der Abstand wird dabei aus den letzten drei beobachteten Schritten vorhergesagt und das Heading ergibt sich aus den Gyroskopmessungen. Jedes Partikel erhält ein Gewicht w (Importance Factor), welches sich aus der Differenz zwischen der vorhergesagten Position (X_k, Y_k) und der tatsächlich beobachteten Position (zX_k, zY_k) ergibt. Die beobachteten Koordinaten ergeben sich aus den aktuellen Beobachtungen. Für das Heading wird die Sensorfusion von Beschleunigungs- und Magnetfeldsensor verwendet. Unter Berücksichtigung des Messrauschens σ_z sind die Gewichte wie folgt definiert (Fahrmeir et al. 1996):

$$w_k^i = \frac{1}{2\pi\sigma_z^2} \cdot \exp\left(-\frac{(X_k^i - zX_k)^2 + (Y_k^i - zY_k)^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (2)$$

Im letzten Schritt werden die Gewichte normalisiert. In der *Importance Sampling* Phase werden die Partikel entsprechend ihrer Gewichtung ausgewählt, um eine neue Schätzung des Systemzustands zu erhalten. Die Auswahl kann dann beispielsweise nach dem Low-Variance-Resampling (LVR)-Verfahren (vgl. Thrun et al. 2005) erfolgen.

4.1 Integration von Gebäudemodellen

Der Hauptvorteil des Partikelfilters ist die Lösung nicht-linearer Schätzprobleme. Dies ermöglicht die Integration von Gebäudeinformationen im Filter zur Evaluierung der Partikelpositionen (vgl. Gordon et al. 1993). Partikel, die eine unzulässige Position im Gebäude (z.B. in Innenwänden), eine unmögliche Bewegung (z.B. durch Wände) oder nicht genügend Abstand zur Wand (z.B. < 30 cm) aufweisen, werden unter Verwendung der Gewichtung ($w_k^i = 0$) aus der Partikelmenge entfernt. Darüber hinaus kann bei Registrierung eines Etagenwechsels die Position des Nutzers auf Treppenbereiche und Fahrstühle eingegrenzt bzw. korrigiert werden. Die Gewichtung (2) wird durch nachfolgende Bedingungen ergänzt:

$$pw_k^i = \begin{cases} 0 & , \text{außerhalb des Gebäudes} \\ 0 & , \text{innerhalb von Wänden} \\ 0 & , \text{das Durchschreiten von Wänden} \\ 0 & , \text{geringer Abstand zur Wand} \\ 0 & , \text{außerhalb von Treppenbereichen und} \\ & \text{Aufzügen beim Stockwerkwechsel} \\ w_k^i & , \text{sonst} \end{cases} \quad (3)$$

Zur Erkennung von unzulässigen Partikelpositionen und -bewegungen im Gebäude können Methoden aus dem Bereich der algorithmischen Geometrie (engl. Computational Geometry) adaptiert werden (vgl. u. a. Preparata und Shamos 1988).

4.2 Kidnapped-Robot-Problem

Für eine robuste Positionsschätzung kann das Kidnapped-Robot-Problem berücksichtigt werden. In der Robotik wird die Problematik, dass der Roboter während des Lokalisierungsprozesses an einer unbekannten Stelle „umpositioniert“ (entführt) wird, untersucht (Thrun et al. 2005). In diesem Fall muss der Roboter autonom erkennen, dass die Position ungültig ist, um eine neue Lokalisierung zu starten. Für die Innenraumpositionierung basierend auf dem Partikelfilter kann

diese Problematik ebenfalls auftreten. Zum einen führen Sensorabweichungen zur Fehlinterpretation der Bewegungsinformation, was wiederum zu einer inkorrekten Positionsschätzung führt. Zum anderen ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass bei der Verwendung einer zu geringen Partikelanzahl nicht alle relevanten Bereiche des Zustandsraums mit den Partikeln abgedeckt werden. Die anschließende Positionsbestimmung würde mit jedem weiteren Schritt fehlschlagen, da die Partikel nicht mit dem realen Standort übereinstimmen. Durch eine Erweiterung des Filters kann das Kidnapped-Robot-Problem abgefangen werden. Bei einem Versagen der Positionsschätzung wird ein Teil der Partikel durch neue, zufällig verteilte Partikel ersetzt. Somit können die relevanten Bereiche des Zustandsraums neu abgedeckt werden. Zur Identifikation eines Positionsverlustes dienen sowohl die Streuung der Partikel als auch deren Gewichte. Kollidieren sämtliche Partikel mit einer Wand ($w = 0$), erreicht die Summe aller Gewichte einen Wert gegen null. Infolge eines starken Positionswechsels aufgrund eines Positionsverlustes nimmt auch die Partikelstreuung zu.

5 Externe Positionierungssysteme

Messungen oder Beobachtungen eines externen Positionierungssystems, z. B. Bluetooth oder WLAN können in Kombination mit Smartphonesensoren genutzt und in die Partikelfilterung zur Unterstützung integriert werden.

5.1 RSS-basierte BLE-Positionierung

Bluetooth Low Energy (BLE) ermöglicht die Nahbereichsfunkkommunikation mit minimalem Stromverbrauch. Anhand der empfangenen Signalstärke (Received Signal Strength, RSS) kann der Abstand zu einem BLE-Sender (Beacon) geschätzt werden (vgl. Zhuang et al. 2016). Demzufolge ist es möglich, den Standort des Smartphonennutzers im Sendebereich der fest installierten Beacons mit bekannter Position einzugrenzen. Die Konzentration der Partikel im Beacon-Sendebereich erfolgt über die Partikelgewichtung. Partikel, die sich im beobachteten Bereich der Beacons befinden, erhalten ein höheres Gewicht. Folglich konzentrieren sich die Partikel an der wahrscheinlichsten Benutzerposition.

Die Bestimmung der Partikelgewichtung kann dazu mit einer Mischverteilung (Mixture Model) aus einer gewichteten Summe von M Dichtefunktionen (vgl. u. a. Härdle und Simar 2007) erfolgen:

$$f(x) = \sum_{n=1}^M \lambda_n f_n(x) \quad (4)$$

Der Parameter λ ist ein Gewichtungsfaktor mit folgender Bedingung:

$$\sum_{n=1}^M \lambda_n = 1 \quad \text{mit } \lambda_n > 0 \quad (5)$$

Für die RSS-basierte BLE-Positionierung wird eine Gleichverteilung im Sendebereich der Beacons angenommen; der Parameter λ wurde empirisch ermittelt.

5.2 WLAN Fingerprinting

Aufgrund der hohen Verfügbarkeit von WLAN Access Points in (öffentlichen) Gebäuden, sowie der Standardausstattung von technischen Geräten mit WLAN, sind WLAN-basierte Systeme prädestiniert für die Indoor-Lokalisierung. Das Fingerprintverfahren, das auf dem einfachen Vergleich von empirischen Messungen (z. B. RSS) beruht, wird in WLAN-Systemen bevorzugt. Die Methode ist in zwei Phasen unterteilt. In der ersten Phase, der Offlinephase oder Kalibrierungsphase, wird das betroffene Areal in einem Raster abgescannt. Jede Position wird einer Konstellation von empfangenen Signalen (Fingerprint) zugeordnet und in einer Datenbank gespeichert. Das Ergebnis ist eine sogenannte Radio Map. In der zweiten Phase, der Onlinephase oder Lokalisierungsphase, wird die Position ermittelt. Hier werden die aktuellen Messungen mit den Daten in der Datenbank verglichen, wobei nach der besten Übereinstimmung gesucht wird. Die Position kann mit deterministischen oder probabilistischen Algorithmen geschätzt werden (Mautz 2012). Im Hinblick auf die sehr starken Schwankungen von WLAN-Signalen durch Abschattungen oder Signalstörungen liegt die Genauigkeit der Positionsbestimmung im Bereich von zwei bis zehn Metern. Das WLAN-Fingerprintsystem wird mit dem Fußgänger-Koppelnavigationsprinzip kombiniert, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Positionsschätzung mit dem Partikelfilter zu verbessern. Zu diesem Zweck wird die Partikelgewichtung aus einer Mischung zweier Normalverteilungen gemäß Gleichung (4), was in diesem Fall dem Gaussian Mixture Model (GMM) entspricht, genutzt.

6 Experimentelle Validierung

Der Positionierungsprozess wird durch die Stockwerkserkennung mithilfe des Barometers gestartet. Anhand dieser Informationen beginnt die Positionsschätzung basierend auf dem Partikelfilter mit dem jeweiligen Grundriss. Die Abb. 3 zeigt das Verhalten des Partikelfilters ohne die Unterstützung eines externen IPS in einem Testlauf von ca. 60 m entlang einer vorgegebenen Strecke (Abb. 3d rote Linie).

Die Smartphones wurden dabei mit einer Gehgeschwindigkeit von 1 m/s^2 in der Hand gehalten. Die Bewegungen der zufällig verteilten Partikel werden durch die zurückgelegte Distanz und der Bewegungsrichtung bestimmt, die sich aus den Sensormesswerten ergeben. Die neuen Partikelpositionen werden dabei auf Plausibilität gegen die Gebäudestruktur getestet. Abb. 3a zeigt den Zustand der Partikelfilterung nach dem zweiten Schritt, Abb. 3b nach 17 Schritten usw. bis zum 58. Schritt in Abb. 3d. Der Schwerpunkt aller Partikel stellt den Standort

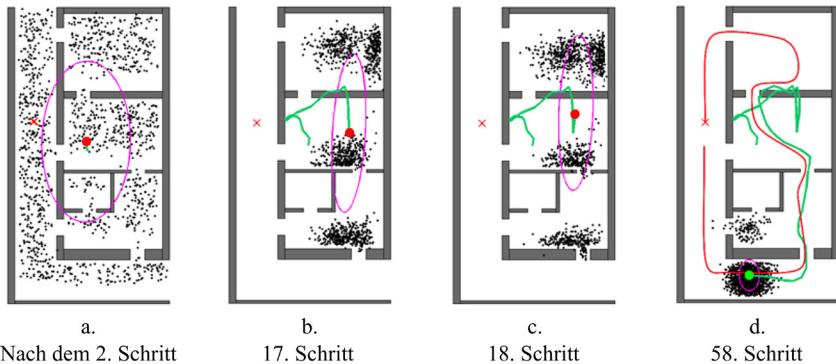


Abb. 3: Verhalten des Partikelfilters in einem Probelauf ohne Unterstützung eines externen IPS

des Benutzers dar, an dem er sich mit größter Wahrscheinlichkeit befindet. Die Unsicherheit der geschätzten Position wird hier mit einer „Streuungsellipse“ (Potthoff 1967) visualisiert, die aufgrund der nicht-normalverteilten Partikel jedoch nur als qualitatives zweidimensionales Streuungsmaß im Sinne einer deskriptiven Statistik verwendet wird. Abhängig von der Größe der Streuungsellipse ist der Schwerpunkt rot für eine schlechte und grün für eine gute Positionierungslösung eingefärbt. Die zurückgelegte Entfernung wird als grüne Linie angezeigt.

Bei unbekannter Startposition sind die Partikel zu Beginn über die gesamte Region verteilt. Nach 17 Schritten bilden sich drei Partikelcluster heraus, die mögliche Standorte des Benutzers darstellen. Eine Übereinstimmung zwischen der geschätzten und der wahren Position ist erst zu einem späteren Zeitpunkt (30. Schritt) gegeben. Um fehlerhafte Partikelpositionen effizienter zu eliminieren und um eine schnellere Konvergenz der Partikel zur wahren Position herbeizuführen, werden Messungen oder Beobachtungen von externen Positionierungssystemen auf Basis von BLE Beacons oder WLAN Fingerprinting in die Partikelfilterung integriert.

6.1 RSS-basierte BLE-Positionierung

Um die Installationskosten so gering wie möglich zu halten, werden die BLE-Beacons (Hersteller: Estimote) entlang der Hauptverkehrsachsen des Gebäudes verteilt. Insbesondere ermöglicht das Anbringen der Beacons in den Haupteingangsbereichen die Reduzierung der Partikel direkt zu Beginn der Lokalisierung, wenn der Benutzer das Gebäude betritt. Die Partikel konvergieren daher deut-

Tab. 1: Unterteilung des Bluetooth-Signals in drei Kategorien

Zustand	RSS in dBm	Distanz in m
Sehr nah	< 70	< 1
Nah	$70 < x < 90$	1–3
Kein Signal	> 90	> 3

lich schneller zur wahren Position als ohne einen Startpunkt.

Die Reichweite der Beacons ist von der Sendeleistung abhängig und für die Untersuchungen

auf 3 m limitiert. Zur weiteren Spezifikation der Positionsbestimmung wird die Signalstärke in drei Kategorien (Tab. 1) unterteilt.

6.2 WLAN Fingerprinting

Für die WLAN-Positionierung wird der *Weighted k-Nearest Neighbour* (WKNN)-Ansatz verwendet. Die WKNN-Methode bestimmt die Position unter Berücksichtigung ihrer k nächsten Nachbarn und ihres Gewichts. Die Gewichtung ergibt sich aus dem Kehrwert der euklidischen Distanz (Mautz 2012). Für die Fingerprintmethode werden erste Offline-Kalibrierungsmessungen durchgeführt, bei denen RSS-Signale an verschiedenen Punkten im Gebäude beobachtet und in einer Datenbank zusammen mit den Koordinaten des Punktes gespeichert werden. Die Rasterweite ist auf zwei Meter festgelegt. Die Datenbank wird für die Online-Phase verwendet, um die beobachteten Signale mit den in der Datenbank gespeicherten Punkten abzugleichen, um die Position des Benutzers bestimmen zu können.

6.3 Ergebnisse

Das zuvor beschriebene Konzept wurde zur experimentellen Evaluierung auf der mobilen Plattform *Android* mit zwei verschiedenen Smartphonemodellen ausgewertet. Die Geräte Google Pixel 2 XL und Sony Z5 Compact sind mit mehreren MEMS-Sensoren ausgestattet: Gyroskop, Beschleunigungssensor, Barometer, Magnetometer, Bluetooth, GNSS, WLAN, Kamera usw. Für eine zuverlässige und genaue Positionsschätzung ist eine große Anzahl (> 500) von Partikeln

notwendig. Aufgrund der Prozessorleistung der verwendeten Smartphones ist die Echtzeit-Positionsschätzung mit dem Pixel 2 XL auf 1500 Partikel und mit dem Sony Z5 Compact auf 700 Partikel begrenzt.

Die Testläufe wurden in einem Gebäude der RWTH Aachen mit normaler Ausstattung von Hörsälen und Büros (u. a. Stühle, Tische und Büromöbel) durchgeführt. Ein Testlauf (ca. 250 m) dauerte etwa zehn Minuten. Für die Quantifizierbarkeit der Güte der Positionierung wurde ein Testfeld generiert,

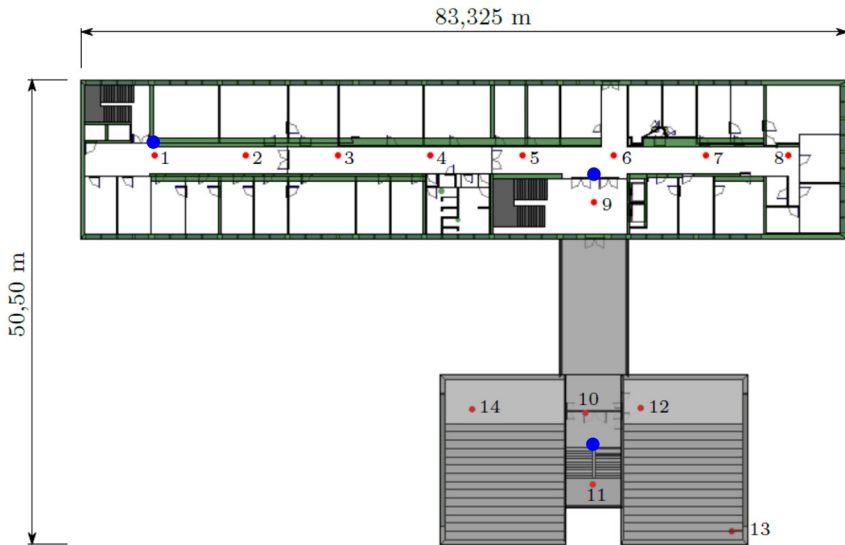


Abb. 4: Visualisierung der Ground Truth Points im ersten Stockwerk. In Blau sind die Standorte der BLE-Beacons gekennzeichnet.

das aus 35 Bodenpunkten (Ground Truth Points, GTPs) verteilt auf zwei Stockwerken besteht (Abb. 4). Der Soll-Ist-Vergleich erfolgt in der Bewegung. Demnach ist eine akkurate Zentrierung des Fußes auf den Bodenpunkt schwer zu erreichen und es können Abweichungen bis zu 30 cm auftreten.

Die Tab. 2 und Tab. 3 fassen die Ergebnisse aller Testläufe getrennt nach den Smartphonetypen zusammen. Mehr als sechs Läufe wurden pro Methode durchgeführt. Die Qualität der Messung wird durch die mittlere quadratische Abweichung (Root Mean Square Error, RMSE) für alle GTPs angegeben.

Die vergleichsweise großen Positionsabweichungen in den Ergebnissen ohne die Unterstützung eines externen IPS sind auf die Tatsache zurückzuführen, dass keine Kongruenz der geschätzten Position zur wahren Position erreicht wird. Das Testgebäude ist symmetrisch und weist nur geringe Differenzierungsmerk-

male auf. Das Risiko, das die Partikel einer falschen Hypothese folgen, nimmt demzufolge zu. Mithilfe von externen Indoor-Positionierungssystemen, insbesondere durch die BLE-Beacons, wird eine robuste und raumgenaue Positionsbestimmung ermöglicht (Tab. 2). Darüber hinaus ist bei einem Vergleich der beiden Tabellen zu erkennen, dass die Positionsgenauigkeit mit der Anzahl der Partikel zunimmt. Ist die Partikelanzahl aufgrund der Rechenleistung begrenzt (< 1000 Partikel), führt eine kombinierte Positionslösung zu besseren Ergebnissen (Tab. 3).

Tab. 2: Ergebnisse der Positionsschätzungen mit dem Google Pixel 2 (1500 Partikel)

	Absolute Positionsabweichung in m			
	Ohne externe IPS	Mit BLE-Beacons	Mit WLAN-Fingerprinting	Kombination aller Systeme
Max	46.68	16.00	33.62	44.49
Mittlere	11.98	3.90	6.01	5.51
Median	6.68	3.31	5.30	3.95
RMSE	12.28	2.53	5.10	6.15

Tab. 3: Ergebnisse der Positionsschätzungen mit dem Sony Z5 (700 Partikel)

	Absolute Positionsabweichung in m			
	Ohne externe IPS	Mit BLE-Beacons	Mit WLAN-Fingerprinting	Kombination aller Systeme
Max	61.03	52.29	44.71	44.75
Mittlere	15.19	5.26	7.35	4.84
Median	10.09	2.50	4.86	3.04
RMSE	13.72	8.08	8.22	6.34

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Echtzeit-Lokalisierung von Fußgängern innerhalb von Gebäuden mit den eingebauten Sensoren des Smartphones basierend auf der SMC-Positionsschätzung „raumscharf“ möglich ist. Das Hinzufügen eines Gebäudemodells ermöglicht das Filtern von inkorrekten Partikelstandorte oder Bewegungen. BLE Beacons und WLAN-Fingerprinting bringen eine deut-

liche Verbesserung für das System, da die Bildung von mehreren Partikelwolken durch die empfangenen BLE Beacon- und/oder WLAN Access Point-Signale erheblich minimiert werden. Insbesondere trägt das Bluetooth-Signal zu einer Erhöhung der Genauigkeit des Systems bei. Es sind mit dem Pixel 2 XL Genauigkeiten von 3 bis 5 m zu erreichen. Aufgrund von Messabweichungen oder Signalstörungen wird die Positionsschätzung verfälscht. Für eine Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit können weitere Technologien (wie zusätzliche Beacons) oder externe Positionierungssysteme (z. B. Visible Light Communication) in das IPS integriert werden.

Literatur

- Blankenbach, J. (2017): Indoor-Positionierung & Lokale Positionierungssysteme. In: Leitfaden – Mobile GIS – Von der GNSS-basierten Datenerfassung bis zu Mobile Mapping. Version 3.0, 63–76.
- Dellaert, F.; Fox, D.; Burgard, W.; Thrun, S. (1999): Monte carlo localization for mobile robots. In: Proceedings of 1999 International Conference on Robotics and Automation, Vol. 2, 1322–1328. DOI: [10.1109/ROBOT.1999.772544](https://doi.org/10.1109/ROBOT.1999.772544).
- Ebner, F.; Fetzer, T.; Deinzer, F. (2015): Multi Sensor 3D Indoor Localisation. In: International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 1–11. DOI: [10.1109/IPIN.2015.7346772](https://doi.org/10.1109/IPIN.2015.7346772).
- Eissfeller, B.; Teuber, A.; Zucker, P. (2005): Indoor-GPS: Ist der Satellitenempfang in Gebäuden möglich? In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 4/2005, 130. Jg., 226–234.
- Fahrmeir, L.; Brachinger, W.; Hamerle, A.; Tutz, G. (1996): Multivariate statistische Verfahren. In: Walter de Gruyter Berlin, Hannover, ISBN: 978-3-110-13806-1.
- Gordon, N.; Salmon, D.; Smith, A. (1993): Novel approach to nonlinear/nonGaussian Bayesian state estimation. In: IEEE Proceedings on Radar and Signal Processing, Vol. 140, 107–113.
- Hafner, P.; Moder, T.; Bernoulli, T.; Fösleitner, C. (2014): Projekt Lobster – Entwicklung von Positionierungstools zur Unterstützung von Ersthelfern. In: AVN 11-12/2014, avn 121, 387–398.
- Härdle, W.K.; Simar, L. (2007): Applied Multivariate Statistical Analysis. In: Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN: 978-3-540-72244-1.
- Lawitzki, P. (2014): Android Sensor Fusion Tutorial. www.codeproject.com/Articles/729759/Android-Sensor-Fusion-Tutorial, letzter Zugriff 07/2018.
- Mautz, R. (2012): Indoor Positioning Technologies. In: Swiss Geodetic Commission, Geodetic-Geophysical Reports of Switzerland, Vol. 86.
- Neges, M.; Koch, C.; König, M.; Abramovici, M. (2015): Combining visual natural markers and IMU for improved AR based indoor navigation. In: Advanced Engineering Informatics. DOI: [10.1016/j.aei.2015.10.005](https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.10.005).
- Potthoff, G. (1967): Die Streuungsellipse. In: Die Korrelationsrechnung im Verkehrswesen, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden. ISBN: 978-3-322-96200-3. DOI: [10.1007/978-3-322-96200-3_7](https://doi.org/10.1007/978-3-322-96200-3_7).

- Preparata, F.P.; Shamos, M. (1988): Computational Geometry – An Introduction. In: Springer Verlag, New York, ISBN: 978-1-4612-1098-6, 1988, 41–45.
- Real Ehrlich, C.; Blankenbach J.; Sieprath, A. (2016): Towards a robust smartphone-based 2,5D pedestrian localization. In: International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 1–8. DOI: [10.1109/IPIN.2016.7743597](https://doi.org/10.1109/IPIN.2016.7743597).
- Thrun, S.; Burgard, W.; Fox, D. (2005): Probabilistic Robotics. In: MIT-Press, Cambridge, ISBN: 978-0-262-20162-9.
- Wendel, J. (2011): Integrierte Navigationssysteme: Sensordatenfusion, GPS und Inertiale Navigation. 2. Aufl. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2011, ISBN: 978-3-486-70429-6.
- Willemsen, Th. (2016): Fusionsalgorithmus zur autonomen Positionsschätzung im Gebäude, basierend auf MEMS-Inertialsensoren im Smartphone. Dissertation, HCU Hamburg
- Zhang, J.; Li, B.; Dempster, A. G.; Rizos, C. (2010): Evaluation of high sensitivity GPS receivers. In: International Symposium on GPS/GNSS, Taipei, Taiwan, 410–415.
- Zhuang, Y.; Yang, J.; Li, Y.; Qi, L.; El-Sheimy, N. (2016): Smartphone-Based Indoor Localization with Bluetooth Low Energy Beacons. In: Sensors (Basel, Switzerland), 16(5), 596. DOI: [10.3390/s16050596](https://doi.org/10.3390/s16050596).

Kontakt

Dipl.-Ing. Catia Real Ehrlich | Prof. Dr.-Ing. Jörg Blankenbach

RWTH Aachen University

Geodätisches Institut und

Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme

Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen

realehrlich@gia.rwth-aachen.de | blankenbach@gia.rwth-aachen.de

Session 4:

Anwendungen Teil 2

(Navigation, Überwachung, Geosensoren)

Die digitale Straßenkarte als Sensor

Jinyue Wang | Martin Wachsmuth | Martin Metzner | Volker Schwieger

1 Einleitung

Waren früher noch gedruckte Straßenatlanten in nahezu allen Fahrzeugen zu finden, wurden diese inzwischen fast vollständig durch digitale Navigationssysteme ersetzt. Die Vielfalt der Geräte und Anbieter ist dabei groß und ihre Integration in das Fahrzeug kann auf verschiedenen Ebenen stattfinden. Sie reicht von fest verbauter Hardware in der Mittelkonsole über mobile, externe Geräte, die meist an der Frontscheibe angebracht werden, bis hin zum Smartphone, das den Besitzer nach dem Parken auch noch zu Fuß bis ans Ziel bringen kann.

