Vorwort

Auch zum 19. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung (3. - 6.3.2020) ist der zugehörige Tagungsband in bewährter Kooperation mit dem Verlag Wichmann pünktlich zum Kurs erschienen. Die Zählung hat ihren Ausgangspunkt 1953, als Max Kneißl in München die von Otto von Gruber in Stuttgart 1928 begründete Tradition der Optischen Streckenmesskurse als Internationale Kurse für geodätische Streckenmessung zur Fortbildung wiederaufnahm; die hohe Nachfrage führte bald dazu, die Veranstaltung auf eine breitere Basis mit den Nachbarländern Österreich und Schweiz zu stellen. Seit 1976 wird die Tagung unter der Bezeichnung "Ingenieurvermessung" in vierjährigem, ab 2004 in dreijährigem Zyklus von den Technischen Universitäten München, Zürich und Graz ausgerichtet.

Während der letzten Kurse hat sich die Verstärkung des Fortbildungscharakters durch Tutorien sehr bewährt. In Berücksichtigung der Wünsche der Kursteilnehmer wird dieser Weg nunmehr ohne Parallelveranstaltungen mit vier halbtägigen Tutorien mit hands-on Charakter, deren Themen am Puls der aktuellen technischen Entwicklung liegen, weitergegangen:

- Deformationsmessungen mit Kameras (Prof. W. Lienhart, TU Graz),
- Geomonitoring mit dem Raspberry-Pi (Prof. W. Stempfhuber, BEUTH Berlin),
- Machine Learning für die Ingenieurgeodäsie (Prof. A. Wieser, ETH Zürich),
- TLS-Prüfung in der Praxis (Dr.-Ing. P. Wasmeier, TU München).

Der Kurscharakter dieser Tagung wird auch durch die Auswahl besonders aktueller Themen für die vier Vortragsblöcke betont. Die Vorträge werden durch Posterpräsentationen ergänzt, die besonders die Kommunikation zwischen den Teilnehmern der Tagung fördern sollen. Die Publikationen zu den Vorträgen und Posters sind im vorliegenden Tagungsband enthalten. Sie geben einen Einblick in die folgenden vier Schwerpunktbereiche:

- Sensorik
- Datenerfassung und evaluierung
- Monitoring
- Ingenieurvermessung in der Praxis

Die Mitveranstalter der Ingenieurvermessungskurse, Prof. W. Lienhart und Prof. A. Wieser, verstärkt durch Dr.-Ing. P. Wasmeier für das Thema Monitoring, haben mit mir die Organisation und Moderation der Themenkreise übernommen. Vielen Dank!

Wie gewohnt wurde den Autoren die anonyme Begutachtung der Manuskripte durch jeweils zwei hochrangige Fachkollegen (peer review) angeboten. Alle Beiträge, die dieses Review-Verfahren durchlaufen haben, sind als solche gekennzeichnet. Ich möchte den anonymen Gutachtern für die Bereitschaft, Manuskripte unter starkem Zeitdruck zu prüfen, sowie für die kritischen und dennoch immer konstruktiven Anmerkungen vielmals danken.

Für die mühevolle Organisation des druckreifen Tagungsbandes bin ich Herrn Dr.-Ing. Peter Wasmeier, welcher mit Umsicht auch die Formatierung und Endkontrolle der Beiträge über-

nommen und die pünktliche Abgabe erreicht hat, zu großem Dank verpflichtet! Die Vorbereitung und Durchführung eines Internationalen Ingenieurvermessungskurses braucht jedoch auch insgesamt alle Ressourcen eines Lehrstuhls und so sei dem ganzen Team des Lehrstuhls für Geodäsie der TUM für seinen höchst engagierten Einsatz hier gedankt!

Gleichzeitig möchte ich allen Autoren für die disziplinierte Einhaltung der zeitlichen Vorgaben, aber vor allem für die hohe Qualität ihrer schriftlichen Beiträge, vielmals danken. Durch diese Beiträge wird der Tagungsband zu einem weiteren Meilenstein für die Entwicklung der Ingenieurgeodäsie und zur Basis für die Diskussion der Fortschritte und der neu nachgefragten Lösungen in unserer einzigartigen geodätischen Ingenieurkompetenz.

Mit Wehmut muss hingegen bekannt werden, dass es diesmal nicht gelungen ist, eine Fachexkursion anzubieten; war noch beim 16. Ingenieurvermessungskurs 2010 in München die klare Erwartungshaltung gegeben, einen Einblick in die Großbaustelle der zweiten S-Bahn-Stammstrecke, dem absoluten Megaprojekt der Isarstadt, ermöglichen zu können, so hat sich der tatsächliche Baubeginn der Tunnelröhren leider immer wieder nach hinten verschoben. Einen futuristischen Ersatz dafür haben wir mit einer vollkommen neuen Form der Tagungseröffnung gewagt, in welcher das zum vierten Mal siegreiche TUM-Team mit seinem Geschwindigkeitsrekord von unglaublichen 482 km/h auf der Teststrecke in den USA das Potential und die Herausforderung von Hyperloop-Transportwegen demonstrierte.

Mit einer geselligen Abendveranstaltung im Verkehrsmuseum des Deutschen Museums ist schließlich auch der Blick zurück in die Vergangenheit – mit allen dabei aufkommenden Erinnerungen an die atemberaubenden ingenieurgeodätischen Leistungen bei der Realisierung der notwendigen Schienen- und Straßenwege – im Programm verankert worden.

Thomas A. Wunderlich (Herausgeber)

Sensorik

Vom Suchen, Finden und Messen – Automatisierte Totalstationen von Leica Geosystems

Elias NIEL

1 Einleitung und Hintergründe

Automatisierte Totalstationen haben sich weltweit etabliert und sind nicht mehr aus dem Vermessungsmarkt wegzudenken. Sie erleichtern und beschleunigen die tägliche Arbeit, indem Prozesse sequentiell automatisiert ablaufen können. Wenngleich die Hauptaufgabe von Totalstationen – das Messen und Abstecken von Positionen – unverändert bleibt, so können die Vorteile automatisierter Totalstationen im Vergleich zu traditionellen manuellen Totalstationen grundsätzlich in drei Punkten zusammengefasst werden:

- Sie ermöglichen den "Ein-Personen-Betrieb" für effizienteres und somit wirtschaftlicheres Arbeiten.
- Menschliche Fehlerquellen, wie beispielsweise individuelles Anzielverhalten oder Ermüdung, werden minimiert.
- Zusätzliche Anwendungsgebiete, wie das Verfolgen und Messen von bewegten Zielen oder sequentielles Messen unterschiedlicher Ziele über einen längeren Zeitraum, können erfasst werden.

Um diese Funktionalitäten gewährleisten zu können, haben Leica Totalstationen eine Vielzahl von unterschiedlichen aufeinander abgestimmten Sensoren und Steuerungselementen verbaut.

Dieser Artikel beschreibt das System Totalstation, die einzelnen Sensoren und deren Zusammenspiel bei gängigen Anwendungen und geht auf spezielle Herausforderungen ein.

2 System "Automatisierte Totalstation"

Automatisierte Totalstationen sind ein Multisensorsystem. Dieses baut auf dem Grundgerüst traditioneller Totalstationen auf – der Erfassung von Horizontal- und Vertikalwinkeln sowie dem Messen von Schrägdistanzen. Dieses Grundgerüst wird aber in vielerlei Hinsicht erweitert und verfeinert. Gerade in Bezug auf das Messen dynamischer Ziele bekommt der Parameter Zeit eine wesentliche Rolle. In diesem Fall kann man von einer 4D-Koordinate sprechen. Auf das Zusammenspiel der einzelnen Sensoren und die Entstehung der Koordinaten wird in Kapitel 3 eingegangen. Zunächst werden jedoch in diesem Kapitel die einzelnen Sensoren – PowerSearch, ATRplus und EDM – beschrieben (Abbildung 1).



Abb. 1: Die Automatisierungskette bei Leica Totalstationen besteht aus Zielsuche, Anzielung, Zielverfolgung, Messung und gegebenenfalls Neuanzielung (LEICA GEOSYSTEMS 2020).

2.1 Automatische Prismensuche – PowerSearch

Die automatische Suche basiert bei Leica Totalstationen auf einer optischen Sende- und Empfangssensorik. Während sich das Instrument um die Stehachse dreht, schickt eine Sendediode (Laserdiode), die sich im Teleskop oberhalb der visuellen Zielachse befindet, kontinuierlich ein hochfrequentes Signal aus. Dieses Signal breitet sich in Form eines Fächers mit einem vertikalen Öffnungswinkel von $\pm 20^{\circ}$ aus, kann von unterschiedlichen Objekten reflektiert werden und wird entsprechend wieder auf einem Empfangssensor im Teleskop detektiert. Während das Instrument rotiert, trifft das ausgesandte Signal auf sich ändernde Reflexionsflächen in unterschiedlichen Entfernungen. Das können beispielsweise Autokarosserien, Hauswände, Bäume oder eben auch Vermessungsprismen sein. Dadurch entsteht am Empfänger ein sogenannter Amplitudensweep, welcher als Basis für die Prismendetektion herangezogen wird. In Abhängigkeit von der Distanz, welche bereits mit dem PowerSearch grob (ca. 3 m genau) gemessen wird, können so Prismen von ungewünschten Reflektoren mit Hilfe einer Analysealgorithmik unterschieden werden. Ein sehr deutlicher Amplitudensweep eines Prismas ist in Abbildung 2 zu sehen.

Wird in dem Sweep ein Prisma klassifiziert, so ist zunächst nur bekannt, dass sich in der jeweiligen Horizontalrichtung und in einem vertikalen Bereich von $\pm 20^{\circ}$ von der Visurlinie ein Prisma befindet. Das Instrument stoppt die horizontale Rotation und startet mit der vertikalen Prismensuche. Dabei übergibt der eben beschriebene PowerSearch-Sensor an den ATR-Sensor, welcher in Kapitel 2.2 genauer beschrieben wird. Das Teleskop bewegt sich in vertikaler Richtung, bis das gefundene Prisma im deutlich kleineren ATR-Sichtfeld erscheint, um ebendann eine Feinanzielung durchzuführen, womit der Suchprozess endet. Das Resultat des Suchprozesses ist, dass das Teleskop, nachdem es in eine beliebige Richtung zeigte, gegenüber dem nächsten Prisma so ausgerichtet ist, dass sofort eine Punktmessung ausgeführt werden kann.



Abb. 2: 2D- und 3D-Darstellung eines Amplitudensweeps eines detektierten Prismas am PowerSearch Empfänger (LEICA GEOSYSTEMS 2020).

2.2 Automatische Anzielung – Winkelmessung und ATRplus

Die Winkelmessung setzt sich bei automatisierten Totalstationen aus mehreren Komponenten zusammen. Die beiden Basismodule sind der Horizontal- und Vertikalkreis in der Stütze des Instruments. Diese funktionieren, genauso wie die Neigungssensoren (Kompensator), analog zu manuellen Totalstationen. Zusätzlich verfügen automatisierte Leica Totalstationen jedoch noch über das ATRplus (Automatic Target Recognition) Modul, welches für die automatische Feinanzielung und den Prism Lock, also das automatische Verfolgen eines bewegten Prismas, verantwortlich ist. Dies geschieht über ein bildbasiertes Evaluierungsverfahren, dessen Herzstück ein CMOS-Sensor als Empfangseinheit und eine darauf abgestimmte Softwarealgorithmik sind.

Die Sendeeinheit der ATRplus besteht aus einer Laserquelle, welche ein koaxiales Infrarot-Signal mit einem Öffnungswinkel von 1,5 gon durch das Teleskop sendet. Wenn dieses Signal auf ein Prisma trifft, wird es dort reflektiert und gelangt wieder in das Teleskop, wo es von dessen optischem Pfad durch einen Strahlenteiler entkoppelt und durch einen IR-Bandpassfilter zum CMOS-Sensor geleitet wird. Auf diesem Bildsensor erscheint der reflektierte Laserstrahl als Lichtpunkt (Abbildung 3). Das auf dem Sensor registrierte Bild wird nun mittels mehrerer Algorithmen analysiert und evaluiert, um einerseits das Prisma als ein solches zu klassifizieren und andererseits dessen genaue Position mit Subpixel-Genauigkeit zu bestimmen. Anhand der Pixelkoordinaten wird dann die Abweichung des Prismenzentrums zur optischen Visurlinie bestimmt und in der Regel an die Motorisierungseinheit übergeben. So kann das Teleskop korrekt ausgerichtet werden. Dies ist jedoch für eine genaue Punktmessung nicht zwingend notwendig, da die Abweichungen sowieso kontinuierlich bestimmt werden und in jedem Fall gemeinsam mit den Korrekturwerten des Neigungssensors in die mathematische Bestimmung der Horizontalrichtung und des Vertikalwinkels einfließen (GRIMM et al. 2015).

Um die bestmögliche Anzielgenauigkeit zu erlangen, ist demnach die genaue Bildanalyse des reflektierten Signalpunkts auf dem CMOS-Sensor essentiell. Dieser variiert in Abhängigkeit von Umweltbedingungen, Prismentyp und Messdistanz. Da die ATRplus jedoch in der Regel keine Distanzinformationen hat und diese im Gegensatz zum PowerSearch-Sensor auch nicht selbst bestimmen kann, arbeitet sie mit der sogenannten "dynamischen Energiekontrolle". Dabei wird sowohl die Signalstärke, aber auch die Integrationszeit am Sensor so angepasst, dass das reflektierte Signal bestmöglich verarbeitet, also der Prismen-Spot und vor allem dessen Zentrum klar und eindeutig mit der gewünschten Genauigkeit bestimmt werden können (GRIMM et al. 2015).



Abb. 3: ATRplus Rohbilder eines Leica Rundprismas (links) und eines Leica 360°-Prismas (rechts) (LEICA GEOSYSTEMS 2020).

Während für eine Einzelpunktbestimmung einzelne ATRplus-Messungen herangezogen werden (hierzu gibt es je nach gewünschter Genauigkeit auch die Option, den Mittelwert über mehrere Messungen zu bestimmen), ist die ATRplus im Verfolgungsmodus hochfrequent aktiv und liefert kontinuierlich Abweichungswerte des Signalpunkts von der optischen Achse. Somit kann auch ein bewegtes Prisma in Zusammenarbeit mit der Motorisierung verfolgt werden.

2.3 Distanzmessung – EDM

Grundsätzlich wird bei Elektrooptischen Distanzmessverfahren (EDM) zwischen zwei Methoden unterschieden: dem gröberen, aber schnelleren Signallaufzeitverfahren und dem präziseren, aber aufwändigeren Phasenvergleichsverfahren.

Die Distanzmessung bei Leica Totalstationen basiert auf dem Phasenvergleichsverfahren, wobei es bei den sich aktuell am Markt befindenden Totalstationen von Leica Geosystems zwei unterschiedliche Typen gibt.

Bei der Leica Viva TS16 und Leica Nova TS60 wird die Schrägdistanz über Phasenvergleichsverfahren ermittelt, während in der Kategorie der MultiStationen, wie der Leica Nova MS60, eine "Wave Form-Digitizer"-Technologie (WFD) angewandt wird. Dabei werden jeweils die Vorteile der eingangs erwähnten Methoden herangezogen und die Nachteile minimiert. Eine WFD-Messung ist keine Einzelmessung. Vielmehr werden laufend kurze hochfrequente (bis zu 2 MHz) Pulse ausgesandt, deren Reflexionen dann auch wieder kontinuierlich registriert werden (Abbildung 4). Nun wird aber von jedem ausgehenden Puls ein kleiner Teil im Teleskop abgezweigt und als Start-Puls "aufbewahrt". Ebenso wird ein Teil des eingehenden Signals abgelenkt und als Stopp-Puls herangezogen. Diese zwei Pulsfragmente werden zunächst über mehrere Samples akkumuliert, um eine bessere Signalqualität zu erlangen, und anschließend digitalisiert. Um Start- und Stopp-Pulse einander zuordnen zu können und somit ein aufwändiges Phasenvergleichsverfahren zu umgehen, werden die Startpulse mit einer unregelmäßigen Frequenz ausgesandt. Die Wiederholungsrate kann zwischen 100 kHz und 2 MHz variieren. Aus diesen digitalisierten Pulsen kann nun die zeitliche Differenz zwischen Start- und Stopp-Puls exakt ermittelt werden (Wellenformanalyse).



Abb. 4: Effekt des Akkumulierens mehrerer Messungen. (MAAR & ZOGG 2014).

Die Messperformance der WFD-Technologie hängt von drei grundlegenden Parametern ab (Abbildung 5):

- Signalstärke (Amplitude),
- Pulsweite (Ton),
- Wiederholungsrate (TRep).

Daraus wird der sogenannte "Duty-Cycle" als Verhältnis aus Pulsweite zu Wiederholungsrate abgeleitet. Durch Anpassung dieser Parameter kann je nach Anwendung ein Optimum zwischen Genauigkeit, Reichweite und Messzeit erzielt werden. So ist beispielsweise beim MS60-Scanning eher die zeitliche Komponente im Vordergrund, bei der Einzelpunktmessung aber die Präzision von größerer Bedeutung (MAAR & ZOGG 2014).



Abb. 5: Veranschaulichung von Signalstärke, Pulsweite und Wiederholungsrate (MAAR & ZOGG 2014).

3 Zusammenspiel der einzelnen Sensoren

"Das Ganze ist mehr als die Summe der Einzelteile" – Aristoteles wird diese Aussage wohl nicht auf Totalstationen bezogen haben, jedoch ist es auch darauf bezogen treffend. Und das beschriebene "mehr" bezieht sich hierbei auf die Fusion und Synchronisation der Vielzahl an einzelnen Sensormesswerten. Denn diese werden einerseits an verschiedenen Stellen erfasst und verarbeitet und sind andererseits mit in unterschiedlichen Frequenzen und Zeitsystemen verfügbar. Während die zeitliche Komponente bei der Messung statischer Ziele nicht im Vordergrund steht, so ist sie bei dynamischen Anwendungen essentiell. Dabei geht es sowohl um die interne Synchronisation zur Koordinatenbestimmung als auch um die Verfügbarkeit für externe Systeme (Stichwort "Echtzeitanwendungen").

3.1 Systemarchitektur

Die Systemarchitektur von modernen Leica Totalstationen kann grob in drei Hauptkomponenten gegliedert werden (Abbildung 6). Diese sind das Anwendungsboard, die Stütze mit dem sogenannten Sensorboard und das Teleskop.





In jeder dieser drei Komponenten befinden sich noch unterschiedliche Subsysteme mit Sensoren und Recheneinheiten, die es miteinander zu synchronisieren gilt. Dabei ist des Weiteren zu beachten, dass jede Hauptkomponente auch mit einem eigenen Zeitsystem ausgestattet ist. Dies betrifft einerseits den Ursprung (Referenzzeit) als auch die Frequenz, beziehungsweise zeitliche Auflösung. In Abbildung 7 sind die wichtigsten Subsysteme und deren (zeitliche) Zusammenhänge schematisch dargestellt. Die zeitliche Synchronisation der Uhren spielt bei der zu erreichenden Messgenauigkeit eine große Rolle. So werden einerseits die unterschiedlichen Systemzeiten aufeinander abgestimmt, aber andererseits müssen auch die unterschiedlichen Driftraten der einzelnen Uhren berücksichtigt werden. Um hier eine möglichst hohe Qualität zu erlangen, ist es von Vorteil, dass die Datenverarbeitung und Synchronisation möglichst in räumlicher Nähe zu den Sensoren geschieht.



Abb. 7: Vereinfachte schematische Darstellung des Datenflusses innerhalb einer Leica Totalstation (KLEEMAIER 2017).

3.2 Synchronisation der Messdaten

Wie eingangs erwähnt, sind die einzelnen Sensoren, die jeweils einen Teil zur tatsächlichen Polarpunktbestimmung beitragen, in verschiedenen Systemkomponenten mit eigenen Zeitsystemen verbaut. Somit ist jeder Sensorwert mit einem eigenen Zeitstempel versehen. Der Anwender möchte aber in der Regel nur einen genauen Zeitwert (in seinem regional korrekten absoluten Zeitsystem, also beispielsweise MESZ) für seine Messung – wie dieser Zeitwert zustande kommt, wird in diesem Kapitel erläutert.

Dazu sei zunächst auf die Eigenschaften der jeweiligen Zeitsysteme verwiesen. Das Applikationsboard arbeitet mit der Zeit des darauf laufenden Betriebssystems. In diesem Fall ist das Windows EC7 mit einer absoluten Zeit und einer temporalen Auflösung von 0,1 Sekunden. Im Gegensatz dazu hat die Sensorboardzeit einen anderen Ursprung. Dessen Zeitskala bezieht sich jeweils auf den Startzeitpunkt (Hochfahren) der Totalstation und verfügt über eine Auflösung in Millisekunden. Abbildung 8 zeigt schematisch, wie beim Tracking, also der kontinuierlichen Distanz- und Winkelmessung, ein gemeinsamer Zeitstempel für die synchronisierten Sensordaten zustande kommt. Die Winkel-, Distanz und ATRplus-Linien repräsentieren die jeweiligen Sensordaten, die asynchron an das Sensorboard gesendet werden. Die schwarz gestrichelten vertikalen Linien zeigen die Anfrage (Start) einer vollständigen Messung und deren Abschluss (wenn alle dafür notwendigen Sensordaten vorliegen).



Abb. 8: Schematische Darstellung der Synchronisation einzelner Subsysteme (KLEEMAIER 2017).

Der Zeitstempel der Messung wird dabei wie folgt ermittelt: Zunächst wartet die Totalstation ab, bis der nächste gültige Distanzwert, welcher mit der niedrigsten Frequenz verfügbar ist, vorliegt. Sobald dies der Fall ist, wird noch auf die jeweils nächsten (deutlich höherfrequenten) Winkel- und ATRplus-Werte gewartet. Anschließend werden die Winkel- und ATRplus-Werte, unter Berücksichtigung des jeweils letzten vor und ersten nach der Distanzmessung abgetasteten Werts, auf den Zeitpunkt der Distanzmessung interpoliert. Dadurch wird sichergestellt, dass von der Objektgeschwindigkeit abhängige Restfehler in der Position aufgrund der unterschiedlichen Abtastraten der einzelnen Sensoren (STEMPFHUBER 2004) minimiert werden können und dem Anwender ein konkreter Zeitpunkt der kompletten Polarpunktmessung angeboten wird. Durch diese Interpolationsmethode kann also die Koordinatengenauigkeit bei dynamischen Anwendungen deutlich erhöht werden. Ein Nachteil ist allerdings, dass sich die Latenzzeit etwas erhöht, was in Abbildung 9 dargestellt ist (KLEEMAIER 2017).



Abb. 9: Darstellung der Auswirkung der Latenzzeit (KLEEMAIER 2017).

In diesem Fall stammt die wahre Trajektorie (durchgehende Linie) von einem Leica AT960 Absolute Lasertracker. Die strichpunktierte Linie repräsentiert die Messungen einer Leica Viva TS16. Der Versatz der beiden Trajektorien ist die Latenz, also der Unterschied in der für den Anwender (in diesem Fall Computer) verfügbaren Zeit der Koordinaten. Diese ist außerdem auch stark abhängig von der Übertragungsart zwischen Messinstrument und Ausgabegerät (in diesem Fall Bluetooth – Kabellösungen wären deutlich schneller), jedoch in einer Größenordnung zwischen 20 ms und 150 ms zu erwarten (KLEEMAIER 2017).

4 Herausforderungen

Bei der praktischen Anwendung der in Kapitel 2 beschriebenen Sensorik stößt man immer wieder auf Herausforderungen, die speziell mit dem Umstand, dass der Vermessungsberuf hauptsächlich in der freien Natur ausgeübt wird, in Zusammenhang stehen. Diese müssen laufend analysiert werden, um Lösungen zu finden, sodass die Performance hochgehalten und auch verbessert werden kann. Abschließend wird hier noch auf einige häufig vorkommende Fälle und deren Handhabung eingegangen.

4.1 Wechselnde Umweltbedingungen

Das Verhalten elektrooptischer Wellen wird bekanntlich durch Umweltbedingungen beeinflusst. Da die physikalischen Gesetze nicht gebrochen werden können, kann dieser Einfluss zwar nicht zur Gänze ausgeschaltet werden, aber bei guter Kenntnis gut damit umgegangen werden.

Zu den größten Herausforderungen gehören hier Nebel, Regen, aber auch temperaturabhängiges Luftflimmern, welche die Signale (PowerSearch, ATRplus, EDM) einerseits abschwächen, aber andererseits auch zu mehr Signalrauschen führen. Dies kann jedoch mit Modellen und entsprechender Softwarealgorithmik berücksichtigt werden.





Abb. 10: ATR-Rohbild eines Prismas (links), ATR-Rohbild eines Autos mit Scheinwerfern (rechts) (GRIMM 2015).

Eine weitere Herausforderung ist der Umgang mit fremden Lichtquellen, wie beispielsweise Sonnenlicht oder Autoscheinwerfern, deren Licht direkt an der entsprechenden Empfangssensorik auftrifft (Abbildung 10). Um derartige Fehlklassifizierungen zu vermeiden, werden einerseits spezielle Filter verwendet; hauptsächlich dient hier aber der Vergleich von Hellund Dunkelbildern. So können aktive Lichtquellen von den gewünschten Reflektoren einfach unterschieden und verworfen werden.

4.2 Fremdreflexe in turbulenten Umgebungen

Eine weitere Herausforderung stellt der Umgang mit Fremdreflexen in turbulenten Umgebungen dar. Das Paradebeispiel dazu sind Warnwesten mit Reflexstreifen, die jeder Vermesser trägt. Im Gegensatz zum oben beschriebenen Fall, in dem Signale von fremden Lichtquellen am Empfänger auftreffen, trifft hier das eigene (z. B. ATRplus), vom ungewünschten Objekt reflektierte Signal auf den Sensor. Dies wird bei Leica Totalstationen mithilfe von Modellen und entsprechender Softwarealgorithmik behandelt.

4.3 Unterbrechung der Visurlinie – Re-Lock

Ein weiterer unvermeidbarer Präzedenzfall tritt ein, wenn die direkte Visurlinie unterbrochen wird. Speziell bei dynamischen Anwendungen, bei denen die Totalstation ein bewegtes Prisma verfolgt, kann dies kaum vermieden werden.

Technisch wird hier zwischen zwei Fällen unterschieden – zum einen, wenn das Prisma hinter einem größeren Objekt (beispielsweise Telefonmast oder Kraftfahrzeug) verschwindet und nach kurzer Zeit wieder zum Vorschein kommt, zum anderen, wenn sich zwei Prismen kreuzen.



Abb. 11: History Logs und die Behandlung von mehreren Prismen im Gesichtsfeld (Grimm 2015).

In beiden Fällen gilt es, die Verfolgungsstabilität des gewünschten Prismas hochzuhalten. Dies funktioniert einerseits (Fall 1) mit Hilfe des Prädiktionsmodus, bei dem das Bewegungsmuster für eine gewisse Zeit linear extrapoliert wird, um das Prisma nach der Sichtunterbrechung wieder einzufangen. Im zweiten Fall bieten die sogenannten "History Logs" Abhilfe. Dank dieser können mehrere Prismen gleichzeitige vom ATRplus-Modul detektiert und deren Bewegungsmuster erfasst werden. So kann dafür gesorgt werden, dass, wenn sich das gewünschte, aktuell verfolgte Prisma hinter einem ungewünschten statischen Prisma vorbeibewegt, die Totalstation weiterhin das bewegte Prisma verfolgt. Dieser Fall ist ansatzweise in Abbildung 11 dargestellt (GRIMM 2015).

4.4 Die Totalstation als Teil eines Multisensorsystems

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

Dieselbe Problematik, welche schon bei der Synchronisation der Messdaten innerhalb der Totalstation entsteht, gilt es natürlich auch hier im externen Umfeld zu beachten. In einem Verbund mehrerer Sensoren, unter Einsatz unterschiedlicher Zeitnehmer, muss neben den unterschiedlichen Messfrequenzen und dem zeitlichen Offset auch eine etwaige Drift der Uhren berücksichtigt werden (KLEEMAIER 2017).

Verfügbare Zeitstempel moderner Leica Totalstationen

Aktuell werden für Totalstationen von Leica Geosystems drei Möglichkeiten zur Einbindung in Multisensorsysteme angeboten. Diese unterscheiden sich einerseits im Format und Informationsgrad der Daten, vor allem aber auch durch die verfügbaren Zeitstempel (KLEEMAIER 2017).

Datenstream via GSI-Output

Über den sogenannten GSI-Output können gemessene Punkte in verschiedenen auswählbaren Formaten von der Totalstation an ein gewöhnliches Terminalprogramm am PC gestreamt werden. Der dabei angegebene Zeitpunkt der Messungen ist jeweils jener des Applikationsboards der Totalstation, also deren Betriebssystems. Dies ist ein absoluter Zeitwert. Mittels GSI-Output können nur auf der Totalstation gespeicherte Punkte gestreamt werden; dies ist jedoch mit einer Frequenz von bis zu 10 Hz möglich (KLEEMAIER 2017).

"Request-Response"-Kommunikation via GeoCOM

Eine weitere Möglichkeit Messdaten der Totalstation extern verfügbar zu machen, ist die Datenabfrage via GeoCOM. Dies ist eine Schnittstelle, die es ermöglicht, einzelne Sensoren gezielt anzusprechen und deren Sensordaten auch abzufragen. Dies können komplette Messungen sein, es ist aber genauso auch möglich, nur Winkelwerte auszulesen. In diesem Fall bekommt man auch immer den relativen Zeitstempel der tatsächlichen Messung – also die Sensorboardzeit in Millisekunden. Es ist jedoch auch möglich, zusätzlich Computerzeitpunkte abzufragen, die man dann selbst mit jenen des Sensorboards synchronisieren kann. Mittels GeoCOM ist es möglich, Messdaten mit bis zu 20 Hz abzufragen (KLEEMAIER 2017).

Datenstream via "Measure & Stream"-Applikation

Die "Measure & Stream"-Applikation wurde gezielt für das gleichzeitige Interagieren des Nutzers mit der Totalstation und Streamen von Messdaten entwickelt. Ähnlich der "GSI-Output"-Lösung gibt es hier mehrere Formate der Datenaufbereitung zur Auswahl. Die Applikation arbeitet sowohl auf der Totalstation als auch auf dem Steuerungselement (Computer) und führt automatisch eine Zeitsynchronisierung durch – was der große Vorteil dieser Applikation ist. Somit ist es möglich, sofort den tatsächlichen Messzeitpunk in der (mög-

licherweise absoluten) Zeit des Multisensorsystems darzustellen. Die maximale Aktualisierungsrate liegt bei der "Measure & Stream"-Applikation bei 5 Hz (KLEEMAIER 2017).

5 Zusammenfassung

In diesem Artikel wurde die Automatisierungskette, insbesondere der dazugehörigen Sensorik, bei Totalstationen der Firma Leica Geosystems beschrieben. Diese beginnt bei der automatischen Zielsuche mit dem PowerSearch-Sensor (Kapitel 2.1). Dessen Aufgabe ist es, ausgehend von einer beliebigen Teleskopposition das nächste (statische) Prisma zu finden. Dabei ist ein enges Zusammenspiel mit der ATRplus-Sensorik (Kapitel 2.2), die für die Feinanzielung und Zielverfolgung zuständig ist, essentiell. ATRplus-Messungen sind Ablagenmessungen eines auf einem Kamerasensor detektierten Lichtpunktes (Prismenklassifizierung) in Pixelkoordinaten mit Subpixelgenauigkeit. Die zur Bestimmung einer Koordinate eines Distanzmessung Messpunkts notwendige wird anhand der WFD-Technologie (Wave Form-Digitizer), welche eine Mischung aus Phasenvergleichsverfahren und Pulslaufzeitverfahren ist und in der Leica Nova MS60 zur Anwendung kommt, erklärt (Kapitel 2.3).

Neben der Beschreibungen der einzelnen Sensorsysteme wurde deren Zusammenarbeit und Synchronisation (Kapitel 4.4) beschrieben und erläutert, was eine gute Automatisierung, unter Berücksichtigung von wechselnden Umwelt- und Umgebungsbedingungen, ausmacht (Kapitel 4).

Literatur

GRIMM, D. & ZOGG, H.-M. (2013): Leica Nova MS50, White Paper, Leica Geosystems.

- GRIMM, D., KLEEMAIER, G. & ZOGG, H.-M. (2015): ATRplus. White Paper, Leica Geosystems.
- KLEEMAIER, G. (2017): Multisensorsystem Totalstation. In: DVW-Schriftenreihe: "MST 2018 – Multisensortechnologie: Low-Cost Sensoren im Verbund", Band 92/2018, Wißner-Verlag, Deutschland, S. 25–36

LEICA GEOSYSTEMS (2020): Eigene Abbildungen

- MAAR, H. & ZOGG, H.-M. (2014): WFD Wave Form Digitizer Technology. White Paper, Leica Geosystems AG, Schweiz.
- STEMPFHUBER, W. (2004): Ein integritätswahrendes Messsystem für kinematische Anwendungen. Dissertation, Institut für Geodäsie, GIS und Landmanagement, Technische Universität München, Deutschland.

Beurteilung der Eignung eines VR-Systems als 3D Koordinatenmesssystem

Peter BAUER, Samuel JOST und Werner LIENHART

Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung durch anonyme Fachkollegen als "peer reviewed paper" angenommen.

1 Einleitung

Ein Virtual Reality (VR) System wird üblicherweise dazu benutzt, dreidimensionale Inhalte einer Person aus der "Ich"-Perspektive zugänglich zu machen. Der Nutzer kann über ein Display, das am Kopf fixiert wird, in die Simulation eintauchen. Dabei wird permanent die Position und Orientierung dieses *Head Mounted Displays* (HMD) von einem Positionierungssystem bestimmt. Diese Technologie erlaubt einen neuen Zugang zur Datenaufbereitung, weit über den zweidimensionalen Computermonitor hinaus.

Obwohl ein funktionsfähiges HMD bereits 1968 (SUTHERLAND 1968) gebaut und diese Technologie stetig weiterentwickelt wurde, hat diese Branche erst in den letzten Jahren ein enormes Wachstum erfahren. Leistungsfähige Computer und ein Hype in der Unterhaltungsindustrie haben dafür gesorgt, dass kostengünstige VR-Systeme für den Massenmarkt produziert werden können. Durch den wachsenden Anspruch der Zielgruppe wurden diese Systeme immer leistungsfähiger und auch für technische Anwendungen attraktiv. Mittlerweile ist ein VR-System ein etabliertes Hilfsmittel zur dreidimensionalen Datenvisualisierung.

Bei den technischen Anforderungen eines VR-Systems liegt der Fokus der Hauptzielgruppe auf einer möglichst realen Darstellung der virtuellen Welt und nicht auf der Genauigkeit des Positionierungssystems. Aus diesem Grund sind Herstellerangaben oder Datenblätter zur Systemgenauigkeit nicht üblich.

Für die Bestimmung der Position und Orientierung der VR-Komponenten werden von einigen Herstellern Basisstationen (z. B. Lighthouses von HTC) benötigt. Als bewegliche Objekte besitzen viele VR-Systeme zusätzlich zum HMD periphere Geräte, wie Kontroller und sogenannte VR-Tracker, deren Position und Orientierung ebenfalls in Echtzeit bestimmt werden. Der Tracker ist durch seinen Aufbau darauf ausgelegt, auf realen Objekten (z. B. Tennisschläger) montiert zu werden, um diese in die virtuelle Welt mit einzubeziehen. In diesem Beitrag wird diese Funktionalität genutzt, um daraus ein System zur Koordinatenmessung aufzubauen

Konzeptionell gibt es eine Analogie zum üblichen Verfahren in der Industrievermessung, bestehend aus Lasertracker und Corner Cube Reflektor bzw. Probe (LEICA 2009, FARO 2018), siehe Abbildung 1.



Abb.1: 3D-Erfassung einer Oberfläche mittels VR-Tracker (a) und konventionellem Lasertracker (b) (Bilder der Komponenten von *vive.com* und *leica-geosystems.com*)

Der Vorteil des VR-Systems gegenüber üblichen geodätischen Instrumenten wie Totalstationen und Lasertrackern ist, dass der Messtaster (VR-Tracker inkl. Spitze) nicht an eine Sichtverbindung zu einer einzigen Basisstation gebunden ist, sondern der Arbeitsbereich durch das Hinzufügen von weiteren Lighthouses erweitert werden kann. Dadurch ist es prinzipiell möglich, sich frei im Werkstück oder rundherum zu bewegen. Ob die Genauigkeit des VR-Systems HTC Vive Pro für die Industrievermessung, oder allgemein für Vermessungsanwendungen, ausreichend ist, wird in diesem Beitrag anhand umfangreicher Laboruntersuchungen diskutiert.

2 Das VR-System HTC Vive Pro

2.1 Funktionsprinzip

Das HTC Vive Pro System (VIVE 11/2019) besteht aus einem HMD, zwei Kontrollern, bis zu 15 Lighthouses der 2. Generation und einer optionalen Anzahl an VR-Trackern (siehe Abbildung 2a). Für die Positions- und Orientierungsbestimmung befinden sich am HMD 31, an den Kontrollern jeweils 24 und an den VR-Trackern 22 Infrarotrezeptoren. Diese Rezeptoren detektieren Signale, welche von den Lighthouses ausgesendet werden. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, gibt es für das System keine Datenblätter mit Angaben zur erreichbaren Genauigkeit der Positions- und Orientierungsbestimmung.



Abb.2: Systemkomponenten des VR-Systems HTC Vive Pro, empfohlenes Setup (VIVE 09/2019) und geöffnetes Lighthouse (CNLOHR 2018)

MÜLLER (2015) berichtet, dass laut Hersteller der Lighthouses Valve ein Minimum an fünf Rezeptoren benötigt wird, um die Position und die Orientierung einer VR-Komponente zu bestimmen. Die Zeit zwischen den Positionsupdates durch die Lighthouses und bei Verlust der Sichtverbindung soll durch inertiale Messeinheiten (IMU) in den Komponenten überbrückt werden (YATES 2016). In den Lighthouses der aktuellen Version befindet sich eine einzige IR-Quelle, um die, wie in Abbildung 2c zu sehen ist, ein Metallzylinder mit zwei Linsen rotiert. Die angewinkelten Facetten der Linsen definieren zwei verkippte Ebenen. Die Rotation des Metallzylinders erzeugt daraus ein durch den Raum streifendes V-förmiges Signal (BEZMALINOVIC 2018).

Die orientierten Richtungen vom Lighthouse zu den IR-Rezeptoren werden aus der Zeitdifferenz zwischen dem Auftreffen des Signals auf den Rezeptoren und dem Beginn der jeweiligen Rotation bestimmt. Obwohl der genaue Aufbau des ausgesendeten Signals von Valve noch nicht veröffentlicht wurde, wird in einschlägigen Internetbeiträgen davon ausgegangen, dass die Ausrichtung des Zylinders und die ID des Lighthouses aus der zeitabhängigen Zusammensetzung des ausgesendeten Signals hervorgehen (R2x0T 2018).

Aus dieser Information ergibt sich die Annahme, dass die Zeitdifferenz zwischen dem Empfang der beiden Ebenen des V-förmigen Signals an einem Rezeptor eine Bestimmung des Vertikalwinkels zwischen Lighthouse und Rezeptoren ermöglicht. Durch die bekannte Lage der IR-Rezeptoren am Gerät könnte daraus die Entfernung und Orientierung der VR-Komponenten zum Lighthouse bestimmt werden. Aus diesem Grund lässt sich die Position und Orientierung der VR-Komponente auch mit nur einem Lighthouse bestimmen.

Das lokale Koordinatensystem des VR-Systems kann über die Lage und Orientierung des HMD oder über die eingegebenen Spielfeldgrenzen zu Beginn der Anwendung definiert werden.

Laut Produktbeschreibung des VR-Systems HTC Vive Pro wird empfohlen, zwei Lighthouses in gegenüberliegenden Ecken des Raumes in einer Höhe von 2 m mit einem Neigungswinkel von 30° bis 45° zu befestigen, um eine möglichst gute Abdeckung zu erzielen (siehe Abbildung 1b). Die Lighthouses haben einen Öffnungswinkel von 120° in der horizontalen Ebene und einen spezifizierten Arbeitsbereich von 0,5 m bis 6 m. Damit soll standardmäßig eine Fläche von mind. 2 m x 1,5 m bis zu 6 m x 6 m abgedeckt werden können (VIVE 09/2019).

2.2 VR-Tracker als Messtaster

Der VR-Tracker besitzt ein Kameragewinde an der Unterseite (siehe Abbildung 3c), damit er an realen (meist abstrahierten) Objekten befestigt werden kann. Am geöffneten Exemplar in Abbildung 3b sind 13 der 22 IR-Rezeptoren zu erkennen. Abbildung 3a zeigt die zugehörigen konischen Vertiefungen am Gehäuse. Beim Vergleich des geöffneten Trackers mit dem Gehäuse fällt auf, dass ein Sensor weniger verbaut wurde als es Vertiefungen am Gehäuse gibt.





Abb.3: VR-Tracker: geschlossene Ansicht (a), geöffneter Tracker (b), Skizze der Unterseite (HTC 2017)

In Rotationsversuchen im Messlabor des Institutes für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) der TU Graz konnte bestätigt werden, dass das koordinative Zentrum direkt im Kameragewinde an der Unterseite des VR-Trackers liegt, wie es laut HTC in den Konstruktionszeichnungen beschrieben wird (HTC 2017).

Erweitert man den VR-Tracker über das Kameragewinde mit einer Metallspitze als Messtaster, kann das VR-System als Koordinatenmesssystem genutzt werden. Da das VR-System die Koordinaten des Mittelpunktes und die Orientierung des Trackers im Raum in Echtzeit bestimmt, kann über diese Information die Position der Metallspitze in Echtzeit im lokalen Koordinatensystem des VR-Systems berechnet werden. Das Messsystem kann zeitgleich über die Tastenbelegung eines VR-Kontrollers gesteuert werden, um Messungen auszulösen.

2.3 Implementierung der Messroutinen in Unity

Die Messroutinen für die Untersuchungen wurden in der Spiel-Engine Unity (UNITY 2019) entwickelt. Diese Entwicklungsumgebung bietet die Möglichkeit, die Funktionalität des VR-Systems über selbst entwickelte C#-Routinen zu erweitern. Die Kommunikation mit dem VR-System wurde über die von SteamVR zur Verfügung gestellten Schnittstellen abgewickelt. In Unity sind diese als Plugin implementiert. Über dieses Plugin kann mittels C#-Routinen auf die Positions- und Orientierungsdaten der VR-Komponenten zugegriffen werden. Ein Zugriff auf die Rohdaten (Vertikal-, Horizontalwinkel und Distanz) ist nicht möglich. Die Prozessierung dieser übernimmt die von SteamVR für das VR-System zur Verfügung gestellte Software.

3 Systemuntersuchungen des VR-Trackers im Messlabor

3.1 Rauschverhalten bei Verwendung von nur einem Lighthouse

Um eine Abschätzung der Genauigkeit der Positionsbestimmung des VR-Trackers zu erhalten, wird zuerst das systemimmanente Rauschverhalten untersucht. Zu diesem Zweck wurden statische Einzelmessungen mit dem VR-Tracker über einen längeren Zeitraum aufgezeichnet. Um die Effekte besser unterscheiden zu können und nicht durch eine Überbestimmung zu verschmieren, wurde die Positionsbestimmung mit nur einem Lighthouse in unterschiedlichen Entfernungen durchgeführt. Beispielhaft werden nachfolgend die Ergebnisse bei einer Distanz von 2 m zwischen Lighthouse und VR-Tracker diskutiert.

Die Scatterplots von über 500 Messungen pro Position zeigen in Abbildung 4a deutlich, dass das Rauschen der Position in Richtung des Lighthouses höher ist als das Rauschen quer zum Lighthouse. Die Fehlerfigur zeigt ein elliptisches Verhalten mit einer eindeutigen Ausrichtung zum Lighthouse. Die einfache Standardabweichung der horizontalen Punktlage liegt bei der untersuchten Distanz von 2 m zwischen 0,6 mm und 0,7 mm in Richtung zum Lighthouse und unter 0,05 mm orthogonal dazu. In Abbildung 4b zeigt die Fehlerfigur auch in der Vertikalebene ein elliptisches Verhalten mit einer Ausrichtung auf das Lighthouse. Das Rauschen in den einzelnen Komponenten ist inhomogener als in Abbildung 4a, da mit der Höhenvariation auch die Sichtbarkeit von IR-Rezeptoren verändert wird.



Abb.4: Horizontale Scatterplots auf 3 Positionen auf selber Höhe (a), Vertikale Scatterplots auf 4 Positionen in einer Ebene mit dem Lighthouse (b)

3.2 Systemverhalten mit einem Lighthouse am Horizontalkomparator

Zur Überprüfung der absoluten Lagegenauigkeit wurde der VR-Tracker auf dem horizontalen Komparator im Messlabor des IGMS positioniert und linear verfahren (siehe Abbildung 5a). Der horizontale Komparator besteht aus einem Schienensystem, auf dem ein Messwagen linear bewegt werden kann. Die Verschiebung wird durch ein Laserinterferometer mit übergeordneter Genauigkeit bestimmt. Als Referenz für die Abweichungen in der Lage wurden die Soll-Positionen als Gerade auf die Messungen des VR-Trackers transformiert, da das Schienensystem der Komparatorbank eine ausreichende Genauigkeit aufweist.

Um einen großen Messbereich abzudecken, wurde das Lighthouse in 4 m Entfernung auf der gleichen Höhe wie der VR-Tracker positioniert. Der Tracker wurde in 25 cm Schritten linear weiterbewegt und 100 Einzelmessungen pro Position wurden ausgelöst (siehe Abbildung 5b). Der Versuch wurde mit unterschiedlichen Längen (mit und ohne Verlassen des Blickfeldes des Lighthouses) am Horizontalkomparator und variierenden Abständen (1,5 m und 4 m) zum Lighthouse wiederholt.

Beispielhaft werden in diesem Artikel die Ergebnisse bei einem Abstand von 4 m von der Komparatorbank gezeigt. Vergleicht man die Mittelwerte der Einzelmessungen mit den Soll-Positionen am Komparator, so können Abweichungen in Richtung des Lighthouses von mehreren Zentimetern beobachtet werden, siehe Abbildung 5. Diese Abweichungen sind systematischer Natur, denn sie sind bei Hin- und Rückweg bis auf wenige Millimeter reproduzierbar (Abbildung 5c).

Weitere Versuche haben gezeigt, dass Positionsbestimmungen auch über den spezifizierten Öffnungswinkel der Lighthouses von 120° hinaus möglich sind. Ab 120° kann ein Anstieg in der Standardabweichung (größere Konfidenzellipsen) wie auch eine Zunahme der Abweichungen zur Referenzlinie (Länge der Pfeile) beobachtet werden. Ab einem Winkel von mehr als 150° vom Lighthouse zum VR-Tracker versucht das System, vermutlich mittels IMU-Daten, die schlechte Positionsbestimmung des Lighthouses auszugleichen. In einer weiteren Untersuchung wurde das Lighthouse kontrolliert abgedeckt, um den Ausfall optischer Messungen zu simulieren. Dies hat gezeigt, dass das System noch für weitere 1,5 Sekunden Daten für den VR-Tracker liefert. Die Positionsbestimmung wird dann sehr unzuverlässig und es kann zu Abweichungen von mehreren Dezimetern kommen.

Führt man den VR-Tracker anschließend wieder in den Sichtbereich der Lighthouses zurück, kommt es in der Positionsbestimmung zu Hysteresen im Bereich mehrerer Zentimeter. Daher kann angenommen werden, dass die Positionsbestimmung nicht unabhängig von der Vorgängerepoche erfolgt und die zurückliegende Trajektorie miteinfließt.