Der Siegeszug der heutigen Navigationsgeräte begann in den 1980er Jahren. Die Firma Bosch war mit der Vorstellung ihres Projektes „EVA“, das für „Elektronischer Verkehrslotse für Autofahrer“ steht, im Jahr 1983 einer der ersten Hersteller, der den Grundstein für heutige Systeme legte. Sechs Jahre später erfolgte die Serienproduktion des Navigationssystems TravelPilot IDS, bei dem die Startkoordinate noch manuell eingegeben werden musste (Meyna 1994).

Für die Entwicklung der Navigationsgeräte mussten zwei wesentliche Grundvoraussetzungen geschaffen werden. Zum einen muss die Position des Fahrzeuges laufend bekannt sein. Bei den ersten Systemen musste die Startposition noch festgelegt werden und während der Fahrt mithilfe verschiedener Sensoren über eine Koppelortung bestimmt werden. Mit der Einführung von GPS in den 1990er Jahren und besonders seit im Jahr 2000 die künstliche Signalverschlechterung abgeschaltet wurde, vereinfachte sich die Positionsbestimmung wesentlich. Damit können weltweit absolute Koordinaten bestimmt werden. Die zweite Voraussetzung sind digitale Karten, die auf den Geräten gespeichert werden können.

Dieser Beitrag widmet sich der digitalen Straßenkarte und der Zuordnung der Position, die zum Beispiel mittels GNSS oder einem integrierten Positionsbestimmungssystem ermittelt wird, zu dieser digitalen Karte. Dieser Zuordnungsprozess wird Map-Matching genannt und ist für einen Navigationsprozess unverzichtbar, da die Navigationsziele (z. B. die Heimatadresse) nur über die digitale Straßenkarte logisch referenzierbar sind.

Digitale Straßenkarte und Map-Matching spielen aber, neben der Positionsbestimmung und der Umgebungserkennung, bei den aktuellen Themen *Fahrerassistenzsysteme* und vielmehr noch *Autonomes Fahren* eine entscheidende Rolle. Dieses begründet die trotz der langen Historie vorhandene hohe Aktualität

des Themas und damit auch neue Entwicklungen in diesem sowohl in der Forschung als auch in der Entwicklung und Praxis relevanten Bereich. Auf den folgenden Seiten wird zunächst ein Überblick über die beiden Themen und deren Zusammenspiel gegeben. Im Abschluss werden die Ergebnisse des BMWi-Projekts Ghosthunter vorgestellt und ein Ausblick auf das EU-Projekt TransSec gegeben. In beiden Projekten wurden bzw. werden sowohl die digitale Straßenkarte als auch Map-Matching zur Lösung der projektspezifischen Ziele herangezogen.

2 Digitale Straßenkarte

Wurden seit vielen Hundert Jahren Karten von Hand und auf Papier erfasst, gezeichnet und fortgeführt, führte die zunehmende Verbreitung der elektronischen Datenverarbeitung auch in der Kartographie zur Digitalisierung der Arbeit und der Produkte. Diese digitalen Karten sind für alle Funktionen des Navigationsgerätes notwendig. Hierfür eignen sich aber nicht automatisch alle digitalen Karten, denn der Name *digitale Karte* verrät noch nichts über den Aufbau der Daten. So ist der einfache Fall einer gescannten analogen, topographischen Karte bereits eine digitale Karte. Diese Rasterdaten wären allerdings höchstens dazu geeignet, die Position des Fahrzeuges auf der Karte anzuzeigen. Alle weiteren Funktionen, die eine navigierbare Karte auszeichnen wie z. B. Routenplanung und Zielführung, erfordern andere Informationen. Weitere Nachteile einer solchen Rasterdarstellung sind ihr großer Speicherplatzbedarf und ihre feste Auflösung. Geeignet für Navigationsanwendungen sind daher Vektordaten. Hier werden Straßen als Linienzüge durch aufeinanderfolgende Koordinatenpaare gespeichert und es sind weitere Eigenschaften in Form von Attributen zu den Linien mit abgespeichert. Digitale Karten als Vektordaten können effizienter gespeichert werden und der Maßstab kann je nach Anwendung flexibel gewählt werden.

2.1 Von der Realität zur Karte

Bevor Karten erstellt werden können, bedarf es immer einer Modellierung, um die Realität abzubilden. Dabei wird festgelegt, welche Objekte mit welchen Attributen und mit welcher Qualität von der tatsächlichen Umgebung erfasst werden und im Datensatz Eingang finden. Jede Karte ist daher als „Modell von bestimmten Objekten für bestimmte Informanten zu bestimmten Zwecken und im Rahmen bestimmter Zeiten“ (Hake 2002) zu verstehen. In Hake (2002) wird weiter unterschieden zwischen dem Primärmodell der Umwelt, einem Sekundärmodell zur kartographischen Darstellung und dem kartographischen Transformationsprozesses, um das Primär- in das Sekundärmodell zu überführen. Bei

digitalen Karten wird der Transformationsprozess durch Programme erreicht, welche die Daten aus einer Datenbank als grafische Darstellung erzeugen. Im Folgenden wird das Primärmodell näher erläutert, welches das Konzept für die Überführung der realen Welt in digitale Daten darstellt. Als Beispiel zur Einführung kann man sich die Modellierung eines kleinen Straßenabschnittes vorstellen. Straßenabschnitte beginnen in der Regel an einer Kreuzung und enden auch wieder in einer Kreuzung. Die Strecke dazwischen kann im einfachsten Fall mit einer geraden Linie verbunden werden. Bei längeren Straßen wird diese Repräsentation der realen Straße jedoch nicht mehr ausreichend sein. Es wird in der Regel also nötig sein, weitere Formpunkte dazwischen einzufügen, was dann zu einer Polylinie führt. Diese Formpunkte stellen keine Knoten dar, sondern werden lediglich zur Darstellung der Geometrie verwendet. Betrachtet man das Beispiel einer Straße genauer, ergeben sich weitere mögliche Detaillierungsstufen. Statt eines einzelnen Linienzuges wäre es möglich baulich getrennte Fahrbahnrichtungen als zwei separate Polylinien zu erfassen. Es ist weiterhin denkbar, bei einer mehrspurigen Straße jede einzelne Fahrspur als eigene Polylinie darzustellen. Man sieht bereits an diesem einfachen Beispiel der Straßengeometrie, dass es vielfältige Möglichkeiten der Erfassung der Realität gibt. Die Erfassung der digitalen Straßenkarte beschränkt sich jedoch nicht nur auf die Geometrie, sondern es müssen für navigierbare Karten noch sehr viel mehr Eigenschaften der Straße erfasst werden. Dazu zählen allgemeine Attribute wie Straßename und Tempolimits, noch wesentlicher ist die Topologie der Straßen. Mit ihr werden die Beziehungen verschiedener Straßen im Verkehrsnetz untereinander abgebildet. In Anlehnung an die Graphentheorie und die dortigen Knoten-Kanten-Modelle werden die Kreuzungen Knoten genannt. Die Straßen, die Kreuzungen verbinden, stellen die Kanten im Netz dar und verlaufen gerichtet. Bei Straßenkarten erwartet der Nutzer inzwischen neben dem reinen Straßennetz auch weitere Informationen z. B. die Warnung vor Gefahrenstellen. Ferner sind unter anderem Grundrisse von Gebäuden oder stationäre Geschwindigkeitsüberwachungsanlagen in der Datenbank enthalten. Für diese Beispiele ist jedoch eine andere Modellierung als für Straßen erforderlich: Grundrisse sind z. B. flächenhafte Objekte und Geschwindigkeitsüberwachungsanlagen punktförmig. Daher ist es notwendig, für verschiedene Objekte eine eigene Modellierung als Klasse vorzunehmen. Ein vereinfachtes Beispiel einer Objektklasse ist in [Tab. 1](#) nach Bartelme (2005) zu sehen.

In der Tabelle sind unter anderem Beziehungen berücksichtigt, denn Straßen treten nicht alleinstehend in der Infrastruktur auf. Sie stehen über Kreuzungen in Verbindung mit anderen Straßen und interagieren ebenso mit der Klasse der Geschwindigkeitsüberwachungsanlagen. Es zeigt sich also, dass das Modell allein mit der Bildung diverser Klassen noch nicht abgeschlossen ist. Es müssen ebenso die Beziehungen der verschiedenen Klassen untereinander abgebildet

Tab. 1: Beispiel einer Klasse „Straße“

Klasse „Straße“	
Geometrie	Linienhafte Erfassung entlang der Straßenmitte, Formpunkte zwischen den Kreuzungen werden ebenfalls erfasst
Objektidentifikation	Straßenname
Objektattribute	Tempolimit, Straßenbreite, Anzahl der Spuren, erlaubte Fahrtrichtung
Beziehungen	Beginnt an Kreuzung, mündet in Kreuzung, verläuft an Geschwindigkeitsüberwachungsanlagen
Methoden	Abfrage der Attribute, Berechnen der Straßenlänge

werden. Solche Modelle können daher sehr schnell anwachsen und theoretisch bis ins kleinste Detail ausformuliert sein.

Dies ist allerdings nur bis zu einem gewissen Grad sinnvoll und die Grenzen sind in Bartelme (2005) aufgeführt:

- „▪ Der Speicherplatz und die erreichbare Genauigkeit sind begrenzt; dies zwingt uns, die Verfeinerung nach endlich vielen Schritten abubrechen.
 - Je detailreicher das Modell wird, desto unhandlicher wird die Bearbeitung und desto weniger flexibel ist es im Hinblick auf neue, unvorhergesehene Anwendungen.
- [...]“

Es ist daher wichtig, das Primärmodell vor der tatsächlichen Datenerfassung ausreichend zu überdenken und zu entwickeln, denn dieses Modell entscheidet letztlich, welche Objekte Eingang in den Datenbestand finden, mit welcher Geometrie diese erfasst werden (geometrische Modellierung), welche Beziehungen zwischen diesen bestehen (topologische Modellierung) und welche Attribute von ihnen erfasst werden (thematische Modellierung).

Nach der Erstellung des Primärmodells folgt die Implementierung in ein Datenverarbeitungssystem. Bisher wurden nur die Objektklassen mit ihren Eigenschaften und Beziehungen untereinander definiert. In welcher Form sie auf Datenträgern gespeichert und verknüpft werden, wird im sogenannten Datenschema festgelegt (Bartelme 2005), wofür dann logische und physikalische Datenmodelle aufgestellt und verwendet werden. Für die effiziente Speicherung und Abfrage von großen Datenbeständen werden Datenbanksysteme genutzt. Im Falle von objektrelationalen Datenbanken, welche heutzutage sehr verbreitet sind, werden Daten in tabellarischer Form modelliert. Ein einzelnes Feld einer Tabelle wird darin mit Zahlen oder Text gefüllt und entspricht den Attributen

Tab. 2: Beispieltabelle für Straßen

Objekt-ID	Straßen-name	Tempo-limit	Straßen-breite	Straßen-art	Geo-metrie
0001	Keplerstraße	30	6	102	Polylinie
0002	Friedrichstraße	50	20	105	Polylinie
0003	Königstraße	5	22	101	Polylinie
...

eines Objektes. Eine Zeile einer Tabelle bildet einen Datensatz (Tupel genannt) und repräsentiert ein Objekt. Objekte der gleichen Klasse werden in einer Tabelle abgelegt. Alle Tabellen zusammen bilden die Datenbank (Lange 2006). Das nachfolgende, stark vereinfachte Beispiel verdeutlicht, wie eine solche Tabelle in einer Datenbank aussehen kann (Tab. 2).

Für die eindeutige Zuordnung von einzelnen Objekten zueinander wird ein eindeutiger Schlüssel, häufig in Form einer Objekt-ID, vergeben. Mit diesem Schlüssel ist es möglich, Informationen aus verschiedenen Tabellen der Datenbank miteinander zu verknüpfen. Mit diesen Verknüpfungen ist es wiederum möglich, Objekte zueinander in Beziehung zu setzen.

2.2 Besonderheiten der Straßenkarte

Der vorhergehende Abschnitt befasste sich mit der allgemeinen Konzeption und dem Aufbau eines Datenbestandes für eine digitale Karte. Diese Karten sind aber nicht zwangsläufig für Navigationsanwendungen geeignet. Dieser Sachverhalt zeigt sich beispielsweise an der amtlichen digitalen Karte in Deutschland aus dem Amtlichen Topographischen Informationssystem ATKIS. In ihr sind die geometrischen Informationen der Straßen erfasst und dargestellt. Der Straßenverlauf und die Kreuzungen sind abgebildet. Was hingegen fehlt, sind die semantischen Relationen wie Abbiegerestriktionen (Walter 1997). Diese sind für eine fehlerfreie Routenplanung jedoch zwingend erforderlich. Deshalb wurden spezielle Datenstandards für die Fahrzeugnavigation entwickelt. Dazu zählt zum Beispiel das Geographic Data File (GDF). Bei diesem Standard wird die Modellierung mit Objekten, Attributen und Relationen zwischen verschiedenen Objekten vorgenommen. Objekte sind überwiegend Straßenelemente und -kreuzungen. Die Attribute umfassen Informationen wie den Straßennamen und die erlaubte Flussrichtung des Verkehrs. Attribute können auch abschnittsweise oder zeitbezogen vergeben werden, wenn z. B. eine Geschwindigkeitsbegrenzung nicht für die komplette Straße oder nur nachts gilt. Die Relationen enthalten schließlich die Beziehungen zwischen den Straßen und Kreuzungen (Linien

und Knoten), also z.B. erlaubte und verbotene Abbiegemanöver. Beziehungen können über Attribute dargestellt werden, welche mindestens zwei Objekte miteinander verknüpfen. Im GDF Standard wird ein anderes Konzept genutzt. Hier sind Beziehungen über eine eigene Tabelle *Relationen* hergestellt. Dies bedeutet, dass in einer GDF Datenbank eine eigene Tabelle, in der alle Relationen eingetragen und geführt werden, existiert.

Darüber hinaus wird das Straßennetz in GDF mit drei Ebenen, den *Levels*, abgebildet. Auf dem niedrigsten Level 0 sind die geometrischen Grundinformationen und deren Topologie abgelegt. Hier gibt es Knoten, die Übergänge zwischen Straßenteilen darstellen. Jedes Straßenstück beginnt und endet an einem Knoten. Dazwischen können weitere Formpunkte eingefügt werden, wenn beispielsweise eine Kurve modelliert werden soll. Zwischen den Knoten und Formpunkten werden gerade, gerichtete Verbindungslinien gebildet. Auf Level 1 werden nicht mehr alle Knoten dargestellt, sondern nur noch solche die eine Kreuzung darstellen. Weiterhin werden die Graphen aus Level 0 zu Straßenelementen zusammengefasst. Auf diesem Level 1 wird die Berechnung der Route durchgeführt. Auf dem letzten Level, dem Level 2, werden in der Datenbank einfache Objekte zu komplexen Objekten wie beispielsweise einzelne Straßenelemente zu ganzen Straßen zusammengefasst. In der grafischen Darstellung wird die Geometrie auf Level 2 hingegen vereinfacht, wie in Abb. 1 zu sehen. Von diesem Level werden

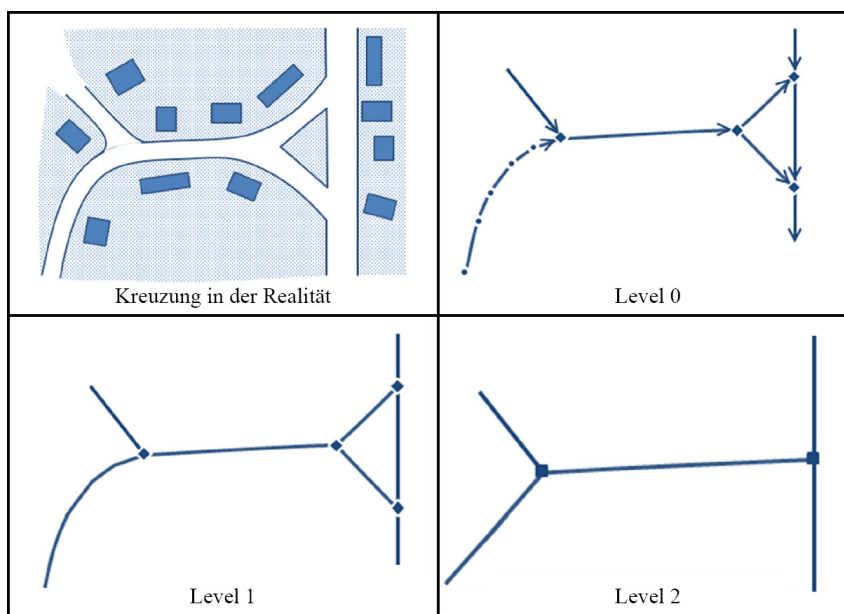


Abb. 1: Die Ebenen einer Kreuzung mit Verkehrsinsel

beispielsweise die Anweisungen für den Fahrer bei der Navigation abgeleitet (Walter 1997). In Abb. 1 wird die Umsetzung einer Straßenkreuzung von der Realität in die verschiedenen Levels von GDF gezeigt. Auf Level 0 ist die Darstellung der Geometrieelemente, wie Formpunkte als kleine Punkte, Kreuzungen als Rauten und die Kanten als gerichtete Graphen zu erkennen. Bei Level 1 bleibt die Geometrie erhalten und wird um zusätzliche Attribute erweitert. Auf Level 2 werden schließlich Kreuzungen und Geometrien vereinfacht dargestellt.

Eine neuere Entwicklung ist der Navigation Data Standard (NDS), der in Zusammenarbeit von diversen Automobil-, Navigationsgeräte- und Kartenherstellern erarbeitet wird. Dazu wurde 2009 der NDS e. V. als Verein gegründet (Behrens et al. 2015). Die Besonderheit der NDS-Daten ist vor allem die Möglichkeit, Kartendaten inkrementell zu aktualisieren. Die Aktualität von Karten ist ein wichtiges Qualitätsmerkmal, das in der Regel mit zunehmender Zeit nach der Kartenveröffentlichung abnimmt. Grund dafür ist die sich verändernde Infrastruktur. Bisher gab es nur die Möglichkeit auf einen kompletten, neuen Datensatz der Kartenhersteller zu warten und diesen auf die Navigationsgeräte zu überspielen. Mithilfe sogenannter Building Blocks und Update Regions ist es in NDS hingegen möglich, einzelne Bereiche der Karte individuell zu aktualisieren. Das trägt dazu bei, geänderte Straßenverläufe schneller in die Karten der Navigationsgeräte zu übernehmen und sie damit laufend aktuell zu halten. Eine detaillierte Einführung zu NDS ist in Behrens et al. (2015) zu finden. Um auf Zukunftsfelder wie das autonome Fahren vorbereitet zu sein, unterstützt das NDS Format auch spurgenaue Karten mit dem High-Definition (HD) Spurmodell (NDS e. V. 2016). In diesen HD-Karten ist es möglich, alle Spuren einer Straße inklusive ihrer Spurmarkierungen zu modellieren. Damit kann z. B. die Lokalisierung des Fahrzeuges auf der Straße verbessert werden (vgl. NDS e. V. 2016).

3 Map-Matching

Map-Matching ist eine wesentliche Komponente heutiger Positionierungs- und Navigationssysteme für Landfahrzeuge. Die Aufgabe des Map-Matching-Verfahrens besteht darin, die durch globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) oder mit Hilfe eines bordeigenen Multisensorsystems ermittelten Fahrzeugpositionen auf eine digitale Straßenkarte zu projizieren.

Mit zunehmendem Wachstum (hinsichtlich Komplexität, Umfang usw.) im Straßennetzwerk für Fahrzeuge ist das Thema Map-Matching seit zwei Jahrzehnten Gegenstand zahlreicher Forschungsbemühungen (Heidrich et al. 2011). Map-Matching-Algorithmen lassen sich dabei in geometrische, topologische und attributgestützte Ansätze klassifizieren. Unter Zuhilfenahme von mathe-

matisch-stochastischen Methoden und durch die Anwendung angemessener Zuordnungskriterien oder Filteralgorithmen lassen sich Map-Matching-Algorithmen weiter verbessern. Wichtige Erweiterungen finden dann statt, wenn Entscheidungen zu treffen sind, insbesondere an Kreuzungen oder auch zwischen parallel verlaufenden Straßen. Die konkreten Vorgehensweisen bisheriger Map-Matching-Ansätze werden in den folgenden Unterkapiteln ausführlich dargestellt und klassifiziert.

3.1 Prinzip des Map-Matching

Das Map-Matching-Verfahren, auch Karteneinpassung genannt, wird heutzutage standardmäßig für verkehrstelematische Anwendungen eingesetzt, um die durch Sensordatenfusion (GNSS, Differential-Odometer, Drehratensensor, Beschleunigungssensor, usw.) geschätzten Fahrzeugpositionen mit einer digitalen Straßenkarte zu verknüpfen und somit die Fahrzeugpositionsdaten sinnvoll nutzen zu können (Heidrich et al. 2011). In einem Map-Matching-Prozess sind im Wesentlichen drei Schritte auszuführen: (1) Suche und Auswahl der Kantenkandidaten, (2) Identifizieren der wahrscheinlichsten Straßenkante zwischen Kandidaten, (3) Bestimmung der Fahrzeugposition auf der gewählten Straßenkante (Hashimi und Karimi 2016).

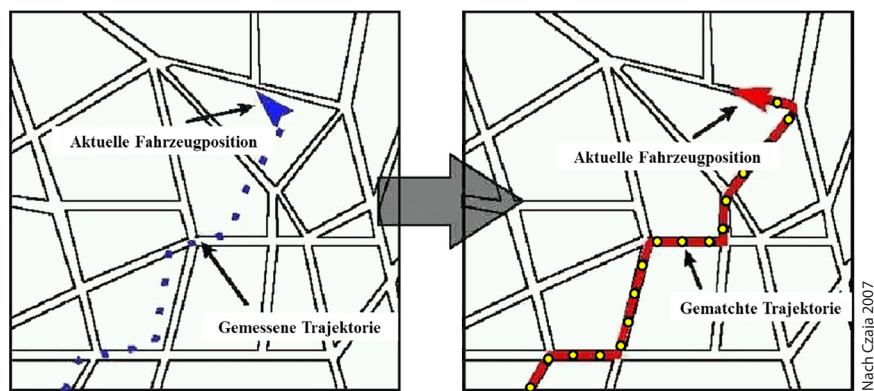


Abb. 2: Prinzip des Map-Matching-Verfahrens

Abb. 2 zeigt das Prinzip eines geometrischen Map-Matching-Verfahrens (Point-to-Curve Matching, siehe Kap. 3.2.1), dargestellt am Beispiel eines kleinen Trajektorienabschnitts und einer vereinfachten Straßenkarte, wobei die gemessenen Fahrzeugpositionen (blaue Punkte in Abb. 2 links) nach Map-Matching den vermutlich abgefahrenen Straßenkanten (roter Pfad in Abb. 2 rechts) zugeordnet werden. Durch orthogonale Projektion werden die Fahrzeugpositio-

nen (Lotfußpunkte) auf der gematchten Straßenkante bestimmt (gelbe Punkte in Abb. 2 rechts). Um potenziell falsche Matching-Ergebnisse zu vermeiden, können unter anderem Straßenattribute wie z. B. Straßenname, vorgeschriebene Fahrtrichtung und Fahrstreifenzahl für den Map-Matching-Prozess herangezogen werden.

3.2 Überblick existierender Map-Matching-Algorithmen

In der Vergangenheit wurde eine Vielzahl von verschiedenen Map-Matching-Algorithmen entwickelt. Wie in Abb. 3 dargestellt, werden sie in die folgenden Klassen unterteilt: geometrische, topologische und attributgestützte Ansätze. Durch Berücksichtigung stochastischer Methoden und Methoden der Entscheidungsfindung können Map-Matching-Prozesse weiter optimiert werden. In schwierigen Entscheidungssituationen (z. B. Kreuzungen) werden häufig fortgeschrittene Methoden wie z. B. Fuzzy-Logik und die Evidenztheorie von Dempster und Shafer (englisch: Dempster-Shafer theory, theory of belief functions) zur Identifizierung der korrekten Straßenkanten eingesetzt (Abb. 3).