Verbleibt der VR-Tracker aber stets im Blickfeld des einen Lighthouses, sind die Koordinaten frei von Hysteresen und Koordinatensprüngen.



Abb.5: Untersuchung der Systemgenauigkeit des VR-Trackers am Horizontalkomparator: Positionsabweichungen von Hin- und Rückweg, wobei der VR-Tracker den Sichtbereich der Lighthouses nie verlassen hat.



Abb.6: Testaufbau (links) und systematische Abweichungen in der VR-Trackerposition in Abhängigkeit der Ausrichtung zum Lighthouse bei einer Distanz von 2 m (rechts)

3.3 Systematisches Verhalten bei Rotation des VR-Trackers

Aufgrund der Systematik der Abweichungen aus Abbildung 5 wird vermutet, dass diese Differenzen aufgrund einer variierenden Ausrichtung des VR-Trackers zum Lighthouse hervorgerufen werden.

Für weiterführende Untersuchungen wurde der VR-Tracker auf einem umgebauten Theodolit Leica TM1100 fixiert und um die Stehachse rotiert. Der TM1100 wurde mit einer Prüfroutine über die GeoCom-Schnittstelle in 1°-Schritten gedreht. An jeder Position wurden mit der selbstentwickelten Software 20 Einzelmessungen mit dem VR-Tracker getätigt. Der Tracker wurde jeweils dreimal bei unterschiedlichen Distanzen rotiert. Zusätzlich wurde bei einer Distanz von 2 m der Versuch dreimal mit verschiedenen, aber baugleichen VR-Trackern durchgeführt, um etwaige Unterschiede zwischen einzelnen Trackern festzustellen.

Die Rotationsversuche in Abbildung 6 zeigen, dass alle drei getesteten VR-Tracker eine Systematik von bis zu 1 cm in einer Entfernung von 2 m aufzeigen. Diese Systematiken sind bei den drei Wiederholungsmessungen pro Tracker eindeutig reproduzierbar und zeigen bei allen drei getesteten VR-Trackern einen vergleichbaren Verlauf. Rotationstests bei unterschiedlichen Distanzen haben auch gezeigt, dass der Charakter der Systematik erhalten bleibt, die Größenordnung aber mit der Distanz skaliert wird. Ebenso wirkt sich die Neigung des Lighthouses in Relation zum Tracker auf die Amplitude der Systematik aus.

Zwischen den VR-Trackern in Abbildung 6 gibt es geringfügige lokale Unterschiede. Ein weiterer Rotationstest mit teilweise abgeklebten Infrarotrezeptoren hat gezeigt, dass das Ausfallen einzelner Rezeptoren lokale Unterschiede hervorrufen kann. Die Differenzen zwischen den VR-Trackern in Abbildung 6 können auf eine unterschiedliche Qualität in der Fertigung hindeuten.



Abb.7: Testaufbau, entnommen aus PATRI (2015), und systematische Abweichungen in der Distanzmessung mit Trimble Totalstationen (S6 und S8) auf ein Trimble MultiTrack 1000, entnommen aus LACKNER (2016).

Diese systematischen Abweichungen in Abhängigkeit der Orientierung stellen eine Analogie zu geodätischen Totalstationen dar. Wie schon in Laborversuchen am IGMS gezeigt wurde, kommt es bei Messungen zu 360°-Prismen auch zu systematischen Abweichungen im Millimeterbereich je nach Ausrichtung des Prismas. Zusätzlich können bei Facettenübergängen der 360° auch Sprünge von bis zu 1 cm auftreten (LACKNER 2016). Exemplarisch sind in Abbildung 7 die Distanzabweichungen auf ein Trimble MultiTrack 1000 mit zwei verschiedenen Totalstationen abgebildet. Dies soll verdeutlichen, dass dieselbe Problemstellung auch bei einer konventionellen Messmethode zu finden ist.

3.4 Verhalten des VR-Trackers mit mehreren Lighthouses

Bisher wurden alle gezeigten Untersuchungen mit nur einem Lighthouse durchgeführt. In diesem Abschnitt wird evaluiert, ob durch das Hinzufügen weiterer Lighthouses und die dadurch entstehende Redundanz in der Positionsbestimmung die Präzision und die Genauigkeit gesteigert werden können. Zu diesem Zweck wurden zwei Lighthouses orthogonal zueinander und in 2 m Entfernung vom Zentrum des Messbereichs positioniert und die dabei aufgespannte Fläche in einem Raster mit 25 Positionen und mit 500 Einzelmessungen pro Position gemessen.

Die Untersuchung des Rauschverhaltens bei den unterschiedlichen Positionen des VR-Trackers zeigt bei der Verwendung von zwei Lighthouses, dass beide Lighthouses zur Positionsberechnung beitragen, aber das Endergebnis ein sehr inhomogenes Verhalten aufweist (siehe Abbildung 8).

Es zeichnet sich zwar im Zentralbereich des Rasters das erwartete isotrope Rauschmuster ab, die übrigen Konfidenzellipsen unterscheiden sich aber sehr in ihrer Form. Zwischen eindeutig auf ein bestimmtes Lighthouse ausgerichteten Konfidenzellipsen finden sich auch immer wieder welche mit isotropem Charakter und einem Messrauschen im Submillimeterbereich.



Abb.8: Rauschmuster des VR-Trackers unter Verwendung von zwei Lighthouses



Abb.9: Rotationsabhängige Systematik des VR-Trackers mit einem Lighthouse (a) und zwei Lighthouses (b)

Dies zeigt deutlich, dass die Kombination von Lighthouses grundsätzlich eine Reduktion des Rauschens bringen kann, aber im Anwendungsfall zu keinem flächendeckend homogenen Ergebnis führte. Ebenso ist eine unterschiedliche Gewichtung der beiden Lighthouses im Algorithmus von SteamVR erkennbar. In Abbildung 8 erhält das Lighthouse 1 eine übergeordnete Rolle in der Positionsbestimmung.

Eine besondere Auffälligkeit lieferte die Wiederholung des Rotationstests mit zwei Lighthouses in 2 m Entfernung. In Abbildung 9a sind die Ergebnisse eines Rotationstests mit nur einem Lighthouse in der Lage dargestellt. Es zeigt sich, wie in Abbildung 6, eine rotationsabhängige Systematik im Zentimeterbereich. Das Rauschen der 20 Einzelmessungen an einer Rotationsposition (Schrittweite 1°) ist von ähnlicher Ausrichtung mit einer Amplitude im Millimeterbereich. In Abbildung 9b zeigen die Ergebnisse eines Rotationstests mit zwei Lighthouses das gleiche systematische Verhalten im Zentimeterbereich wie in Abbildung 9a. Betrachtet man das Rauschen der 20 Messungen an den Rotationspositionen, zeigt sich in diesem Fall aber ein isotropes Verhalten.

Die Verwendung mehrerer Lighthouses hat daher eine Auswirkung auf das Rauschverhalten der statischen Messungen. Die absoluten Positionsfehler bleiben aber vorhanden und sind weiter abhängig von einem einzigen Lighthouse, welches durch systemeigene Kriterien mit einer höheren Priorität belegt wird.

4 3D Erfassung eines Karosserieteils mit einem VR-Tracker

4.1 Umsetzung des VR-Trackers als 3D Koordinatenmesssystem

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den Laboruntersuchungen sollte es, mit einigen Einschränkungen, möglich sein, Messungen mit einer relativen Genauigkeit im unteren Millimeterbereich mit dem VR-Tracker durchzuführen.

Um die Messung einer Industrieanwendung zu simulieren, wurde als Objekt ein Karosserieteil eines Autos mit 20 Messmarken verwendet. Als Messaufbau wurde eine Konfiguration mit zwei Lighthouses gewählt, um einerseits das Messrauschen gering zu halten (Messung im zentralen Bereich), aber vor allem um Hysteresen und grobe Fehler durch Sichtverlust zu einem Lighthouse zu vermeiden.

Der größte Einfluss auf die Genauigkeit der Messungen besteht aus den systematischen Fehlern, die durch die Orientierung des VR-Trackers zum Lighthouse hervorgerufen werden. Aus diesem Grund wurde während der gesamten Messungen der Tracker auf das Lighthouse mit der höchsten Priorität ausgerichtet, welches vorher durch die Analyse des Rauschmusters der Position des VR-Trackers bestimmt wurde.

Pro Messpunkt wurden 500 Einzelmessung ausgelöst. Dies entspricht bei der Messrate des VR-Systems von 100 Hz einer Messzeit von ca. 5 Sekunden. Ähnlich wie bei der Probe des Lasertrackers muss der VR-Tracker bei der Punktaufnahme nicht notwendigerweise vertikal gehalten werden, da auch die Orientierung des Trackers zu jedem Zeitpunkt bekannt ist.

4.2 Vergleichsmessungen

Damit die Positionsgenauigkeit des VR-Trackers überprüft werden kann, wurden die Messungen am Karosserieteil auch mit einem Lasertracker Leica LTD 800 (Leica 2003) im Messlabor der TU Wien durchgeführt (siehe Abbildung 10). Zur Steigerung der Reproduzierbarkeit der Messungen wurden die Messstellen gekörnt. Die Wiederholungsmessungen mit dem Lasertracker haben gezeigt, dass die Referenzmessungen mit einer Wiederholbarkeit von 0,5 mm über alle Messstellen durchgeführt werden konnten. Damit die Messungen des VR- Trackers und des Lasertrackers verglichen werden konnten, wurden die Daten mit einer 6-Parameter Helmert-Transformation aufeinander transformiert. Durch dieses Vorgehen wurde auch eine unzureichende Horizontierung des lokalen Koordinatensystems des VR-Systems korrigiert.



Abb.10: Gegenüberstellung der Messtaster des VR-Systems und des Lasertracker-Systems



Abb.11: Lage- und Höhendifferenzen zwischen den Ergebnissen des VR-Trackers und des Lasertrackers bei der Erfassung der Geometrie eines Karosserieteils.

4.3 Ergebnisse

Das Karosserieteil wurde in 2 m Entfernung zu jedem Lighthouse auf einem Messpfeiler in einer Höhe von 1,5 m fixiert (siehe Abbildung 11a). Die Transformation der Messungen des VR-Trackers auf die Messungen des Lasertrackers zeigt, dass die 3D-Punktlagefehler des VR-Trackers unter 3 mm liegen. Die Lageabweichungen in Abbildung 11b sind größer als der Fehler in der Höhenkomponente in Abbildung 11c. Ebenso ist zu erkennen, dass ähnlich wie beim Komparatorversuch (Abbildung 5) die Fehler in Richtung eines Lighthouses größer sind als orthogonal dazu.

Die Messungen wurden dreimal wiederholt. Bei allen drei Messreihen mit unterschiedlichen Graden an Verkippung des VR-Trackers wurde eine Koordinatenabweichung zum Lasertracker unter 3 mm erreicht. Somit wurden in diesem Anwendungsfall Genauigkeiten erreicht, die auch typischen Genauigkeiten von Totalstationsmessungen mit 360°-Prismen entsprechen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Versuche zeigen das enorme Potential der Hardware eines VR-Systems für die kleinräumige Vermessung. Das Messrauschen liegt im Bereich weniger Millimeter und in Richtung quer zum Lighthouse Großteils unter einem Millimeter. Größte Einschränkung für die Genauigkeit sind die rotationsabhängigen Abweichungen. Da diese Abweichungen jedoch systematisch und reproduzierbar sind, sollte eine Kalibrierung und Anbringung einer numerischen Korrektur möglich sein. Im Gegensatz zu Totalstationen und 360°-Prismen ist zu jedem Zeitpunkt neben der Position auch die Orientierung des Trackers bekannt. Erst dadurch wird eine rechnerische Korrektur der Rotationssystematik möglich. Diese wurde bisher noch nicht implementiert. Wenn jedoch darauf geachtet wird, dass der Tracker bei der Messung immer eine ähnliche Orientierung in Bezug zum Lighthouse aufweist, kann der Einfluss der systematischen Abweichungen stark reduziert werden. Insgesamt konnte durch die Vergleichsmessungen mit einem konventionellen Lasertracker nachgewiesen werden, dass unter einer optimalen Konfiguration schon jetzt eine Genauigkeit von besser als 3 mm erreicht werden kann.

Die Versuche haben aber auch gezeigt, dass der Algorithmus in SteamVR darauf ausgelegt ist, ein flüssiges Spielvergnügen zu gewährleisten. Bedient man sich dieser Schnittstelle, kann es aufgrund einer unzureichenden Kalibrierung der Komponenten zu systematischen Fehlern von einigen Zentimetern kommen (Verkippung der horizontalen Ebene, Maßstab, Ausrichtung...). Auch führt eine schlechte Balance zwischen den Lighthousedaten und den IMU-Daten zu Hysteresen. Bei einer schlechten geometrischen Anordnung des Systems können groben Fehler von einigen Dezimetern und Sprünge in den Koordinaten der Lighthouses auftreten. Es sei darauf hingewiesen, dass bei all den durchgeführten Versuchen die Positions- und Orientierungsberechnung mit SteamVR erfolgte. Eine andere Implementierung könnte bei denselben Rohdaten auch andere Ergebnisse liefern.

Werden diese Probleme durch eine höhere Gewichtung der Lighthousedaten oder durch eine stabilere Einbindung der IMU-Daten beseitigt und das Lighthousesystem durch externe Informationen gestützt, könnte das System enorme Möglichkeiten im unteren Millimeterbereich bieten.

Danksagung

Wir möchten uns beim Department of Geodesy and Geoinformation der TU Wien (Prof. Hans Neuner) für die Unterstützung bei den Vergleichsmessungen im Messlabor der TU Wien bedanken. Besonders möchten wir den Einsatz von Dipl.-Ing. Thomas Thalmann hervorheben, der die Messungen mit dem Lasertracker durchgeführt hat.

Ebenfalls bedanken wir uns bei Dipl.-Ing. Robert Hofstadler vom Institut für Fahrzeugtechnik der TU Graz sowie bei Dipl.-Ing. Markus Salchner und Dipl.-Ing. Severin Stadler von Magna Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co KG für die fachlichen Diskussionen, die finanzielle Unterstützung und die gute Zusammenarbeit.

Literatur

- BEZMALINOVIC, T. (2018): SteamVR: Erste Entwickler erhalten neue Trackingboxen https://mixed.de/steamvr-erste-entwickler-erhalten-neue-trackingboxen/ (23.09.2019). CNLOHR (2018): Tearing down a Vive Lighthouse 2.0
- https://www.youtube.com/watch?v=JP5maGaumYo (24.09.2019).
- FARO Europe GmbH & Co (2018): FARO Vantage⁸⁶ und Vantage^{E6} Laser Tracker, MA-FR-8593 REV October 02, 2018
- HTC (2017): HTC Vive Tracker Developer Guidelines Ver. 1.3, https://dl.vive.com/Tracker/ Guideline/HTC_Vive_Tracker_Developer_Guidelines_v1.3.pdf (23.09.2019).
- KREYLOS, O. (2016): Lighthouse tracking examined http://doc-ok.org/?p=1478 (23.09.2019).
- LACKNER S. & LIENHART W. (2016): Impact of Prism Type and Prism Orientation on the Accuracy of Automated Total Station Measurements, Proc. Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Wien, S. 8
- LEICA Geosystems GmbH (2003): Leica Laser Tracker for Hand-Tools Specifications, 731982, Version 11/2003
- LEICA Geosystems GmbH (2009): Leica Absolut Tracker Product Brochure, 764370, Version 02/2009
- MÜLLER, R. A. (2015): Lighthouse von VALVE erklärt. http://vrjump.de/lighthouse-erklaert (23.09.2019).
- PATRI, G. P. (2015): Untersuchung der Systemeigenschaften moderner Totalstationen, Masterarbeit, Technische Universität Graz
- R2X0T (2018): Github Seite von cnlohr, Let's try figuring out the data stream. https://github.com/cnlohr/esptracker/issues/1#issuecomment-410683665 (23.09.2019).
- SUTHERLAND, I. E. (1968): A head mounted three dimensional display, In: Tagungsband der AFIPS 68, S.757–764
- UNITY (2019): Homepage von Unity3d, Beschreibung Unity 2019 https://unity3d.com/unity (12.11.2019).
- VIVE (09/2019): Homepage von Vive, Überprüfen Ihrer Einrichtung https://www.vive.com/de/support/vive/category_howto/play-area.html (23.09.2019).
- VIVE (11/2019): Homepage von Vive, Vive Pro
 - https://enterprise.vive.com/us/product/vive-pro/ (12.11.2019).
- YATES, A. (2016): Impossible Tasks of Making Valve's VR Work https://www.youtube.com/watch?v=75ZytcYANTA&t=489s (23.09.2019)

Erstellung und Validierung eines Positionskorrekturmodells für einen Roboterarm mittels künstlicher neuronaler Netze

Sabine HORVATH und Hans NEUNER

1 Einleitung

Roboterarme sind unerlässlich für den technologischen Fortschritt, da sie die Automatisierung von Tätigkeitsabfolgen in einer Vielzahl von Bereichen ermöglichen. In der Ingenieurgeodäsie können sie für die Automatisierung von Messprozessen eingesetzt werden, wie das in der industriellen Qualitätskontrolle z. B. bei Abnahmeprüfungen von Karosserien gebräuchlich ist. Ebenfalls üblich ist der Einsatz von Roboterarmen zur Sensor- oder Messsystem-Kalibrierung wie zum Beispiel zur Nullpunktsbestimmung von GNSS-Antennen (MENGE 2003). In der Forschung kann ein Roboterarm als Träger und Referenz in der kinematischen Trajektorienbestimmung dienen (HERRMANN 2010). Ein ingenieurgeodätisches Kernthema ist die Systemidentifikation z. B. im Zuge von Überwachungsmessungen, um den untersuchten Deformationsprozess umfassend zu modellieren. Für die Methodenentwicklung zur Systemidentifikation liefert das System Roboterarm gute Testbedingungen. Für manche der genannten ingenieurgeodätischen Anwendungsmöglichkeiten wird eine geringe absolute Positionsunsicherheit benötigt, die infolge einer Kalibrierung und der Anbringung der Kalibrierwerte erreicht werden kann. In der Robotik spricht man eher von einer Systemidentifikation, die eine allgemeine Herangehensweise zur Bestimmung des Zusammenhanges von Einund Ausgangsgrößen darstellt. Dafür können parametrische oder nichtparametrische Verfahren eingesetzt werden. Dieser Beitrag fokussiert sich auf eine nichtparametrische Modellierung eines Roboterarms auf Basis von künstlichen neuronalen Netzen (KNN). Dafür werden die Roboter-Positionsfehler auf die entsprechenden Gelenksstellungen zurückgeführt. Die Validierung der Methode, bestehend aus der Transformation und dem KNN, erfolgt anhand von Gelenksstellungen unabhängiger Testdaten. Es werden die entsprechenden Positionsfehler mittels des trainierten KNN prädiziert und an die Pose angebracht. Ziel ist, zu zeigen, dass die Modellierung durch das erstellte Positionskorrekturmodell eine Möglichkeit zur Kalibrierung eines Roboterarms darstellt.

Der Beitrag ist wie folgt gegliedert: Nach einer Einführung in das System Roboterarm und die gewählte Methode zur Erstellung des Roboterarm-Positionskorrekturmodells in Kapitel 2 werden die vorbereitenden Tätigkeiten wie z. B. die Roboterbewegungssimulation sowie die Messungen in zwei Messepochen im dritten Abschnitt beschrieben. In Kapitel 4 werden die Erstellung und die Validierung des Positionskorrekturmodells ausführlich behandelt und die Ergebnisse der KNN-Modellierung werden präsentiert. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung sowie einem Ausblick auf weiterführende Arbeiten.

2 Grundlagen

Dieser Abschnitt gibt Einblick in das System Roboterarm und setzt sich mit Fehlereinflüssen und den Möglichkeiten der Modellierung auseinander. Die nichtparametrische Modellierung mit KNN wird detailliert besprochen, bevor die Methode für die Bestimmung des Positionskorrekturmodels vorgestellt wird.

2.1 System Roboterarm

Die häufigste Art von Robotermanipulatoren sind Roboterarme. Dabei handelt es sich um eine serielle Kette von Starrkörpern verbunden durch Drehgelenke. Auf Basis von variierenden Gelenksstellungen können im Falle eines Roboterarms mit sechs Freiheitsgraden beliebige Posen, d. h. Positionen und Orientierungen, im Arbeitsbereich des Roboterarms angefahren werden. Die Güte der angefahrenen Pose ist das Ergebnis aller beeinflussenden Größen - begonnen vom Aufbau und der Geometrie des Roboterarms bis hin zu den Eigenschaften der verbauten mechanischen Komponenten. Eine gängige Einteilung der Fehlereinflüsse erfolgt in geometrische und nicht-geometrische Fehler. Typische geometrische Fehler entstehen in der Fertigung und sind zum Beispiel Fehler in den Armlängen, in den Achsorientierungen oder im Gelenks-Nullpunkt. Nicht-geometrische Fehler entstehen in der Bewegung und unter Lasteinwirkung. Dazu gehören die Gelenksnachgiebigkeit, das Getriebespiel, die Getriebereibung, die Durchbiegung der Arme oder die Erwärmung von Bauteilen. Bei einer Klassifizierung des Ausmaßes verschiedener Fehlereinflüsse nennen verschiedene Literaturquellen die geometrischen Fehler als dominierenden Anteil am Fehlerbudget. MOORING et al. (1991) weisen auf eine differenzierte Betrachtungsweise hin - je nach Spezifikation, Bautyp und Fertigung können Fehlereinflüsse ein unterschiedliches Ausmaß annehmen.

Wie im Falle der Systemidentifikation unterscheidet man hier zwischen parametrischen und nichtparametrischen Ansätzen. Im ersten Fall wird der mathematische oder physikalische Zusammenhang zwischen der Fehlergröße und der Zielgröße durch physikalisch interpretierbare Parameter ausgedrückt. Nichtparametrische Verfahren sind allgemeingültig, wobei keine Interpretation der bestimmten Parameter möglich ist. In die letzte Kategorie fällt auch der gewählte Ansatz – die Modellierung mit künstlichen neuronalen Netzen (KNN). Die wesentlichen Unterschiede der einzelnen Herangehensweisen sind in Tabelle 1 zusammengefasst, wobei es sich nicht um einen allgemeingültigen Vergleich handelt. Die nichtparametrischen Methoden beziehen sich ausschließlich auf den gewählten Ansatz. Für die Modellierung mit KNN benötigt man große Datenmengen. Aus diesem Grund ist der Messaufwand für die Generierung von Trainingsdaten hoch. Die automatisierte Messroutine bedarf außerdem einer Planung und Simulation der möglichen Roboterarm-Posen. Für die Bestimmung der parametrischen Unbekannten bedarf es zwar einer redundanten Beobachtung, aber der Messaufwand sowie die Planung der Roboterposen sind im Vergleich gering. Eine Problematik in der parametrischen Modellierung ist die redundante Bauweise eines Roboterarms, welche Singularitäten verursacht. Die linearen Abhängigkeiten werden entweder durch Streichung von Parametern oder durch Nebenbedingungen in der Schätzung behoben, wobei dann die physikalische Interpretierbarkeit der Parameter ebenfalls nicht mehr gegeben ist. Es resultieren lokale Lösungen, für die keine gute Inter- bzw. Extrapolation mehr möglich ist. Decken die Trainingsdaten den Arbeitsbereich des Roboterarms hinreichend gut ab, führt das KNN eine gute Interpolation auf noch nicht gesehene Gelenksstellungen durch. Ein Vorteil

Parametrisch	Nichtparametrisch (KNN)
+ Geringer Messaufwand	- Hoher Messaufwand
+ Geringer Planungsaufwand	- Planung unbedingt notwendig
– Singularitäten	+ Interpolation
– Lokale Lösung	+ Inhärente Fehlermodellierung

 Tabelle 1:
 Gegenüberstellung von parametrischen und nichtparametrischen Verfahren hinsichtlich der Roboterarm-Modellierung

der KNN ist, dass Fehlerquellen, die nicht explizit im KNN berücksichtigt sind, mitmodelliert werden wie z. B. Nulllagen- sowie inkrementelle Gelenksfehler.

2.2 Nichtparametrische Modellierung mittels künstlicher neuronaler Netze

Die nichtparametrische Modellierung des Systemverhaltens erfolgt auf Basis von Ein-X und Ausgangsgrößen Y. Durch die Adaption der Gewichte/Parameter w_{lm} an die vorgegebenen Ausgangsgrößen Y wird das künstliche neuronale Netz trainiert. Grundlegende Aspekte der Modellierung mit KNN finden sich bei HEUNECKE et al. (2013). Zur Optimierung der KNN als approximierende Funktion wird in diesem Beitrag Levenberg-Marquardt herangezogen. Die Komplexität des Modells wird von der Anzahl und der Anordnung der Gewichte w_{lm} sowie der verwendeten Aktivierungsfunktion bestimmt. Die Festlegung der optimalen Komplexität wird im Zuge einer Modellselektion getroffen.

Die Information bezüglich des funktionalen Zusammenhangs zwischen Einfluss- und Zielgrößen ist aufgrund der Endlichkeit der Datenreihe beschränkt. Es stellt sich die Frage, inwieweit dieses empirisch getriebene Modell das "wahre" System abbildet. Dieser Gedanke wird bereits im Zuge der Modellselektion aufgegriffen. Das Ziel dabei ist es, eine Modellstruktur zu bestimmen, die eine gute Prädiktion bzw. Generalisierung ermöglicht. Eine Aussage über die Prädiktions- und Generalisierungsfähigkeit eines Modells lässt sich tätigen, wenn das bestimmte Modell auf einen unabhängigen Datensatz übertragen wird. Aus diesem Grund kommt der Validierung des KNNs große Bedeutung zu.

2.3 Positionskorrekturmodell

Das Positionskorrekturmodell basiert in erster Linie auf den Gelenksstellungen des Roboterarms. Abhängig von den gewählten Gelenksstellungen ergeben sich unterschiedliche Positionen, denen auch unterschiedliche Fehler anhaften. Dabei sind die Gelenksstellungen nicht die primäre Ursache für die Positionsfehler. Sie bewirken lediglich die Variationen der Fehler im Arbeitsbereich des Roboterarms. Die Positionsfehler resultieren aus der Summe verschiedener Fehlereinflüsse, wie in Kapitel 2.1 dargelegt. Je nach gewählter Roboterpose wirken manche Einflüsse stärker oder schwächer. In Gelenkstellungen, die eine gestreckte Position des Roboterarms bewirken, werden Fehler in den Armlängen stärker zum Vorschein gebracht. Auch die unzureichende Modellierung der Roboter- bzw. der Endeffektor-Masse würde man in solch einer Pose verstärkt feststellen. Fehlereinflüsse, die direkt durch die Gelenke verursacht werden, sind die Nulllagen- und die inkrementellen Gelenksfehler. Diese Ausführungen zeigen, dass die resultierenden Positionsfehler aus verschiedenen Einflussgrößen entstammen, die aber mit denselben Eingangsgrößen – den Gelenkstellungen – beschrieben werden. Somit kann keine Differenzierung zwischen diesen Einflussgrößen stattfinden. Aus diesem Grund ist es das Ziel, das KNN um die wesentlichen Einflussgrößen zu erweitern. Zum jetzigen Zeitpunkt handelt es sich um ein statisches Positionskorrekturmodell.

$$j_{i} \longrightarrow \begin{bmatrix} \mathsf{KNN} \\ w_{lm} \end{bmatrix} \xleftarrow{w_{lm}}^{R} t_{RF} \overset{LT}{\mathbf{T}_{P}} \downarrow \downarrow \downarrow$$

$$j_{I} \xrightarrow{\mathsf{Trafo}} \overset{\mathsf{R}_{R_{LT}, R}}{\mathsf{T}_{LT}, P} t_{RF}$$



Der entwickelte Ansatz zur Erstellung des Positionskorrekturmodells besteht, wie in Abbildung 1 skizziert, aus einer vorgeschalteten Transformation und dem KNN. Im Folgenden werden Posen und Transformationen als homogene Transformationsmatrizen ${}^{Z}T_{A}$ (${}^{Z}R_{A}$, ${}^{Z}t_{A}$) geführt, wobei der obere Index das Ziel- (Z), der untere Index das Ausgangs-Koordinatensystem (A) beschreibt (gemäß: ${}^{Z}p_{A} = {}^{Z}R_{A} {}^{A}p + {}^{Z}t_{A}$). Weiters wird ein zweiter unterer Index, getrennt durch einen Beistrich, verwendet, der den Bezug zum Koordinatensystem des Messmittels (B) wiedergibt (${}^{Z}t_{A,B}$). Die Transformation beschreibt den Übergang vom Mess- (*LT*) in das Roboter-Koordinatensystem (*R*). Gleichzeitig wird auch die Translation zwischen dem Messpunkt (*P*) und dem Roboterflansch (*RF*) ${}^{P}t_{RF}$ geschätzt. Nähere Ausführungen zu dem Transformationsansatz sind HORVATH & NEUNER (2019) zu entnehmen. Die Transformation ist notwendig, um die beobachteten Posen ${}^{LT}T_{P}$ in das Robotersystem zu überführen und einen Korrekturwert ${}^{R}\delta t_{RF}$ zur Verfügung stellen zu können. Der Korrekturwert ${}^{R}\delta t_{RF}$ entspricht dem Systemausgang des KNN in der Trainingsphase. Als Eingangsgrößen werden vorerst, wie oben ausgeführt, die sechs Gelenksstellungen j_i verwendet.

Abb. 2: Vorgehensweise bei der Validierung des Positionskorrekturmodells

Für die Validierung des Ansatzes wird wie in Abbildung 2 dargestellt vorgegangen. Die KNN-Gewichte w_{lm} wurden bereits optimal in der Trainingsphase des Netzes geschätzt (siehe Abbildung 1). Auf dieser Grundlage kann für einen beliebigen Satz an Gelenksstellungen j_i die Positionskorrektur ${}^R \delta t_{RFpred}$ prädiziert und zur Roboterposition ${}^R t_{RF}$ hinzugefügt werden. Die Validierung erfolgt dann durch den Vergleich mit der transformierten Beobachtung ${}^R t_{RF,LT}$ und wird im Weiteren als die verbleibende Abweichung ${}^R \Delta t_{RF}$ bezeichnet.

3 Datenerfassung und Aufbereitung

Die Datenerfassung besteht aus zwei Messepochen. Einerseits werden Trainingsdaten benötigt, um das System Roboterarm zu identifizieren. Aufgrund der großen Datenmenge gestaltet sich diese Messepoche umfangreich. Eine möglichst automatische Datengewinnung ist dafür erforderlich. Andererseits soll eine unabhängige Messung zur Validierung des erstellten Modells erfolgen.



Abb. 3: Messaufbau zur Generierung der Trainingsdaten bestehend aus UR5 mit T-Probe und dem AT960

Der Roboterarm ist ein Universal-Robot UR5, der eine Reichweite von 850 mm und eine maximale Traglast von 5 kg aufweist. Die spezifizierte Wiederholgenauigkeit beträgt 0,1 mm. Als Messmittel werden ein Lasertracker Leica AT960 in Kombination mit einer T-Probe, die starr mit dem Roboterflansch verbunden ist, verwendet. In Abbildung 3 ist der Messaufbau zur Generierung der Trainingsdaten abgebildet.

Um Tausende Roboterposen generieren zu können, bedarf es eines möglichst automatisierten Messprozesses. Dafür sollen beliebige Roboterposen angefahren werden und die Sichtverbindung zum Lasertracker darf nicht verloren gehen. Die Problematik dabei ist, ob eine Roboterpose in Bezug zu seiner eigenen Geometrie und in weiterer Folge zu den tatsächlichen Begebenheiten und Adaptionen (Montagetisch, Endeffektor) realisierbar ist. Ein zweiter Punkt ist die Aneinanderreihung der einzelnen Roboterposen. Es muss gewährleistet sein, dass die Folgepose erreichbar ist und der Roboterarm entlang seiner Trajektorie nicht mit sich selbst oder den Adaptionen kollidiert. Dafür bedarf es an CAD-Modellen der Adaptionen und einer Kollisionsdetektion – das Softwarepaket RoboDK wurde verwendet. Für die Ansteuerung des Roboterarms und die Datenaufzeichnung wurde das Robot Operating Systems (ROS) genutzt. Die Roboterposen wurden angefahren, die Messungen erfolgten statisch.

Für den Trainingsdatensatz konnten von den 8.000 geplanten Roboterposen nur rund 6.650 verwendet werden. Ein Großteil ging durch die fehlende Sichtverbindung zwischen T-Probe und Lasertracker verloren. Weiters wurden im Zuge der Datenaufbereitung und Ausreißerelimination Roboterpositionen entfernt. Die Transformationspunkte werden aus der Gesamtdatenmenge entnommen. Auf Basis von 50 Transformationspunkten werden die neun Parameter (${}^{R}T_{LT}$, ${}^{P}t_{RF}$, siehe Abbildung 1) geschätzt, um in weiterer Folge die Korrekturwerte ${}^{R}\delta t_{RF}$ zu berechnen.

Der Validierungsdatensatz wurde zwei Monate später gemessen. Dafür wird zwar dieselbe Messmethode verwendet, jedoch die Aufnahmegeometrie verändert. Für die Validierung stehen nach Abzug der 30 Transformationspunkte rund 200 Roboterposen zur Verfügung. Außerdem wurde anhand von sechs Gelenksstellungskombinationen die Anfahrt der korrigierten Roboterpositionen getestet. Die dafür gewählten Roboterpositionen befanden sich in der Roboter x-Ebene (siehe Abbildung 3) und auf eine radiale Variation wurde geachtet.

4 Erstellung und Validierung des Positionskorrekturmodells

Bei dem Positionskorrekturmodell handelt es sich um ein zweistufiges Verfahren, wie in Kapitel 2.3 bereits erläutert. Im ersten Schritt muss die Transformation aus Abbildung 1 bestimmt werden, um Positionsabweichungen ${}^{R}\delta t_{RF}$ ermitteln zu können. Die resultierenden Positionsabweichungen der Trainingsdaten aus der ersten Messepoche sind in der Abbildungen 4 (hellgraue Linie) erkennbar.

Ziel der Modellierung mit dem KNN ist es, eine gute Generalisierungs- und Prädiktionsfähigkeit des Modells zu erreichen. Eine Aussage darüber kann auf Basis eines Testdatensatzes getroffen werden. Deswegen werden 15 % der Daten vor dem Training beiseitegelegt und von der Trainingsphase ausgeschlossen. Bevor das Training des KNNs erfolgen kann, muss definiert werden, wie viele Parameter in wie vielen verdeckten Schichten des Netzes benötigt werden. In Anlehnung an das universelle Approximationstheorem (HORNIK 1989) beschränken wir uns auf die Wahl einer verdeckten Schicht. Die Bestimmung der Anzahl der Parameter in dieser Schicht erfolgt mittels einer Kreuzvalidierung auf Basis der Trainingsdaten. Um eine sinnvolle Modellstruktur in Abhängigkeit der Datenlänge zu bestimmen, wird Widrows Heuristik (HEUNECKE et al. 2013, S. 442) herangezogen. Bei einer Trainingsdatenmenge von 5.600 Datenpaaren und einer 5%igen Prädiktionsabweichung werden 29 verdeckte Knoten als maximale sinnvolle Anzahl ermittelt. Die Modellselektion durch die Kreuzvalidierung hat ebenfalls einen minimalen Validierungsfehler für eine Struktur mit 29 Knoten ergeben.

Das Training erfolgt auf Basis dieser gewählten Modellstruktur. Um keine lokale Lösung zu generieren, werden verschiedene Parameterinitialisierungen gerechnet. Die Initialisierung, die zur kleinsten mittleren Abweichung bezüglich der Testdaten führt, wird in weiterer Folge verwendet. Nach einer zuvor festgelegten Iterationsanzahl wurde das Training für abgeschlossen erklärt. Das Netz wurde auf Basis der Daten aus der ersten Messepoche und aller getroffener Spezifikationen trainiert und ist Grundlage für die unabhängige Validierung mit
den Daten aus der zweiten Messepoche. In Abbildung 4 ist ein repräsentativer Ausschnitt der erzielten Anpassung des trainierten Netzes an die Trainings- sowie an die Testdaten gezeigt (vgl. dunkelgraue Linie). Es ist keine schlechtere Adaption für die am Training noch nicht beteiligten Testdaten feststellbar. Aufgrund dieser guten Generalisierung kann geschlossen werden, dass die KNN-Modellierung hinreichend ist.



Abb. 4: Die Anpassung der KNN-Prädiktion ${}^{R}\delta t_{RF_{pred}}$ an die ursprünglichen Positionskorrekturen ${}^{R}\delta t_{RF}$ ist ausschnitthaft für die Trainings- sowie auch die Testdaten gezeigt. Die Ähnlichkeit der prädizierten Korrekturen zwischen Training und Test lässt auf eine gute Generalisierung schließen. Die Achskomponenten beziehen sich auf das Roboter-Basis-Koordinatensystem in Abbildung 3.

Der Unterschied der bereits erfolgten Validierung auf Basis der Testdaten (Abbildung 4) zu der folgenden Validierung liegt darin, dass nun das gesamte Positionskorrekturmodell inklusive der Transformation getestet wird. Dafür wurde im Zuge der zweiten Messepoche ein Datensatz bestehend aus 221 Roboterposen generiert. Die sich daraus ergebenden Unterschiede im Messaufbau, in der Atmosphäre, im Aufwärmverhalten des Roboterarms, etc. haben einen Einfluss auf beide Methodenteile. Wird trotz dieser veränderten Umstände eine gute Prädiktion erzielt, spricht dies für die Generalisierungsfähigkeit des KNNs und den Korrekturansatz.

Die prädizierten Positionskorrekturen der 221 beliebigen Roboterpositionen aus der zweiten Messepoche sind in Abbildung 5 (strich-punktierte Linie) dargestellt. Im Idealfall (kein Rauschen ist in den Daten vorhanden und alle beeinflussenden Größen wurden berücksichtigt) sollten sich die prädizierten Korrekturen ^R $\delta t_{RF_{pred}}$ den gemessenen Abweichungen ^R δt_{RF} anpassen und deren Differenz ^R Δt_{RF} gegen Null gehen. Bei der verbleibenden Abweichung

 ${}^{R}\Delta t_{RF}$ handelt es sich um die Differenz zwischen der transformierten Lasertracker-Messung und der korrigierten Roboterposition (${}^{R}\Delta t_{RF} = {}^{R}t_{RF,LT} - ({}^{R}t_{RF} + {}^{R}\delta t_{RF_{pred}})$), siehe Abbildung 2. Die x- und y-Komponenten im Roboter-Basis-Koordinatensystem (siehe Abbildung 3) zeigen eine bessere Adaption an die gemessenen Abweichungen ${}^{R}\delta t_{RF}$ als die z-Komponente. Insbesondere im Bereich um Punktnummer 175 ist eine gute Prädiktion zu erkennen. Die Mittelwerte der Streuungen sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Abweichungen der Roboterposition von der transformierten und gemessenen Position ${}^{R}\delta t_{RF}$ streuen in den einzelnen Achsrichtungen im Mittel um 0,2 mm. Durch die Positionskorrektur erfolgt eine Verminderung dieser Abweichungen ${}^{R}\delta t_{RF}$ von 15 % bis 40 %. Bezogen auf die Norm der mittleren Streuung kann eine Verbesserung um 25 % erzielt werden.



Abb. 5: Validierung des trainierten Netzes mit randomisierten Roboterposen aus der zweiten Messepoche. Es wird die Positionskorrektur bzw. die ursprüngliche Positionsabweichung ${}^{R}\delta t_{RF}$, die Prädiktion des trainierten Netzes ${}^{R}\delta t_{RF_{pred}}$ sowie die verbleibende Abweichung ${}^{R}\Delta t_{RF}$ gezeigt.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der ursprünglichen Abweichungen ${}^{R}\delta t_{RF}$ den Abweichungen ${}^{R}\Delta t_{RF}$ nach Anbringung der Positionskorrektur für die Validierungsdaten aus der zweiten Messepoche (Abbildung 5)

Standardabweichungen	x	у	Z	Norm
$\sigma_{R} \delta t_{RF}$	0,22 mm	0,22 mm	0,26 mm	0,41 mm
$\sigma_{R_{\Delta t_{RF}}}$	0,13 mm	0,18 mm	0,22 mm	0,31 mm

Testweise wurde versucht, die prädizierte Korrektur ${}^{R}\delta t_{RF_{pred}}$ an die Roboterpose anzubringen und den Roboterarm diese anfahren zu lassen. Dies entspricht de facto einer Anwendung des KNN-basierten Kalibriermodells auf neu angefahrene Posen. In Abbildung 6 sind die prädizierten Korrekturen ${}^{R}\delta t_{RF_{pred}}$ sowie die verbleibende Abweichung ${}^{R}\Delta t_{RF}$ der sechs angefahrenen Roboterpositionen dargestellt. Wie sich erkennen lässt, belaufen sich diese noch vorhandenen Abweichungen ${}^{R}\Delta t_{RF}$ auf maximal $\pm 0,5$ mm bei prädizierten Korrekturen ${}^{R}\delta t_{RF_{pred}}$ von bis zu 0,5 mm. Es zeigt sich für diese geringe Punktanzahl eine Verbesserung auf das Niveau der spezifizierten Wiederholgenauigkeit des UR5, ausgenommen ist die x-Koordinate des ersten Punktes (${}^{R}\Delta t_{RF,x1} = -0,15$ mm). Diese Ergebnisse (Abbildung 6) zeigen deutlichere Verbesserungen im Vergleich zu den randomisierten Roboterpositionen aus Abbildung 5, obwohl im Anfahrtest noch zusätzlich ein Anfahrfehler des Roboterarms hinzukommt.

Das Ziel ist es, mit der vorgestellten Methode, bestehend aus Transformation und KNN, auch absolut die spezifizierte Wiederholgenauigkeit zu erreichen. Der Anfahrtest zeigt, dass dies für ausgewählte Roboterpositionen nahezu zutreffend ist, wobei die Aussagekraft dieses Tests durch eine größere Datenanzahl gestützt gehört. Die Streuung der Abweichungen in Tabelle 2 deutet darauf hin, dass dieses Ziel noch nicht erreicht wird. Die Modellierung des Systems Roboterarm basiert im Moment nur auf den Gelenksstellungen. Diese Zuordnung der Positionsfehler zu den einzelnen Gelenksstellungen erklären die Abweichungen ^R δt_{RF} zu einem Viertel. Es müssen weitere Einflussgrößen im Modell berücksichtigt werden, damit eine Differenzierung zwischen Positions-Fehleranteilen, verursacht durch unterschiedliche Einflussgrößen, erreicht und die Prädiktionsgüte verbessert wird. Eine erste Erweiterung wird die Berücksichtigung von Endeffektor-Lasten darstellen.



Abb. 6: Anfahrtest; Es werden die prädizierten Positionskorrekturen ${}^{R}\delta t_{RF_{pred}}$ sowie die verbleibenden Abweichungen ${}^{R}\Delta t_{RF}$, nachdem die korrigierten Positionen angefahren wurden, gezeigt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Roboterarme sind auch in der Ingenieurgeodäsie ein hilfreiches Werkzeug für vielfältige Einsatzzwecke. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Systemidentifikation eines Roboterarms auf Basis eines nichtparametrischen Ansatzes. Ziel ist es, ein Positionskorrekturmodell zu erstellen, das eine geringe absolute Positions-Unsicherheit erzielt.

Die Ergebnisse zeigen, dass das vereinfachte Modell mit den sechs Gelenksstellungen als Einflussgrößen nur eine 25% ige Verbesserung der Abweichungen zwischen Roboterposition und gemessener Roboterposition ermöglicht, d. h. ein Viertel der Residuen können aufgrund der Zuordnung zu den Gelenksstellungen erklärt werden. Der Anfahrtest weist ein deutlicheres Ergebnis auf. Die Abweichungen, nachdem die sechs korrigierten Positionen angefahren wurden, bewegen sich im Bereich der spezifizierten Positionswiederholgenauigkeit. Ziel zukünftiger Entwicklungen wird es sein, den Anteil der Residuen zu verkleinern, indem noch nicht berücksichtigte Einflussgrößen, wie die Endeffektor-Lasten, hinzugenommen werden und Wechselwirkungen zwischen Transformation und KNN zu analysieren.

Literatur

- HERMANN, C., HENNES, M., JURETZKO, M., SCHNEIDER, M. & MUNZINGER, C. (2010): Positioning and Synchronization of Industrial Robots. In: 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), IEEE Xplore, S. 436-440
- HEUNECKE, O., KUHLMANN, H., WELSCH, W., EICHHORN, A. & NEUNER, H. (2013): Handbuch der Ingenieurgeodäsie – Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. 2. Auflage, Wichmann, Berlin/Offenbach
- HORNIK, K., STINCHCOMBE, M. & WHITE, H. (1989): Multilayer feedforward networks are universal approximators. In: Neural Networks 2(1989)5, S. 359-366
- HORVATH, S. & NEUNER, H. (2019): System identification of a robot arm with extended Kalman filter and artificial neural networks. In: Journal of Applied Geodesy 2019, 13(2), S. 135-150
- MENGE, F. (2003): Zur Kalibrierung der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen für die hochpräzise Positionsbestimmung. Dissertation, Hannover
- MOORING, B., ROTH, Z. & DRIELS, M. (1991): Fundamentals of Manipulator Calibration. J. Wiley, New York

3D Hydromapper, ein innovatives Mobile Mapping System zur Erfassung von Verkehrswasserbauwerken

Christian HESSE, Karsten HOLSTE und Ingo NEUMANN

1 Einleitung

1.1 Inspektion von Verkehrswasserbauwerken

Der Zustand der Straßenverkehrsinfrastruktur steht nicht nur in Deutschland seit vielen Jahren im Fokus von Politik und Öffentlichkeit. Weit weniger Beachtung fanden bisher Infrastrukturbauwerke im Bereich der Wasserstraßen und küstennahen Häfen. Hierzu zählen insbesondere Kaianlagen, Schleusen und Terminals für den Umschlag von Massen- und Stückgütern. Insgesamt gibt es in Deutschland rd. 3 000 km Uferwände in Häfen und an Wasserstraßen, deren Funktionsfähigkeit dauerhaft sicherzustellen ist.

Das Bruttoanlagevermögen der Wasserstraßeninfrastruktur des Bundes beträgt ca. 50 Mrd. \in , 30 % der Anlagen sind älter als 100 Jahre und insgesamt 80 % der Anlagen älter als 50 Jahre. Bei einer theoretischen Lebensdauer von rd. 80 – 100 Jahren ist daher davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren aufgrund von Ermüdungs- und Alterungserscheinungen eine massiv wachsende Anzahl von Bauwerken einer intensiveren Überwachung zugeführt werden muss. Dies ist erforderlich, damit betriebliche Einschränkungen minimiert werden und der Bauwerksbetrieb sichergestellt werden kann. Der Bundesverkehrswegeplan 2030 sieht rd. 70 % der Gesamtinvestitionen für den Erhalt und den Ersatz von Infrastruktur an Wasserstraßen vor.

Im Gegensatz zu Straßen und Brücken existieren bei den o. g. Kaianlagen etc. zwei Besonderheiten. Zum einen können mögliche Schäden aufgrund des vergleichsweise hohen Sedimentgehaltes in norddeutschen Gewässern weder optisch noch flächenhaft erfasst werden, sondern müssen mit Hilfe von Tauchern an definierten Querschnitten exemplarisch für das gesamte Bauwerk untersucht werden. Zum anderen kann ein schadensbedingter Ausfall dieser Bauwerke aufgrund ihrer Alleinstellung in aller Regel nicht kompensiert werden und führt zum Totalausfall der benötigten Infrastruktur.