Die Performance solcher Algorithmen hat sich signifikant verbessert, einerseits aufgrund der beträchtlich gestiegenen Genauigkeit der heutigen Posi-

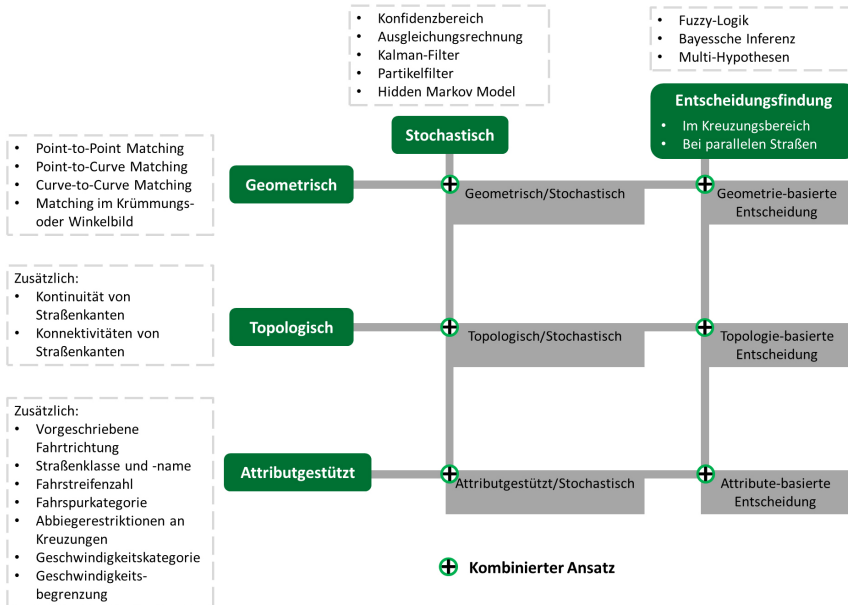


Abb. 3: Klassifizierung Map-Matching-Algorithmen

Tab. 3: Klassifizierung von ausgewählten existierenden Map-Matching-Ansätzen

	Stochastisch	Entscheidungsfindung
Geo-metrisch	Geometrisch/Stochastisch <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bernstein und Kornhauser (1996) ▪ Czommer (2000) ▪ Röhrig et al. (2009) 	Geometriebasierte Entscheidungsfindung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Zuordnung
Topo-logisch	Topologisch/Stochastisch <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ochieng et al. (2003) ▪ Velaga et al. (2009) ▪ Blazquez (2012) ▪ Quddus und Washington (2015) ▪ Hashemi und Karimi (2016) 	Topologiebasierte Entscheidungsfindung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Zuordnung
Attribut-gestützt	Attributgestützt/Stochastisch <ul style="list-style-type: none"> ▪ Krumm et al. (2006) ▪ Kuhnt et al. (2014) ▪ Luo et al. (2017) ▪ Wang et al. (2017) ▪ Li et al. (2017) 	Attributbasierte Entscheidungsfindung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Heidrich et al. (2011) ▪ Abdallah et al. (2011) ▪ Romon et al. (2015) ▪ Tang et al. (2017)

tionsbestimmungsverfahren wie z.B. GNSS und Multisensor-Datenfusion, andererseits aufgrund der erheblichen Qualitätssteigerung bei modernen digitalen Straßenkarten. Nach dem in Abb. 3 dargestellten Klassifizierungsverfahren werden ausgewählte existierende Map-Matching-Ansätze einer passenden Kategorie zugewiesen (Tab. 3). Es ist diesbezüglich anzumerken, dass Multi-Hypothesen-Verfahren und auch die Bayessche Inferenz der Kategorie *Entscheidungsunterstützende Ansätze* zugeordnet wird, obwohl die beiden Verfahren auch statistischen Ursprungs sind. In Tab. 3 sind die entsprechenden Map-Matching-Ansätze, Heidrich et al. (2011) und Romon et al. (2015), mit Unterstrich gekennzeichnet. In den folgenden Unterkapiteln werden die jeweiligen Map-Matching-Ansätze der hier genannten Kategorien im Einzelnen vorgestellt.

3.2.1 Geometrische Ansätze

In den geometrischen Map-Matching-Algorithmen werden lediglich die geometrischen Informationen bzw. die Koordinaten der Knoten und Kanten der digitalen Straßenkarte verwendet. In der Literatur gibt es eine Reihe von unterschiedlichen geometrischen Ansätzen. Insbesondere die drei Verfahren *Point-to-Point*

Matching, *Point-to-Curve Matching* und *Curve-to-Curve Matching* zählen zu den gebräuchlichsten (Quddus et al. 2007).

Beim *Point-to-Point Matching* wird allein der Abstand von der Fahrzeugposition zu den jeweiligen Kartenpunkten (Punkt-Punkt) als Kriterium herangezogen. Der Kartenpunkt mit dem kürzesten Abstand zu der Fahrzeugposition wird gewählt (grüne gestrichelte Linien in Abb. 4). Das Verfahren ist recht einfach zu implementieren und auch vergleichsweise schnell. Allerdings hängt das Verfahren entscheidend davon ab, wie die Straßen tatsächlich digitalisiert werden.

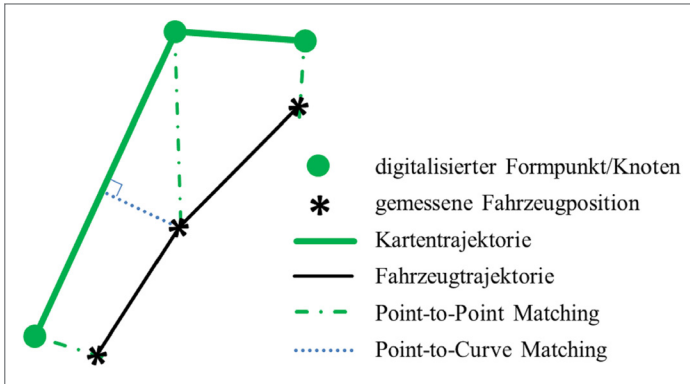


Abb. 4:
Illustration
für Point-
to-Point
und Point-
to-Curve
Matching

Wenn die eigentlich befahrene Straße nur mit wenigen Kartenpunkten digitalisiert wird und die Abstände zweier miteinander verbundener Kartenpunkte sehr groß sind, wird die Fahrzeugposition sehr wahrscheinlich falsch zugeordnet. Ein *Point-to-Curve Matching*-Verfahren weist den Fahrzeugpositionen die nächstgelegenen Kurven (Kantenzüge) zu (blaue gestrichelte Linien in Abb. 4). Im Vergleich zum *Point-to-Point Matching* erzielt dieses Verfahren deutlich bessere Ergebnisse. Der Nachteil liegt vor allem darin, dass bei Y-förmigen Kreuzungen und bei parallelen Straßen oft falsche Zuordnungsergebnisse geliefert werden, weil das Verfahren keine Rücksicht auf die historischen Map-Matching-Ergebnisse (Zuordnungen der vorangegangenen Zeitpunkte) nimmt (Bernstein und Kornhauser 1996). Für praktische Anwendungen sind die beiden obengenannten Verfahren allerdings nicht geeignet.

Um die Schwächen der Verfahren *Point-to-Point Matching* und *Point-to-Curve Matching* zu beseitigen und fehlerhafte Zuordnungen zu vermeiden, wurde *Curve-to-Curve Matching* zuerst von Bernstein und Kornhauser (1996) vorgestellt. Dabei wird der kleinste Abstand zwischen den Fahrzeug- und Kartentrajektorien errechnet. Die Kartentrajektorie mit dem kürzesten Abstand zur Fahrzeugtrajektorie wird als die Richtige identifiziert. Wie in Abb. 5 dargestellt, wird eine stückweise lineare Kurve durch Verbindung zweier aufeinanderfolgenden

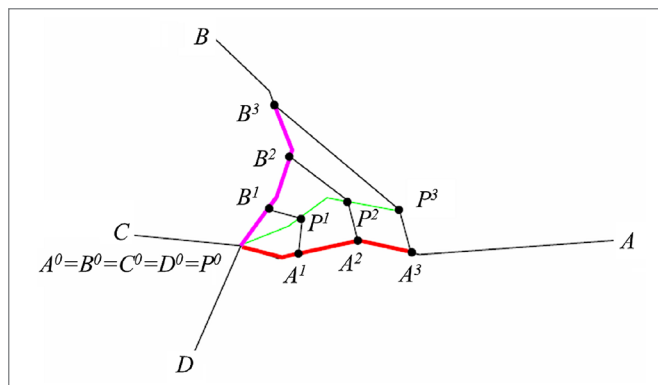


Abb. 5:
Illustration für
Curve-to-Curve
Matching nach
Bernstein und
Kornhauser
(1996)

Fahrzeugpositionen P^0 , P^1 , P^2 und P^3 konstruiert (grüne Kurve in Abb. 5). Dann werden stückweise lineare Kurve gleicher Länge entlang allen Kartentrajektorien A, B, C und D konstruiert. Zur Vereinfachung werden hier nur die Kartentrajektorien A (rote Kurve) und B (lila Kurve) als Kandidaten betrachtet. In diesem Beispiel sind die Kurven P, A und B jeweils in drei gleich lange Liniensegmente unterteilt. Durch Berechnung und Vergleich der Abstände der Kurve P zu den Kurven A und B wird identifiziert, dass die Kurve A der Kurve P näher liegt als die Kurve B. Somit wird Kurve P der Kurve A zugeordnet (Bernstein und Kornhauser 1996).

Eine andere Form des *Curve-to-Curve Matchings* wird in der Arbeit von Czommer (2000) beschrieben. Dies erfolgt entweder auf der Ebene von Krümmungen oder Richtungswinkeln oder direkt auf Koordinatenebene. Beim Map-Matching im Krümmungs- oder Winkelbild wird die Kreuzkorrelationsfunktion verwendet, um die im Fahrzeug gemessenen Krümmungen einem Sollkrümmungsauschnitt zuzuordnen. Wird der Map-Matching-Prozess auf Koordinatenebene durchgeführt, sind identische Punkte in Karten- und Fahrzeugtrajektorien, die gleichfalls durch Einteilung in gleich lange Liniensegmente gewonnen werden, durch reine Translation, ebene Ähnlichkeitstransformation oder Affintransformation zu identifizieren.

3.2.2 Topologische Ansätze

Durch die Topologie eines digitalen Straßennetzes lassen sich die Beziehungen zwischen allen in der Datenbank gespeicherten Objekten (Punkte, Linien und Flächen) beschreiben. In einem topologischen Map-Matching-Algorithmus werden neben den geometrischen Informationen die topologischen Eigenschaften der Knoten und Kanten (z. B. Nachbarschaft und Verbindung der Straßen untereinander) der vorliegenden digitalen Straßenkarte mit einbezogen. Durch

die Unterstützung von topologischen Informationen, wie z. B. Straßenkonnektivität, wird die Performance eines geometrischen Map-Matching-Algorithmus wesentlich verbessert (Quddus et al. 2007).

Für eine genauere Identifikation der korrekten Straßenkante entwickelten Velaga et al. (2009) einen verbesserten topologischen Ansatz mithilfe einer geeigneten Gewichtsfunktion, die von der Fahrzeugorientierung, dem Lotabstand der Fahrzeugposition zur Straßenkante und Konnektivitäten von Straßenkanten abhängig ist. Der Kantenkandidat mit der höchsten Wahrscheinlichkeit wird gewählt. Für Straßenkonnektivität wird dabei zusätzlich ein Zuordnungsparameter X definiert, der entweder den Wert 0 oder 1 hat (Abb. 6). Mithilfe der historischen Map-Matching-Ergebnisse werden die Konnektivitäten zwischen der letzten identifizierten Straßenkante (hellblaue Kante zur Epoche $(k-1)$ in Abb. 6) und allen Kantenkandidaten für die aktuelle Fahrzeugposition (Epoche k) überprüft. In diesem Beispiel werden insgesamt fünf Kantenkandidaten mit dem rechteckigen Suchfenster ermittelt: Zwei Kandidaten direkt mit der letzten identifizierten Kante verbunden ($X = 1$) und drei Kandidaten haben dazu keine Konnektivität ($X = 0$).

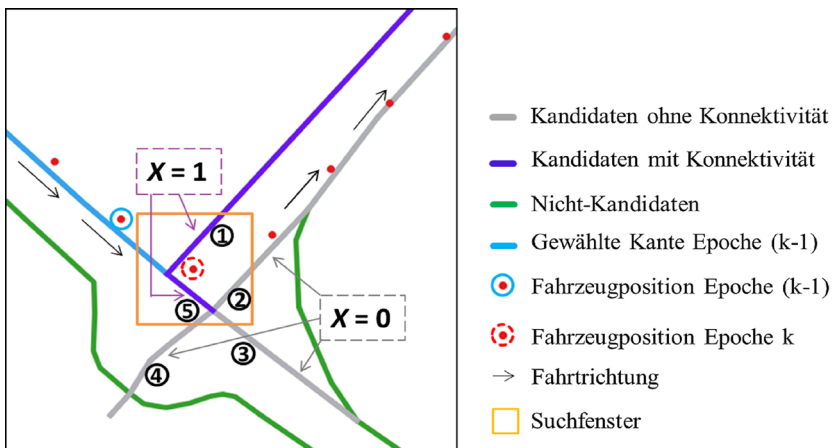


Abb. 6: Beispiel für einen topologischen Map-Matching-Ansatz

3.2.3 Attributgestützte Ansätze

Neben Geometrie und Topologie des vorliegenden Straßennetzes stellen die Straßenattribute, welche die Eigenschaften einer Straße oder eines Straßenausschnittes beschreiben, einen wichtigen Bestandteil der digitalen Straßenkarte dar. Durch Kombination von Geometrie, Topologie und Attributinformation

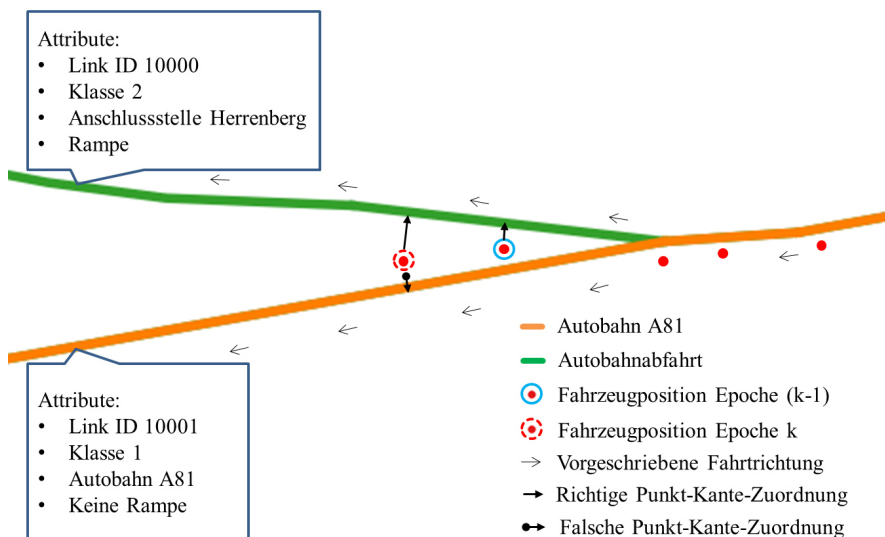


Abb. 7: Beispiel für einen attributgestützten Map-Matching-Ansatz

der Straßen können die potenziell falschen Zuordnungen schnell und effektiv aufgedeckt und korrigiert werden. Wie in Abb. 7 veranschaulicht, wird die Fahrzeugposition zur Epoche (k-1) bereits zur Autobahnabfahrt (grüne Kurve in Abb. 7) zugeordnet. Anhand der modellierten und realen Fahrzeugfahrtrichtungen sowie Abbiege- und Wendeverbote auf der Autobahnabfahrt kann sich das Fahrzeug nicht nach einer Sekunde wieder zurück auf der Autobahn (gelbe Kurve in Abb. 7) befinden. Eine falsche Zuordnung der Fahrzeugposition zur Epoche k zur Autobahn A81 kann effektiv vermieden werden, indem man die Straßenattribute *Straßenname*, *erlaubte Fahrtrichtung* sowie *Abbiegerestriktionen* mit einbezieht.

In Ochieng et al. (2003) wird ein leistungsfähiger Map-Matching-Ansatz vorgestellt, wobei die Attribute *Straßenname*, *Länge der Straße*, *erlaubte Fahrtrichtung* und die *durchschnittliche Fahrzeuggeschwindigkeit* ausgenutzt werden, um Straßenkreuzungen zu erkennen. Wenn das Fahrzeug sich entlang der letzten identifizierten Straßenkante bewegt, ist keine neue Kandidatensuche notwendig und die aktuelle Fahrzeugposition wird direkt zugeordnet. Nur bei Kreuzungen und Einmündungen wird ein neues Suchfenster konstruiert, um die Zahl möglicher Kantenkandidaten einzuschränken. Dies ermöglicht eine hohe Laufzeiteffizienz und kann auf diese Weise die potenziell falsche Zuordnung effektiv vermeiden. Weitere gebräuchliche Straßenattribute sind z.B. Abbiegerestriktionen an Straßenkreuzungen, Geschwindigkeitsbegrenzung und Fahrspurkategorie. Krumm et al. (2006) verwenden maximal zulässige Fahrgeschwindigkeiten und

die daraus resultierenden Mindestfahrzeiten, um unwahrscheinliche Kantenkandidaten auszuschließen.

3.2.4 Stochastische Ansätze

Die Einteilung der Map-Matching-Algorithmen lässt sich weiter verfeinern. Dabei werden bei den allgemeinen, stochastisch genannten Ansätzen die stochastischen Eigenschaften (Genauigkeiten) der Sensorik (z. B. GNSS und Odometer) und der digitalen Karten modelliert. Beispielsweise werden in Czimmer (2000) die Sensorfehler und Kartenungenauigkeiten berücksichtigt und die daraus resultierende Verschiebung und der Maßstabfaktor zwischen Ist- und Sollkrümmungsprofil werden in einer Ausgleichung nach kleinsten Verbesserungsquadraten geschätzt. Unter anderem wird in den meisten Map-Matching-Ansätzen anhand von stochastischen Informationen ein Konfidenzbereich um die Fahrzeugpositionen konstruiert, damit die Anzahl der Kantenkandidaten und somit die Rechenzeit reduziert werden kann.

In den letzten Jahrzehnten wurden zur Lösung von Map-Matching-Aufgaben zahlreiche neue Ansätze entwickelt, die im Vergleich zu den älteren Verfahren mehr oder weniger abgewandelt und angepasst wurden, damit sie sich an entsprechenden Anwendungsszenarien orientieren. Am häufigsten werden das (erweiterte) Kalman-Filter und das Partikelfilter in der Literatur erwähnt.

Das Kalman-Filter ist ein optimales Filter für lineare stochastische Systeme, das heutzutage oft in den Bereichen Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes/autonomes Fahren zur Fusion heterogener Sensordaten (z. B. GNSS, IMU und Odometer) und zur Korrektur der Sensorfehler eingesetzt wird, um die Positionierungsgenauigkeiten zu erhöhen. Das erweiterte Kalman-Filter ist in der Praxis am häufigsten für nicht-lineare Systeme zu verwenden, in denen die GNSS-Rohdaten und die anderen Sensordaten miteinander verknüpft werden und die Positionskoordinaten und Geschwindigkeiten des Fahrzeugs optimal geschätzt werden.

Das Partikelfilter ist ein sequenzielles Monte-Carlo-Filter. Es beruht auf dem Bayes-Theorem und kann auch zur Fahrzeugpositionierung genutzt werden (Röhrig et al. 2009). Dabei lässt sich die Fahrzeugposition durch eine Vielzahl an Partikeln repräsentieren. Das Partikelfilter wird zuerst mit einer größeren Menge (z. B. 1000) von zufälligen Partikeln initialisiert. Diese Partikel werden über den Zustandsraum, welcher die Fahrzeugposition und eventuell Orientierung und Geschwindigkeit enthält, verstreut, unter Bezugnahme auf die ermittelte Fahrzeugposition und Sensorfehler wird den Partikeln dann eine Wahrscheinlichkeit zugewiesen (Röhrig et al. 2009). Dann werden unwahrscheinliche Partikel eliminiert und neue Partikel in Bereichen höherer Wahrscheinlichkeit generiert. Es besteht ein deutlicher Unterschied zwischen dem Kalman-Filter und

dem Partikelfilter in der Genauigkeit und der Konvergenzgeschwindigkeit, wenn die auftretenden Sensorfehler nicht normalverteilt sind (Neumann 2002, Röhrig et al. 2009). Beim Kalman-Filter wird die Annahme einer Normalverteilung vorausgesetzt, während mit dem Partikelfilter die Messabweichungen der Sensordaten sich durch eine beliebige nicht-normale Verteilung modellieren lassen. Nach Ausreißern oder mehreren Messfehlern kann das Partikelfilter schneller gegen den wahren Wert konvergieren und stabilere und genauere Positionsschätzung durchführen als das Kalman-Filter (Neumann 2002). Im Übrigen ist noch zu erwähnen, dass der Rechenaufwand für das Partikelfilter direkt von der Partikelanzahl abhängig ist. Ein ausführlicher Vergleich zwischen den beiden Filteralgorithmen bezüglich der Genauigkeit, Robustheit und Laufzeiteffizienz, welche bei Echtzeitanwendungen eine zentrale Rolle spielen, ist in Neumann (2002) gegeben.

Kuhnt et al. (2014) entwickeln ein weiteres Partikelfilterbasiertes Map-Matching-Verfahren zur Lokalisierung autonomer Fahrzeuge anhand von GPS- und Odometriedaten (Wegmessungen). Die Querabweichungen der mittels Partikelfilter geschätzten Fahrzeugpositionen zur Fahrbahnmitte müssen möglichst gering gehalten werden, bevor das Fahrzeug in eine Straßenkreuzung einfährt. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass dabei mehrere Partikel (Positionshypothesen) verfolgt werden und somit die Zustandsschätzung nicht aufgrund einer Fehlentscheidung für eine einzige Hypothese neu initialisiert werden muss. Die Testergebnisse zeigen, dass trotz teilweise hoher Ungenauigkeiten des eingesetzten Low-Cost Empfängers im städtischen Bereich eine langfristig stabile und hinreichend genaue Lösung sowohl für Positionsschätzung als auch für das Map-Matching erzielt wurde.

Bezüglich des Partikelfilters ist noch zu erwähnen, dass es heutzutage sehr häufig zum fahrspurgenauen Map-Matching eingesetzt wird. Die Anwendung von digitalen Straßenkarten hat in den letzten Jahren einen großen Aufschwung erfahren, besonders durch den verstärkten Einsatz im Navigationsbereich. HERE und TomTom, die weltweit größten Anbieter von digitalen Straßenkarten, haben mittlerweile hochpräzise High Definition (HD-)Karten für zukünftige Fahrzeuggenerationen entwickelt. Mit zentimetergenauen Informationen zu Fahrspuren und Geometrie ermöglichen es HD-Karten, die gemessenen Fahrzeugtrajektorien auf die korrekte Fahrspur zu übertragen. Gleichzeitig konzentrieren sich viele Forschungen auf die fahrspurgenaue Fahrzeuglokalisierung sowie die dazu benötigten Map-Matching-Algorithmen. Beispielsweise haben Li et al. (2017) einen fahrspurgenauen Map-Matching-Ansatz entwickelt, der einerseits auf den hochpräzisen fahrspurgenauen digitalen Straßenkarten basiert, andererseits das Partikelfilter verwendet, um möglichst zuverlässige Ergebnisse zu erhalten. In [Abb. 8](#) werden die Standard-Navigationskarte (hellblaue dicke Kurven) und die fahrspurgenaue Straßenkarte (grüne dünne Kurven) am Beispiel eines kleinen

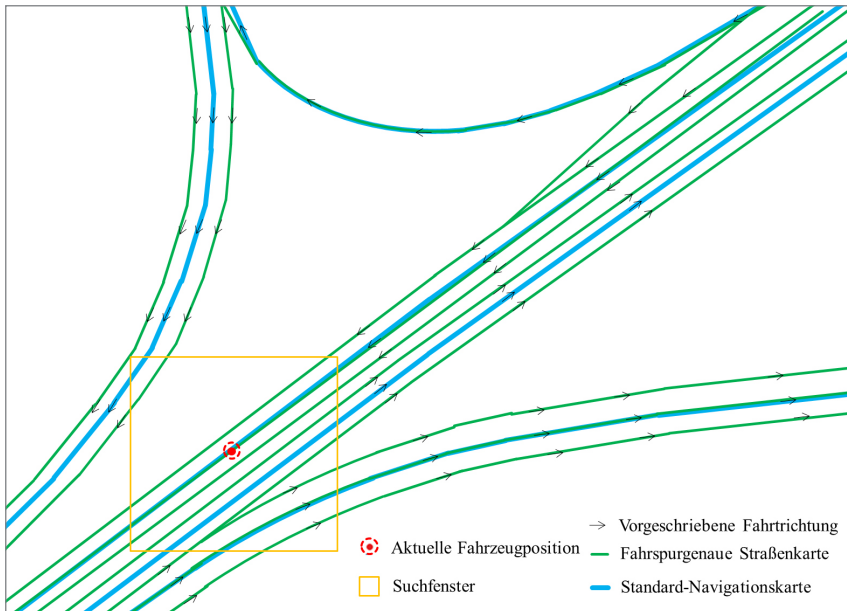


Abb. 8: Fahrspurgenaue Straßenkarte und Standard-Navigationskarte im Vergleich

Kartenausschnittes vom Autobahnkreuz Stuttgart miteinander verglichen. Daraus ist zu erkennen, dass sich die Anzahl der Kantenkandidaten innerhalb des Suchfensters bei Verwendung von fahrspurgenauen Straßenkarten erheblich erhöht. Dies führt direkt zu einer höheren Mehrdeutigkeit beim Identifizieren der korrekten Straßenkante. Zur Lösung des Problems wird in Li et al. (2017) das Partikelfilter als die bestgeeignete Methode gewählt. Im Vergleich zum Kalman-Filter und zur Fuzzy-Logik liefert der Ansatz mit dem Partikelfilter zuverlässigere Ergebnisse und ist einfacher zu implementieren.