Diese Konsequenzen wiegen im Vergleich zu Brücken ungleich schwerer und erfordern erhöhte Anstrengungen bei der Inspektion und Prüfung dieser Infrastruktur. Zu diesem Zweck wurde das vom Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI) seit dem Jahr 2019 geförderte 3D HydroMapper Konsortium gegründet, in dem die Ingenieurbüros Dr. Hesse und Partner und WKC Hamburg GmbH, das Geodätische Institut der Leibniz Universität Hannover, das Fraunhofer IGP aus Rostock sowie die beiden großen Infrastrukturbetreiber Niedersachsen Ports und die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) zusammengeschlossen sind. In diesem höchst innovativen Vorhaben sollen bis Ende 2021 nicht nur eine Sensor- und Trägerplattform für die hochauflösende Erfassung über und unter Wasser, sondern auch verschiedene Verfahren für ein automatisiertes qualitätsoptimiertes Routing mit aktiver Sensorausrichtung entwickelt werden. Im Anschluss an die Datenerfassung soll eine Erkennung von Bauwerksschäden mittels KI-Verfahren im Rahmen von Big-Data-Ansätzen und eine automatische Ableitung von parametrischen intelligenten Bauwerksmodellen (BIM) realisiert werden, um die nachfolgende Nutzung der Daten innerhalb der IT-Anwendungen der Infrastrukturbetreiber zu ermöglichen.

Als wesentliche Ergebnisse des Vorhabens soll der Stand der Technik im Hinblick auf folgende Parameter verbessert werden:

- Erhöhung von Auflösung und Genauigkeit der 3D-Daten auf wenige Zentimeter
- Reduktion der Ermittlungszeit eines Bauwerkszustandes von Wochen auf Stunden
- Verbesserung der Vollständigkeit der Datenbasis auf 100 %
- Direkte Ableitung statischer Kenngrößen aus den 3D-Daten

Im Rahmen dieses Papers soll schwerpunktmäßig auf die sensorischen Innovationen sowie auf die erstmals mögliche direkte Nutzung vollständiger Varianzinformationen aus dem Messprozess zur Ableitung strukturmechanischer Größen eingegangen werden.

Für die vertiefte Betrachtung der Ableitung von parametrischen Bauwerksmodellen sei auf HESSE et.al. (2019b) verwiesen.

1.2 Verfügbare Systeme zur flächenhaften Objekterfassung

Die statische, dynamische oder kinematische Erfassung von Objekten mittels flächenhaft messender Verfahren, meist auf Basis von Lasersensoren, ist eine in der Geodäsie verbreitete Aufgabe. Insbesondere im Bereich der topographischen Erfassung, des Hochbaus sowie des Straßen- und Verkehrswegebaus an Land existieren hierfür bereits eine Vielzahl von Sensoren, die eine große Bandbreite an Objektpunktgenauigkeiten und Produktivitätsniveaus abbilden.

Eine Auswahl der momentan am Markt verfügbaren Systeme ohne Beschränkung auf einzelne Hersteller ist in Abb.5 dargestellt.

Während für landgestützte Messaufgaben ausreichend Alternativen für die verschiedenen Anforderungen und Umgebungsbedingungen zur Verfügung stehen, sind im Bereich der Unterwasseraufnahmen so gut wie keine standardisierten Sensorsysteme am Markt verfügbar, die den Anforderungen der Bauwerksinspektion genügen würden. Erste Lösungen seit 2010 zeigten durchaus vielversprechende Ergebnisse (HESSE et.al. 2010), wurden aber bisher nicht auf das notwendige Genauigkeitsniveau weiterentwickelt.

An genau dieser Stelle setzt das vorliegende Entwicklungsvorhaben 3D HydroMapper an, welches nicht nur die flächenhafte hybride Erfassung über und unter Wasser, sondern auch die Qualität der erzeugten Punktwolken und 3D-Modelle auf ein signifikant höheres Niveau heben soll, als dies von bekannten Verfahren erzielbar ist. Zudem wird angestrebt, eine möglichst weitgehende Automation durch den Einsatz moderner KI-Verfahren für die Detektion von Schäden und die automatische Ableitung von intelligenten Bauwerksmodellen zu erreichen. Durch die Verbesserung der Messdatenqualität soll zudem die Weiterverarbeitung für statische und lebensdauerverlängernde Zwecke der Konstruktionen ermöglicht werden.



Abb.5: Gängige Systeme zur flächenhaften dreidimensionalen Objekterfassung

2 Das 3D HydroMapper System

2.1 Konzept der Sensor- und Trägerplattform

Für die vollständige Erfassung von Wasserbauwerken ist die Kenntnis der über und unter Wasser liegenden Bauwerksteile gleichermaßen erforderlich. Idealerweise erfolgt diese flächenhaft in dreidimensionaler Weise, so dass nicht nur semantische Informationen über den Zustand des jeweiligen Bauteils, sondern auch seine konkrete geometrische Form, Abweichungen von der Soll-Form sowie seine Lage und Ausrichtung im Raum für spätere Vergleichsmessungen bestimmt werden können.

Für die Verbesserung der Datenqualität im Hinblick auf Vollständigkeit, ausgedrückt durch den mittleren Punktabstand am Objekt, die Genauigkeit der erfassten 3D-Daten in Form von Standardabweichungen sowie die Zuverlässigkeit im Hinblick auf Wiederholbedingungen zur Feststellung von Deformationen sind eine Reihe von Parametern zu beachten.

Bei der Messung mittels hydroakustischer Verfahren unter Wasser führen schlechte Aufnahmekonfigurationen, meist hervorgerufen durch große Objektabstände und schleifende Auftreffwinkel des Signals auf die Bauteiloberflächen, sehr viel stärker zu systematischen Messabweichungen und erhöhtem Messrauschen der Punktwolke als dies von Laserscannern zu erwarten ist.



Abb. 6: Systemaufbau der 3D HydroMapper Plattform

Aus diesem Grund ist nicht nur ein möglichst geringer Messabstand zum Objekt, sondern auch eine optimale, in diesem Fall orthogonale, Sensorausrichtung für hochwertige und auf die Schadenserkennung optimierte Erfassungen anzustreben. Als eine der Besonderheiten des HydroMapper Systems ist die adaptive Ausrichtung aller bildgebenden Sensoren in Bezug zum Aufnahmeobjekt zu nennen, die aktuell auch Gegenstand einer Patentanmeldung ist. Hierdurch wird die gesamte Sensorplattform mit hoher Dynamik stets so ausgerichtet, dass Laserscanner und hydroakustischer Scanner immer orthogonal zur zu messenden Objektoberfläche weisen. Umfangreiche Tests haben bestätigt, dass sich die Datenqualität hierdurch signifikant verbessern lässt.

Abbildung 2 zeigt den grundsätzlichen Systemaufbau von Träger- und Sensorplattform des 3D HydroMappers. Es ist zu erkennen, dass nicht nur die schiffsgetragene Sensorplattform, sondern auch eine an Land befindliche zielverfolgende Totalstation sowie ein optional zur Vervollständigung der Aufnahme einsetzbares UAV Teil des Gesamtkonzeptes sind.

Das besondere Umfeld im Bereich der Hafenbauwerke ist geprägt durch starke bis sehr starke Abschattungen der verfügbaren GNSS-Systeme. Dies wird in erster Linie durch die vergleichsweise große Höhe von Kaimauern im tidebeeinflussten Bereich hervorgerufen, wo Kaimauerhöhen in Bezug auf die Wasseroberfläche von 5-10 m eine zu erwartende Größenordnung darstellen. Verbunden mit der Forderung nach möglichst geringem Messabstand und den im Hafenbereich häufig anzutreffenden Krananlagen bzw. Containerbrücken ergibt sich die Notwendigkeit einer zusätzlichen Stützung der Trajektorienerfassung mittels eines unabhängigen und driftfreien Messverfahrens additiv zur vorhandenen Inertialsensorik.

2.2 Praktische Realisierung

Für die erste Realisierung eines Prototyps des HydroMapper Systems wurde die Fertigung einer speziellen Schwimmplattform bei einer darauf spezialisierten Werft in Auftrag gegeben, die auf Einsätze in küstennahen Bereichen sowie auf Binnenwasserstraßen mit Wellenhöhen von bis zu 0,5 m ausgelegt ist.

Diese Version 1 besitzt nicht nur einen konventionellen Antrieb, sondern auch zwei elektrische Antriebe, durch die selbst bei sehr geringer Fahrt eine optimale Kontrolle über die Ausrichtung der Messplattform möglich ist.

Abb. 7 zeigt die erste Version der HydroMapper-Plattform bei einem Einsatz im Hamburger Hafen. Zu erkennen ist der Profilscanner vom Typ Imager 9012 von Z+F sowie das Dual-GNSS-Heading-System, welches in Verbindung mit einer hochwertigen IMU für die Navigation der Plattform sorgt. Additiv kann, wie bereits erwähnt, auch eine MS60 von Leica zur Stützung der Trajektorie mittels 360 Grad Prisma auf der Plattform genutzt werden, um Bereiche mit GNSS-Signalabschattungen hochgenau zu überbrücken.

Für die Erfassung von unter Wasser liegenden Objektteilen in unterschiedlichen Tiefen kann die Sensorplattform zudem mit Hilfe eines hochdynamischen Hexapodsystems sowie eines ausfahrbaren Messrohrgestänges nicht nur in der Ausrichtung, sondern auch in der Höhe variiert werden. Durch die Linearantriebe des Hexapods können die Krängungs- und Driftbewegungen optimal kompensiert werden. Zusätzlich kann der Kopf des Hexapods um die Hochachse angepasst werden, um schräg zur Route orientierte Flächen - wie z. B. Spundwandstege – verbessert aufnehmen zu können.



Abb. 7: Einsatz des HydroMapper Prototyps Version 1 im Hamburger Hafen

Zusätzlich zum aktiven Ausgleich von Bewegungen der Plattform sind auch zwei verstellbare Schwimmer in die Plattform integriert, die für eine zusätzliche Stabilisierung der Messplattform während der Objektaufnahme sorgen.

Erste Vergleichsfahrten haben gezeigt, dass mit dieser Plattformkonstruktion wesentlich stabilere Fahrten als mit den in der Hydrographie üblichen Bootseinheiten bei zugleich wesentlich geringerem Tiefgang und geringerem Einsatzgewicht möglich sind.

2.3 Hochgenaue Synchronisation von GNSS/IMU und Totalstation

Als besondere Herausforderung stellt sich bei kinematischen und dynamischen Anwendungen die Synchronisation von Subsystemen auf der Messplattform auf der einen Seite sowie mit externen Sensoren wie automatisch zielverfolgenden Totalstationen auf der anderen Seite heraus, wenn es auf eine hohe Genauigkeit der zeitlichen Synchronisierung aller Messdaten ankommt.



Abb. 8: Synchronisierung einer Leica MS60 mit dem Sensorsystem der Messplattform

Der Grund für die notwendige Synchronisierung liegt in der bereits genannten Abschattung von GNSS-Signalen im Hafenbereich durch hohe Kaimauern und Krananlagen. Da die GNSS-Daten nicht nur für die Positionierung der Scandaten, sondern auch für die aktive Navigation benötigt werden, ist eine Lösung erforderlich, bei der die Daten des Tachymeters auch in nahezu Echtzeit auf der eigentlichen Messplattform verfügbar sind.

Hierzu wurde zum einen eine Echtzeitkomponente entwickelt, welche in der Lage ist, die verschiedenen Zeitnormale der Leica Multistation mit der GPS-Zeit innerhalb eines Latenzbandes im unteren Millisekundenbereich zu synchronisieren. Dieser Echtzeitrechner nutzt ein verbreitetes Echtzeitbetriebssystem für die notwendigen Prozesse und einen STM Nucleo embedded Rechner als Hardwareplattform. Die Zeiterfassung samt PPS-Puls wird über ein uBlox Neo Modul vorgenommen, welches an den embedded Rechner angeschlossen ist.

Um die vom Tachymeter erzeugten Positionsdaten auch auf der Messplattform nutzen zu können, wurde ein Cloud-Relay entwickelt, welches der Plattform die Daten in Form vom NMEA-Messages zur Verfügung stellt, so dass auch die Schiffsplattform während der GNSS-Ausfallzeiten nicht nur auf die Positionsbestimmung und Navigation mittels IMU angewiesen ist.

Erste Testmessungen haben gezeigt, dass die Genauigkeit der Tachymetermessung überwiegend besser als die per GNSS erfassten Positionen ist und dass das für die 3D-Erfassung notwendige Genauigkeitsniveau im unteren Zentimeterbereich in nahezu allen Umgebungen erreichbar ist. Durch die in Echtzeit verfügbaren Positionsdaten ergibt sich für die Bauwerksinspektion, aber insbesondere auch für die Bauüberwachung z. B. von tiefen Baugruben die Möglichkeit, Reinigungs- und Betonagevorgänge von Unterwasserbetonsohlen oder Verankerungsarbeiten zu kontrollieren und Mängel abstellen zu lassen, ohne dass massive Kosten oder Verzögerungen durch das Prinzip "trial and error" entstehen.

2.4 Daten-Backend und Bereitstellung an Nutzer

Eines der größten Hindernisse bei der Nutzung von 3D-Scandaten für Kundenanwendungen ist die Nutzung der 3D-Daten durch Kunden selbst, da vielfach noch die notwendigen Voraussetzungen im Hinblick auf Hardware und Software fehlen, um mit Massendaten im Terabyte-Bereich arbeiten zu können.



Abb. 9: Workflow vom Daten-Backend zu Kundenanwendungen

Aus diesem Grund wurde im Rahmen des HydroMapper Projektes auch eine Web-basierte Softwareplattform geschaffen (Abb. 9).

Über diese Plattform können Kunden sämtliche Messdaten, aufbereitete Ergebnisse in Form von georeferenzierten und kolorierten Punktwolken sowie finale Nutzerdaten wie Schadenspläne und Prüfberichte generiert und on-demand zur Verfügung gestellt werden.

Dies schließt insbesondere auch die nachfolgend beschriebenen Berechnungen ein, die für die bautechnische Bewertung von Hafenanlagen und großen Bauwerken hilfreich sind.

2.5 Verwertungsmöglichkeiten für die Bauwerksinspektion

Durch die konsequente Digitalisierung der Bauwerksprüfung ergeben sich nicht nur enorme Effizienzgewinne im Prüf- und Dokumentationsprozess, sondern auch in der ggf. nachfol-

genden Planungs- und Ausführungsphase sowie insbesondere im Betrieb. Mit dem in Abschnitt 2.4 beschriebenen Daten-Backend lassen sich eine Vielzahl von Nutzungen realisieren. So können die im Rahmen der Bauwerksinspektion festgestellten Schäden unter Verwendung von HDR-Panoramen dargestellt werden, um eine möglichst plastische und situationsbezogene Schadensdarstellung zu erzielen. Der Bauwerkszustand ist somit standortunabhängig abrufbar und kann durch die Darstellung des Gesamtbauwerkes auch von fachfremden Beteiligten nachvollzogen werden.



Abb. 6: OPEN BIM - Nutzung der Schadensdaten im Webtool (links) und Messergebnisse einer Spundwand (rechts)

Im Planungsprozess werden die im Rahmen der Inspektion aufgenommenen Daten als Grundlage genutzt, um den Entwurf vollständig und transparent anfertigen zu können (Abbildung 6 links). Für die sich anschließende Ausführungsplanung, die in Deutschland noch regelmäßig an die ausführenden Unternehmen vergeben wird, können die Bauwerksdaten dann im Sinne einer OPEN BIM-Lösung ebenfalls genutzt werden.

Somit kann sich durch den 3D HydroMapper eine Umkehr der derzeit üblichen Praxis ergeben: Im Rahmen der Inspektion werden die vollständigen Bauwerksdaten aufgenommen und mit der eindeutigen Befundung die weiteren Schritte durchgeführt. Die sonst übliche Mehrfachaufnahme mit unterschiedlichen Ergebnissen und Empfehlungen kann damit vermieden werden. Die Projektbeteiligten nehmen sich aus dem Information Model die Daten, die für die Realisierung der jeweiligen Aufgabe gerade benötigt werden.

2.6 Ableitung strukturmechanischer Modelle

Besonders häufig kommen bei Kaianlagen Stahlspundwände zum Einsatz (Abbildung 6 rechts). Im Gegensatz zu Straßenbrücken findet bei den Spundwänden eine Abnutzung der Konstruktion durch Korrosion statt. Durch die Verwendung von größeren Blechdicken als statisch erforderlich kann die innerhalb der Lebensdauer auftretende Korrosion kompensiert werden. Am Ende der Lebensdauer ist die Korrosion jedoch häufig so weit fortgeschritten, dass die Konstruktion sich relativ stark verformt oder sogar Löcher entstehen und der hinter der Spundwand befindliche Boden in das Hafenbecken auslaufen kann.

Durch Nachrechnungen soll dann geklärt werden, in welchem Standsicherheitszustand sich die Spundwand befindet und welche Maßnahmen zur Gewährleistung des sicheren Hafenbetriebs erforderlich sind. Diese Nachrechnungen sind jedoch von erheblichen Unwägbarkeiten geprägt, weil aufgrund der nur stichprobenhaft vorhandenen Grundlagen diverse Annahmen wie Erddruck- und Wasserdruckansätze getroffen werden müssen. Dadurch ergeben sich dann durchaus Berechnungsergebnisse, die nicht zwangsläufig der Realität entsprechen, sondern weit auf der sicheren oder unsicheren Seite liegen können.

Neben der sehr hohen Auflösung der erfassten 3D-Daten stellt auch die kurzfristige Verfügbarkeit des vollständigen Bauwerkszustandes einen zentralen Kundennutzen dar.

Durch die vorhandenen Messdaten ist die Verformung der Konstruktion bekannt, sodass unter Verwendung der Profilwiderstandswerte die Ausnutzungen und Einwirkungen auf die Konstruktion ermittelt werden können. Die in den o.g. Nachrechnungen genannten Annahmen können somit überprüft und verifiziert werden. Somit ergibt sich die Möglichkeit, mit kalibrierten Tragwerksmodellen Berechnungen für Grenzzustände der Verkehrswasserbauwerke realitätsnah durchzuführen.

Die im Brückenbau durchaus üblichen Probebelastungen zur Verifizierung des Tragverhaltens sind bei den Verkehrswasserbauwerken durch die ständige Einwirkung der Bodenkomponente daher durchaus vermeidbar.



Abb. 7: Auswertung von Deformationsmessungen an einem Spundwandbauwerk

Erste Tests haben gezeigt, dass durch das innovative 3D HydroMapper-System Wiederholgenauigkeiten im Bereich von 2–3 Zentimetern auch unter Wasser erzielbar sind, aus denen zusätzlich Änderungen von Bauwerkszustand oder Bauwerksgeometrie ermittelt werden können. Durch die noch wesentlich höheren inneren Genauigkeiten der Messdaten kann der statische Zustand des Bauwerkes zuverlässig abgeleitet werden, sodass sich insbesondere im Hinblick auf die durch theoretische Nachrechnungen prognostizierte Restlebensdauer von Verkehrswasserbauwerken ein wesentlich genauerer Ansatz ergibt. Beanspruchungen und Einwirkungen können basierend auf den realen Messdaten mit Hilfe robuster und statistisch fundierter B-Spline-Approximationsverfahren geschätzt werden (Abbildung 7). Die Genauigkeiten bzw. Konfidenzintervalle der statischen Größen werden dabei streng aus dem stochastischen Modell der Messungen und des Approximationsprozesses abgeleitet.

Literatur

- BMVI (2013): Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur, "Hybride 3D-Bestandsdatenerfassung und modellgestützte Prüfung von Verkehrswasserbauwerken für ein nachhaltiges Infrastruktur-Lifecycle-Management - 3D HydroMapper" Berlin https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/KI-Projekte/3d-hydromapper.html. (02.11.2019)
- EHM, M. & HESSE, C. (2012): Entwicklung eines kinematischen Laserscansystems f
 ür Anwendungen im Schiffbau. In: Tagungsband der Go-3D-Konferenz 2012 in Rostock, S. 31-36.
- HESSE, C., BÖDER, V., EHM, M. & SAUER, A. (2010): Kinematische TLS Messungen auf dem Vermessungsboot Level-A. Hamburger Forum für Geomatik 2010.
- HESSE, C., HOLSTE, K. & NEUMANN, I. (2019a): 3D HydroMapper, ein innovatives Über- und Unterwasserscansystem zur Bauwerksinspektion. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestri-sches Laserscanning 2019 (TLS 2019). DVW-Schriftenreihe, Wißner-Verlag, Augsburg, 2019.
- HESSE, C., HOLSTE, K., NEUMANN, I., HAKE, F., ALHATIB, H., GEIST, M., KNAACK, L. & SCHARR, C. (2019b): 3D HydroMapper – Automatisierte 3D-Bauwerksaufnahme und Schadenserkennung unter Wasser für die Bauwerksinspektion und das Building Information Modelling. Hydrographische Nachrichten, HN113, 06/2019, Deutsche Hydrographische Gesellschaft e.V., Rostock, 2019. ISSN: 1866-9204.
- HESSE, C. & VENNEGEERTS, H. (2014): Referenzierung kinematischer Laserscansysteme mit IMU und Tachymeter. In: DVW e.V. (Hrsg.): Multi-Sensor-Systeme – Bewegte Zukunftsfelder. Beiträge zum 138. DVW Seminar in Hamburg. DVW-Schriftenreihe, Bd. 75/2014, Wißner Verlag, Augsburg, 2014.

Gefördert durch:



Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Entwicklung eines Multi-Sensorsystems zur Georeferenzierung von hydrographischen Messdaten auf Binnengewässern

Annette SCHEIDER, Volker SCHWIEGER und Thomas BRÜGGEMANN

1 Motivation

Um Informationen über die Topographie des Gewässergrunds von Binnenwasserstraßen zu gewinnen (Bathymetrie), kommen zumeist Vermessungsschiffe zum Einsatz. Auf ihnen sind heutzutage oft sogenannte Fächerecholote installiert (engl. *Multibeam echosounder* – MBES), die in einer Messepoche ein Profil des Gewässerbetts quer zur Schiffslängsrichtung erfassen. Diese Messsysteme bestimmen die Wassertiefe durch Ermittlung der Laufzeit von Schallsignalen, welche von einem oder mehreren Transceivern (gekoppelten Sende- und Empfangseinheiten) ausgesendet werden (LURTON 2002).

Um aus den so erfassten Messdaten die Form des Gewässergrunds korrekt modellieren zu können, müssen die Position und die räumliche Orientierung der MBES-Transceiver zu jedem Messzeitpunkt verfügbar sein und eine ausreichende Genauigkeit aufweisen. Da sich dieser Sensor unter Wasser befindet, ist eine direkte Positionsbestimmung nur schlecht möglich. Stattdessen werden auf dem Schiff ein oder mehrere GNSS-Empfänger sowie ein Inertial Navigation System (INS) installiert. Sind die Positionen und, falls erforderlich, Einbauwinkel aller Sensoren in einem schiffsfesten Koordinatensystem x^B bekannt und werden von den Instrumenten zuverlässige Beobachtungsgrößen ausgegeben, so kann die Position des Referenzpunkts im MBES über eine dreidimensionale Koordinatentransformation jederzeit berechnet werden. Die Definition des Koordinatensystems folgt den Angaben in BRÜGGEMANN (2013). Damit wird eine Georeferenzierung der hydrographischen Messdaten erreicht. Diese Form der Georeferenzierung kann für jedes weitere hydrographische Messinstrument übertragen werden, dessen Referenzpunktkoordinaten im Schiffskoordinatensystem bestimmt sind.

Im offenen Gelände kann eine zuverlässige Positionslösung durch Berechnung einer präzisen differentiellen Echtzeit-GNSS-Lösung erreicht werden. Hindernisse wie Bauwerke, Bäume oder steile Hänge bewirken eine Verschlechterung der bestimmten Positionslösung oder gar Unterbrechungen im GNSS-Empfang. Auch Lücken im Mobilfunknetz sind als Problem zu betrachten, da in diesen Gebieten keine Referenzdaten zur Berechnung einer RTK-Lösung empfangen werden können. Da die Positionsgenauigkeit in diesem Fall oft mehrere Dezimeter oder schlechter beträgt, wird das Positionierungssystem zu einem Multi-Sensorsystem erweitert. Durch kombinierte Auswertung aller dabei erfassten Beobachtungsgrößen wird auch in kritischen Umgebungen permanent eine qualitätsgesicherte Lösung mit einer Genauigkeit von besser als 3 dm (Lage) bzw. 1 dm (Höhe) bereitgestellt. Somit kann auch bei nicht verfügbaren GNSS-Lösungen eine präzise Georeferenzierung der hydrographischen Messdaten stattfinden.

2 Messsystem

2.1 Aufbau des Multi-Sensorsystems

Das Vermessungsschiff stellt i. d. R. die Trägerplattform für ein hydrographisches Messsystem dar. Im hier betrachteten Fall erfolgte die Datenerfassung mit dem Peilschiff *Mercator* des WSA Duisburg-Rhein. Das im Folgenden beschriebene Multi-Sensorsystem (MSS) zur Positions- und Orientierungsbestimmung setzt sich, mit Ausnahme der MBES-Transceiver, aus den in Abb. 1 dargestellten Komponenten zusammen.



Abb. 1: Schematische Anordnung der einzelnen Komponenten des Multi-Sensorsystems zur Positions- und Orientierungsbestimmung und der Transceiver des Fächerlots, (SCHEIDER 2020).

Auf Vermessungsschiffen sind allgemein ein oder mehrere GNSS-Antennen (Mehrfrequenz-Empfänger) auf dem Dach bzw. an Masten angebracht. Die *Mercator* ist mit vier GNSS-Antennen ausgerüstet, von denen zwei Bestandteil eines GNSS-INS-gekoppelten Systems sind. Das INS bzw. die Motion Rotation Unit (MRU) selbst wird zur Bestimmung der räumlichen Orientierung eingesetzt. Durch die Koppelung mit den GNSS-Antennen kann vom gekoppelten System neben dem Roll- und dem Nickwinkel des Schiffs auch das Heading ausgegeben werden. Mittlerweile sind auch GNSS-INS-Systeme erhältlich, für die eine einzelne GNSS-Antenne ausreicht (GAIFFE et al. 2000). In diesem Fall werden INS mit faseroptischen Kreiseln (FOG) verbaut (z. B. iXBlue PHINS).

Neben den bereits an Bord befindlichen Bestandteilen des Multi-Sensorsystems werden weitere Komponenten ergänzt. Um die Geschwindigkeit des Multi-Sensorsystems redundant bestimmen zu können, wird der Einsatz eines Doppler Velocity Logs (DVL) getestet. Dieses Instrument bestimmt mithilfe von Schallsignalen die Geschwindigkeit über dem Gewässergrund, aber auch relativ zu umgebenden Wasserschichten. Das Messprinzip eines DVLs basiert auf der Nutzung des Doppler-Effekts und ist in JONG et al. (2002) beschrieben. Um auch dynamische Aspekte im Bewegungsverhalten des Schiffs beschreiben zu können, wurden zusätzliche Messeinheiten ins Schiff eingebaut, mit denen die Drehzahl der Propellerschrauben und ihre Ausrichtung relativ zur Schiffslängsachse abgegriffen werden kann. Da die *Mercator* zwei um 360° drehbare Ruderpropeller besitzt, wurden vier Messeinheiten installiert (BREITENFELD et al. 2015).

2.2 Beobachtungsgrößen

Die genannten Instrumente messen das Bewegungsverhalten des Vermessungsschiffs in zahlreichen Beobachtungsgrößen. Die erfassten Beobachtungsgrößen stellen dabei eine diskrete Abtastung des tatsächlichen Bewegungsprozesses zum Messzeitpunkt t_k dar. Die Gesamtheit aller zeitlichen Realisierungen einer einzelnen Beobachtungsgröße, d. h. der zeitliche Verlauf dieser Größe, wird als Zeitreihe angesehen. Die Abtastung erfolgt in einem vorgegebenen Zeitintervall Δt . Die einzelnen erfassten Beobachtungsgrößen sind in Tabelle **1** aufgeführt.

Beobachtungsgrößen	Symbol	Erfassender Sensor
Drehraten	ω^B_x , ω^B_y , ω^B_z	MRU
Geschwindigkeitskomponenten in Achsrich- tung des x^B -Systems	v^B_x , v^B_y , v^B_z	MRU, DVL
Geschwindigkeitskomponenten relativ zum Wasser	$v^B_{rel,x}$, $v^B_{rel,y}$, $v^B_{rel,z}$	DVL
Absolute Geschwindigkeit über Grund (Be- trag)	SOG ^B	GNSS-Empfänger
Hub	hv	MRU
Kurs über Grund	COG	GNSS-Empfänger
Orientierungswinkel (Roll, Pitch, Heading)	$\varphi, heta, \psi$	MRU, GNSS-Kompass
Position (Rechtswert, Hochwert, ellip. Höhe)	R^N, H^N, h^N	GNSS-Empfänger
Ausrichtung der Ruderpropeller (Steuerbords und Backbords)	δ_{SB} , δ_{BB}	Amperemeter / Messeinheit
Drehzahl der Ruderpropeller (Steuerbords und Backbords)	n_{SB}, n_{BB}	Amperemeter / Messeinheit

Tabelle 1: Beobachtungsgrößen im Multi-Sensorsystem (BREITENFELD et al. 2015)

In Bereichen ohne Sichthindernisse, die den Empfang von GNSS-Signalen be- bzw. verhindern, und ohne Mobilfunklöchern, die den Empfang von Korrekturdaten behindern, kann von den auf dem Schiff installierten GNSS-Empfängern eine kinematische Echtzeit-GNSS-Lösung (RTK) bestimmt werden. Hierzu werden Korrekturdaten des hochpräzisen Echtzeit Positionierungsservices (HEPS) des Referenzdatenservices *SAPOS* herangezogen.

Für jede der Beobachtungsgrößen wurde a-priori eine Genauigkeitsvorgabe definiert, die im Allgemeinen den Herstellerangaben entspricht. Für Beobachtungsgrößen ohne eine Genauigkeitsvorgabe wird ein Wert abgeschätzt.

3 Bereitstellung des Systemzustands

Um permanent die Verfügbarkeit einer qualitätsgesicherten Lösung zu gewährleisten und damit fehlende Beobachtungen zu kompensieren, wird der Zustand des Systems *Vermessungsschiff* mithilfe eines erweiterten Kalman Filters (EKF) geschätzt, der beispielsweise in RAMM (2008) oder in WENDEL (2011) vorgestellt wird. Der Systemzustand selbst wird mit 13 Zustandsgrößen beschrieben. Über ein Beobachtungsmodell wird der Zusammenhang zwischen Zustands- und Beobachtungsgrößen hergestellt.

Die Positionsänderung zwischen einer Messepoche t_k und einer nachfolgenden Epoche t_{k+1} in einem nordorientierten Navigationskoordinatensystem mit Rechtswert (R), Hochwert (H) und Höhe (h) wird durch

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{R}_{k+1}^{N} \\ \Delta \bar{H}_{k+1}^{N} \\ \Delta \bar{h}_{k+1}^{N} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{z} (\hat{\psi}_{k}) \mathbf{R}_{y} (\hat{\theta}_{k}) \mathbf{R}_{x} (\hat{\varphi}_{k}) \begin{bmatrix} \hat{v}_{x,k}^{B} \\ \hat{v}_{y,k}^{B} \\ \hat{v}_{z,k}^{B} \\ \hat{v}_{z,k}^{B} \end{bmatrix} \Delta t$$

$$(1)$$

prädiziert. Sie wird in Abhängigkeit von weiteren Zustandsgrößen, den Orientierungswinkeln $\hat{\varphi}_k, \hat{\theta}_k, \hat{\psi}_k$ und den entlang der Achsen des Schiffskoordinatensystems wirksamen Komponenten des dreidimensionalen Geschwindigkeitsvektors $\hat{v}_{x,k}^B, \hat{v}_{y,k}^B, \hat{v}_{z,k}^B$, bestimmt. Für erstere erfolgt die Prädiktion in Anlehnung an FOSSEN (2011) mit

$$\begin{bmatrix} \bar{\varphi}_{k+1} \\ \bar{\theta}_{k+1} \\ \bar{\psi}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\varphi}_k \\ \hat{\theta}_k \\ \hat{\psi}_k \end{bmatrix} + \mathbf{T}_{b,n} (\hat{\varphi}_k, \hat{\theta}_k) \underbrace{\begin{bmatrix} \widehat{\omega}_{x,k}^B \\ \widehat{\omega}_{y,k}^B \\ \widehat{\omega}_{z,k}^B \\ \widehat{\omega}_{z,k}^B \end{bmatrix}}_{\underline{\omega}_{k}^B} \Delta t.$$
(2)

Für die einzelnen Komponenten im Geschwindigkeitsvektor \overline{v}_{k+1}^B und den Drehraten (Winkelgeschwindigkeiten) in $\overline{\omega}_{k+1}^B$ bewirken extern auf das System einwirkende Kräfte **F** Beschleunigungen und damit Geschwindigkeitsänderungen, so dass allgemein

$$\overline{\boldsymbol{\omega}}_{k+1}^B = \widehat{\boldsymbol{\omega}}_k^B + \Delta \boldsymbol{\omega}_k^B (\Delta t, \boldsymbol{F}_1, \boldsymbol{F}_2, \dots, \boldsymbol{F}_n), \tag{3}$$

$$\overline{\boldsymbol{v}}_{k+1}^{B} = \widehat{\boldsymbol{v}}_{k}^{B} + \Delta \boldsymbol{v}_{k}^{B}(\Delta t, \boldsymbol{F}_{1}, \boldsymbol{F}_{2}, \dots, \boldsymbol{F}_{n})$$

$$\tag{4}$$

gilt. Im folgenden Abschnitt sollen die wichtigsten einflussnehmenden Kräfte identifiziert und ihre deterministischen Einflüsse auf das Systemverhalten modelliert werden. Diese sollen als Stellgrößen in das Prädiktionsmodell eingeführt werden.

Um die vorliegende Beobachtung Hub (hv), die eine vertikale Distanz zum vom Wellengang bereinigten Wasserspiegel als mittlere Höhenlage angibt (BREITENFELD et al. 2015), integrieren zu können, wird eine weitere Zustandsgröße definiert. BREITENFELD et al. (2015) führen dazu die Ablage der Wasserspiegellage $\Delta h_{WL,Modell,k}$ ein. Sie gibt den Unterschied zwischen der als ungestört angenommenen Wasserspiegellage und der mit einem hydrologischen Modell (BFG 2017) bestimmten Wasserspiegellage an und wird als konstant angenommen. Da die reale, ungestörte Wasserspiegellage von einem Schiff aus nicht bestimmt werden kann, müssen auch die auf diese Größe einflussnehmenden Faktoren im Modell beachtet werden.

4 Beeinflussende Faktoren

Um die das Bewegungsverhalten des Systems Vermessungsschiff beeinflussenden Faktoren bestimmen zu können, wird das Systemverhalten empirisch anhand von erfassten Messdaten identifiziert. Dabei wird von einem kausalen Verhalten mit einer hohen Erhaltungsneigung ausgegangen. Dies liegt darin begründet, dass es sich um ein physikalisches System handelt, bei dem die auf das System einwirkenden Kräfte sich relativ langsam und verzögert auf das Systemverhalten auswirken. Diese Kräfte (z. B. Strömung, manuelle Steuerung, etc.) bewirken einen deterministischen Anteil am Bewegungsverhalten. Ihre Auswirkungen sind im Messsignal enthalten und verursachen eine Änderung des zur Messepoche t_k vorliegenden Systemzustands. Diese Anteile sollen im Weiteren bestimmt werden.

Ein weiterer Effekt, der das Bewegungsverhalten des Systems beeinflusst, ist der sogenannte Squat-Effekt. Die Fahrt des Schiffs durch das Wasser bewirkt dabei aufgrund der Fahrdynamik ein vertikales Einsinken des Schiffs, das sich auf die Vertikalkomponente auswirkt. BREITENFELD et al. (2015) beschreiben, wie dieser Effekt im Erweiterten Kalman Filter berücksichtigt wird.

4.1 Einfluss der manuellen Steuerung

Das Vermessungsschiff wird während einer Messfahrt manuell durch Änderung der Ausrichtung der Ruderpropeller ($\delta_{SB,k}, \delta_{BB,k}$) und der Drehzahl der Propeller ($n_{SB,k}, n_{BB,k}$) gesteuert. Diese Größen beeinflussen den durch die Ruderpropeller auf das System wirkenden Kraftvektor sowie das Drehmoment. Die Änderungen der anliegenden Kräfte werden als Kraftstoß \mathbf{F}_{contr} und \mathbf{M}_{contr} betrachtet. Sie sind im Weiteren als Steuerungsgrößen aufgefasst (BREITENFELD et al. 2015, SCHEIDER 2020). Anhand einer Kreuzkorrelationsanalyse lässt sich nachweisen, dass die vor allem in Vertikalrichtung wirkenden Komponenten $\Delta \omega_{x,k}^{B}, \Delta \omega_{y,k}^{B}$ und $\Delta v_{z,k}^{B}$ nicht signifikant oder nur sehr schwach durch \mathbf{F}_{contr} und \mathbf{M}_{contr} beeinflusst werden. Der Korrelationskoeffizient ρ ist kleiner als 0,3.

Für die weiteren Geschwindigkeitskomponenten kann bei der Kreuzkorrelationsanalyse mit einem Korrelationskoeffizient von $\rho > 0,81$ jeweils ein hoher maximaler Korrelationskoeffizient nachgewiesen werden. Es zeigt sich dabei auch, dass das Bewegungsverhalten des Schiffs deutlich verzögert auf Änderungen in $\delta_{SB,k}$, $\delta_{BB,k}$ und $n_{SB,k}$, $n_{BB,k}$ reagiert. Die Änderung einer betrachteten Zustandsgröße lässt sich in Abhängigkeit von der Änderung der Steuerungsgröße (allgemein z_0 = Komponente aus \mathbf{F}_{contr} , \mathbf{M}_{contr}), der Zeitkonstanten T_1 , des Verzögerungsintervalls T_t sowie des Proportionalitätsbeiwerts K durch

$$\dot{x}(t) = \frac{K}{T_1} \cdot z_0 \cdot e^{-\frac{(t-T_t)}{T_1}}$$
(5)

ausdrücken (vgl. MANN et al. 2005). Die Parameter T_1 , T_t und K werden durch eine Ausgleichung nach dem Gauß-Markov-Modell individuell für die Geschwindigkeitsänderungen $\Delta v_{x,k}^B$, $\Delta v_{y,k}^B$ bzw. die Änderung der Drehrate $\Delta \omega_{z,k}^B$ bestimmt. Die dabei verwendeten Näherungswerte für T_t werden aus der Kreuzkorrelationsanalyse abgegriffen. Da oft der nächste Steuereingriff einsetzt, bevor der Einfluss der vorangehenden manuellen Regelung abgeklungen ist, werden die einzelnen Einflüsse in jeder Epoche inkrementell über die dem Prädiktionszeitpunkt t_k vorangehenden Epochen aufaddiert.

Mit diesem Ansatz kann das Beschleunigungsverhalten bzw. können die daraus resultierenden Geschwindigkeitsänderungen teilweise modelliert werden (SCHEIDER 2020). Wird für die Geschwindigkeitskomponenten ein quadratischer Mittelwert (RMS) berechnet, lässt sich dieser durch Anwendung des genannten Ansatzes teils deutlich verbessern.

Tabelle 2: Prozentueller Anteil der verbleibenden Abweichungen zwischen dem Modell und den gemessenen Geschwindigkeitsänderungen für $\Delta v_{contr,x,k}^{B}$, $\Delta v_{contr,y,k}^{B}$ und $\Delta \omega_{contr,z}$

Fahrtszenario	Normale Fahrt (Rhein)	Normale Fahrt in ruhigem Wasser	Kurvenfahrt (Rhein)
$\frac{RMS(\Delta v_{contr,x,k}^B - \Delta v_{x,k}^B)}{RMS(\Delta v_{x,k}^B)}$	85,3 %	69,6 %	64,1 %
$\frac{RMS(\Delta v_{contr,y,k}^{B} - \Delta v_{y,k}^{B})}{RMS(\Delta v_{y,k}^{B})}$	46,9 %	48,8 %	36,5 %
$\frac{RMS(\Delta\omega^B_{contr,z,k} - \Delta\omega^B_{z,k})}{RMS(\Delta\omega^B_{r})}$	73,0 %	77,1 %	52,8 %



Abb. 2: Modellierte Geschwindigkeitsänderung $\Delta v_{contr,x,k}^{B}$ im Vergleich zu den aus Messdaten bestimmten Geschwindigkeitsänderungen $\Delta v_{x,k}^{B}$.

In Tabelle 2 werden die Anteile der mittleren quadratischen Abweichungen zwischen den modellierten und den gemessenen Geschwindigkeitsänderungen im Verhältnis zu den aus Messwerten bestimmten Geschwindigkeitsänderungen präsentiert. Dabei wird zwischen unterschiedlichen Fahrtszenarien unterschieden. Besonders sticht hier die Komponente Δv_y^B hervor. Durch Verwendung der modellierten Geschwindigkeitsänderungen $\Delta v_{contr,y}^B$ kann

bereits mehr als 50 % von Δv_y^B deterministisch ausgedrückt werden. Für $\Delta v_{contr,x}^B$ und $\Delta \omega_{contr,z}^B$ fällt die Verringerung der Abweichungen zwar geringer aus, aber es können immer noch min. 15 % der Änderungen deterministisch beschrieben werden. Exemplarisch wird die Modellierung der Geschwindigkeitsänderung $\Delta v_{contr,x}^B$ für eine Messfahrt in ruhigen Gewässern in Abb. 2 gezeigt.

Um die so modellierten Geschwindigkeitsänderungen als Stellgröße für die Prädiktion der Geschwindigkeitskomponenten einführen zu können, werden die zugehörigen Varianzen mit dem Varianzfortpflanzungsgesetz bestimmt.

4.2 Einfluss der Strömung

Die jeweils zum Zeitpunkt t_k am DVL auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten können als Differenz der Geschwindigkeiten über Grund und der Geschwindigkeiten relativ zum Wasser bestimmt werden

$$\boldsymbol{v}_{str,k}^{B} = \boldsymbol{v}_{k}^{B} - \boldsymbol{v}_{rel,k}^{B} = \left[v_{x,k}^{B}, v_{y,k}^{B}, v_{z,k}^{B} \right]^{T} - \left[v_{rel,x,k}^{B}, v_{rel,y,k}^{B}, v_{rel,z,k}^{B} \right]^{T}.$$
(6)

Dabei wird davon ausgegangen, dass rings um das Schiff gleichförmige Strömungseinflüsse vorliegen. Diese Annahme ist insbesondere in Mündungsbereichen von kleineren Flüssen oder beim Vorhandensein von unregelmäßigen Unterwasserstrukturen nicht zutreffend. Dort kann durch die Strömung eine Rotation um die z^B -Achse bewirkt werden. Da jedoch nur ein DVL zur Verfügung steht, können die Strömungsunterschiede entlang des Schiffs nicht erfasst und damit nicht modelliert werden. Der Strömungseinfluss wird somit als reiner translatorischer Einfluss betrachtet (SCHEIDER 2020).

Somit kann die Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten $\Delta v_{str,k}^{B}$ als weitere Stellgröße des Prädiktionsmodells betrachtet werden.



Abb. 3: Modelliertes $\Delta v_{contr,x}^{B}$, $\Delta v_{contr,str,x}^{B} = \Delta v_{contr,x}^{B} + \Delta v_{str,x}^{B}$ im Vergleich zu den aus Messdaten bestimmten Geschwindigkeitsänderungen Δv_{x}^{B} .

Werden sowohl $\Delta v_{contr,k}^{B}$ als auch $\Delta v_{str,k}^{B}$ in Gleichung (4) eingesetzt, so variieren die RMS-Werte der verbleibenden Abweichungen wesentlich stärker als bei den in Tabelle **2** gezeigten Ergebnissen für v_{x}^{B} und v_{y}^{B} . Dies gilt besonders beim Szenario *normale Fahrt (Rhein)* (Fahrt geradeaus), bei dem die Abweichungen in v_{x}^{B} sogar vergrößert werden. Für die anderen Szenarien sind die verbleibenden Abweichungen um ca. 8 % größer als in Tabelle **2**. Im Fall von v_{z}^{B} können die Abweichungen um etwa 25 % verringert werden. Der Grund für die teilweise Verschlechterung der Ergebnisse im Vergleich zu Abschnitt 4.1 ist ein starkes Rauschen in $\Delta v_{str,k}^{B}$. Dennoch ist eine Berücksichtigung des Strömungseinflusses prinzipiell sinnvoll, um Geschwindigkeitsänderungen vollständig abbilden zu können (Abb. **3**).

4.3 Einfluss von zyklischen (temporären) Effekten

Neben den eindeutig identifizierbaren Einflussfaktoren treten weitere Effekte auf, die auf verschiedene Einflussfaktoren zurückzuführen sind, z. B. Wellen oder Wind auf dem Schiff. Viele dieser Einflüsse wirken nur temporär auf das System ein. Sie kumulieren zu einem zyklischen Signalanteil. Da die einzelnen Einflüsse nicht getrennt voneinander betrachtet werden können, werden sie gemeinsam untersucht. Die Periodendauer dieser Effekte ist deutlich kürzer als eine Minute. Um ihre Auswirkungen analysieren zu können, muss der jeweilige Signalanteil zunächst von den dauerhaft wirkenden, deterministisch begründeten Signalanteilen isoliert werden.

Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass mit den in den vorherigen Abschnitten genannten Einflussfaktoren alle über längeren Zeitraum wirkenden Einflussfaktoren abgedeckt sind, werden diese dauerhaft wirkenden Signalanteile durch Anwendung eines Tiefpassfilters oder einer diskreten Wavelet-Transformation mit Rauschminderung abgeschätzt. Nach Eliminierung dieses Anteils kann eine Analyse der zyklischen Signalanteile folgen.

Aufgrund der temporären Variationen können die dem Signalanteil zugrundeliegenden Schwingungsfrequenzen zwar durch eine (Fast) Fourier Transformation (FFT) bestimmt werden, sie können jedoch nicht dem zugehörigen Zeitabschnitt zugeordnet werden. Stattdessen bietet sich eine Analyse mithilfe der *Short-Time Fourier Transformation* (STFT) oder der *kontinuierlichen Wavelet-Transformation* (CWT) an.

Short Time Fourier Transformation

Bei der STFT wird mithilfe einer geeigneten Fensterfunktion $\gamma(t)$ ein zeitlicher Ausschnitt des betrachteten Signalanteils selektiert. Für diesen Ausschnitt wird eine Fourier-Analyse durchgeführt. Die Anzahl *n* der im Ausschnitt betrachteten Signalelemente wird durch die Länge von $\gamma(t)$ definiert. Analog zur FFT wird auch bei der STFT die spektrale Auflösung durch die zeitliche Dauer von $\gamma(t)$ (und damit durch *n*) vorgegeben (KIENCKE et al. 2008).

Wird $\gamma(t)$ über den betrachteten Signalanteil verschoben, können die zyklischen Effekte im nächsten Ausschnitt analysiert werden. Bei einer Analyse des Anteils im zeitlichen Intervall $(t_{k-(n-1)/2}, t_{k+(n-1)/2})$ wird das Ergebnis jeweils dem zentralen Verschiebungszeitpunkt t_k zugeordnet.

Das Ergebnis einer STFT wird in einem Spektrogramm als spektrale Leistungsdichte dargestellt. Anhand der Maximalwerte im Spektrogramm können die dominierenden Frequenzen detektiert werden.