3.2.5 Entscheidungsunterstützende Ansätze

Beim Map-Matching können Probleme durch mehrdeutige Entscheidungssituationen entstehen, z. B. im Stadtzentrum mit hoher Straßendichte, neben parallelen Straßen oder im Kreuzungsbereich. Diese Situationen stellen eine besondere Herausforderung dar, da die Ungenauigkeit der Eingangsdaten (Sensordaten) offen lässt, ob das Fahrzeug z. B. seine Fahrspur gewechselt hat oder abgebogen ist. Für solche praktisch auftretenden Entscheidungsprobleme müssen angemessene Zuordnungskriterien durch eine vollständige Fallunterscheidung in den Map-Matching-Prozess integriert werden, um möglichst zuverlässige Ergebnisse zu erzielen. Die Entscheidungsfindung erfolgt dabei in der Regel mit Fuzzy

Inferenzsystemen (Tang et al. 2017), unter Anwendung der Dempster-Shafer Evidenztheorie (Abdallah et al. 2011), Multi-Hypothesen-Verfahren (Heidrich et al. 2011, Romon et al. 2015) oder mit Hilfe der Bayesschen Inferenz (Quddus et al. 2015). Solche Methoden bieten eine sehr effektive Unterstützung in der Identifikation der korrekten Straßenkante für die Fahrzeugposition.

Das Map-Matching-Verfahren von Abdallah et al. (2011) beschäftigt sich mit der Überprüfung von mehreren Hypothesen und der Identifizierung der korrekten Straßenkante unter Verwendung der Evidenztheorie nach Dempster und Shafer. Jede Nullhypothese beschreibt eine besondere Situation für die aktuelle Fahrzeugposition: 1) auf der letzten identifizierten Straßenkante, 2) die letzte identifizierte Straßenkante verlassen, 3) neben parallelen Straßen, 4) im Kreuzungsbereich, 5) vor einer Kreuzung oder Einmündung und 6) Kartendaten nicht vorhanden. Eine wichtige Besonderheit des Verfahrens liegt im Vergleich zu existierenden Ansätzen darin, dass die digitalen Straßenkanten stückweise durch Rechtecke anstatt durch Linienzüge repräsentiert werden. Die Dimension des Rechtecks ist von der geometrischen Genauigkeit der digital abgelegten Karteninformationen einerseits und der Fahrbahnbreite andererseits abhängig. Dadurch sind die typischen Problemfälle wie Kantenidentifikation bei komplexen Kreuzungen, parallelen Straßen und fehlenden Kartendaten leichter zu bewältigen. Dieser Hypothesenbasierte Map-Matching-Algorithmus kann hochpräzise und zuverlässige Positionslösungen des Fahrzeuges errechnen und weist eine hohe Leistungsfähigkeit in der praktischen Durchführung auf.

Alternativ kann beim Map-Matching das menschliche Erfahrungswissen durch Fuzzy-Regeln dargestellt werden; z. B. wenn die Winkeldifferenz zwischen der Orientierung einer Straßenkante und der Fahrtrichtung des Fahrzeugs klein ist, dann besteht eine hohe Ähnlichkeit zwischen der Fahrzeug- und Kartentrajektorie (Tang et al. 2017). Der wesentliche Unterschied im Vergleich zu anderen Map-Matching-Ansätzen ist allerdings, dass die Zugehörigkeit, mit der das Fahrzeug auf den jeweiligen Kantenkandidaten fährt, mithilfe der Fuzzy-Regeln und den Zugehörigkeitsfunktionen auszurechnen ist.

4 Projekt Ghosthunter

Das Forschungsprojekt **Ghosthunter**, gefördert von Juni 2015 bis November 2017 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) – Raumfahrtmanagement, beschäftigte sich mit der Entwicklung eines Geisterfahrerwarnsystems basierend auf GNSS-Technologien, digitalen Straßenkarten und Map-Matching-Algorithmen. Durchgeführt wurde das Projekt vom Institut für Ingenieurgeodäsie (IIGS) der Universität Stuttgart und vom Institut für Raumfahrttechnik und

Weltraumnutzung (ISTA) der Universität der Bundeswehr München sowie der Firma NavCert GmbH in Braunschweig (Wang et al. 2016). Dabei umfassten die Forschungsschwerpunkte die Bereiche GNSS-basierte Fahrzeugnavigation, Sensorfusion, Kartenbewertung und Map-Matching.

Da Geisterfahrten oftmals an Autobahnanschlussstellen beginnen (Abb. 9), wurde mit dem Projekt **Ghosthunter** ein Telematiksystem zur Geisterfahrererkennung im Bereich von Autobahnauffahrten und -abfahrten erforscht (Wang et al. 2016). Die folgenden Abschnitte beschreiben ausführlich die Forschungsaktivitäten des IIGS. Im Rahmen dieser Vorstellung werden die verwendeten Methoden für die Qualitätsuntersuchung digitaler Straßenkarten und die Algorithmenentwicklung zum Map-Matching näher erläutert sowie die Untersuchungsergebnisse diskutiert und interpretiert.

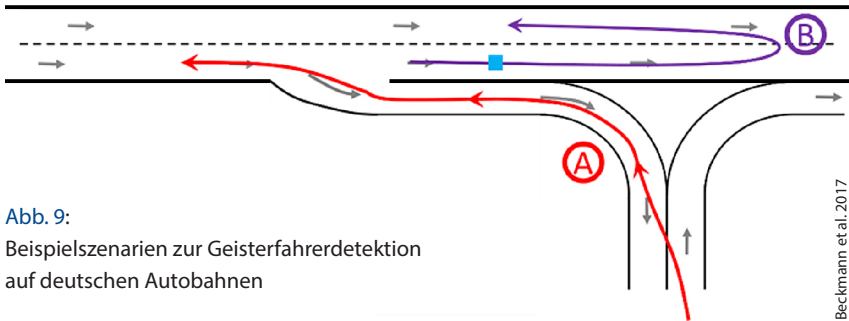


Abb. 9:

Beispielszenarien zur Geisterfahrerdetektion auf deutschen Autobahnen

4.1 Projektrahmen und Ziel

Unter Geisterfahrern, auch Falschfahrer genannt, versteht man jene Autofahrer, die entgegen der vorgeschriebenen Fahrtrichtung fahren. Alljährlich ereignen sich durchschnittlich ca. 1950 Geisterfahrten auf deutschen Autobahnen. Diese verursachen ungefähr 75 bis 80 Unfälle (BASt 2012). Am häufigsten werden Autobahnabfahrten in falscher Richtung befahren (Abb. 9, Szenario A) oder ein Autofahrer wendet auf der Autobahn (Abb. 9, Szenario B). Solche riskanten Fahrmanöver führen häufig zu Verkehrsunfällen mit Toten oder Schwerverletzten.

Das Projekt **Ghosthunter** hatte das Ziel, dem Name nach, Geisterfahrten zukünftig effektiv vorzubeugen, den Straßenverkehr vor Geisterfahrern zu schützen und somit die Verkehrssicherheit zu verbessern. Als Untersuchungsgebiet wurde hierfür ein regionaler Bereich der deutschen Bundesautobahn 81 (A81) zwischen Stuttgart und Singen festgelegt (Wang et al. 2016). Die Forschungsaktivitäten des IIGS konzentrierten sich dabei auf zwei Teilbereiche: Evaluierung der Qualität vorhandener Kartensysteme und Entwicklung und Implementierung eines für die Geisterfahrerdetektion geeigneten Map-Matching-Algorithmus.

4.2 Qualitätsuntersuchung von digitalen Straßenkarten

Digitale Straßenkarten stellen einen unentbehrlichen Bestandteil für verkehrstelematische Anwendungen dar. Sie liegen weltweit in unterschiedlichen Genauigkeiten und Detaillierungsgraden vor und sind zurzeit für ganz Deutschland flächendeckend verfügbar.

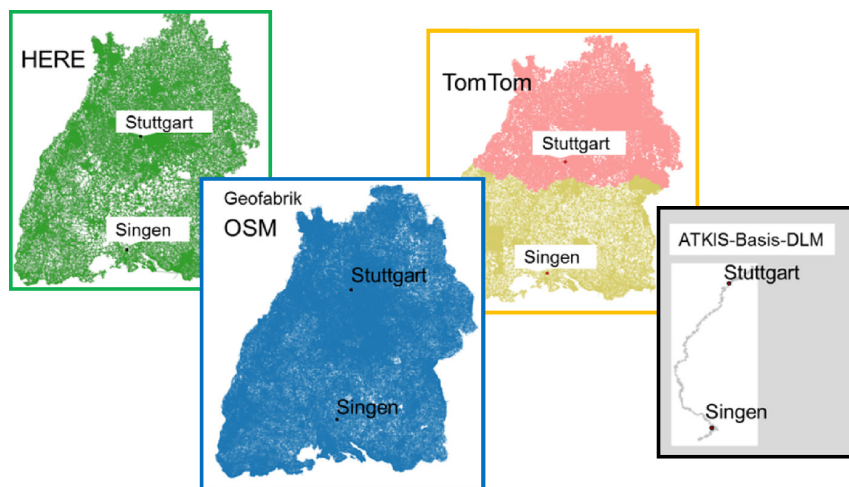


Abb. 10: Digitale Straßenkarten verschiedener Kartenanbieter

Nach der erfolgreichen Ermittlung des aktuellen Standorts des Fahrzeugs wird ein Map-Matching-Prozess ausgeführt, um den Bezug zwischen gemessener Fahrzeugposition und dem vorliegenden Straßennetz herzustellen. Dies erfordert das Vorliegen der relevanten Daten in Form einer digitalen Straßenkarte. Um ein für die Geisterfahrerdetektion und das hierfür notwendige Map-Matching optimal geeignetes Kartensystem identifizieren zu können, wurden im Rahmen des Projekts die Genauigkeiten von den vier verschiedenen Straßenkartenproduzenten HERE, TomTom, OSM und ATKIS-Basis-DLM empirisch untersucht (Abb. 10). Dies erfolgte durch Abgleich mit der Realität. Zu diesem Zweck wurden für ausgewählte Autobahnanschlussstellen Referenztrajektorien aus präzisen GNSS-Trägerphasenlösungen generiert (Wang et al. 2016). Die Messunsicherheit der Referenztrajektorien liegt unter 0,1 m in der Lage.

Bei der Untersuchung wird zwischen absoluter und relativer Genauigkeit unterschieden. Die absolute Genauigkeit, nachfolgend auch als Lagegenauigkeit bezeichnet, beschreibt den Abstand ds zwischen der zu bewertenden Karten-trajektorie und der Soll-Trajektorie (bzw. Referenztrajektorie). Unter relativer

Tab. 4: Evaluierungsergebnisse für absolute und relative Positionsgenauigkeit

Genauigkeit	ATKIS	HERE	TomTom	OSM
$rms_{absolut, ds}$	1,80 m	2,02 m	2,00 m	1,95 m
$rms_{relativ, \Delta\alpha}$	4,8°	4,1°	5,1°	4,2°
$rms_{relativ, \Delta\alpha^*}$	1,09 m	0,93 m	1,17 m	0,95 m
$rms_{relativ, \Delta\kappa}$	0,0087 m ⁻¹	0,0053 m ⁻¹	0,0079 m ⁻¹	0,0055 m ⁻¹

Wang et al. 2016

Genauigkeit (auch genannt: Formgenauigkeit) versteht man die Qualität der Straßenmodellierung hinsichtlich der Formhaltung. Dafür wurden zwei Qualitätskriterien kombiniert: Differenz der Orientierungsänderungen $\Delta\alpha$ und Differenz der Krümmungen $\Delta\kappa$, um damit aussagekräftige Ergebnisse erzielen zu können (Wang et al. 2016). Für weitere detaillierte Ausführungen diesbezüglich wird auf Wang et al. (2016) verwiesen.

Als Ergebnis erhält man für jeden vorliegenden Datenbestand die mittleren RMS-Werte (von engl. Root Mean Square – quadratischer Mittelwert) der absoluten Positionsabweichung und der Formabweichung von den verwendeten Referenzdaten (Tab. 4). Um einen unmittelbaren Vergleich mit den Literaturangaben zu ermöglichen, wurde hierbei der Parameter $\Delta\alpha$ von Grad in Meter umgerechnet und durch $\Delta\alpha^*$ repräsentiert. Aus den in Tab. 4 dargestellten empirischen Evaluierungsergebnissen wird ersichtlich, dass die amtlichen ATKIS-Straßendaten die beste Lagegenauigkeit von 1,80 m besitzen und die kommerziellen HERE-Straßendaten die höchste Formgenauigkeit von 0,93 m bieten.

Des Weiteren sind die Attributinformationen von digitalen Straßenkarten von herausragender Bedeutung für eine verlässliche Geisterfahrdetektion und andere verkehrssicherheitsrelevante Leistungsbereiche. Digitale Straßenkarten der beiden größten Kartenanbieter der Welt, TomTom und HERE, enthalten bis zu 204 Straßenattribute: vom *Straßenname*, *vorgeschriebener Fahrtrichtung*, *Länge des Straßenabschnitts* und *Anzahl der Fahrstreifen* bis hin zur *Geschwindigkeitskategorie* (Navi 2008). Zusätzlich bieten TomTom und HERE Nutzern Kartenprodukte mit optimierter Straßengeometrie und präzisen Attributen wie z. B. Straßenkrümmung für Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) Anwendungen. Im Gegensatz dazu wurden die amtlichen Datenbestände ATKIS und frei verfügbare OSM-Straßenkarten wegen gänzlichen Mangels des Attributes *vorgeschriebene Fahrtrichtung* nicht weiter im Projekt berücksichtigt.

4.3 Entwicklung und Implementierung eines Gewichtsfunktion-basierten Map-Matching-Algorithmus

In diesem Abschnitt wird der zur Geisterfahrrerdetektion verwendete Gewichtsfunktionbasierte Map-Matching-Algorithmus vorgestellt. Anhand einer umfangreichen Literaturstudie, in der unterschiedliche Map-Matching-Ansätze für diverse Anwendungszwecke zusammengefasst und ausgewertet wurden, können hierbei Heading-Winkel, kürzeste Distanz und Konnektivität als Zuordnungskriterien festgelegt werden. Da zusätzlich stochastische Informationen verwendet werden, handelt es sich um einen topologischen-stochastischen Ansatz.

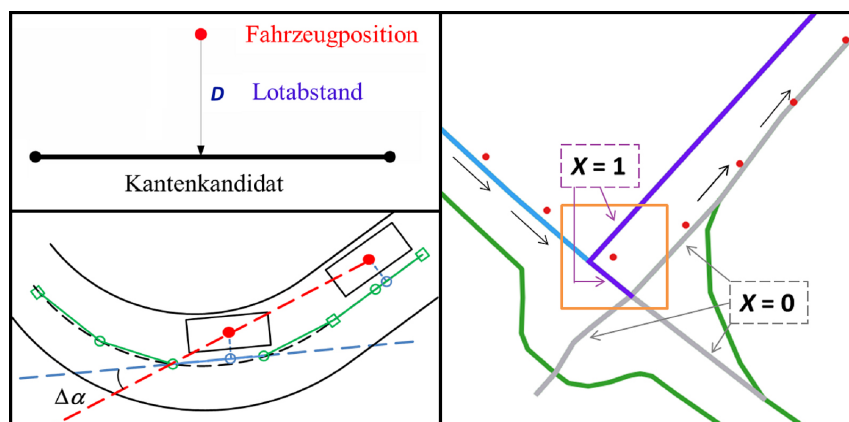


Abb. 11: Ausgewählte Zuordnungskriterien für den Map-Matching-Algorithmus

Das Heading-Kriterium beschreibt die Differenz des Heading-Winkels $\Delta\alpha$ zwischen der aktuellen Orientierung der Fahrzeuglängsachse und einer Straßenkante (Abb. 11 links unten). Mit dem Distanzkriterium wird der kürzeste Abstand (Lotabstand) D der Fahrzeugposition von einer Straßenkante ermittelt und in die Gewichtsfunktion eingesetzt (Abb. 11 links oben).

Das dritte Kriterium Konnektivität X ergänzt den Map-Matching-Algorithmus um eine topologische Analyse und kann die Schwäche der rein geometrischen Ansätze gut kompensieren. Dabei wird die topologische Beziehung zwischen Kantenkandidaten der aktuellen Epoche und der identifizierten Straßenkante der letzten Epoche ausgenutzt (Abb. 11 rechts).

Nach oben genannten Kriterien lässt sich eine Gewichtsfunktion (TWS: Total Weighting Score) definieren, mit der die Gewichtung bzw. Wahrscheinlichkeit jedes im Suchfenster (Maße: $2b \times 2b$ m) befindlichen Kantenkandidaten berechnet wird:

$$TWS_i = \begin{cases} \frac{1}{2} \cos(\Delta\alpha) + \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{2}b - D}{\sqrt{2}b} \right) & i = 2; \\ \frac{1}{3} \cos(\Delta\alpha) + \frac{1}{3} \left(\frac{\sqrt{2}b - D}{\sqrt{2}b} \right) + \frac{1}{3} X & i \geq 3; \end{cases} \quad (1)$$

mit $\Delta\alpha$: Differenz des Heading-Winkels; X : Konnektivität; i : Epoche Nummer;
 D : Lotabstand/kürzester Abstand; b : halbe Seitenlänge des Suchfensters

Der Kantenkandidat, der die höchste Gewichtung (TWS) zugeschrieben bekommt, wird als Map-Matching-Ergebnis identifiziert. An dieser Stelle soll auf Wang et al. (2017) mit weiteren Ausführungen des Map-Matching-Algorithmus und der zugehörigen Zuordnungskriterien verwiesen werden.

Die Korrektheit dieses Algorithmus wurde zuerst durch hinreichend viele Tests im Post-Processing bewiesen. Die dazu verwendeten Trajektoriendatensätze sind zum Teil mit Google Earth simuliert, zum Teil reale GNSS-basierte Fahrzeugtrajektorien. Die Abb. 12 zeigt ein exemplarisches Beispiel für das

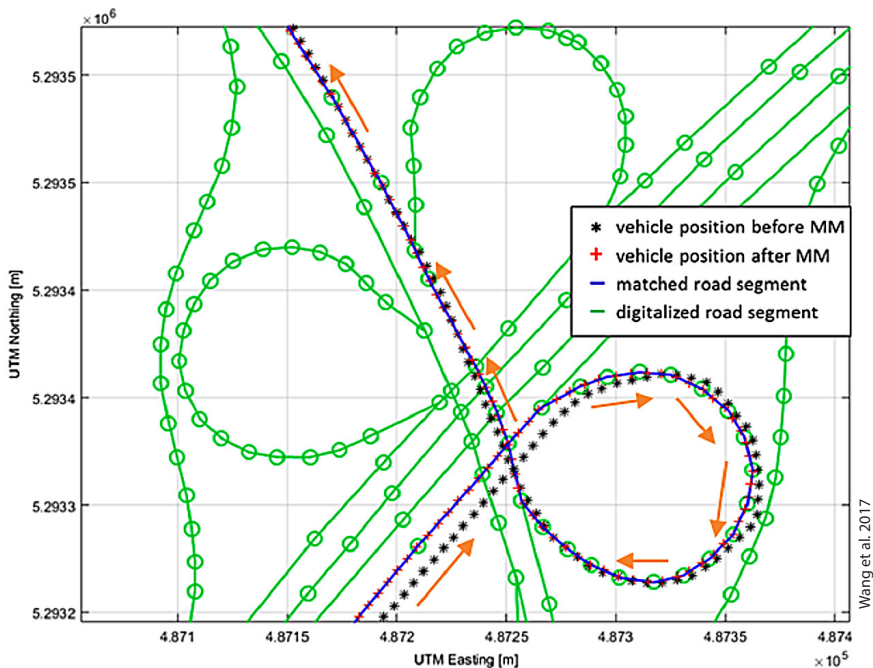


Abb. 12: Map-Matching-Ergebnisse am Beispiel der Autobahnanschlussstelle Böblingen-Hulb und einer simulierten Fahrzeugtrajektorie

Map-Matching-Ergebnis in einem komplexen Kreuzungsbereich bestehend aus vier Autobhnauffahrten, vier Autobhnaufahrten auf der Autobahn A81 jeweils in Richtung Singen und Stuttgart, sowie zusätzlichen Verflechtungstreifen. Die dabei verwendete Fahrzeugtrajektorie ist ein simulierter Datensatz mit niedriger Genauigkeit von wenigen bis mehreren Metern. Der Map-Matching-Algorithmus ist trotzdem in der Lage, allen Fahrzeugpositionen bestimmte Straßenkanten korrekt zuzuweisen (blau markierte Kanten in Abb. 12).

4.4 Algorithmus-Optimierung für die Echtzeitausführung

Für die Geisterfahrrdetektion im Bereich von Autobhnauf- und -abfahrten ist es von entscheidender Bedeutung, dass der Map-Matching-Algorithmus echtzeitfähig ist. Für eine effiziente Echtzeitausführung wurde dieser Algorithmus optimiert, indem der vorliegende digitale Vektordatenbestand in $2 \times 2 \text{ km}^2$ Kartenkacheln unterteilt und vorprozessiert wurde. Wie in Abb. 13 dargestellt, werden Karteneinlesen, Koordinatentransformation, Kachelgenerierung und weitere Schritte der Datenvorprozessierung vor dem Map-Matching-Prozess durchgeführt. Dadurch reduziert sich der gesamte zur Echtzeit auszuführende Rechenaufwand erheblich.

Um die Notwendigkeit der Datenvorprozessierung und Kachelung aufzuzeigen, wurden die Performances (Laufzeiteffizienz) der verschiedenen Varianten des Map-Matching-Algorithmus untersucht. Die Ergebnisse, basierend auf einer längeren Trajektorie mit 950 aufeinanderfolgenden Fahrzeugpositionen, sind

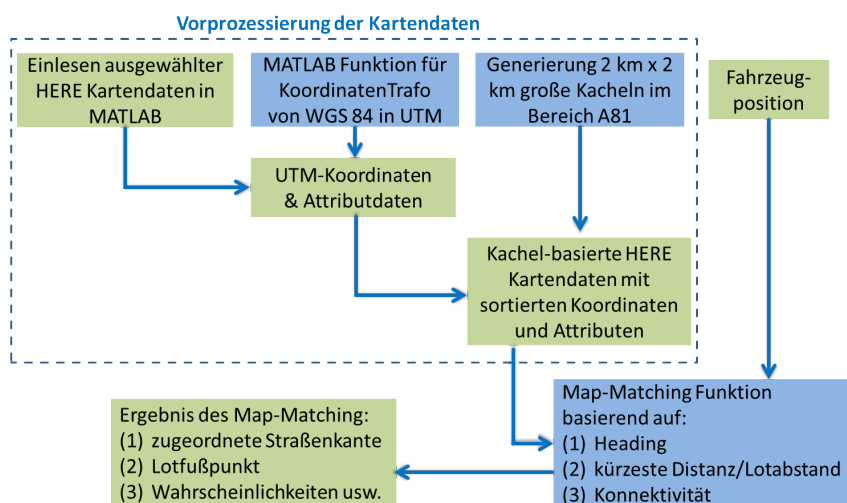


Abb. 13: Optimierung des Map-Matching-Algorithmus für die Echtzeitausführung

Tab. 5: Ausführungszeiten der verschiedenen Varianten des implementierten Map-Matching-Algorithmus im Vergleich

Karte	Kachelung	Vorprozessierung ohne Kachelung	t_{\max} [s]	t_{\min} [s]	t_{mean} [s]	σ_t [s]
TomTom	–	–	0,363	0,302	0,308	0,003
HERE	–	–	0,185	0,134	0,137	0,002
HERE	–	✓	0,113	0,035	0,065	0,020
HERE	✓	–	0,079	0,019	0,042	0,015
HERE	✓	✓	0,048	0,010	0,014	0,002

in Tab. 5 zusammengefasst. Daraus ist ersichtlich, dass die Variante mit vollständiger Vorprozessierung und Kachelung die beste Performance aufweist: 0,014 s im Durchschnitt. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass der Rechenaufwand des Algorithmus unter Verwendung der TomTom-Karte mehr als doppelt so hoch wie unter Einsatz von HERE-Karte ausfällt. Der Grund dafür ist, dass die TomTom-Straßen deutlich feiner modelliert wurden und somit innerhalb des Suchfensters einer festen Größe doppelt so viele zu untersuchende Kantenkandidaten bei TomTom im Vergleich zu HERE enthalten sind.

5 Projekt TransSec

Die Terrorangriffe der letzten Zeit, unter anderem in Nizza und Berlin, haben auf dramatische Weise gezeigt, welche verheerenden Schäden mit Lastkraftwagen entstehen, wenn diese missbraucht und in Menschenmengen gelenkt werden (Spiegel 2016a, Spiegel 2016b). Die bisher installierten Sicherheitssysteme konnten dabei vom Fahrer übersteuert werden und machten damit einen mutwilligen Angriff möglich. Deshalb hat man sich im Forschungsprojekt TransSec – „Autonomous Emergency Maneuvering and Movement Monitoring for Road Transport Security“ zum Ziel gesetzt, ein System zu entwickeln, welches vom Fahrer nicht mehr übersteuert werden kann und somit Terrorangriffe verhindert. Dazu haben sich die folgenden Partner aus Industrie und Forschung zusammengefunden und für eine Förderung der EU aus dem Forschungsprogramm Horizon 2020 erfolgreich beworben: Daimler AG, TeleConsult Austria GmbH, Fundación Centro de Tecnologías de Interacción y Comunicaciones Vicomtech, Waterford Institute of Technology, Telecommunications Software & Systems Group und Universität Stuttgart, Institut für Ingenieurgeodäsie (TransSec 2018). Das Projekt startete im Februar 2018 und wird bis zum Jahr 2021 laufen.

Eine wichtige Datengrundlage innerhalb des Projektes wird die digitale Karte darstellen. In ihr finden sich z. B. Informationen über Straßen und Bereiche, die von LKWs nicht befahren werden dürfen. Bewegt sich das Fahrzeug dennoch auf einen solchen Bereich zu, können aufgrund der Karte und weiterer Sensoren, wie beispielsweise Kameras, Risiken für Fußgänger erkannt und entsprechende Manöver zur Gefahrenabwehr eingeleitet werden. Außerdem soll das Konzept der lokalen dynamischen Karte implementiert werden. Dabei werden der im Fahrzeug vorhandenen statischen Karte weitere dynamische Informationen aus dem aktuellen Umfeld des LKW hinzugefügt, dem Fahrer präsentiert und für eine Risikoanalyse verwendet. Die Positionsbestimmung des Fahrzeuges wird bei diesem Projekt mit GNSS, unter Einbeziehung der neuesten Technologien des Galileo-Systems, und der Integration weiterer Sensoren, wie z. B. einem Inertialmesssystem, realisiert. Wird eine Gefahrensituation erkannt, wird in die Fahrzeugsteuerung eingegriffen, um einen Unfall zu verhindern. Außerdem wird das Fahrzeug im Gefahrenfall mit seiner Umgebung kommunizieren. Dafür wird der V2X (Vehicle-to-everything) Ansatz verfolgt, bei dem der LKW mit anderen Fahrzeugen, der Straßeninfrastruktur und Fußgängern in der Umgebung kommuniziert. Das Institut für Ingenieurgeodäsie der Universität Stuttgart wird dabei vor allem bei der integrierten Positionsbestimmung und der digitalen Karte inklusive Map-Matching-Algorithmus mitarbeiten.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag stellt die Grundlagen der digitalen Straßenkarte und der Map-Matching-Algorithmen dar. Die Autoren können hier nicht alle Details und alle Algorithmen vorstellen; vielmehr soll den Lesern ein Überblick geboten werden. Dabei wird auch eine überarbeitete Einteilung der Map-Matching-Algorithmen vorgeschlagen. Zwei Projekte illustrieren abschließend den Einsatz der digitalen Straßenkarte und der genannten Algorithmen; einmal Ergebnisse zur Falschfahrererkennung und das andere Mal die Vorstellung von Ansätzen zur Abwehr von LKW-Terrorattacken.

Es ist davon auszugehen, dass digitale Straßenkarten zukünftig fahrspurgenau modelliert vorliegen werden. In dem bereits genannten NDS-Standard sind solche Möglichkeiten vorgesehen. Es wird sich die Frage nach der Genauigkeit dieser Fahrspurmodellierung stellen. Zurzeit lässt sich diese noch nicht empirisch beantworten. Wie zuvor dargestellt, liegen erste Ansätze zum fahrspurgenauen Map-Matching bereits vor. Es ist jedoch zu erwarten, dass das Vorliegen derartiger digitaler Straßenkarten (HD-Karten) eine schwungvolle und forschungsintensive Entwicklung im Bereich Map-Matching anstoßen wird.

Danksagung

Das Projekt Ghosthunter wurde unter dem Kennzeichen 50 NA 1524 finanziell gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) – Raumfahrtmanagement. Das Projekt TransSec wird von der Europäischen Kommission unter der Kennziffer 776355 finanziell gefördert. An dieser Stelle danken die Autoren beiden Geldgebern für die Unterstützung und die erfolgreiche Zusammenarbeit.

Literatur

- Abdallah, F.; Nassreddine, G.; Denoeux, T. (2011): A multiple-hypotheses map matching method suitable for weighted and box-shaped state estimation for localization. IEEE Intelligent Transportation Systems Society, vol. 12, iss. 4, 1495–1510. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5963717>. DOI: 10.1109/TITS.2011.2160856.
- Bartelme, N. (2005): Geoinformatik: Modelle, Strukturen, Funktionen. 4. vollst. überarb. Aufl. ed. Springer, Berlin.
- BASt (2012): Falschfahrten auf Autobahnen. Schlussbericht. Bearbeitung: Bergische Universität Wuppertal und Büro für Forschung, Entwicklung und Evaluation.
- Beckmann, H.; Frankl, K.; Wang, J.; Metzner, M.; Schwieger, V.; Pany, T.; Eissfeller, B. (2017): Performance comparison of different GNSS-based multi-sensor systems for detecting wrong-way driving on highways. In: Proceedings of ION GNSS+ Meeting, 25–29 September, Oregon, USA.
- Behrens R.; Kleine-Besten T.; Pöchmüller W.; Engelsberg A. (2015): Digitale Karten im Navigation Data Standard Format. In: Winner H., Hakuli S., Lotz F., Singer C. (eds) Handbuch Fahrerassistenzsysteme. ATZ/MTZ-Fachbuch. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Bernstein, D.; Kornhauser, A. (1996): An Introduction to Map Matching for Personal Navigation Assistants. New Jersey TIDE Center, Princeton University.
- Blazquez, C. (2012): A Decision-Rule Topological Map-Matching Algorithm with Multiple Spatial Data. Global navigation satellite systems: Signal, theory and applications, 215–240.
- Czaja, J. (2007): Ein sensorgestütztes mobiles GIS am Beispiel des Nationalparks „Bayerischer Wald“. Dissertation, Institut für Geodäsie, GIS und Landmanagement, Technische Universität München.
- Czommer, R. (2000): Leistungsfähigkeit fahrzeugautonomer Ortungsverfahren auf der Basis von Map-Matching-Techniken. Dissertation, Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen, Universität Stuttgart.
- Hake, G.; Grünreich, D.; Meng, L. (2002): Kartographie: Visualisierung raum-zeitlicher Informationen. 8. vollst. neu bearb. und erw. Aufl. ed. De-Gruyter-Lehrbuch. Walter de Gruyter, Berlin New York.
- Heidrich, W. A.; Schulze, M.; Kessel, M.; Werner, M. (2011): Robustes Mapmatching hoch aufgelöster, fahrzeugbasierter GPS-Tracks. www.martinwerner.de/pdf/MAPMATCH.pdf.

- Krumm, J.; Letchner, J.; Horvitz, E. (2006): Map Matching with Travel Time Constraints. Copyright © 2006 SAE International. www.microsoft.com/en-us/research/publication/map-matching-travel-time-constraints.
- Kuhnt, F.; Kohlhaas, R.; Jordan, R.; Gußner, T.; Gump, T.; Schamm, T.; Zöllner, J. M. (2014): Particle filter map matching and trajectory prediction using a spline based intersection model. FZI-Report, FZI Forschungszentrum Informatik am Karlsruher Institut für Technologie, Oktober 2014.
- Lange, N. de (2006): Geoinformatik in Theorie und Praxis. 2. akt. und erw. Aufl. ed. Springer, Berlin.
- Li, F.; Bonnifait, P.; Ibanez-Guzman, J.; Zinoune, C. (2017): Lane-level map-matching with integrity on high-definition maps. IEEE Intelligent Vehicle Symposium (IV2017), 1176–1181, June 2017, Los Angeles, CA, United States. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7995872>.
- Luo, A.; Chen, S.; Xv, B. (2017): Enhanced Map-Matching Algorithm with a Hidden Markov Model for Mobile Phone Positioning. ISPRS International Journal of Geo-Information. www.mdpi.com/2220-9964/6/11/327/pdf.
- Meyna, A. (1994) Zuverlässigkeitsbewertung zukunftsorientierter Technologien. Qualitäts- und Zuverlässigkeitsmanagement. Braunschweig/Wiesbaden, Vieweg.
- Navi (2008): Geodaten-Erfassung bei NAVTEQ: Straßenkarten für die kleinen Helfer. NAVI magazine 3-4/2008. www.navi-magazin.de.
- NDS e. V. (2016): Pressemitteilung: Veröffentlichung von HD Kartenstandard für Firmen: Industriekonsortium treibt Autonomes Fahren voran. www.nds-association.org/wp-content/uploads/20160914-PR-G.pdf, letzter Zugriff 06/2018.
- Neumann, D. (2002): Kalman-Filter und Partikelfilter zur Selbstlokalisierung – Ein Vergleich. www.allpsych.uni-giessen.de/dirk/projects/particle.pdf.
- Ochieng, W. Y.; Quddus, M. A.; Noland, R. B. (2003): Map-matching in complex urban road networks. Brazilian Journal of Cartography 55 (2), 1–18.
- Quddus, M. (2006): High integrity map matching algorithm for advanced transport telematics applications. Dissertation, Centre for Transport Studies, Imperial College London, United Kingdom.
- Quddus, M.; Ochieng, W. Y.; Noland, R. B. (2007): Current map-matching algorithms for transport applications: State-of-the art and future research directions. Transportation Research Part C 15, 312–328.
- Quddus, M.; Washington, S. (2015): Shortest path and vehicle trajectory aided map-matching for low frequency GPS data. Transportation Research Part C 55, 328–339.
- Röhrig, C.; Büchter, H.; Kirsch, C. (2009): Monte Carlo Lokalisierung Fahrerloser Transportfahrzeuge mit drahtlosen Sensornetzwerken. www.fh-dortmund.de/roehrig/papers/roehrigams09.pdf.
- Romon, S.; Bressaud, X.; Lassarre, S.; Pierre G. S.; Khoudour, L. (2015): Map-matching Algorithm for Large Databases. The Journal of Navigation (2015), 68, 971–988. www.math.univ-toulouse.fr/~bressaud/Papiers/2014-0030-ROMON-Copy-Edit_v3.pdf.
- Spiegel (2016a): Anschlag in Nizza, Zahl der Todesopfer auf 86 gestiegen. Spiegel online, www.spiegel.de/politik/ausland/anschlag-in-nizza-zahl-der-todesopfer-steigt-auf-86-a-1108632.html, letzter Zugriff 9.7.2018.

- Spiegel (2016b): Berlin, Lkw rast in Weihnachtsmarkt – Polizei geht von Vorsatz aus. Spiegel online, www.spiegel.de/politik/deutschland/berlin-lkw-attacke-am-breitscheidplatz-polizei-geht-von-vorsatz-aus-a-1126660.html, letzter Zugriff 9.7.2018.
- Tang, J.; Zhang, S.; Zou, Y.; Liu, F. (2017): An adaptive map-matching algorithm based on hierarchical fuzzy system from vehicular GPS data. PLOS ONE. <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0188796>.
- TransSec (2018): TransSec Partners. www.transsec.eu/partners, letzter Zugriff 07/2018.
- Velaga, N.; Quddus, M.; Bristow, A. (2009): Developing an enhanced weight-based topological map-matching algorithm for intelligent transport systems. Transportation Research Part C 17, 672–683.
- Walter, V. (1997): Zuordnung von raumbezogenen Daten: am Beispiel der Datenmodelle ATKIS und GDF. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften Reihe C, Dissertationen. Beck, München.
- Wang, J.; Metzner, M.; Schwieger, V. (2016): Überprüfung und Bewertung der Datenqualität von digitalen Straßenkarten Kartenvergleich zwischen HERE, TomTom, OSM und ATKIS-Basis-DLM. In DGON-Symposium Positionierung und Navigation (POS-NAV) 2016, Berlin, Germany.
- Wang, J.; Metzner, M.; Schwieger, V. (2017): Weighting-function based map-matching algorithm for a reliable wrong-way driving detection. In Proceedings of 12th ITS European Congress, 19–22 June 2017, Strasbourg, France.

Kontakt

M.Sc. Jinyue Wang | M.Sc. Martin Wachsmuth |
 Dr.-Ing. Martin Metzner | Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schwieger
 Institut für Ingenieurgeodäsie, Universität Stuttgart
 Geschwister-Scholl-Straße 24 D, 70174 Stuttgart
jinyue.wang@iigs.uni-stuttgart.de | martin.wachsmuth@iigs.uni-stuttgart.de
martin.metzner@iigs.uni-stuttgart.de | volker.schwieger@iigs.uni-stuttgart.de

Multisensorsystem zur Erfassung von Turmschwingungen an der Marienkirche Neubrandenburg

Philipp Engel | Karl Foppe | Uwe Köster

1 Einleitung

Im Jahr 2014 wurde eine Kooperation zwischen der Hochschule Neubrandenburg und der Stadt Neubrandenburg vereinbart, die das Ziel hat, die Marienkirche im Stadtzentrum als Untersuchungsobjekt für ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen zu nutzen. Primär sollen etwaige Bewegungen des Kirchturms und des Kirchenschiffs mit Hilfe der an der Hochschule entwickelten Monitoring-Plattform DABAMOS erfasst werden. Darüber hinaus dient das Objekt auch der Erprobung moderner Sensor- und IoT-Technologien unter realen Bedingungen.



Abb. 1:
Die Kirchenglocken
der Marienkirche

Die Geschichte der Marienkirche reicht bis zur Gründung der Stadt Neubrandenburg im Jahr 1248 zurück. Die ursprünglich neunjochige und dreischiffige Hallenkirche diente bis zu ihrer Profanisierung im Jahr 2001 als Hauptpfarrkirche Neubrandenburgs und wird seit ihrem Umbau zur Konzertkirche als

Konzertsaal genutzt. Nach den Zerstörungen des Zweiten Weltkriegs wurde der 90 m hohe Kirchturm im Jahr 1983 wiederhergestellt. Die Bauarbeiten fanden im Jahr 2007 mit der Installation eines neuen Glockenstuhls und fünf Glocken ihren Abschluss (Abb. 1).

Das imposante gleichzeitige Läuten der fünf neuen Glocken kann von Besuchern und Betriebspersonal gleichermaßen als deutlich spürbare Gebäudeschwingungen auf dem Turm wahrgenommen werden, so dass in der Vergangenheit die Frage nach der Standsicherheit des Kirchturmes aufgeworfen wurde. Professionelle Industriekletterer sprachen aufgrund ihres subjektiven Eindrucks von angenommenen Bewegungsraten von mehr als 10 cm an der Turmspitze.

2 Geodätische Überwachungsmessungen

Geodätische Überwachungsmessungen umfassen die Planung, Durchführung, Auswertung und Dokumentation von Messvorhaben zur Aufdeckung von geometrischen Objektveränderungen, die als Bewegungen und Verformungen erfasst werden. Ziel der Überwachungsmessungen ist die Beobachtung des Verhaltens ausgewählter Objektpunkte. Dieses Verhalten kann entweder den zu erwartenden Veränderungen entsprechen oder abweichen. So werden geometrische Beziehungen der gewählten Objektpunkte quantisiert und der Deformationszustand des überwachten Bauwerkes dokumentiert. Dabei sind nach Welsch et al. (2000) die wesentlichen Ziele der Bauwerksüberwachung:

- Nachweis der Stand- und Funktionssicherheit des zu überwachenden Bauwerkes, sowie der störungsfreie Betrieb,
- Minderung des Gefährdungspotenzials durch rechtzeitiges Erfassen von Veränderungen,
- Beweissicherung zur Schadensdokumentation und zur Klärung der Ursachen von Schäden,
- Möglichkeit zur Prognose des mutmaßlichen Verhaltens in der näheren Zukunft,
- Überprüfung von Konstruktions- und Materialeigenschaften mit dem Ziel der Verbesserung der mechanischen Modellvorstellung,
- Erkenntnisgewinn für vergleichbare Objekte.

Für die Realisierung von geodätischen Überwachungsmessungen werden zunehmend Multisensorsysteme verwendet.

3 Methodik

Zur Erfassung von Schwingungen eignen sich insbesondere inertielle Sensoren, die Längs- und Querschleunigungen hochfrequent erfassen können. Durch die zunehmende Verbreitung von Smartphones kann untersucht werden, inwieweit sich die auftretenden Schwingungen auch mit diesen Geräten aufzeichnen lassen. Als klassische Verfahren zur Messung von absoluten Auslenkungen bieten sich moderne Tachymeter und GNSS-Systeme an. Um in der ingenieurgeodätischen Ausbildung Messverfahren kritisch zu betrachten, die aufgrund ihres Abgriffsystems eigentlich nicht zur Erfassung dynamischer Schwingungen geeignet sind, wurden auch Neigungssensoren mit Flüssigkeitshorizont als Referenzfläche untersucht.

Die Auswertung erfolgte mittels Schwingungsanalyse durch Fourier-Transformation. Dadurch konnte von der Zeitdarstellung in die Frequenzdarstellung übergegangen werden. Ziel war es, die Frequenzen und Amplituden der Turmschwingung mit allen Sensoren mit möglichst ausreichender Genauigkeit zu erfassen (Foppe 2006). Besondere Beachtung fand die Bestimmung der tatsächlichen Amplituden der Turmbewegung. Während die tachymetrischen Messungen und die durch GNSS bestimmten Amplitudenspektren direkt die erfassten Amplituden metrisch wiedergeben, sind die gemessenen Beschleunigungen mittels zweifacher Integration in Längenmaße umzuwandeln. Mit den Neigungssensoren werden die Neigungsänderungen im Winkelmaß erfasst, so dass sich generell bei einer Modellierung als vertikaler Kragarm die Berechnung der Auslenkung nach der Bogenformel anbietet. Im vorliegenden Fall ist diese vereinfachte Modellannahme aufgrund der unterschiedlichen Bauphasen des Turms offensichtlich nicht zulässig.

Eingezogene Betondecken, Treppenhäuser und andere eingebrachte Verstärkungen erlauben keine einfache Festlegung der Stabachse der Biegelinie und somit des Drehpunktes. Eine exakte Modellierung mittels Finite-Elemente-Methode (FEM) war nicht Gegenstand der hier beschriebenen Untersuchungen. Die Amplitudenwerte der Neigungssensoren lassen sich aber durchaus mit den Amplituden der Beschleunigungsmesser vergleichen, da beide Sensoren jeweils auf gleicher Höhe im Turm nebeneinander angebracht wurden.

4 Praktische Umsetzung

Um Schäden an der Bausubstanz des Kirchturms von vornherein zu vermeiden, erfolgt das gleichzeitige Läuten aller fünf Glocken nur noch an kirchlichen Hochfesten. Einmal im Jahr führt die Stadt Neubrandenburg ein sogenanntes

Probeläuten durch, bei dem verschiedene Kontrollmaßnahmen durchgeführt werden, darunter die Begutachtung des Turms durch Industriekletterer.

Bei der Auswertung der detektierten Frequenzen war zu unterscheiden, ob es sich um anregende Schwingungen (durch die Bewegungen der Glocken selbst im Glockenstuhl hervorgerufen) oder um angeregte Gebäudeschwingungen (Resonanz oder Oberschwingungen) handelt. Dazu wurden die Glocken während des Läutens mit einer Videokamera aufgezeichnet. Aus den Videoaufnahmen ließen sich die Frequenzen der Bewegungen im Glockenstuhl leicht abzählen. Diese finden sich in den Amplitudenspektren als kleine Peaks im Bereich von 0,50 Hz bis 0,38 Hz wieder.

4.1 Monitoring-System

Unter der Bezeichnung DABAMOS wird an der Hochschule Neubrandenburg ein freies und plattformunabhängiges Monitoring-System entwickelt. Im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte sind verschiedene Softwarelösungen für das geodätische Deformationsmonitoring von Bauwerken und Geländeabschnitten entstanden. Das *Open Automatic Deformation Monitoring System* (OpenADMS) wurde in der Programmiersprache Python entwickelt und dient der praktischen Umsetzung von Überwachungsmessungen. OpenADMS ist netzwerkfähig, lässt sich einfach erweitern und stellt nur geringe Anforderungen an die Hardware. Dadurch kann die Software auch auf preisgünstigen Einplatinen-Computern, wie dem Raspberry Pi, ausgeführt werden, welche zunehmend für Mess- und Steueraufgaben Verwendung finden (Peci et al. 2014).

Die Software umfasst verschiedene Module für die Sensorkommunikation, das Post-Processing und die Persistenz von Messwerten. Abgesehen von einigen Kernmodulen für die Verwaltung der Konfiguration und den Nachrichtenaustausch können alle anderen Programmteile nach den jeweiligen Anforderungen geladen und kombiniert werden. Auf Basis einer standardisierten Programmierschnittstelle ist es möglich, den Funktionsumfang der Software leicht zu erweitern (Engel et al. 2016). Eine Einbindung beliebiger Sensoren ist möglich, sofern diese eine offene und dokumentierte Schnittstelle aufweisen. In den meisten Fällen ist dazu kein weiterer Programmieraufwand notwendig.

Mit OpenADMS lassen sich neben einzelnen Sensorstationen auch Sensornetze umsetzen. Die Installation und Fernwartung der Sensorknoten erfolgt über eine eigenständige Web-Applikation, die das MQTT-Protokoll (Light 2017) nutzt, um mit den einzelnen Instanzen zu kommunizieren.

4.2 Sensornetzwerk

Das Monitoring-Konzept umfasst mehrere Sensorstationen, die innerhalb der Kirche zu einem Sensornetzwerk zusammengeschlossen sind. Ein zentraler Rechner steuert die Sensoren vor Ort und speichert die erfassten Messwerte lokal ab (Engel 2013). Der Fernzugriff auf das Monitoring-System ist über eine Richtfunkverbindung zur Hochschule möglich, die sich in etwa einem Kilometer Entfernung befindet.

Der im Kirchturm verbaute Stahlbeton schloss aufgrund seiner abschirmenden Wirkung die Einrichtung eines Funknetzes aus. Die einzelnen Sensorstationen sind daher an ein konventionelles Ethernet-Netzwerk angeschlossen. Die Verlegung der Datenleitungen erfolgte zeitgleich mit der Installation einer eigenen Spannungsversorgung.

Ein Unix-Server im Kirchturm führt das Monitoring-System OpenADMS aus, welches wiederum die Messdaten der einzelnen Sensoren über RS-232 aufzeichnet (Abb. 2). Das Datensignal von und zu den Sensoren wird durch serielle Geräteserver auf Ethernet umgesetzt, per TCP/IP übertragen und am Server auf einen virtuellen COM-Port abgebildet. Dadurch lassen sich beliebig viele Sensoren über ein einzelnes Ethernet-Kabel zu einem Datenbus verbinden. Durch die geringen Kosten und den modularen Aufbau kann das Netzwerk zu einem späteren Zeitpunkt leicht durch weitere Sensoren erweitert werden.



Abb. 2: Unix-Server mit Monitoring-System, Sensorsteuerungseinheit und Leica Nivel210 auf einer Konsole im Kirchturm

4.3 Sensoren

Für die Überwachung des Kirchturms wurden GNSS-Receiver, Tachymeter, Neigungs- und Beschleunigungsmesser sowie der integrierte MEMS-Sensor eines Smartphones verwendet (Ergebnisse in Abb. 3).

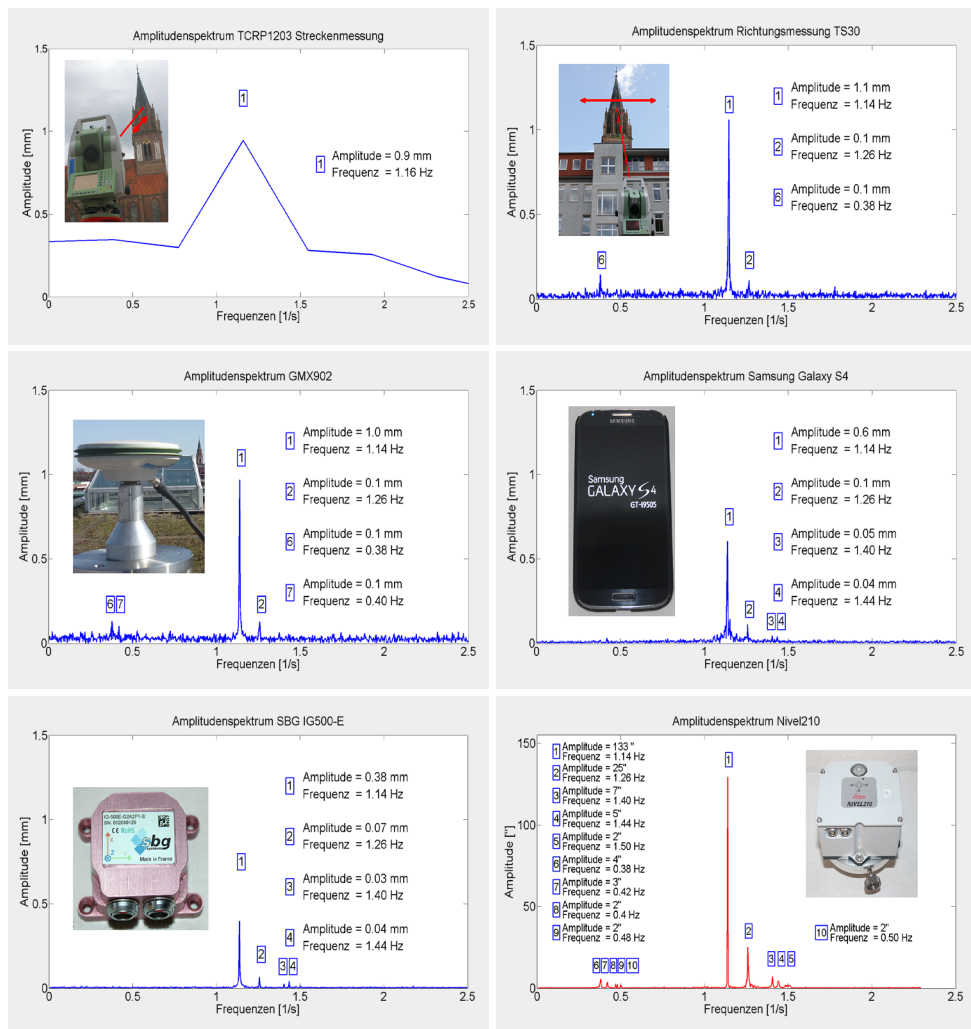


Abb. 3: Amplitudenspektren

4.3.1 GNSS

Die Erfassung der Turmschwingungen mittels GNSS erfolgte mit zwei Zweifrequenzempfängern Leica GMX902 und passenden Antennen Leica AS10. Eine Antenne wurde über eine Spezialkonstruktion auf der Südseite der Turmspitze installiert. Die Referenzstation befand sich auf dem Messdach der Hochschule. Für die Datenübertragung zwischen Kirchturm und Referenzstation wurde die bestehende Richtfunkverbindung genutzt. Die Empfänger arbeiteten mit einer Abtastfrequenz von 20 Hz. Die Software Leica GNSS Spider berechnet die Koordinaten in Echtzeit. Das Ergebnis der Schwingungsanalyse ergab mehrere Schwingfrequenzen. Der größte Peak lag bei einer Frequenz von 1,14 Hz mit einer Amplitude von einem Millimeter.