Abb. 4: Exemplarisches Spektrogramm für die Änderung der Rollrate $\Delta \omega_x^B$ – zeitliche Lokalisierung der dominierenden Frequenzen (Darstellung der spektralen Leistungsdichte) (SCHEIDER 2020).

Um auch die im Randbereich des Zeitausschnitts auftretenden Frequenzen bestimmen zu können, überlagern sich die verschobenen Signalausschnitte. Obwohl dadurch die zeitliche Lokalisierung der auftretenden Frequenz verschmiert wird, können nur so wirklich alle temporären zyklischen Effekte berücksichtigt werden.

Wie in dem in Abb. 4 gezeigten Beispiel dargestellt ist, zeichnet sich in diesem Fall eine durchgehend dominierende Frequenz von ca. 0,35 Hz ab. Im Zeitintervall von 0 s bis ca. 600 s lässt sich zudem eine zweite Frequenz, mit geringerer Dominanz erkennen.

Kontinuierliche Wavelet Transformation

Im Gegensatz zur STFT kommt bei der kontinuierlichen Wavelet-Transformation keine Fensterfunktion mit einer festen Größe n zum Einsatz. Stattdessen wird auf eine skalierbare Wavelet-Funktion $\psi(t)$ zurückgegriffen. Da hier zyklische Effekte betrachtet werden sollen, muss aus der großen Anzahl an verfügbaren Wavelet-Funktionen (vgl. DAUBECHIES 1992) eine zumindest näherungsweise symmetrische Funktion ausgewählt werden, mit deren Hilfe genau diese zyklischen Signalstrukturen nachgebildet werden können. Als beidseitig gedämpfte Kosinus-Funktion kommt das sogenannte Morlet-Wavelet der idealen harmonischen Schwingung am nächsten. Alternativ lassen sich zu diesem Zweck auch die von MALLAT (2009) gezeigten Daubechies-Wavelets oder Symlets höherer (gerader) Ordnung wählen.

Die Wavelet-Funktion wird für eine Signalanalyse mit einem Parameter *a* skaliert und über den gesamten Zeitbereich über den Signalanteil verschoben. Für jedes Verschiebungsinkrement, das durch den Verschiebungsparameter *b* wiedergegeben wird, wird die Ähnlichkeit zwischen der skalierten Waveletfunktion ψ_a und dem betrachteten zeitlichen Signalabschnitt



Abb. 5: Exemplarische Zeit-Frequenz-Darstellung (aus Skalogramm) für die Änderung der Rollrate $\Delta \omega_x^B$ – zeitliche Lokalisierung der dominierenden Frequenzen (SCHEIDER 2020).

bestimmt. Der dabei jeweils bestimmte Wavelet-Koeffizient wird in einem sogenannten Skalogramm dargestellt. Maximale Koeffizienten lassen auf eine hohe Ähnlichkeit zwischen der lokalen Umgebung des Signalanteils zum Zeitpunkt t_k und dem jeweiligen ψ_a schließen. Da jeder Wavelet-Funktion eine spezifische (Pseudo-)Frequenz v_0 zugeordnet ist, kann auch für jeden Skalierungsparameter *a* eine zugehörige Frequenz

$$\nu_a = \frac{\nu_0}{a \cdot \Delta t} \tag{7}$$

bestimmt werden (ARBY 1997), wenn die Abtastrate Δt bekannt ist. Somit kann ein Skalogramm leicht in eine Zeit-Frequenz-Darstellung umgewandelt werden. Im Gegensatz zum Spektrogramm weist diese Darstellungsform weder im Zeit- noch im Frequenzbereich eine gleichmäßige Auflösung auf. Dennoch stellt die CWT eine gute Ergänzung zur Detektion von dominierenden Frequenzen dar, da sie besonders im niederfrequenten Bereich, in dem deterministische Signalanteile erwartet werden, eine hohe spektrale Auflösung aufweisen kann. Wie in Abb. **5** dargestellt ist, können mithilfe der CWT dominierende Frequenzen im selben Bereich wie in Abschnitt 4.3 mittels STFT nachgewiesen werden.

Detektierte Frequenzen

Die STFT und die CWT werden in SCHEIDER (2020) auf Messsignale aus unterschiedlichen (*normalen*) Fahrtszenarien angewendet. Es wird jeweils zwischen Berg- und Talfahrten auf dem Rhein bei Duisburg, Wendemanövern und einer Fahrt in ruhigem Gewässer (Kanal) unterschieden. Die Ergebnisse beider Analysen zeigen, dass bei allen betrachteten Fahrtszenarien mehrere dominierende Frequenzen festgestellt werden können. Ihre Anzahl unterschiedet sich erwartungsgemäß für die unterschiedlichen Fahrtszenarien.

Es ist auffallend, dass bei den sich vor allem in Vertikalrichtung auswirkenden Geschwindigkeits- und Drehratenänderungen $(\Delta \omega_x^B, \Delta \omega_y^B, \Delta v_z^B)$ für fast alle betrachteten Fahrtszenarien Frequenzen im Bereich von 0,35 Hz auftauchen, während für die vor allem auf die Horizontalkomponenten wirkenden Änderungen $(\Delta \omega_z^B, \Delta v_x^B, \Delta v_y^B)$ tiefere Frequenzen in einem Frequenzband zwischen 0,07 – 0,11 Hz zu erkennen sind. Letztere sind im Spektrogramm und im Skalogramm weniger deutlich erkennbar als die für die Vertikalkomponenten wirksamen Frequenzen. Die zugehörigen zyklischen Effekte treten nur temporär auf. Im Gegensatz dazu wirken die zyklischen Effekte mit Frequenzen von ca. 0,35 Hz bis auf temporäre Unterbrechungen nahezu permanent auf $\Delta \omega_x^B, \Delta \omega_y^B$.

Anhand dieser Analyse kann festgestellt werden, dass die Änderungen der Geschwindigkeiten durch zyklische Effekte beeinflusst werden, die im Prädiktionsmodell ergänzt werden sollten. Sie lassen sich für alle Komponenten durch

$$\Delta v_{zykl,k}^{B} = b_{0} + \sum_{i=1}^{q} b_{i} \cdot \sin(2\pi v_{i} t_{k+1} + \Delta \Phi_{i})$$
(8)

darstellen. Die Anzahl q der sich überlagernden Frequenzen schwankt dabei. Auch die detektierten Frequenzen selbst sind nicht stabil. Aus diesem Grund sollten die zur Beschreibung der zyklischen Anteile in ω_x^B , $\Delta \omega_y^B$ und Δv_z^B erforderlichen Schwingungsparameter, die Phasenverschiebung $\Delta \Phi_i$, der Offset b_0 und die Amplitude b_i , lokal mitgeschätzt werden, wobei von zumindest einer Schwingung auszugehen ist.

5. Implementierung des Modells

Anhand der untersuchten deterministischen Einflussfaktoren und des kumulativ bestimmten Einflusses lässt sich für die Prädiktion der einzelnen Geschwindigkeitskomponenten folgendes Modell aufstellen.

$$\begin{bmatrix} \overline{\boldsymbol{\omega}}_{k+1}^{B} \\ \overline{\boldsymbol{v}}_{k+1}^{B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \widehat{\boldsymbol{\omega}}_{k}^{B} \\ \widehat{\boldsymbol{v}}_{k}^{B} \end{bmatrix} + \boldsymbol{f}_{1}(\mathbf{M}_{contr}, \mathbf{F}_{contr}) + \boldsymbol{f}_{2}(\mathbf{F}_{str}) + \boldsymbol{f}_{3}(\boldsymbol{b}_{0}, \boldsymbol{b}_{i}, \boldsymbol{\nu}_{i}, \Delta \boldsymbol{\Phi}_{i})$$
(9)

Das definierte Prädiktionsmodell wird schrittweise im Erweiterten Kalman Filter implementiert, wobei der Squat-Effekt stets in die Schätzung eingeht (SCHEIDER 2020, BREITENFELD et al. 2015). Betrachtet werden die Implementierungsschritte

- o: ohne Modellierung der Drehraten-/Geschwindigkeitsänderungen $(\bar{\boldsymbol{\omega}}_{k+1}^B = \hat{\boldsymbol{\omega}}_{k}^B, \ \bar{\boldsymbol{v}}_{k+1}^B = \hat{\boldsymbol{v}}_{k}^B),$
- c: Verwendung von $f_1(\mathbf{M}_{contr}, \mathbf{F}_{contr})$ nach Abschnitt 4.1,
- c + z: Verwendung von $f_1(M_{contr}, F_{contr}) + f_3(b_0, b_i, \nu_i, \Delta \Phi_i)$ nach Abschnitt 4.1 und 4.3 Detektierte Frequenzen sowie
- c + z + s: Verwendung von $f_1(\mathbf{M}_{contr}, \mathbf{F}_{contr}) + f_2(\mathbf{F}_{str}) + f_3(\mathbf{b}_0, \mathbf{b}_i, \mathbf{v}_i, \Delta \Phi_i)$, nach Abschnitt 4.1, 4.2 und 4.3 Detektierte Frequenzen.

In Abb. **6** wird anhand der Ergebnisse in SCHEIDER (2020) exemplarisch gezeigt, wie sich die Innovationen zwischen den modellierten und den gemessenen Geschwindigkeitskomponenten für drei verschiedene Fahrtszenarien ändern.

Die mittleren quadratischen Innovationen der Drehraten verdeutlichen, dass sich durch Berücksichtigung des Steuerungseinflusses bereits eine gewisse Verringerung der Innovationen erreichen lässt. Diese ist mit durchschnittlich 25 % aber geringer als bei einer zusätzlichen Berücksichtigung der zyklischen Effekte. Im zweiten Fall kann durchschnittlich eine Verbesserung um 41 % erreicht werden. Bei Betrachtung der Geschwindigkeitskomponenten fallen die Unterschiede der Innovationen weniger deutlich aus. Während bei einer Geradeausfahrt keine Verbesserung der Innovationen erreicht wird, können diese beim zweiten und dritten Fahrtszenario um 14 % bzw. 16 % reduziert werden.



Abb. 6: RMS-Werte der Innovationen für die beobachteten Drehraten [°/s] und Geschwindigkeiten [m/s] (MRU) bei den Fahrtszenarien (a) Geradenfahrt, (b) Kurvenfahrt und (c) Fahrt mit teilweisem Ausfall der GNSS-RTK-Lösung.

Aufgrund des relativ starken Messrauschens für die Stellgrößen $\Delta v_{str,k}^B$ kann bei ihrer Aufnahme ins implementierte Prädiktionsmodell allgemein keine Verbesserung in Form von reduzierten Innovationen erreicht werden. Leider führt die Verbesserung der modellierten Stellgrößen nicht zu einer signifikant verbesserten Schätzung der Positionslösung.

6 Fazit

Um eine Georeferenzierung von Messdaten eines Fächerecholots zu ermöglichen, müssen während der gesamten Messfahrt qualitätsgesicherte Positionslösungen und Orientierungswinkel zur Verfügung stehen. Da in der Realität insbesondere die Positionslösungen nicht permanent verfügbar sind, werden mit einem Multi-Sensorsystem zahlreiche Beobachtungsgrößen erfasst, so dass auch dynamische Zusammenhänge modelliert werden können. Werden die hier beschriebenen Ansätze realisiert, so können die Änderungen von Drehraten- und Geschwindigkeitskomponenten teilweise deterministisch modelliert werden. Insbesondere bei Fahrten mit höherer Fahrdynamik lässt sich durch Berücksichtigung des Steuereinflusses und der zyklischen Effekte eine verbesserte Schätzung erreichen, die für die Drehraten bei bis zu 41 % und bei den Geschwindigkeitskomponenten im Bereich von ca. 15 % liegt. Da die als Stellgrößen betrachteten Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit aktuell mit einem starken Messrauschen behaftet sind, kann durch ihre Berücksichtigung im Prädiktionsmodell eines EKFs momentan keine verbesserte Schätzung erzielt werden. Kann das Messrauschen dieser Stellgrößen reduziert werden, so wird erwartet, dass die Zustandsgrößen in $\widehat{\boldsymbol{\omega}}_k^B$ und $\widehat{\boldsymbol{v}}_k^B$ eine verbesserte Schätzung erfahren. Zukünftig ist zu untersuchen, ob eine explizite deterministische Modellierung des Wind-Einflusses eine verbesserte Modellierung des Systemzustands ermöglicht.

Danksagung

Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse wurden teilweise in einer Kooperation zwischen dem Institut für Ingenieurgeodäsie (Universität Stuttgart) und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) im Rahmen des Projekts HydrOs entwickelt. Dabei wurden alle hier präsentierten Messdaten erfasst. Wir möchten den ehemaligen BfG-Mitarbeitern Harry Wirth und Marc Breitenfeld sowie dem WSA Duisburg-Rhein für die gute Zusammenarbeit danken.

Literatur

- ABRY, P. (1997): Ondolettes, et turbulence Multirésolutions, algorithms de décompositions, invariance d'échelle et signaux de pression. Diderot Editeur Art Sciences, Paris.
- BREITENFELD, M, WIRTH, H., BRÜGGEMANN, T., SCHEIDER, A. & SCHWIEGER, V. (2015): Entwicklung von Echtzeit- und Postprocessingverfahren zur Verbesserung der bisherigen Ortung mit Global Navigation Satellite Systems (GNSS) durch Kombination mit weiteren Sensoren sowie hydrologischen Daten. BfG-Bericht BfG-1856. BfG, Koblenz.
- BRÜGGEMANN, T. (2013): Ingenieurgeodätische Fragestellungen bei der Einmessung von Vermessungsschiffen. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde: Neue Entwicklungen in der Gewässervermessung, BfG-Kolloquium, 20./21.11.12, Koblenz, 5/2013, S. 32–40.
- BFG (2017): FLYS Flusshydrologischer Webdienst. http://www.bafg.de/DE/08_Ref/M2/ 03_Fliessgewmod/01_FLYS/flys_node.html (25.11.2019).

DAUBECHIES, I. (1992): Ten Lectures on Wavelets. SIAM, Philadelphia, USA.

- DEJONG, C. D., LACHAPELLE, G., SKONE, S. & ELEMA, I. A. (2002): Hydrography. Series on Mathematical Geodesy and Positioning. VSSD, Delft.
- GAIFFE, T., COTTREAU, Y., FAUSSOT, N., HARDY, G., SIMONPIETRI, P. & ARDITTY, H. (2000): Highly Compact Fibre Optic Gyrocompass for Applications at Depths up to 3000 Meters. In: Proceedings of the 2000 International Symposium on Underwater Technology (Cat. No.00EX418), IEEE, S. 155–160.
- FOSSEN, T. I. (2011): Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. Wiley & Sons, Chichester, Großbritannien.

- KIENCKE, U., SCHWARZ, M. & WEICKERT, T. (2008): Signalverarbeitung Zeit-Frequenz-Analyse und Schätzverfahren. Oldenbourg Verlag, München.
- LURTON, X. (2002): An introduction to underwater acoustics: principles and applications. Springer Praxis Publishing, London.
- MALLAT, S. (2009): A Wavelet Tour of Signal Processing. 3. Aufl., Academic Print, Elsevier Verlag, Burlington, MA, USA.
- MANN, H. B., SCHIFFELGEN, H. & FRORIEP, R. (2005): Einführung in die Regelungstechnik. Hanser Verlag, München.
- RAMM, K. (2008): Evaluation von Filter-Ansätzen f
 ür die Positionssch
 ätzung von Fahrzeugen mit den Werkzeugen der Sensitivit
 ätsanalyse. Dissertation an der Universit
 ät Stuttgart. DGK Reihe C, Heft 619, M
 ünchen.
- SCHEIDER, A. (2020): Dreidimensionale Zustandsschätzung eines Peilschiffs unter Verwendung eines Multi-Sensorsystems (in Bearbeitung).
- WENDEL, J. (2011): Integrierte Navigationssysteme. 2. Aufl.. Oldenbourg Verlag, München.

Ingenieurgeodätisches Monitoring im Internet of Things. Entwicklung und Erprobung autonomer Sensorsysteme

Philipp ENGEL, Karl FOPPE und Uwe KÖSTER

1 Einleitung

An der Hochschule Neubrandenburg wurden im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte moderne Hardware- und Software-Lösungen für das ingenieurgeodätische Deformationsmonitoring entwickelt und getestet. Ein Gegenstand dieser Untersuchungen war der Einfluss neuer Technologien im Bereich des *Internet of Things* (IoT) auf die Möglichkeiten zur Vernetzung und Fernsteuerung von Multisensorsystemen in der Geodäsie.

Als Ergebnis dieser Arbeiten entstand unter anderem das freie Monitoring-System *OpenADMS*, das für den Einsatz bei automatisierten Überwachungsmessungen konzipiert ist. Die Software erlaubt die autonome Erfassung von Zeitreihen durch geodätische, geotechnische und meteorologische Sensoren sowie deren Verarbeitung und Auswertung durch dynamisch integrierbare Programm-Module in der Programmiersprache Python. Neben einem neuartigen Datenbankmodell wurden auch zahlreiche Module für die Sensorsteuerung, die Verarbeitung von Messdaten und den Nachrichtenversand im Fehlerfall implementiert.

Eingebettete Mess- und Kontrollsysteme auf Grundlage preisgünstiger Einplatinen-Computer, wie etwa dem *Raspberry Pi*, dienen der kabelgebundenen oder kabellosen Ansteuerung von Sensoren und erlauben die Übertragung gewonnener Zeitreihen zu entfernten Datenbank-Servern mittels Mobilfunktechnik. Mehrere Prototypen dieser Systeme konnten zusammen mit der Monitoring-Software bei der messtechnischen Überwachung von Brücken und Sakralbauten getestet werden (Abbildung 1).

Darüber hinaus stellte sich die Frage, inwieweit sich preisgünstige Beschleunigungssensoren auf MEMS-Basis für die Schwingungsanalyse im Bauwerksmonitoring eignen. Die Arduino-Mikrocontroller-Plattform diente dabei als Grundlage für die Umsetzung eines einfachen Low-Cost-Sensors. Über eine serielle RS-232-Schnittstelle lassen sich die Beschleunigungsund Temperaturwerte im ASCII-Format abrufen. Durch seinen einfachen Aufbau war die Einbindung des Sensors in das bestehende Monitoring-System ohne Programmieraufwand möglich. Im Verbund mit weiteren Sensoren konnten u. a. die Turmschwingungen einer gotischen Backsteinkirche bestimmt werden. Die Auswertung der erfassten Zeitreihen erfolgte mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT) und Short-Time-FFT, wobei die Ergebnisse der verschiedenen Messkampagnen die Praxistauglichkeit der Systeme bestätigen.



Abb. 1: Verschiedene Mess- und Kontrollsysteme für das ingenieurgeodätische Monitoring, die an der Hochschule Neubrandenburg entwickelt wurden.

2 Ingenieurgeodätisches Monitoring

Die kontinuierliche Beobachtung kritischer Infrastruktur soll deren Stand- und Funktionssicherheit über einen langen Zeitraum garantieren. Der Einsturz eines Gebäudes kündigt sich häufig schon lange vorher durch Verformungen, Risse oder Setzungen an. Diese geometrischen Veränderungen können als Grundlage dienen, um darauf aufbauend Gefahrensituationen zu erkennen und zu beurteilen sowie Prognosen zum zukünftigen Verhalten des Objektes aufzustellen. Sensornetzwerke zur dauerhaften messtechnischen Überwachung von Bauwerken und Geländeabschnitten gewinnen unter energiepolitischen und sicherheitstechnischen Aspekten national wie international sicherlich an Bedeutung.

Flächenverbrauch und Bebauungsdichte nehmen insbesondere in Ballungsgebieten und Küstenregionen zu; auch das Alter und die Laufzeit öffentlicher und privater Infrastruktur steigen stetig. Vor allem in den Bereichen Verkehr, Küstenschutz, Bergbau, erneuerbare Energien und historische Bausubstanz wird die Nachfrage nach modernen und kostengünstigen Monitoring-Lösungen in Zukunft zunehmen. So ist nach Zahlen des Bundesverkehrsministeriums fast jede achte Brücke in Deutschland baufällig, ein Großteil über 40 Jahre alt. Bei einem Gesamtbestand von 39.600 Brücken gestalten sich Sanierung und Neubau als zeit- und kostenintensiv.

Auch Schieneninfrastruktur und Industrieobjekte, darunter die ca. 30.000 Windkraftanlagen in Deutschland, kommen für ingenieurgeodätische Überwachungsaufgaben in Frage.

2.1 Sensorknoten

Sensoren dienen in der Geodäsie und Geotechnik der quantitativen und qualitativen Messung physikalischer Einflussgrößen. Neben dem eigentlichen Sensor-Element verfügen viele Sensoren auch über eine Auswerte-Elektronik, die beispielsweise analoge Signale in digitale umwandelt oder die Messwerte über eine serielle Schnittstelle zum Abruf bereitstellt (HERING et al. 2012). Sensoren können auch zu Netzwerken zusammenschlossen werden. In diesem Fall spricht man häufig von Sensorknoten in einem Sensornetzwerk.

Eine vergleichsweise einfache Möglichkeit zur Anbindung von Sensoren an einen weit entfernten Steuerungsrechner stellen serielle Geräteserver dar. Diese nutzen Ethernet, WiFi oder Mobilfunk, um Daten über große Distanzen zu übertragen. Der Geräteserver tunnelt die seriellen Eingabe- und Ausgabedaten des angeschlossenen Sensors durch eine TCP/IP-Verbindung zum entfernten Rechner. Auf diesem bildet eine Treiber-Software die eingehenden Datenströme auf eine virtuelle COM- oder TTY-Schnittstelle ab. Im Gegensatz zu RS-232-Verbindungen arbeitet TCP/IP rein paketorientiert, so dass eine einzelne Datenleitung ausreichend ist, um mehrere Sensoren zu steuern. Für das Monitoring-System besteht, abgesehen von der Latenz, kein Unterschied zu einem Sensor an einer physischen Schnittstelle. Als großer Nachteil erweist sich aber die Fehleranfälligkeit dieser Methode. Bei einer Unterbrechung der Netzwerkverbindung fällt auch die Datenübertragung aus; der Verlust von Messwerten ist die Folge. Daraus ergibt sich die Anforderung, dass erfasste Zeitreihen vor der Übertragung zunächst lokal zwischengespeichert werden müssen.

Für die lokale Ansteuerung von Sensoren im Rahmen geodätischer und geotechnischer Überwachungsmessungen wurde in der Vergangenheit oft auf konventionelle Desktop- oder robustere Industrie-Computer zurückgegriffen. Beide Arten weisen aber einen vergleichsweise hohen Stromverbrauch auf, der einen Batteriebetrieb einschränkt. Auch sind diese Systeme bauartbedingt nur eingeschränkt für raue Umgebungen mit direkten Umwelteinflüssen geeignet und müssen aufwendig gesichert werden. Demgegenüber ist die Rechenleistung und der verfügbare Speicher von stromsparenden Mikrocontrollern, wie etwa der Arduino-Plattform, und einfachen Embedded-Computern für komplexe Mess- und Steuerungsaufgaben mit deren hohen Anforderungen an Datensicherheit häufig nicht ausreichend. In den letzten Jahren konnten sich Einplatinen-Computer als leistungsfähige Alternative zwischen vollwertigen PCs und Mikrocontrollern etablieren. Der sogenannte Raspberry Pi ist sicherlich der bekannteste von ihnen. Ähnliche, aber kostenintensivere Lösungen auf Basis der x86-Architektur sind zwar seit langem im industriellen Umfeld bei der Maschinensteuerung zu finden, aber erst mit dem Aufkommen von Smartphones und der Verbreitung der ARM-Architektur sind die preisgünstigen System-on-a-Chip (SoC) genannten integrierten Schaltkreise, die alle Komponenten eines Rechners vereinen, zum Massenprodukt geworden. Bedingt durch die Vorteile - Größe, Stromverbrauch, Preis - werden Einplatinen-Computer zunehmend bei der temporären und permanenten Aufzeichnung geo-spatialer Messwerte eingesetzt (PECI et al. 2014, MOURE et al. 2015; ENGEL et al. 2016).