4.3.2 Tachymeter

Am Kirchturm wurden in Längs- und Querrichtung zur Bewegungsrichtung der Glocken zwei Monitoring-Prismen Leica GPR112 angebracht (Abb. 4). Zwei Tachymeter (Leica TS30 und Leica TCRP1203) verfolgten die Prismen mit Abtastraten von ca. fünf Messungen pro Sekunde.

Beide Tachymeter sind prinzipiell in der Lage, die hohe Abtastrate von 5 Hz einzuhalten. Im sogenannten *Lock-Modus* liefern sie in diesem Takt je einen

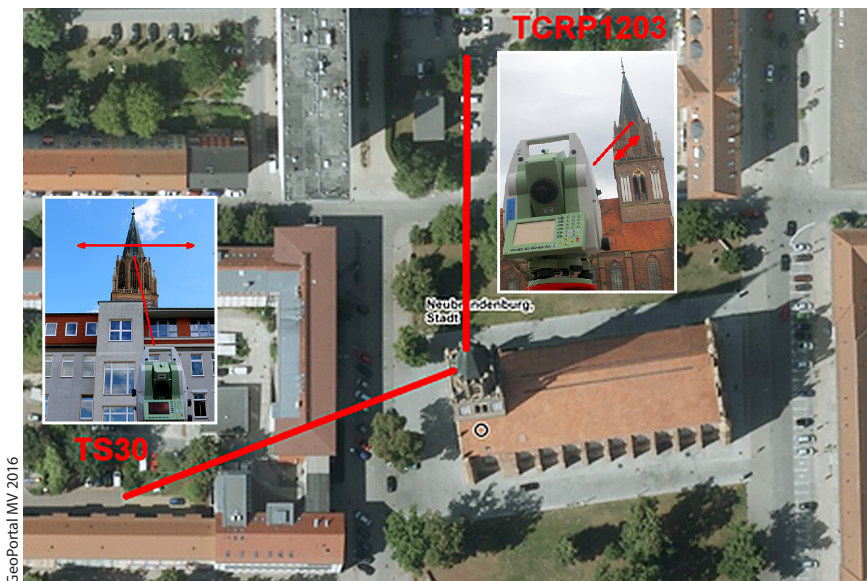


Abb. 4: Tachymeterstandpunkte

Winkel und einen Streckenwert (*tracking*). Jedoch erfolgt in diesem Modus im Abstand von ca. 12 s eine absolute Feinmessung der Strecke, welche mit etwa einer Sekunde wesentlich länger dauert. In jedem Fall ist die Äquidistanz der Zeitreihen nur für einen kurzen Zeitraum gegeben. Mit geeigneten Interpolationsverfahren ließen sich zwar äquidistante Zeitreihen erzeugen, diese wären jedoch hypothesenbehaftet. Die Auswertung dieses kurzen Zeitraums von 12 s bestätigt trotzdem die Ergebnisse der GNSS-Messungen mit Amplituden von 0,9 mm und einer Frequenz von 1,16 Hz.

Um die Problematik der äquidistanten Zeitreihen zu umgehen, wurden beim Tachymeter Leica TS30, welches quer zur Hauptbewegungsrichtung positioniert war, nur die Richtungswerte ausgelesen. Mit Hilfe eines in Python geschriebenen Programms ließen sich die Horizontalrichtungen mit einer Frequenz von 20 Hz erfassen. Die so erhaltenen Werte waren auch über längere Beobachtungszeiträume zeitlich äquidistant. Nach der Frequenzanalyse lagen dadurch detaillierte Ergebnisse vor. Neben der Hauptamplitude von 1,1 mm bei 1,14 Hz ließen sich wie bei den GNSS-Messungen die sehr kleinen Amplituden von 0,1 mm bei 1,26 Hz und 0,38 Hz wiederfinden.

4.3.3 Neigungsmesser

Mit zwei Präzisionsinklinometern Leica Nivel210 wurde die Neigung des Turms in verschiedenen Höhen mit einer Abtastrate von ca. 4,5 Hz gemessen. Obwohl das Messprinzip eines Flüssigkeitshorizonts für die Erfassung hochdynamischer Schwingungen eigentlich nicht geeignet ist, ergab die Auswertung hochauflösende und rauscharme Ergebnisse in den Amplitudenspektren.

Die hohe Auflösung ermöglicht die Aufzeichnung sämtlicher Eigenbewegungen der schwingenden Glocken, welche sich im Bereich von 0,4 bis 0,5 Hz befinden. Auch die Antworten des Turms in Form von Gebäudeschwingungen im Bereich von 1,16 bis 1,5 Hz wurden erkannt.

4.3.4 Beschleunigungssensor

Mit dem Sensor IG-500E der Firma SBG Systems stand für die Messversuche eine Inertial Measurement Unit (IMU) auf Basis eines Microelectromechanical System (MEMS) zur Verfügung. Der IG-500E liefert sehr genaue, relativ driftfreie Beschleunigungen und Winkelinkremente. Das System wurde vor den Messungen im geodätischen Prüflabor der Hochschule untersucht und kalibriert.

Im Turm der Marienkirche ist direkt unterhalb des Glockenstuhls in einem geschützten, für Besucher unzugänglichen Bereich eine Konsole montiert, die zur gleichzeitigen Aufnahme verschiedener Sensoren geeignet ist (Abb. 2). Mit dem IG-500E wurden die Daten mit einer Rate von 50 Hz aufgezeichnet. Es

konnten auch hier Peaks in gleichen Frequenzbereichen gefunden werden. Bei der Berechnung der Turmauslenkungen aus den Beschleunigungswerten wird eine maximale Amplitude von 0,6 mm erreicht, was sich mit den GNSS- und Tachymeterwerten deckt, da diese in größerer Höhe des Turmes ermittelt wurden und daher auch größere Auslenkungen anzeigen.

4.3.5 Smartphone

Die meisten aktuellen Smartphones können grundsätzlich auch als MEMS-basierte Sensorsysteme dienen (Köster 2016). Die Eignung sollte im Rahmen der Messungen näher untersucht werden. Bei der letzten Messkampagne kam ein Samsung Galaxy S4 zum Einsatz, das für die Dauer der Messung auf einer Konsole fest mit dem Bauwerk verbunden wurde. Eine App zeichnete die Beschleunigungen in drei Achsen mit einer Abtastrate von 50 Hz auf.

Die Frequenzanalyse der Daten ergab die Übereinstimmung mit den erfassten Frequenzen der anderen Verfahren, wobei die größte Amplitude von $0,03 \text{ m/s}^2$ bei 1,14 Hz festgestellt wurde, woraus sich nach doppelter Integration (numerisch und analytisch) eine Auslenkung des Turms um 0,6 mm ergibt.

5 Fazit

Die durchgeführten Messungen in der Marienkirche Neubrandenburg konnten den Nachweis erbringen, dass sich alle eingesetzten Messmethoden für die Aufzeichnung der Turmschwingungen eignen, wobei eine ausreichende Genauigkeit erzielt wird.

Die TPS-Messungen erlaubten die Bestimmung sowohl der Amplituden als auch der Frequenzen. Die Auswertungen der im *Lock*-Modus generierten Daten lieferte aus den genannten Gründen nur kurze Zeitreihen. Das Problem ließe sich mit Hilfe geeigneter Interpolationsalgorithmen lösen. Es wäre zudem von Vorteil, alle Messwerte mit einem hochgenauen Zeitstempel zu versehen. Aber auch die hier aufgezeigte Alternative, die Messwerte mittels eines einfachen Python-Programms auszulesen und nur die reine Horizontalwinkelmessung zu betrachten, liefert zeitlich äquidistante Daten.

Die Langzeitqualität der GNSS-Daten wird durch Mehrwegeeffekte am Turm negativ beeinflusst, da eine direkte Anbringung der Antenne auf der Turmspitze nicht möglich war.

Die Eignung der flüssigkeitsbasierten Neigungssensoren für diese Messaufgabe überrascht. Aber die detektierten Frequenzen decken sich mit den anderen Messverfahren und auch mit separaten Schwingungsuntersuchungen aus den Vorjahren. Nach wie vor besteht das Problem, die Neigungswerte in metrische

Tab. 1: Zusammenstellung gemessener Glocken- und Gebäudefrequenzen

Glocke	Glocken- frequenz [Hz]	Gebäude- frequenz [Hz]	Faktor
Marienglocke	0,38 6	1,14 1	3
Johannesglocke	0,42 7	1,26 2	3
Gebetsglocke	0,46 8	1,40 3	3
Sakramentsglocke	0,47 9	1,42 4	3
Lob- und Dankglocke	0,50 10	1,50 5	3

Auslenkungen umzurechnen, wenn keine Klarheit über die anzusetzenden Modellvorstellungen für das Untersuchungsobjekt besteht.

In diesem Bereich wird derzeit im Rahmen studentischer Abschlussarbeiten untersucht, ob sich die Lage der hypothetischen Drehgelenke eines stabförmigen Bauwerks bei nicht vorliegendem Modellen wie FEM o. ä. auch über Video-Auswertungen nach der Methode der Eulerian Video Magnification nachweisen lässt, bei denen Videoaufnahmen derartig „frequenzverstärkt“ werden, dass sich Bewegungen und Drehpunkte in den Bildern wiederfinden lassen (Wolff 2015, Wu et al. 2012).

Positiv überrascht hat die Tatsache, dass schon einfache Smartphones für die hier beschriebenen Schwingungsuntersuchungen geeignet sind. Nicht nur die Frequenz, sondern auch die Amplitude der Schwingungen konnte mit den integrierten MEMS-basierten Beschleunigungssensoren nachgewiesen werden. Dabei liegen die Ergebnisse im Bereich der Ergebnisse der anderen Sensoren.

Das Gebäude schwingt mit einem konstanten Faktor von drei in Bezug zu den Glocken. Dies ist physikalisch gesehen die zweite Oberschwingung. Die Frequenz von 1,14 Hz liegt nahe der vermuteten Eigenfrequenz des Kirchturmes (Tab. 1). Denn nur bei dieser Frequenz wird die eigentliche Glockenfrequenz der Marienglocke besonders verstärkt. Exakte statische Berechnungen liegen derzeit nicht vor.

Die Befürchtung, dass sich der Kirchturm um mehrere Zentimeter oder gar Dezimeter bewegt, ließ sich entkräften. Es treten zwar Schwingungen am Kirchturm auf, welche durch das Glockenspiel verursacht werden, aber diese weisen nur geringe Amplituden auf (Abb. 5). Die detektierten Frequenzen haben laut den beteiligten Statikern derzeit keine Auswirkungen auf das Mauerwerk.

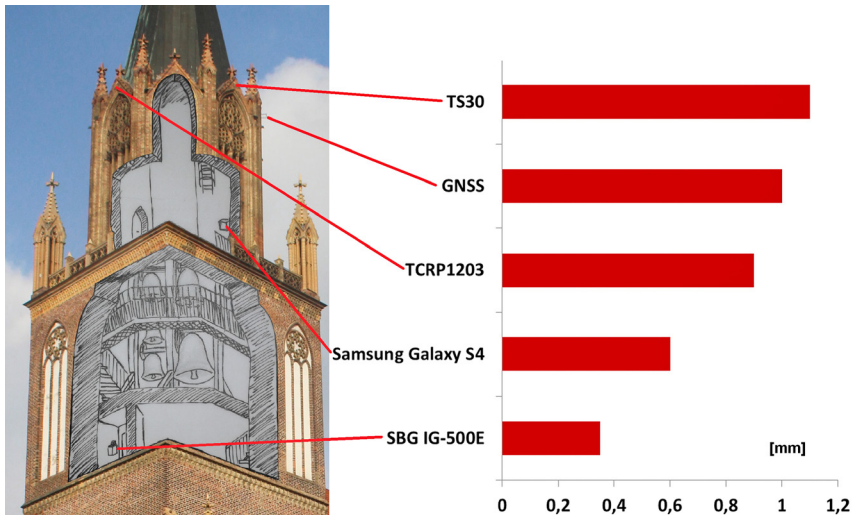


Abb. 5: Darstellung der Amplituden der Kirchturmschwingung in den entsprechenden Höhen der Sensorinstallation.

Literatur

- Engel, P. (2013): Entwicklung eines autonomen Low-Cost-Messclients für geodätische Überwachungsmessungen. Master-Arbeit, Hochschule Neubrandenburg.
- Engel, P.; Foppe, K. (2016): Open Source Deformation Monitoring: A Multi-Platform Approach For Automated Observations in Geodesy. Beitrag zu GeoTerrace 2016 International Conference in Lviv (Ukraine), 15.–16. Dezember 2016.
- Foppe, K. (2006): Permanent Automatic Monitoring of Historical Ecclesiastical Architecture. Beiträge zum 3rd IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering/12th FIG Symposium on Deformation Measurements in Baden bei Wien, 22.–24. Mai 2006.
- GeoPortal MV (2016): www.gaia-mv.de/gaia/gaia.php, letzter Zugriff 02/2016.
- Köster, U. (2016): Multisensor-Monitoring zur Erfassung hochfrequenter Deformationen an der Marienkirche Neubrandenburg. Bachelor-Arbeit, Hochschule Neubrandenburg.
- Light, R.A. (2017): Mosquitto: Server and client implementation of the MQTT protocol. The Journal of Open Source Software, vol. 2, no. 13, Mai 2017. DOI: [10.21105/joss.00265](https://doi.org/10.21105/joss.00265).
- Peci, L. M.; Berrocoso, M.; Fernández-Ros, A.; García, A.; Marrero, J. M.; Ortiz, R. (2014): Embedded ARM System for Volcano Monitoring in Remote Areas: Application to the Active Volcano on Deception Island (Antarctica). Sensors. 2014, 14(1): 672–690.
- Welsch, W.; Heunecke, O.; Kuhlmann, H.; Möser, M. (Hrsg.) et al. (2000): Handbuch Ingenieurgeodäsie. Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. Heidelberg: Wichmann.

- Wolff, C. (2015): Werkzeuge zum ingenieurgeodätischen Monitoring mittels Low-Cost-Kamerasystemen. Master-Arbeit, Hochschule Neubrandenburg.
- Wu, H.-Y.; Rubinstein, M.; Shih, E.; Guttag, J.; Durand, F.; Freeman, W. T. (2012): Eulerian Video Magnification for Revealing Subtle Changes in the World. ACM Transactions on Graphics, vol. 31, Number 4 (Proc. SIGGRAPH).

Kontakt

M. Eng. Philipp Engel | Prof. Dr.-Ing. Karl Foppe | B. Eng. Uwe Köster
Hochschule Neubrandenburg – University of Applied Sciences
Brodaer Straße 2, 17033 Neubrandenburg
pengel@hs-nb.de | foppe@hs-nb.de | lg12007@hs-nb.de

Hochgenaue Qualitätssicherung für Trajektorien und deren Anwendung in Projekten der kinematischen Ingenieurvermessung

Gunnar Gräfe

1 Zusammenfassung

Kinematische Messverfahren hoher Genauigkeit werden zunehmend für Anwendungen im Bereich der Ingenieurvermessung eingesetzt. Vermessung aus der Bewegung hat den Vorteil, dass der Straßen- oder Schienenraum in kurzer Zeit ohne Behinderung des fließenden Verkehrs und ohne Gefährdung von Messpersonal erfasst werden kann. Allerdings unterliegen die kinematischen Verfahren den gleichen Genauigkeitsvorgaben, wie herkömmliche Messtechniken. Die erforderliche Präzision lässt sich erreichen, wenn geeignete Sensoren unterschiedlicher Bauart mit komplementären Eigenschaften verwendet werden. Ein Beispiel ist die Kombination von Kameras und Laserscannern im Mobilien-Straßen-Erfassungs-System (MoSES). Die einzelnen Sensoren werden miteinander durch geeignete Kalibrier- und Synchronisationsverfahren auf einer Messplattform zu einem einheitlichen Messinstrument verschmolzen. Als äußere Orientierung für die exakt zeitsynchronisierten Aufnahmesensoren dienen Position und Lagewinkel des Fahrzeuges, die mit Hilfe einer inertialen Messeinheit (IMU), gestützt auf DGPS und weitere Sensoren, kontinuierlich dreidimensional ermittelt werden. Das System ist so konzipiert, dass die Trajektorie auch bei langen GPS-Ausfallzeiten zuverlässig bestimmt werden kann.

Projekte zur kinematischen Vermessung von Fahrbahnoberflächen dienen zum Beispiel zur Gewinnung der Planungsgrundlagen für Deckensanierungen auf Autobahnen sowie für die anschließende Bauüberwachung und Abnahmekontrolle. Der Anschluss an das lokale Koordinatensystem wird über Passpunkte hergestellt, so dass die absolute Lage durchgreifend kontrolliert werden kann. Für die Kontrolle der relativen Genauigkeit nützen die Passpunkte aber nichts, so dass auf der Basis der redundanten Aufnahme mit zwei Scannern ein durchgreifendes Qualitätsprüfungssystem entwickelt werden musste. Dieses ermöglicht es nicht nur, Fehler in der relativen Genauigkeit aufzudecken, sondern auch deren Kompensation.

2 Einführung

Die kinematische Ingenieurvermessung mit Mobile Mapping Messsystemen wird heute für eine Vielzahl von Aufgaben eingesetzt, z. B. für die exakte Vermessung des vorhandenen Straßenbestandes als Grundlage für Sanierungsmaßnahmen oder die Aufnahme von Bahn- oder Tunnelstrecken. Hochgenaue Systeme kommen z. B. auch bei der Qualitätsprüfung zum Einsatz, wie zum Beispiel bei der Kontrolle von Einbaulage und -ebenheit von neu gebauten Fahrbahnflächen.

Die 3D Mapping Solutions GmbH setzt zur Erfassung von Straßen und Schienenwegen aller Art mehrere Systeme vom Typ MoSES (Mobiles-Straßen-Erfassungs-System; Abb. 1) ein. Die Systeme wurden von 3D Mapping Solutions selbst entwickelt und werden weltweit erfolgreich betrieben. Das System MoSES digitalisiert den befahrenen Korridor mit einem Multisensor-Messsystem aus Kameras und hochauflösenden Laserscannern.



Abb. 1:
Das Mobile-Straßen-Erfassungs-System (MoSES II)

Die Bereiche mit den höchsten Anforderungen an die Messgenauigkeit sind die Qualitätsprüfung von Fahrbahnoberflächen und die hochauflösende Aufnahme von Fahrbahnen als Grundlage für die automobile Fahrzeugentwicklung.

Grundlage für numerische Simulationen im Bereich der Fahreigenschaften von Fahrzeugen ist die präzise Kenntnis der Oberflächengeometrie der Fahrbahnoberfläche. Da Simulationen in der automobilen Entwicklung einen immer größeren Raum einnehmen, kommt auch den Datengrundlagen zunehmend eine immer höhere Bedeutung zu. Von der Anwenderseite gefordert wird eine garantierte relative Genauigkeit von 1 mm oder besser. Diese Präzision ist notwendig, um die Anregungen von Reifen und Fahrwerk durch die Oberfläche

möglichst exakt und hypothesenfrei in der Simulation nachbilden zu können. Als Grundlage für Simulationen werden aktuell nicht nur Strecken auf automobilen Versuchsgeländen digitalisiert, sondern auch öffentliche Straßen, Autobahnen und Rennstrecken.

Für die hochauflösende Aufnahme von Fahrbahnoberflächen war es notwendig, ein durchgängig belastbares Qualitätssicherungsverfahren zu entwickeln, das die relative Genauigkeit der Modelldaten belastbar nachweisen kann. Das nachfolgend beschriebene Verfahren wurde bei 3D Mapping Solutions aufgebaut, in den Prozessen implementiert und wird seit Jahren erfolgreich eingesetzt.

3 Aufbau und Funktion der Messsysteme vom Typ MoSES

3.1 Das Mobile-Straßen-Erfassungs-System (MoSES)

Das MoSES wurde für die messtechnische Erfassung des Straßenraumes optimiert. Das System ist modular aufgebaut. Kern des Systems ist das Modul zur Bestimmung der Trajektorie bestehend aus einer dreidimensionalen, inertialen Messeinheit (IMU) sowie einem DGPS-Empfänger und einem Wegsensor als Stützsensoren. Zur Erfassung des Straßenraumes werden zwei Multisensormodule verwendet:

- **Modul Photogrammetrie und Bilddokumentation:**
Digitale, kalibrierte Messkameras in variabler Anzahl und Konfiguration für die stereophotogrammetrische Objektmessung sowie die bildhafte Dokumentation des Straßenraumes und der Fahrbahnoberfläche.
- **Modul Laserscanner:**
Zumeist zwei Laserscanner zur Digitalisierung des befahrenen Korridors, wobei maximal vier Laserscanner möglich sind.

Fahrbahnoberflächen lassen sich in der geforderten Weise mit dieser spezialisierten Messtechnik zuverlässig erfassen. Essenziell sind mindestens zwei Hochleistungs-Laserscanner und ein hochgenaues Inertialsystem zur vollständigen Kompensation der Fahrzeugbewegungen.

Zur Einhaltung der spezifizierten hohen Genauigkeit sind folgende Voraussetzungen zu erfüllen:

- Exakte zeitliche Synchronisation zwischen Scanner und Inertialsystem; diese wird typischerweise mit einer Genauigkeit von 10^{-6} Sekunden sichergestellt.
- Präzise Berechnung der dreidimensionalen Fahrzeugbewegung und deren Verifikation.
- Exakte Kalibrierung des Messsystems (Gräfe 2007).

- Laufende Qualitätsprüfung für jedes Ergebnis unter Ausschluss von Fehlern, die zu Störungen der Oberflächengeometrie oder zu Fehlern im Frequenzbereich führen können (Haigermoser et al. 2015).

Detailliertere Beschreibungen zur Funktionsweise des Systems finden sich in (Gräfe 2007).

3.2 Trajektorienbestimmung

Die Trajektorie des Fahrzeuges, d. h. die dreidimensionale Position und die zugehörigen drei Lagewinkel im Raum, wird im Anschluss an die Befahrung berechnet. Die IMU als Kernsensor ermittelt Beschleunigungen und Drehraten mit hoher Frequenz und bildet damit die Bewegung des Fahrzeuges dreidimensional in dynamischer Hinsicht exakt ab. Für die vollständige Kompensation aller Fahrzeugbewegungen ist typischerweise eine Aufnahme Frequenz von 200 Hz nötig. 3D Mapping Solutions setzt verschiedene Inertialsysteme ein, z. B. ein Laserkreiselssystem vom Typ iMAR NavRQH mit 2000 Hz Rohdatenfrequenz, Faserkreiselssysteme hoher Genauigkeit oder Applanix POS LV 420 mit integrierter LN 200 IMU mit 200 Hz. Zur Berechnung der Trajektorien werden hoch entwickelte, robuste Kalman-Filter eingesetzt, die alle Sensordaten in einem gemeinsamen, fahrdynamischen Modell mit Hilfe optimaler Schätzverfahren verarbeiten. Die Berechnung besteht vereinfacht dargestellt meist aus einer zeitlichen Vorwärtsfilterung, zeitlichen Rückwärtsfilterung und anschließenden Glättung. Zur erfolgreichen Georeferenzierung und Orientierung der Daten der Aufnahmesensoren ist die gleichbleibend genaue und kontinuierliche Ermittlung der Trajektorie erforderlich. Die Verwendung einer inertialen Messeinheit als Kernkomponente und die anschließende robuste Filterung garantieren, dass eine zuverlässige Ermittlung der Trajektorie auch in Gebieten erzielt werden kann, in denen lediglich qualitativ minderwertige oder gar keine GPS-Positionen zur Stützung der Drift der IMU zur Verfügung stehen.

Die Messungen des DGPS-Empfängers als Stützsensoren bestimmen den Rahmen der absoluten Genauigkeit. Da DGPS mit einer Phasenlösung kinematisch aufgrund von topographisch bedingten Störungen der GPS-Signale oft nicht zur Verfügung steht, ergeben sich im Regelfall Trajektoriengenauigkeiten in der Lage mit einer Bandbreite von 2 bis 3 cm (Phasenlösung) bis 2 bis 3 dm. Absolute Abweichungen der Trajektorie von der Realität lassen sich mit Hilfe von Passpunkten zuverlässig kompensieren. Bei einer Messung von Bestandsdaten auf Straßen reichen zum Beispiel vier Passpunkte pro km zur Gewährleistung der geforderten Genauigkeit aus. In der kinematischen Ingenieurvermessung sind solche Verfahren mittlerweile Standard.

In Bezug auf die relative Genauigkeit gilt dies nicht. Fehler in der relativen Genauigkeit lassen sich über Passpunkte in der Regel nicht erkennen, können aber erhebliche Auswirkungen auf die Qualität des kinematischen Messergebnisses haben. Folgende Fehler können bei der Trajektorienbestimmung auftreten, die sich direkt auf die relative Genauigkeit auswirken:

- Fehler im Inertialsystem, z. B. durch Hardwarefehler oder Kalibrierungsmängel.
- Fehler in der Filterung, z. B. durch numerische oder algorithmische Mängel der Software. Diese Fehler in der Prozessierungssoftware treten zumeist bei der Glättung zutage und können sowohl die dreidimensionale Position als auch die Winkel verfälschen.

Unabhängig von der Ursache wirken sich die oben beschriebenen Fehler alle als Mängel in der Bewegungskompensation aus, lassen sich also über eine Analyse der relativen Genauigkeit detektieren.

3.3 Modul Laserscanner

Auf dem MoSES-Fahrzeug können parallel bis zu vier Hochleistungs-Laserscanner kinematisch betrieben werden. Für die Erfassung von Fahrbahnoberflächen ist das MoSES in der Regel mit zwei Scannern vom Typ ZF Profiler ausgerüstet. Beide Scanner werden parallel auf der Messplattform betrieben und nehmen aus unterschiedlichen Perspektiven die Fahrbahn auf. Auf diese Weise können „Schatten“ durch Messhindernisse minimiert und die Profildichte und Redundanz erhöht werden. Die Scanner ermöglichen mit einer Profilmessfrequenz von



Abb. 2: Beispiel für eine Laserscanner-Punktwolke

mindestens 200 Profilen/Sekunde und einer Einzelpunkt-Wiederholgenauigkeit von ca. 0,5 mm eine exakte Abtastung jeder Strecke mit hoher Auflösung. Der Aufnahmebereich ist nicht begrenzt, da jeder Scanner ein 360°-Vollprofil aufnimmt, so dass auch Brückenbauwerke und Tunnel detailliert erfasst werden können. Pro Sekunde werden ca. 1 Mill. Punkte pro Scanner gemessen. Die maximale Reichweite liegt bei über 100 m. Bei 20 m/s (also 72 km/h) ergibt sich im Bereich der Fahrbahn in bis zu 3 m Entfernung zum Scanner eine Punktdichte von ca. 2500 Messpunkten pro m² (siehe [Abb. 2](#)).

4 Qualitätsprüfung zum Nachweis der relativen Genauigkeit

4.1 Grundprinzip

Das Grundprinzip der Qualitätsprüfung basiert auf folgenden Grundlagen:

- Die beiden Laserscanner liefern eine redundante Abtastung der Fahrbahnoberfläche in Lage und Höhe. Beide Scanner sind gegen die Fahrtrichtung leicht gedreht angebracht ([Abb. 3](#)). Wenn beide Scanner mit unterschiedlichem Vorzeichen z. B. um 20° gegen die Fahrtrichtung gedreht werden, dann liegt der Winkel zwischen den Scanlinien bei 40°. Dies hat eine Reihe von Vorteilen.
- Aufgrund der Rotation der Scanner gegeneinander tasten beide Geräte jeden Punkt der Fahrbahn zu unterschiedlichen Zeitpunkten ab. Abhängig von der Fahrgeschwindigkeit und der Entfernung zum Fahrzeug kann der Zeitunterschied für einen identischen Punkt auf einer Fahrbahn zwischen der Abtastung durch den linken und durch den rechten Scanner bei mehreren Sekunden liegen. Diese Zeitdifferenz in der Abtastung bedeutet, dass die Messungen nicht nur als redundant, sondern auch als stochastisch unabhängig angesehen werden können.
- Die Messgenauigkeit der Scanner selbst ist mit ca. 0,5 mm sehr hoch. Systematische Driften z. B. aufgrund von Temperaturschwankungen werden über eine interne Kalibrierstrecke im Scanner kompensiert. Mit Hilfe von Referenzzielen am Fahrzeug hat 3D Mapping Solutions nachgewiesen, dass die Scanner auch bei einer Messzeit von mehreren Stunden eine konstante Entfernungsmessung frei von systematischen Fehlern liefern. Die Scanner sind somit so genau und so stabil, dass sich diese für den Nachweis der relativen Genauigkeit eignen.
- Die zugrundeliegende Trajektorie basiert auf hochgenauen inertialen Messungen. Ein inertiales Messsystem (IMU) zeichnet sich vor allem durch sehr hohe Kurzzeitstabilität aus.

- Für den Nachweis der relativen Genauigkeit, basierend auf den Daten beider Scanner, kann man also davon ausgehen, dass beide Scanner trotz unterschiedlicher Abtastungszeitpunkte an identischen Punkten auf der Fahrbahn zu gleichen Ergebnissen kommen müssen.
- Weichen die Messergebnisse veränderlich voneinander ab, liegt in jedem Fall ein Mangel in der Bewegungskompensation vor, also ein Mangel in der Qualität der Trajektorie.

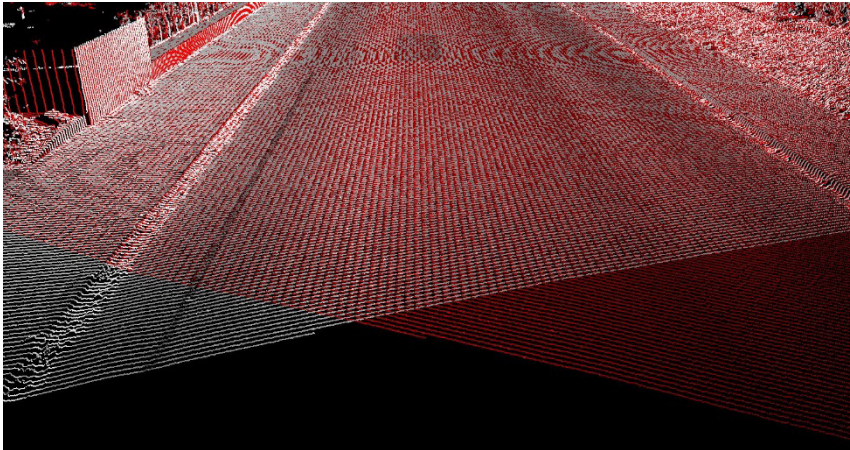


Abb. 3: Beispiel für die Laserscanner-Punktwolken beider Scanner (linker Scanner in rot, rechter in grau gefärbt)

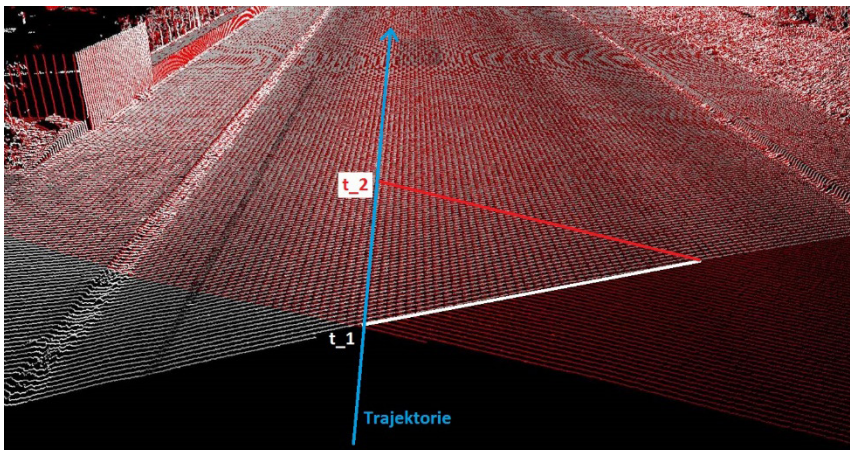


Abb. 4: Die Prinzipskizze verdeutlicht die Grundlage der Qualitätsprüfung. Jeder Punkt der Fahrbahn wird durch die beiden Scanner zu unterschiedlichen Zeitpunkten abgetastet.

4.2 Beispiel

Die Funktionsweise der Qualitätsprüfung lässt sich am Beispiel einer Innenstadtstraße mit Kopfsteinpflaster (Abb. 5) deutlich zeigen.



Abb. 5:
Innenstadtstraße mit
Kopfsteinpflaster

Abb. 6 und Abb. 7 zeigen die zu erwartende Kongruenz am Beispiel der Innenstadtstraße. Der Vergleich der Messungen des linken Scanners und des rechten Scanners in der Höhe ergibt eine Standardabweichung von 0,7 mm und ergibt damit den statistischen Erwartungswert.

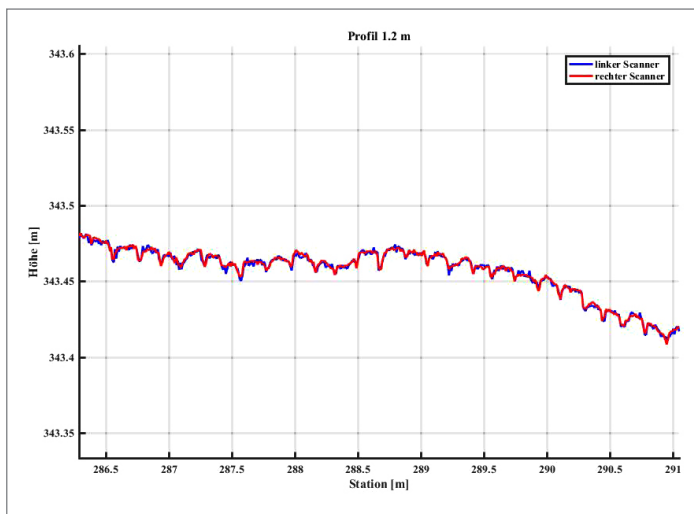


Abb. 6:
Plot der Scanner-
messungen
beider Scanner
entlang des Längs-
profils in
Abb. 5. Die einzelnen
Pflaster-
steine sind
deutlich zu
erkennen.

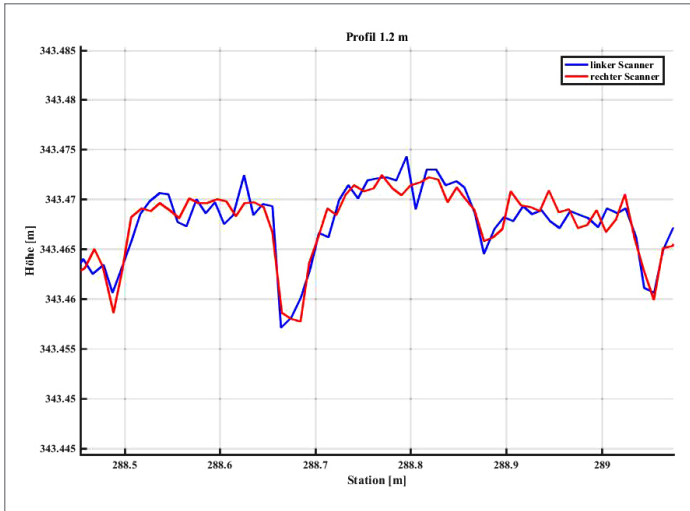


Abb. 7:
Vergröße-
rung zu
Abb. 6. Die
Kongruenz
der beiden
Messungen
ist deutlich
erkennbar.

4.3 Einsatzbereich der Qualitätsprüfung

Die Qualitätsprüfung wurde eingeführt, um eine durchgreifende Kontrolle der relativen Genauigkeit von Ergebnissen der Ingenieurvermessung (Fahrbahnen/Bahnstrecken/Tunnel) und automobiler Projekte (hochgenaue Oberflächen-

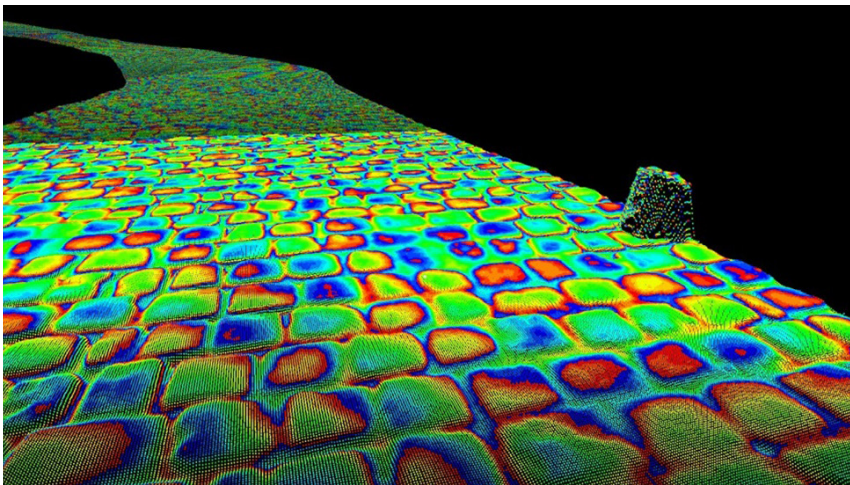


Abb. 8: Hochauflösendes Oberflächenmodell im 5×5 mm-Raster für die Fahrbahn aus Abb. 5 in farbcodierter Höhendarstellung

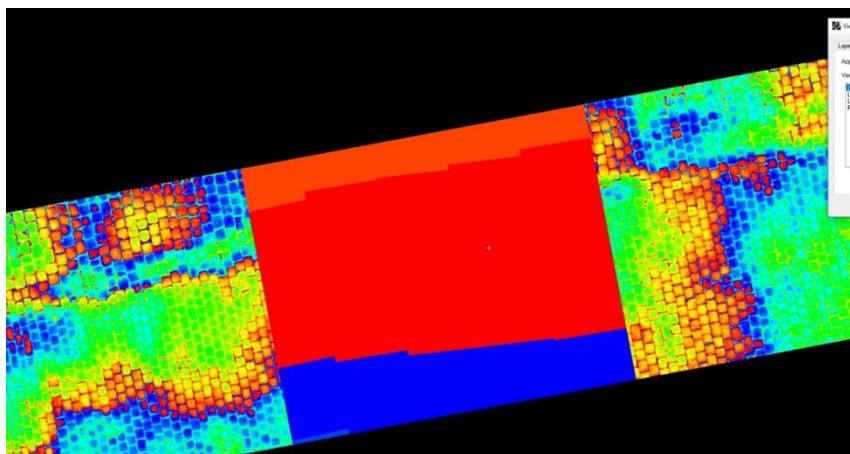


Abb. 9: Hochauflösendes Oberflächenmodell in farbcodierter Höhendarstellung mit eingebettetem Plot der Abweichung zwischen dem linken und dem rechten Scanner. Rot steht hier für Werte bis 1 mm, blau bis -1 mm. Hier liegt also eine kleine, konstante Restsystematik der Kalibrierung vor, die über die Fahrbahnbreite knapp 2 mm beträgt. Der Restfehler wird von der Software automatisch ermittelt und kompensiert. Es gibt keinen Fehler in der Trajektorie. Die relative Genauigkeit ist perfekt.

modelle für die Fahrwerkentwicklung) zu ermöglichen. In der Praxis findet die Qualitätsprüfung integriert in die 3D Mapping Solutions Software bei praktisch jedem Projekt statt.

Zum Beispiel werden bei der Berechnung von Oberflächenmodellen (siehe Beispiel Abb. 8) für jeden Punkt des Modells die Ergebnisse von linkem und rechten Scanner verglichen und die Differenz gebildet.

Die Differenzen bei der Berechnung von Oberflächenmodellen werden dokumentiert und auf Störungen und Abweichungen kontrolliert. Kleine systematische Restfehler zwischen den Scannermessungen werden von der Software automatisch kompensiert. Typischerweise liegen Restsystematiken im Bereich von konstant ± 1 mm (Abb. 9).

4.4 Erfahrungen mit der Qualitätsprüfung

Die Qualitätsprüfung wurde eingeführt, um eine durchgreifende Kontrolle der relativen Genauigkeit der Ergebnisse der kinematischen Scannermessungen zu ermöglichen, und wird von 3D Mapping Solutions seit mehreren Jahren erfolgreich betrieben.

Die Erfahrungen sind durchaus gemischt:

- 3D Mapping Solutions betreibt Inertialsysteme verschiedener Hersteller und setzt je nach System auch Software verschiedener Hersteller für die Trajektorienprozessierung ein.
- Wenn Probleme mit der relativen Genauigkeit als Folge mangelhafter Trajektorien auftreten, so lassen sich diese sehr signifikant mit Hilfe der Laserscanner feststellen. Auftretende Fehler in Lage oder Höhe betragen schnell mehrere Zentimeter, teilweise sogar mehrere Dezimeter auf Streckenlängen bis zu 50 m.
- Unstetigkeiten im Sinne von Sprüngen kommen dabei so gut wie nicht vor. Bei Fehlern der Trajektorie handelt es sich aufgrund der Berechnungsmethoden immer um falsche relative Änderungen, also fehlerhafte Steigungen, die zu einem „Hügel“ führen, den es in der Realität nicht gibt oder fehlerhafte Richtungsänderungen, die zu einem „Schlenker“ führen, den es in der Straße nicht gibt.
- Eigentlich sollten Fehler in der relativen Genauigkeit gar nicht vorkommen, sofern ein Inertialsystem korrekte Messwerte liefert und Zeitsynchronisation und Kalibrierung fehlerfrei sind. Die Suche nach den Ursachen führte nur ein einziges Mal zu einem Hardwarefehler, genauer gesagt zu einem Zeitfehler in einem Inertialsystem selbst. In allen anderen Fällen lag die Ursache nur in der Trajektoriensoftware. Bei guten GPS-Bedingungen treten so gut wie keine Probleme auf. Werden die GPS-Bedingungen jedoch schlecht und müssen Driften und GPS-Lücken etc. während der Filterung kompensiert werden, so zeigen sich bei allen verwendeten Softwarepaketen zur Trajektorienbestimmung gelegentliche numerische Mängel. In der Folge treten Fehler in der relativen Genauigkeit auf, die offenbar rein numerische Ursachen haben. Dazu passt auch, dass bei hochwertigen Inertialsystemen, z. B. dem Laserkreiselssystem, selten oder nie Fehler in der relativen Genauigkeit zu beobachten sind, während diese bei stärker driftenden Inertialsystemen geringerer Güte deutlich zunehmen.
- Die Häufigkeit der Fehler ist damit in Bereichen mit gestörten GPS, z. B. Innenstädten, deutlich höher als z. B. auf Autobahnen.
- 3D Mapping Solutions arbeitet auch immer wieder mit den Daten von Partnersystemen, die für Projekte eingesetzt werden. Hier wurde in Einzelfällen eine durchaus signifikante Häufung von Fehlern in der relativen Genauigkeit der Trajektorie festgestellt mit teilweise mehreren Fehlern pro Kilometer.
- Aus der Sicht von 3D Mapping Solutions besteht numerischer Verbesserungsbedarf bei den Softwarepaketen zur Trajektorienbestimmung.
- Die gefundenen Fehler in der relativen Genauigkeit lassen sich eventuell durch erneute Trajektorienberechnung mit anderen Einstellungen beheben. Dies führt aber nicht immer zum Ziel und ist eher mühsam. 3D Mapping

Solutions hat daher eine eigene Kompensationssoftware entwickelt, die auf der Basis der Qualitätsprüfung sicherstellt, dass die fehlerhaften Steigungen oder Richtungsänderungen vollständig korrigiert werden.

Literatur

- Gräfe, G. (2005): Kinematic Determination of Road Surface Models. Proceedings Conference on Optical 3D Measurement Techniques VII, 21–30, Wien.
- Gräfe, G. (2007): High precision kinematic surveying with laser scanners. *Journal of Applied Geodesy*, 185–199.
- Gräfe, G. (2007): Kinematische Anwendungen von Laserscannern im Straßenraum. PhD thesis, Universität der Bundeswehr München.
- Haigermoser, A.; Lubert, B.; Rauh, J.; Gräfe, G. (2015): Road and track irregularities: measurement, assessment and simulation. *Vehicle System Dynamics*, 53 (7), 878–957.

Kontakt

Dr.-Ing. Gunnar Gräfe
3D Mapping Solutions GmbH
Raiffeisenstraße 16, 83607 Holzkirchen
gunnar.graefe@3d-mapping.de

Multi-Sensor-System for Navigation

Alexandra Avram | Erick González-Rodríguez | Henry Conrad | Volker Schwieger

1 Introduction

Position is a term that refers in this paper to the position, velocity and attitude of a user in a road vehicle. To obtain the trajectory from a start-point A to an end-point B, in Grewal et al. (2013) the navigation modes are split into five categories: pilotage, celestial navigation, dead reckoning, radio navigation and inertial navigation. This paper focuses on the latter two modes. This is because when GNSS (Global Navigation Satellite System) and an INS (Inertial Navigation System) are working together, they provide better results as when one of the systems is working stand-alone. A GNSS stand-alone system is able to provide a user a PVT (Position, Velocity, Time) solution. However, both systems need precise clocks to be able to provide an accurate position. The satellite geometry, multipath effects or signal outage in a GNSS stand-alone mobile system can also affect the accuracy. An INS stand-alone sensor is able to provide a PVA (Position, Velocity, Altitude) solution by integrating acceleration and altitude rates. Nevertheless, the existing drifts result in exponential errors after integration and the solution provided by such a system is not reliable (Grewal et al. 2013).

A GNSS/INS integration provides a more robust and precise position estimate as the systems work complementary. The solution output consists of a six-degree of freedom and a higher update rate. The GNSS outage can be aided by the INS solution which is not dependent on the satellite visibility. The advantages and drawbacks of a GNSS based algorithm and two GNSS/INS integration models are analyzed within this paper. The three processing algorithms are presented, followed by their assessment based on real data from a measurement campaign. The motivation of this paper is to find the best post-processing method with regard to the measurement equipment available. It is important that the best accuracy with a measurement setup is determined, in order to have a reference trajectory, i. e. ground truth data. It is essential in the process of testing and evaluating positioning sensors that are in a development phase to have a reference trajectory.

2 Differential GNSS

The error sources in a GNSS standard positioning system are related to the satellite with clock and ephemeris error, atmosphere via ionosphere and troposphere errors and user through multipath, receiver clock error and noise. The first two types of errors are spatially correlated and vary slowly in time. In 1980, the technique called differential GNSS (DGNSS) was developed in order to remove the spatially correlated errors. Besides improving the accuracy, DGNSS has a positive impact on the integrity as it reduces the probability that a GNSS user suffers of an undetected system fault (Parkinson et al. 1996).

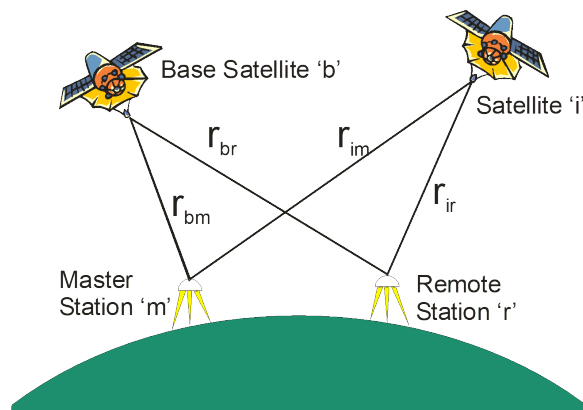


Fig. 1:

The principle of DGNSS (NovAtel 2017): The Master Station is a point where the coordinates are accurately known. The Remote Station coordinates are computed with a code-based method.

Fig. 1 shows the principle of local area DGNSS. In such a system, corrections are sent from a master station to remote stations (rovers). The master station is indicated by m and is a precisely known coordinate point. Thus, the range r_{bm} is also precisely known. The remote station is referred as r and it is the point whose coordinates are computed. A rover, which is in the proximity of the master station, will experience the same or similar GNSS errors. If position corrections are sent, this implies that all rovers must have the same sky plot as the master station. As this assumption is incorrect, the master station sends range corrections. Within a horizontal radius of 150 km, an accuracy of one meter is achievable with this method, when using a code-based algorithm. The PDGNSS (Precise DGNSS) is based on the same principle, but the corrections are based on carrier phase measurements. Therefore, the accuracy can reach few centimeters.

3 GNSS/INS Integration

The term INS is an acronym for *Inertial Navigation System*. The integration of GNSS and INS is often used as the two systems operate complementary. The GNSS solution corrects the INS drifts, whereas the INS is smoothing the GNSS solution, rejects outliers and bridges outages. The navigation solution resulted from such a system is complete, continuous and high-bandwidth (Groves 2013). The basic principle of an integration algorithm is based on the comparison between the GNSS navigation solution with the INS output. The final navigation solution is usually based on a Kalman filter and it consists of a corrected inertial navigation solution. By having this architecture, the INS is able to bridge the GNSS outages. There are different methods to integrate the measurements from the two systems. Depending on the input that is used e.g. raw measurements or navigation solution and the mathematical algorithm, there are three types of coupling: loose, tight and deep. In this paper, the first two methods are investigated. Their architecture is described in Fig. 2 and Fig. 3.

3.1 Loosely Coupled (LC)

In a loosely coupled integration architecture, the GNSS and INS are working as two independent systems. In Fig. 2 three main blocks can be distinguished. The GNSS Receiver block and Inertial Navigation System block feed in their output

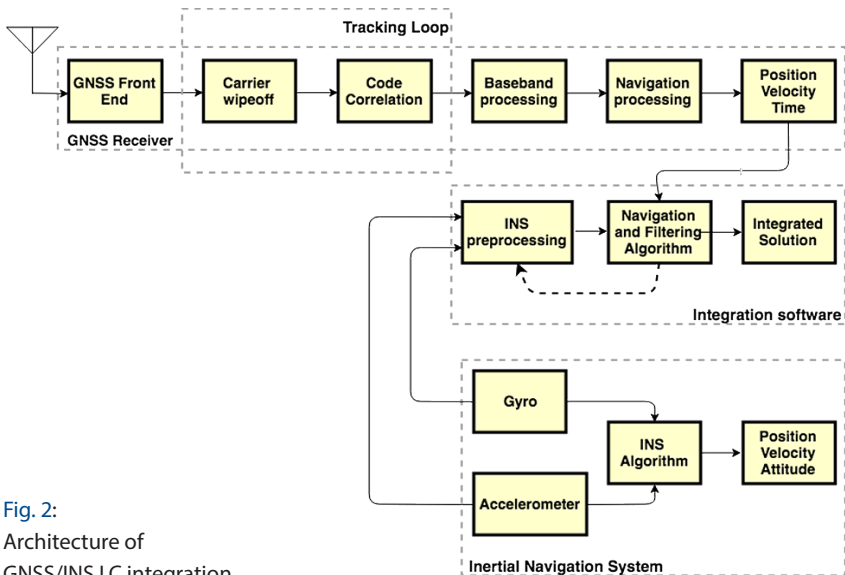


Fig. 2:
Architecture of
GNSS/INS LC integration

to the integration software block. The fusion between the navigation solutions results in a third one provided by the integration software. There are sub-variants of the LC architecture presented in Fig. 2 depending on the equipment that is used. For example, it can be designed as an open or closed-loop configuration. The dashed line in the LC scheme between the Navigation and Filtering Algorithm and the INS preprocessing is absent in an open-loop configuration. The feedback indicated by the dashed line is necessary if the inertial sensors quality is poor, due to the exhibited high drifts. Otherwise, the closed-loop configuration is used and the backward feedback is not performed.

The filtering algorithm in an LC integration is generally a Kalman filter implementation. A generic Kalman filter model can be written as (Gianluca et al. 2017).

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (1)$$

where H_k is the transition matrix, which shows the connection between the error states x_k and the measurements z_k at time k . The quantity v_k is the white noise induced by the measurements. Considering an LC integration, z_k can be expressed as:

$$z_k = [X_{INS} - X_{GPS}, Y_{INS} - Y_{GPS}, Z_{INS} - Z_{GPS}] \quad (2)$$

where X_{INS} , Y_{INS} , Z_{INS} are derived from the inertial sensors solution and X_{GPS} , Y_{GPS} , Z_{GPS} from the GNSS navigation solution.

3.2 Tightly Coupled (TC)

A basic tightly coupled scheme is shown on the right side of Fig. 3. In such an algorithm, the integration is centralized by a Kalman filter (KF) and it occurs at the raw sensor output level. That means, pseudorange, pseudorange rate, accelerations and gyro measurements are used to generate the integrated navigation solution. Generally, the TC architecture provides a better accuracy and it is more robust as the LC architecture. The better accuracy is due to smaller temporally correlation in a KF as in a PVT solution. The robustness owes to the fact that the KF can use the GNSS observables even if less than four satellites are in view (Gleason and Gebre-Egziabher 2009). However, it is not possible to output a valid position for a long time in this conditions either due to the clock drifts. As the LC architecture, the TC architecture has also sub-variants. The one in Fig. 3 shows the tracking loop aiding. By feeding information about the position and/or velocity in the GNSS receiver, its performance can be increased and the satellite acquisition/re-acquisition time decreases.

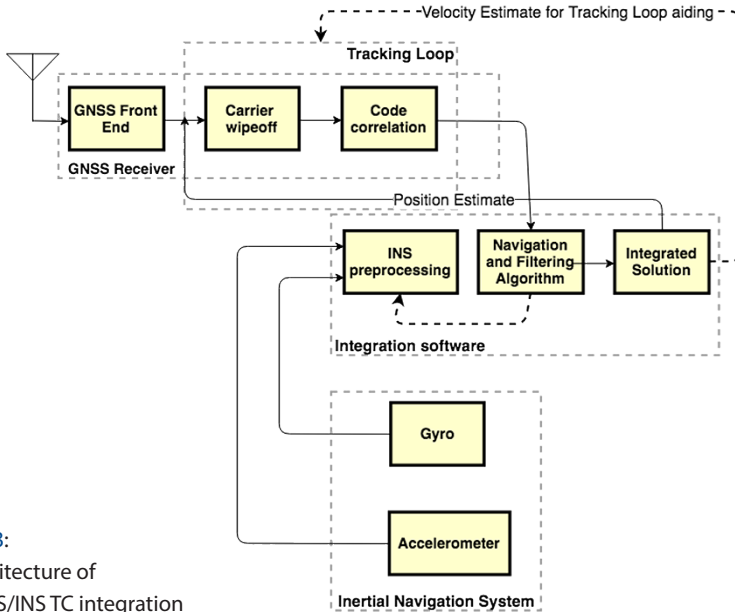


Fig. 3:
Architecture of
GNSS/INS TC integration

The measurements model of the tightly coupled Kalman filter according to (Gianluca et al. 2017) is defined as:

$$z_k = \begin{bmatrix} \xi_{sat,k} - \bar{\xi}_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

where $\xi_{sat,k}$ is the matrix with corrected pseudoranges and the pseudoranges rates at time k . The term $\bar{\xi}_k$ stands for the matrix with predicted pseudoranges and pseudorange rates computed from the current estimate.

4 Equipment and measurement setup

The input data for the navigation solution processing is provided by the setup presented in Fig. 4. The antenna that was mounted on the car is a 3G+C maritime NavXperience, a high-precise multi-constellation triple-frequency GNSS antenna. The dashed line indicates the antenna cable and the continuous line the Ethernet cable. The active splitter connects the antenna with the GNSS/INS receiver, iTraceRT-F402-E.

The manufacturer specifications for the iTrace system are given in Tab. 1. The initial alignment is automatic and it is a deeply coupled INS/GNSS Kalman filter based data fusion. The data processing rate is up to 400 Hz, but the used rate for

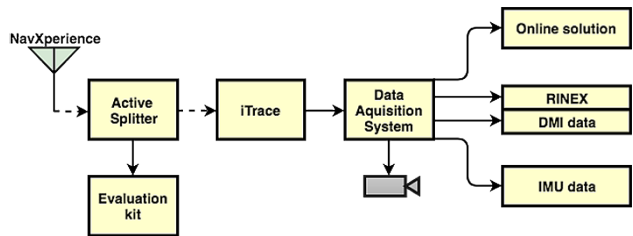


Fig. 4: Car sensors setup for the measurement campaign. The NavXperience antenna is connected to the iTrace though an active splitter. Output data from iTrace and camera is transferred to the Data Acquisition System through an Ethernet cable.

this project is 200 Hz. The output, which is stored in the acquisition system, consists of an online navigation solution and separate output for the iTrace sensor components. That means, the GNSS observation files, raw IMU data as well as wheel speed data are available as output. A camera is mounted in the car and the .avi file is stored as output of the measurement campaign. The visual information

Tab. 1: Technical Data of iTraceRT-F402-E. The compact INS/GNSS system provides position, acceleration, angular rate, attitude, true heading and velocity of the mobile vehicle

	Roll/Pitch	Yaw	Remarks
Accuracy Angles	0.01°	0.025°	INS/RTK-GNSS
	0.01°	0.03°	after 10 sec RTK-GNSS outage
	0.02°	0.04°	after 60 sec GNSS outage
Horizontal		Vertical	
Accuracy Position	± 2 cm	5 cm + 2 ppm	INS/RTK-GNSS
	± 10 cm	± 12 cm	10 s GNSS outage
	± 90 cm	30 cm	60 s GNSS outage
	± 1.8 cm	± 1.8 cm	pure GNSS
	± 2 cm	5 cm	post-proc, INS/RTK
Velocity			
Accuracy Velocity	0.01 m/s		NS/RTK-GNSS
	0.02 m/s		10 s GNSS outage
	0.04 m/s		30 s GNSS outage



provides an understanding about the surrounding and helps to explain eventual deviations of the trajectory.

The driven trajectory is a round trip Abstatt–Mühlhausen in Baden-Württemberg. It has a length of approximately 200 km and the predominant environment is highway. There are challenges along the route because of tunnels where GNSS outage occurs and shadowing caused by bridges across the highway.

5 Data post-processing

The drive output consists of the data from the iTrace: RINEX observation files, vehicle body rotation and wheel speed sensor files, lever arm information and a binary file with the on-the-fly solution, as well as a video from the camera. The output measurements are processed with NovAtel Waypoint® Inertial Explorer®. First, the output on-the-fly solution is used to compute virtual reference stations (VRS). Twenty VRS are computed along the route at a distance of maximum 10 km. Secondly, three projects are created to process the data as follows: using PDGNSS method, GNSS/INS LC integration and GNSS/INS TC integration. The GNSS processing is performed in both directions to obtain the best solution. When processing in both directions, independent forward and reverse solutions are obtained and they are compared to find position differences. By using this processing method, the solution accuracy is maximized. For both LC and TC processing, the GNSS combined solution is used. As the antenna, iTrace and wheel speed sensor are installed in different locations of the car, the lever arms offset are used in the computations.

According to the literature, the DGPS solution is expected to have a lower accuracy, especially within GNSS shadowing areas. As for the LC and TC algorithms, a slightly better accuracy is expected in the TC case. That is because the GNSS and IMU data are integrated at a pseudorange level and not at the PVT solution. On the one hand, in an open-sky scenario, the pseudoranges should not be affected, therefore the LC and TC algorithms should deliver equal results within the noise. On the other hand, the pseudoranges can be affected by the multipath effect even in an open-sky scenario i.e. more than four satellites in view. However, unlike the LC algorithm, the TC algorithm maximizes the GNSS availability as the phase updated can be applied where a minimum of two satellites of the same constellation are available between consecutive epochs (NovAtel 2017). The three projects have as an output the same trajectory computed with three methods. The output is further imported into MATLAB for analysis. By looking at areas with different GNSS availability, the performance of the three presented methods is investigated in different scenarios.

6 Performance assessment: PDGNSS – PDGNSS/INS LC – PDGNSS/INS TC

The data set collected during the test drive was logged in the acquisition system as shown in Fig. 4 and processed using the three algorithms: PDGNSS, INS/PDGNSS LC and LC. The trajectory is driven on the highway and the following GNSS visibility states are encountered:

1. Open sky – visibility: 15 satellites
2. Acceptable – visibility: 5 satellites
3. Tunnels – GNSS outage occurs

These three representative occurrences and the driven trajectory are shown in Fig. 5. The lines represent the plotted trajectory as output from the three processing algorithms. The blue line displays the PDGNSS solution, the red one the LC solution and the green one the TC solution. The VRS represent the Virtual Reference Stations computed from the online solution.

From Tab. 2, where the standard deviations for the complete trajectory are summarized, it can be seen that the LC and TC algorithms perform similarly. In the PDGNSS case, it shows better results in terms of standard deviation as the

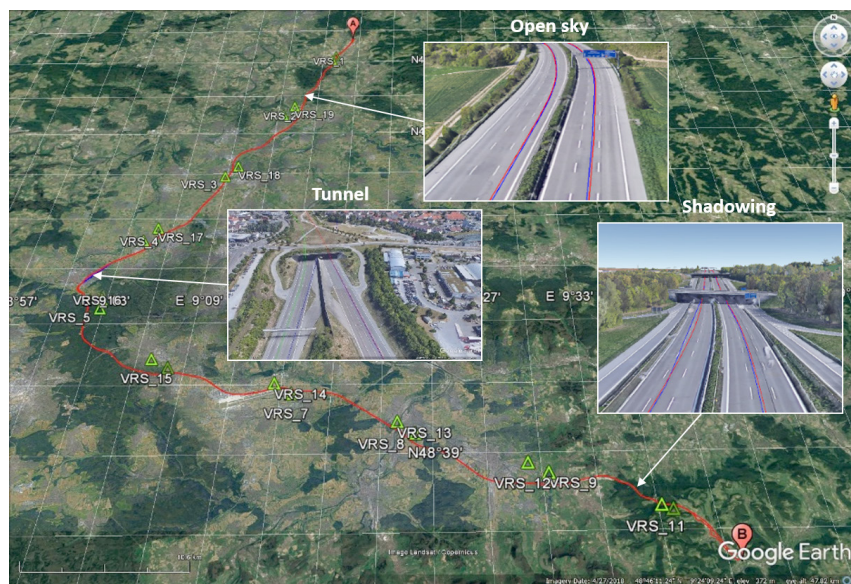


Fig. 5: Map view of the test trajectory, where A is the start point and B is the retouring point. The overlapped pictures represent the three kind of environments along the route. The blue, red and green line shows the PDGNSS, LC and TC navigation solutions.

Tab. 2: Standard deviation solution of the position, velocity and gyroscope angles for the used algorithms. The values originate from the complete trajectory

Algorithm	SD X (m)	SD Y (m)	SD H (m)	SD X velocity (m/s)	SD Y velocity (m/s)	SD Z velocity (m/s)	Pitch Error (deg/s)	Roll Error (deg/s)	Heading Error (deg/s)
PDGNSS	0.093	0.111	0.204	0.072	0.076	0.101	–	–	–
LC	0.055	0.060	0.026	0.002	0.002	0.0009	0.038	0.039	0.095
TC	0.056	0.060	0.026	0.002	0.002	0.0009	0.038	0.039	0.099

latter two integration algorithms. In the X- and Y-plane, the difference between PDGNSS only and the integrated solution is around 4 cm, respectively 5 cm, whereas in the Z-plane it raises to 178 cm. Regarding the horizontal velocity, the results are similar, as the standard deviation is equal for the integrated solution and better in comparison with the PDGNSS only solution. The gyroscope rotation angles i. e. raw, pitch and heading are estimated identically as well, according to the statistics.

Analysis of the system performance when the GNSS outage occur is performed and presented in [Tab. 3](#). The sky plot is analyzed to find the time interval where the GNSS outage occurs. The same statistics as in [Tab. 1](#) are computed, but this time for the chosen time series where the car is in the tunnel, during 100 s. The analysis results show that the LC and TC algorithms perform again almost the same in terms of position and identically in terms of 3D velocity and rotation of the body. Nevertheless, the standard deviations decreases four times within the 100 s in the tunnel.

Tab. 3: Standard deviation solution while GNSS outage occurs

Algorithm	SD X (m)	SD Y (m)	SD H (m)	SD X velocity (m/s)	SD Y velocity (m/s)	SD Z velocity (m/s)	Pitch Error (deg/s)	Roll Error (deg/s)	Heading Error (deg/s)
PDGNSS	–	–	–	–	–	–	–	–	–
LC	0.219	0.240	0.090	0.007	0.008	0.002	0.001	0.001	0.001
TC	0.223	0.242	0.090	0.007	0.008	0.002	0.001	0.001	0.001

Tab. 4: Standard deviation solution while GNSS coverage is acceptable i. e. five satellites in view

Algorithm	SD X (m)	SD Y (m)	SD H (m)	SD X velocity (m/s)	SD Y velocity (m/s)	SD Z velocity (m/s)	Pitch Error (deg/s)	Roll Error (deg/s)	Heading Error (deg/s)
PDGNSS	0.002	0.002	0.005	0.084	0.082	0.091	–	–	–
LC	0.0006	0.001	0.0009	0.0001	0.0001	0.0001	0.0	0.0	0.0
TC	0.0001	0.001	0.0007	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0.0

Along the test trajectory, there were a few situations where the GNSS visibility was reduced. Tab. 4 shows the computed statistics for 6 s with five satellites in view. The standard deviation for this interval is the best compared to the whole trajectory and the tunnel series. The standard deviation for PDGNSS on the X- and Y-axis reaches 2 mm and on the Z-axis 5 mm, whereas the integrated solutions provide in all three axis a SD less than 1 mm. The velocity SD provided by the PDGNSS in this case (five satellites in view) is comparable with the one computed for the whole trajectory. However, the velocity results of TC and LC integration are improved ten times, while the TC performs slightly better than LC.

The best results are obtained as expected when the GNSS availability is full. The statistics computed in Tab. 5 summarize the standard deviations along 6 s with 15 satellites in view in order to compare them to the previous case. The PDGNSS SD for position is reaching an mm value, whereas the velocity SD is tens of cm better. The results of the integrated solution show that the LC performs

Tab. 5: Standard deviation solution with excellent GNSS coverage i. e. 15 satellites in view

Algorithm	SD X (m)	SD Y (m)	SD H (m)	SD X velocity (m/s)	SD Y velocity (m/s)	SD Z velocity (m/s)	Pitch Error (deg/s)	Roll Error (deg/s)	Heading Error (deg/s)
PDGNSS	0.0001	0.0001	0.0003	0.0517	0.029	0.038	–	–	–
LC	0.0008	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00
TC	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00

better than TC in this case of full GNSS availability. The estimated gyroscope accuracy is negligible for both integration algorithms.

6.1 Discussions

The results for the complete trajectory show that the positioning standard deviation is increased by the IMU and odometer at a cm level compared to the PDGNSS solution. However, the difference in cm owes to the fact that the test

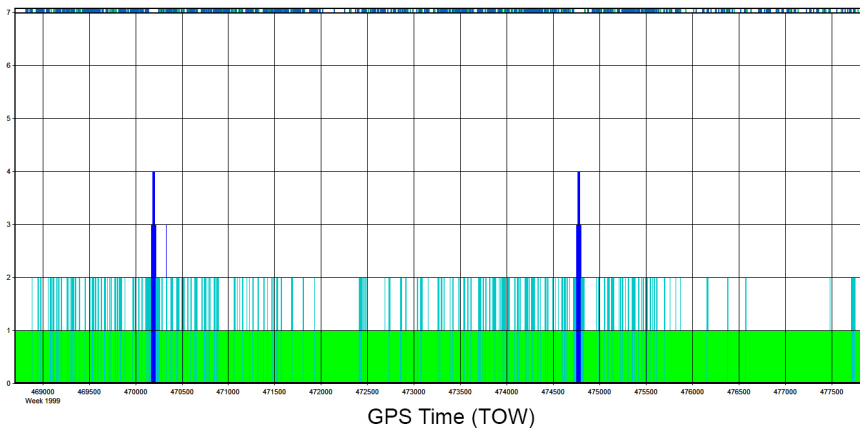


Fig. 6: Quality factor along the test trajectory. Green i.e. 1 indicates fixed integer, light blue i.e. 2 a stable float and dark blue i.e. 3 and 4 converging float. The latter situation indicates the tunnel on both driving directions.

trajectory had mostly a good GNSS coverage. This is shown by the quality factor in [Fig. 6](#) provided by the processing software. Green areas indicate a fixed integer solution with a good satellite geometry, while the light blue areas indicate a noisy fixed integer with a poor geometry. Dark blue shows the areas with a float solution. The contribution that a PDGNSS/INS over a PDGNSS system is remarkable in critical situations, where environmental factors produce shadowing or GNSS outage. This is proved by the analysis in [Tab. 3](#) and [Tab. 4](#). In a tunnel, there is a lack of a solution in the case of a GNSS system and an INS is necessary in order to have a navigation solution. However, if the GNSS outage lasts until the drift of the INS increases, the integrity of the solution is lost. The INS quality is important as well. The more stable the INS, the better will be the integrated solution in critical GNSS environment. To check the stability of the INS system that was used, the difference between the PDGNSS/INS and PDGNSS navigation solution was computed. Results show in both LC and TC case differences

between 11 to 65 cm in X, Y and Z. The differences on the three axis prove that the INS system works properly.

Another point, which is proved in the analysis, is that the LC does not have always an inferior performance, when compared to the TC algorithm. The results of the two algorithms depend on the satellite availability. In a situation where the satellite visibility is rather poor, the TC performs better, according to the results in Tab. 4. This is the case because the LC algorithm uses the PVT solution, which is worse given the poor visibility. On the other hand, the TC is using pseudorange rates and therefore the algorithm continues working even with less than four satellites in view. As a consequence, if the GNSS availability is good, the LC has results which are the same or better than the TC algorithm. To show the importance of an integrated solution over a GNSS system, the position deviation because of the tunnel is plotted in Fig. 7. As there is no solution for PDGNSS, a straight line connects the last computed position and the first one after recovering lock of the satellites. In contrast, the LC and TC algorithm continue providing a solution. As their performance is almost identical, the plotted trajectories overlap in this case.

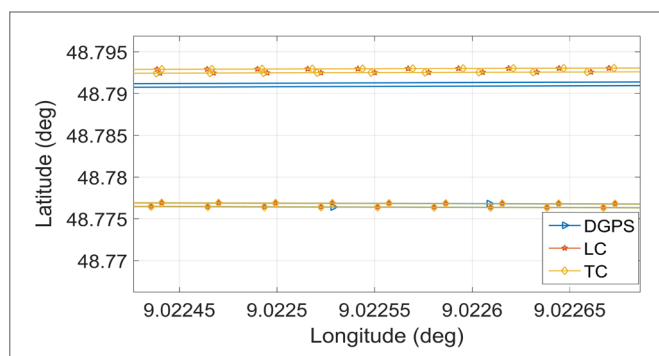


Fig. 7:
Output comparison between PDGNSS LC and TC geographical position

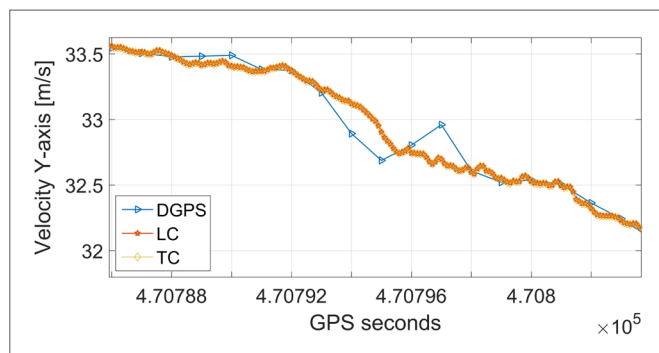


Fig. 8:
Output comparison between PDGNSS LC and TC Y-axis velocity

Another advantage of using an INS system coupled with GNSS is represented by the higher update rate. In contrast to the GNSS solution which is provided at 1 Hz, the INS solution in this project has an update rate of 200 Hz. Thus, the navigation solution is smoother, as it can be seen in [Fig. 8](#).

7 Conclusions

Within this paper, the assessment of the performance of a PDGNSS only and two PDGNSS/INS integration algorithms i.e. LC and TC is presented. Three different situations and the trajectory overall were analyzed. The three environments: tunnel, acceptable and full GNSS availability were chosen to show the performance of the presented algorithms in different environments.

The assessment results show that choosing an integrated system over a GNSS only or the LC algorithm over the TC is a question of application and requirements. The analysis of the data from a 2 hours 30 minutes drive on a highway showed that the integrated system makes sense to avoid losing the navigation solution. Although it is expected that the TC algorithm performs the best, it behaves similar to the LC algorithm under a good GNSS availability.

References

- Gianluca, F.; Pini, M.; Gianluca, M. (2017): Loose and Tight GNSS/INS Integrations: Comparison of Performance Assessed in Real Urban Scenarios. In: *Sensors*, 17, 255.
- Gleason, S.; Gebre-Egziabher, D. (2009): *GNSS Applications and Methods*. Norwood, MA: Artech House.
- Grewal M.S.; Andrews, A.P.; Bartone, C.G. (2013): *Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation and Integration*. New Jersey: Wiley.
- Groves, P.D. (2013): *Principles of GNSS, Inertial and Multisensor Integrated Navigation Systems*. London: Artech House.
- NovAtel (2017): *Trainship Madrid*. Madrid: Unpublished Source.
- Parkinson, B. (1996): *Global Positioning System Theory and Application*. Vol. II. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Contact

Alexandra Avram
Robert Bosch GmbH
Robert-Bosch-Allee 1, 74232 Abstatt
alexandra.avram@de.bosch.com

Jedes moderne geodätische Messinstrument ist ein Multisensorsystem, nicht jedes kann aber als Low-Cost System bezeichnet werden. Dieser Band bietet einen Überblick zu Multisensorsystemen, Beiträge zu mathematischen Modellen zur Sensorfusion sowie zu Kommunikations-, Kalibrier- und Synchronisationsaspekten.

Klassische Anwendungen wie Gleisaufnahme, Straßenerfassung sowie Überwachungsaufgaben werden beschrieben. Weitere Anwendungen finden Unterwasser, bei Verkehrsbetrieben und in der kinematischen Ingenieurvermessung statt. Ein Schwerpunkt liegt auf der Positionsbestimmung für Fußgänger und Fahrzeuge.



ISBN: 978-3-95786-170-2



9 783957 861702

Schriftenreihe des DVW
Band 92/ 2018
Printversion: 29,80 Euro
PDF: kostenfrei
www.geodaesie.info