2.2 Sensornetzwerke

Unter dem Begriff Sensornetzwerke werden Infrastrukturen für die Beobachtung der Umwelt zusammengefasst, die messende, verarbeitende und kommunizierende Komponenten beinhalten und auf Ereignisse innerhalb einer spezifischen Umgebung reagieren können. Diese Umgebung kann beispielsweise Teil der physischen Welt, eines biologischen Systems oder einer IT-Struktur sein. Typische Anwendungsgebiete umfassen Mess- und Steuerungsaufgaben, Datenerfassung, Monitoring, Überwachung und Telemetrie. Ein Sensornetzwerk besteht nach SOHRABY et al. (2007) zumeist aus vier Komponenten: einem Verbund lokaler oder verteilter Sensoren, einem kabelgebundenen oder kabellosen Netzwerk zum Datenaustausch, einer zentralen Instanz zur Speicherung gesammelter Informationen sowie rechnergestützten Systemen zur Ereignisbehandlung, Datenauswertung, Statusabfrage und Fernwartung. In den letzten Jahren verbreiteten sich Sensornetzwerke in immer mehr Anwendungsgebieten, darunter Industrie, Umweltwissenschaften, Gesundheitswesen, aber auch Geodäsie und Geotechnik (Abbildung 2).



Abb. 2: Schematische Darstellung eines Sensornetzwerks auf Grundlage der Monitoring-Plattform *OpenADMS*

In der Ingenieurgeodäsie begann die Automatisierung messtechnischer Prozesse und damit die Ausbreitung erster Sensornetzwerke bereits in den 1980er Jahren. Zunächst wurden konventionelle Personal Computer für die Ansteuerung von Sensoren über analoge und serielle Schnittstellen sowie die anschließende Verarbeitung erfasster Zeitreihen eingesetzt. Bedingt durch die technischen Limitierungen jener Zeit ließen sich Messwerte zunächst nur lokal speichern, ohne Möglichkeit zur einfachen Datenfernübertragung (PELZER 1988). Für den Datenexport standen lediglich Magnetband, Disketten oder Papierausdrucke zur Verfügung. Die Verbreitung von Modems für analoge Telefonanschlüsse vereinfachte die Fernwartung permanenter Überwachungsmessungen. Die gespeicherten Zeitreihen ließen sich nun einfach mittels FTP-Protokoll über das Internet auf entfernte Systeme kopieren. Die Wartung und Überwachung von messtechnischen Prozessen war aber weiterhin mit einem relativ hohen zeitlichen Aufwand verbunden. Im Zuge dieser Entwicklungen entstanden eine Reihe geodätischer Monitoring-Systeme, wenn auch zunächst nur für ausgewählte Messtechnik und Anwendungsfälle (u. a. SULEIMAN 1998; KÄLBER et al. 2000; FOPPE et al. 2006). Hersteller geodätischer Sensoren bieten seit langem Überwachungssysteme an, die aber häufig nur zu den eigenen vermessungstechnischen Produkten kompatibel sind. Mit dem Fortschreiten der Digitalisierung verbreiteten sich auch neuartige Lösungen für die Umsetzung von Sensornetzwerken, wie etwa Netzwerkprotokolle und Datenaustauschformate für das Internet der Dinge. Bluetooth, ZigBee und verschiedene WiFi-Standards verbinden räumlich verteilte Sensorknoten zu drahtlosen Sensornetzwerken. Für den Nachrichtenaustausch zwischen den einzelnen Komponenten kann auf leichtgewichtige Protokolle, wie etwa MQTT, ZeroMQ oder XMPP, zurückgegriffen werden. Die Serialisierung von Messdaten erfolgte in der Vergangenheit häufig nur binär, als CSV oder in einem speziellen ASCII-Format. Diese werden zunehmend durch XML und andere Formate abgelöst, die zum Teil für Anwendungen mit Raumbezug standardisiert sind, etwa Sensor Web Enablement Observations & Measurements (WALTER 2012) oder GeoJSON (BUTLER et al. 2016). In der Ingenieurgeodäsie werden Sensornetzwerke primär für die Überwachung von Deformationen, Umwelteinflüssen und Naturereignissen eingesetzt. Für die Zukunft ist zu erwarten, dass jeder einzelne Sensorknoten eines solchen Netzwerkes über eine eigene Datenverbindung zum Internet verfügt (5G, IPv6) und dabei selbstständig und autonom mit verteilten Anwendungen interagiert (Machine-to-Machine-Kommunikation).

3 Umsetzung eines ingenieurgeodätischen Monitoring-Systems

In den letzten Jahren wurden an der Hochschule Neubrandenburg neue Ansätze für die Umsetzung eines modernen ingenieurgeodätischen Monitoring-Systems verfolgt. Die Untersuchungen begannen zunächst als studentische Projekte zur einfachen Sensorsteuerung und Beobachtungsdatenerfassung. Unter dem Titel *Datenbank-orientiertes Monitoring- und Analysesystem* (DABAMOS) konnten diese Arbeiten später im Rahmen eines Forschungsprojektes subsumiert werden.

3.1 Monitoring-Software

Das freie Monitoring-System *OpenADMS Node* ist in der Programmiersprache Python geschrieben und zu allen modernen Computer-Plattformen kompatibel. Neben konventionellen PC-Systemen werden auch Einplatinen-Computer mit Linux/Unix und mobile Endgeräte auf Android-Basis unterstützt. Sensoren lassen sich ohne Programmieraufwand über serielle Datenschnittstellen und Bus-Systeme einbinden (u. a. RS-232, RS-485, USB, Bluetooth, 1-Wire, GPIO).

Die Software setzt sich aus mehreren Modulen zusammen, die jeweils vorgegebene Aufgaben übernehmen und sich dabei beliebig kombinieren lassen. Zu diesen Aufgaben gehören die Sensoransteuerung, die Verarbeitung und Speicherung von Zeitreihen, der automatische Nachrichtenversand im Fehlerfall oder der Fernzugriff über das Internet. Die Module kommunizieren untereinander über das MQTT-Protokoll. Ein lokaler Server-Dienst disponiert dabei den Nachrichtenaustausch zwischen den Clients. Das Protokoll erlaubt es, lokale Sensornetzwerke sehr einfach umzusetzen und eigene Anwendungen zu integrieren. Eine Authentifizierung und Verschlüsselung der Verbindung ist darüber hinaus möglich.

Der Funktionsumfang der Monitoring-Software kann durch zusätzliche Module in der Programmiersprache Python erweitert werden, wobei ein Zugriff auf Anwendungen und Bibliotheken, die in einer anderen Sprache geschrieben sind, möglich ist. *OpenADMS Node* ist unter einer permissiven Open-Source-Lizenz veröffentlicht (BSD). Für die Nutzung fallen keine Lizenzgebühren an.

3.2 Client-Server-Kommunikation

Für den Austausch von beliebigen Daten zwischen zwei Rechnersystemen haben sich zum Teil sehr unterschiedliche technische Lösungen entwickelt. Das *File Transfer Protocol* (FTP) war eines der ersten Netzwerkprotokolle, mit dem sich Dateien bidirektional übertragen ließen. Mittels FTP können aber lediglich Dateien ausgetauscht werden. Im Kontext der Ingenieurgeodäsie ist damit eine Auswertung von Zeitreihen in Echtzeit nicht möglich.

Die Alternative zur rein dateibasierten Verarbeitung von Messdaten sind Datenbank-Management-Systeme, die Zeitreihen sehr viel besser abbilden und einen wahlfreien Zugriff auf einzelne Beobachtungen ermöglichen. Da der öffentliche Betrieb eines Datenbank-Servers im Internet Sicherheitsrisiken birgt, kann zur Abschirmung ein Virtuelles Privates Netzwerk (VPN) eingerichtet werden, das einen sicheren Übertragungskanal durch ein unsicheres Netzwerk bereitstellt. Die Einrichtung eines umfangreichen Sensornetzwerkes gestaltet sich damit aber relativ aufwendig.



Abb. 3: Darstellung einer einfachen Cloud-Infrastruktur zur Speicherung von Zeitreihen. Eine HTTP-basierte REST-Schnittstelle kann entweder als komplexe Web-Applikation oder direkt im Web-Server implementiert werden. Der NoSQL-Datenbank-Server Apache CouchDB integriert eine solche Schnittstelle bereits. Es wurden daher verschiedene Datenaustauschprotokolle und -formate untersucht, die eine einfache, konsistente und sichere Übertragung von Zeitreihen zwischen Sensorknoten und Datenbank-Server erlauben. Unter dem Namen *Representational State Transfer* (REST) ist eine zustandslose Architektur auf Basis des HTTP-Protokolls bekannt, das die Entwicklung eigener webbasierte Programmierschnittstellen (APIs) erlaubt. Der Server nimmt über die API beliebige Zeitreihen im JSON-Format entgegen und speichert sie in einer dokumentenorientierten PostgreSQL-Datenbank ab (Abbildung 3). Der Zugriff auf die öffentlich erreichbare Schnittstelle ist durch Verschlüsselung (HTTPS) und Authentifizierung (HTTP Basic Auth) abgesichert.

Fordert ein Client einzelne Beobachtungen oder ganze Zeitreihen an, gibt der Server diese je nach Anfrage im JSON- oder CSV-Format zurück. Für viele Programmiersprachen existieren Bibliotheken, die die Kommunikation mit Web-Servern vereinfachen, so dass sich Messdaten beispielsweise in Python, JavaScript oder MATLAB direkt abrufen, verarbeiten und grafisch darstellen lassen.

3.3 Eingebettete Mess- und Steuersysteme zur Sensordatenerfassung

Bedingt durch die Nachteile konventioneller Desktop-Computer beim Einsatz im Rahmen von Langzeitüberwachungsmessungen sowie die hohen Kosten industrieller Embedded-Systeme wurden ab 2013 die ersten preisgünstigen Einplatinen-Computer hinsichtlich ihrer Eignung zur Ansteuerung geodätischer Sensoren evaluiert. Diese sind zwar nicht für raue Umweltbedingungen mit hohen Temperaturunterschieden zertifiziert, zeigten bei mehrjährigen empirischen Untersuchungen aber keine Ausfallerscheinungen. Insbesondere die verschiedenen Modelle des *Raspberry Pi* erwiesen sich als zuverlässig.

Als Betriebssysteme eignen sich angepasste Linux-Distributionen und BSD-Derivate. Sofern ein geeigneter Python-Interpreter für das Betriebssystem verfügbar ist, kann auch die Monitoring-Software *OpenADMS Node* ausgeführt werden. Die Sensoren lassen sich entweder direkt an die USB-Ports des Computers oder indirekt über einen seriellen Geräteserver anschließen.

Sollen die erfassten Messdaten nicht nur lokal gespeichert, sondern auch an einen Datenbank-Server übertragen werden, muss eine entsprechende Netzwerkverbindung bestehen. Industrielle LTE-Router für den eingebetteten Betrieb können einzelne Sensorknoten mit nur geringem Aufwand an das mobile Internet anschließen.

4 Praktischer Einsatz

Die entwickelten Hardware- und Software-Komponenten sind im Rahmen verschiedener ingenieurgeodätischer Deformationsüberwachungsmessungen erfolgreich getestet worden, etwa beim Monitoring von Autobahnbrücken oder der Aufdeckung von Turmschwingungen einer gotischen Backsteinkirche aus dem 13. Jahrhundert.



Abb. 4: Eines der beiden Mess- und Steuersysteme mit 4G-Anbindung für das Brücken-Monitoring an der Autobahn A 27.

4.1 Monitoring von Brückenbauwerken

Seit 2016 wird die Monitoring-Software *OpenADMS Node* bei der messtechnischen Überwachung von zwei Autobahnbrücken an der A27 in Niedersachsen eingesetzt. Bei den Bauwerken handelt es sich um eine ca. 38 m lange Plattenbrücke (Baujahr 1964) und eine ca. 72 m lange Hohlkastenbrücke (Baujahr 1963). Für beide Objekte wurde ein ähnliches Monitoring-Konzept erarbeitet. Jeweils ein Leica TS16 nimmt geometrische Veränderungen am Bauwerk auf. Durch Pt100-Widerstandsthermometer im Beton des Überbaus werden die Temperaturwerte erfasst und eine Wetterstation von Reinhardt erlaubt die Aufzeichnung meteorologischer Einflussgrößen für die Streckenkorrektur des EDM.

Die Mess- und Steuersysteme basieren auf dem Einplatinen-Computer *Raspberry Pi 2* mit dem Unix-Betriebssystem FreeBSD 11 (Abbildung 4). Jeweils im Intervall von zehn Minuten zeichnen die Monitoring-Systeme die Messdaten der einzelnen Sensoren auf. Über ein 4G-Modem besteht eine Verbindung zum Internet. Eine unterbrechungsfreie Stromversorgung sichert zusätzlich alle elektronischen Komponenten vor Netzausfällen ab.

Die Fernwartung der beiden Mess- und Steuersysteme ist über einen zentralen Unix-Server möglich, der einen OpenVPN-Dienst bereitstellt. Der Server speichert die von den Sensorknoten erfassten Messwerte in einer PostgreSQL-Datenbank. Die lokale Ansteuerung der Sensoren und die Weiterleitung der Zeitreihen an den Datenbank-Server erfolgt dabei autonom. Fehlerhafte Messungen (z. B. Prismenspiegel verdeckt) werden durch das Monitoring-System erkannt und wiederholt. Bei einer Unterbrechung der Internet-Verbindung speichert das Monitoring-System die Messdaten zunächst in einer lokalen Datenbank. Die Übertragung zum Datenbank-Server im Internet wird zu einem späteren Zeitpunkt automatisch fortgesetzt.


Abb. 5: Sensoraufbau innerhalb der Marienkirche Neubrandenburg (v. l. n. r.: SBG IG-500E, Leica Nivel210 und Low-Cost-MEMS).

Die technische Umsetzung hat sich als zuverlässig erwiesen. Lediglich die Tachymeter mussten nach mechanischen Defekten ausgetauscht werden. Die verwendeten Einplatinen-Computer haben sich hingegen im mehrjährigen Dauerbetrieb bewährt, da weder Systemabstürze auftraten noch Neustarts erforderlich waren.

4.2 Monitoring der Konzertkirche Neubrandenburg

Die im Stadtzentrum von Neubrandenburg gelegene Marienkirche mit ihrem 90 m hohen Turm diente bis zu ihrer Profanisierung im Jahr 2001 als Hauptpfarrkirche. Im Jahr 2007 wurde im Turm ein neuer Glockenstuhl mit fünf Glocken installiert. Seit ihrem Umbau 2001 wird die Kirche als Konzertsaal genutzt. Das gleichzeitige Läuten der fünf Glocken kann von Besuchern des Turms als deutlich spürbare Gebäudeschwingungen wahrgenommen werden. Daraus ergab sich die Frage, ob die Bewegungen des Turms dessen Standsicherheit beeinflussen. Basierend auf einer Kooperation zwischen Hochschule und Stadt Neubrandenburg wurden ab 2014 im Rahmen studentischer Forschungsarbeiten mehrere ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen am Objekt durchgeführt.

Bei der Beurteilung der möglichen Messverfahren kamen zunächst inertiale Sensoren in Betracht, um Längs- und Querbeschleunigungen hochfrequent zu erfassen. Durch die zunehmende Verbreitung von Smartphones war weiterhin von Interesse, ob sich die auftretenden Schwingungen mit diesen Geräten ebenfalls aufzeichnen lassen. Als klassische Verfahren zur Messung von absoluten Auslenkungen bieten sich dagegen moderne Tachymeter und GNSS-Systeme an. Aber auch Neigungssensoren mit Flüssigkeitshorizont als Referenzfläche sollten einer kritischen Betrachtung unterzogen werden. Ein an der Hochschule Neubrandenburg entwickelter Low-Cost-Beschleunigungssensor (Abbildung 5) wurde ebenfalls für die Bestimmung der Amplituden eingesetzt und dessen Messwerte mit denen der anderen Sensoren verglichen. Der Low-Cost-Sensor ist mit einer RS-232-Schnittstelle für die digitale Übertragung der Messwerte ausgestattet. Von einem Host-Computer aus ist lediglich eine serielle Datenverbindung zum Sensor aufzubauen. Der Datenaustausch erfolgt dabei ohne ein spezifisches Protokoll. Für den Datentransfer ist ein einfacher Terminal-Emulator ausreichend. Darüber hinaus kann der Sensor auch in ein Monitoring-System eingebunden werden.

Die Auswertung der einzelnen Zeitreihen erfolgte mit Analysemethoden der Signaltheorie. Bisher kam zur Frequenzanalyse häufig nur die konventionelle Fourier-Transformation zur Anwendung. Mit der Kurzzeit-Fourier-Transformation und der Wavelet-Transformation stehen aber weitere Methoden zum Aufzeigen zeitlicher Frequenzveränderungen zur Verfügung.

Die Auswertung der Zeitreihen ergab für alle eingesetzten Sensortypen vergleichbare Frequenzen und Amplituden. Das Gebäude schwingt mit einem konstanten Faktor von drei im Bezug zu den Glocken. Dies ist physikalisch gesehen die zweite Oberschwingung. Die Frequenz von 1,14 Hz liegt nahe der vermutlichen Eigenfrequenz des Kirchturmes. Die Untersuchungen konnten zeigen, dass die durch das Glockenspiel verursachten Turmschwingungen nur eine geringe Amplitude von weniger als 2 mm aufweisen.



Abb. 6: Amplitudenspektrum der mittels Low-Cost-MEMS-Sensor an der Marienkirche Neubrandenburg aufgezeichneten Zeitreihe.

5 Fazit

Bei den bereits zurückliegenden und den noch andauernden Überwachungsmessungen haben die Monitoring-Software, der Cloud-Dienst für Zeitreihen sowie die verschiedenen eingebetteten Mess- und Steuersysteme auf Grundlage von Einplatinen-Computern ihre Praxistauglichkeit auch im Langzeitbetrieb gezeigt. Durch den modularen Aufbau des Systems konnte dieses sehr flexibel und mit geringem Konfigurationsaufwand an unterschiedlichste Anforderungen und Konzepte angepasst werden. Die niedrigen Hardware-Anforderungen erlauben auch die Nutzung neuartiger Endgeräte für die lokale Sensoransteuerung.

Die Entwicklung ist aber noch nicht abgeschlossen. In weiteren FuE-Projekten ist die Einbindung von GNSS-Einfrequenzempfängern in das Monitoring-System zunächst fortzuführen. Daran anschließend soll ein preisgünstiger Multisensorknoten entwickelt werden, der sich in die vorhandene Architektur einfügt. Die gegenwärtig noch rudimentäre Unterstützung von Android-basierten Endgeräten, wie Smartphones und Tablets, ist zunächst noch auszubauen, damit weitere Untersuchungen hinsichtlich der Eignung als autonom agierende Messund Steuersysteme möglich sind.

Die praktischen Versuche mit dem entwickelten Low-Cost-Sensor haben gezeigt, dass dieser hinreichende Ergebnisse liefert und mit kommerziellen Sensoren vergleichbare Genauigkeiten erreicht. Es konnte ein sehr kostengünstiger Sensor entwickelt werden, der sich ohne Schwierigkeiten in das Monitoring-System der Konzertkirche Neubrandenburg einbinden ließ. Ein Einsatz des Sensors an Brücken oder anderen Ingenieurbauwerken erscheint daher als möglich.

Literatur

- BUTLER, H., DALY, M., DOYLE, A. et al. (2016): The GeoJSON Format. Internet Engineering Task Force (IETF), Request for Comments: 7946. ISSN: 2070-1721.
- ENGEL, PH. & FOPPE, K. (2016): Open Source Deformation Monitoring. A Multi-Platform Approach for Automated Observations in Geodesy. In: Proceedings of GeoTerrace 2016, Lviv, Ukraine.
- FOPPE, K., BARTH, W. & PREIS, S. (2006): Autonomous Permanent Automatic Monitoring System with Robot-Tacheometers. In: Processings of XXIII International FIG Congress, München, 8. bis 13. Oktober 2006.
- HERING, E. & SCHÖNFELDER, G. (Hrsg.) (2012): Sensoren in Wissenschaft und Technik. Funktionsweise und Einsatzgebiete. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- KÄLBER, S., JÄGER, R. & SCHWÄBLE, R (2000): A GPS-Based Online Control and Alarm System. In: GPS Solutions (2000) 3: 19; DOI: 10.1007/PL00012799.
- LI, CH., FERNANDEZ-STEEGER, T. M., LINK, J. A. B. et al. (2014): Use of MEMS Accelerometers/Inclinometers as a Geotechnical Monitoring Method for Ground Subsidence. In: Acta Geodyn. Geomater., Vol. 11, No. 4 (176), 337–349, 2014; DOI: 10.13168/AGG.2014.0015.
- LIGHT, R. A. (2017): Mosquitto. Server and Client Implementation of the MQTT Protocol. In: The Journal of Open Source Software, Vol. 2, No. 13, Mai 2017; DOI: 10.21105/joss.00265.
- MOURE, D., TORRES, P., CASA, B. et al. (2015): Use of Low-Cost Acquisition Systems with an Embedded Linux Device for Volcanic Monitoring. In: *Sensors* 2015, *15*(8), 20436-20462; DOI: 10.3390/s150820436.
- PECI, L. M., BERROCOSO, M., FERNÁNDEZ-ROS, A. et al. (2014): Embedded ARM System for Volcano Monitoring in Remote Areas: Application to the Active Volcano on Deception Island (Antarctica). In: Sensors. 2014; 14(1): 672–690.

- PELZER, H. (Hrsg.) (1988): Ingenieurvermessung. Deformationsmessungen. Massenberechnung. Ergebnisse des Arbeitskreises 6 des Deutschen Vereins für Vermessungswesen (DVW) e. V. Herausgegeben von Hans Pelzer. Stuttgart: Wittwer.
- RODRIGUEZ, C. C. G. & SERVIGNE, S. (2012): Sensor Data Quality for Geospatial Monitoring Applications. In: Multidisciplinary Research on Geographical Information in Europe and Beyond. Proceedings of the AGILE 2012 International Conference on Geographic Information Science, Avignon, April, 24–27, 2012.
- SOHRABY, K., MINOLI, D. & ZNATI, T. (2007): Wireless Sensor Networks. Technology, Protocols, and Applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- SULEIMAN, A. (1998): Automatisierte Dauerüberwachung von Bauwerksverformungen und Erfassung statischer Größen am Beispiel des Zwickauer Doms. In: Bautechnik, 75(3), 168–179; DOI: 10.1002/bate.199801470.
- WALTER, K. (2012): Untersuchungen räumlicher Dienstestandards zur Umsetzung einer Geodateninfrastruktur eines sensorbasierten Frühwarnsystems. Dissertation, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Universität Rostock.
- WELSCH, W., HEUNECKE, O., KUHLMANN, H., MÖSER, M. (HRSG.) et al. (2000): Handbuch Ingenieurgeodäsie. Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. Heidelberg: Wichmann.

Indoornavigation in einer Bibliothek

Janek STOECK und Harald STERNBERG

1 Zusammenfassung

Den optimalen Weg zu einem Ziel zu finden ist ohne Zuhilfenahme entsprechender Werkzeuge mitunter nicht besonders einfach oder gar unmöglich. So ist es auch in der Bibliothek der HafenCity Universität Hamburg. Hier sind aufgrund inhomogener Signaturen der Bücher eindeutige Zuordnungen zu bestimmten Themengebieten nicht möglich. Dies liegt daran, dass der aktuelle Bestand aus mehreren alten Beständen zusammengeführt worden ist. Es folgt eine unübersichtliche Darstellung des Standortes eines Buches.

Um diesen Umstand zu vereinfachen, wird derzeit ein Indoornavigationssystem entwickelt. Um komplexe Anwendungen zu realisieren, sind Eigenentwicklungen mit infrastrukturbasierten Ortungsmöglichkeiten komplizierter zu realisieren, besonders wenn es um die Verknüpfung mehrerer Disziplinen geht. Hier bieten sich Systeme an, welche der Nutzer bereits besitzt, wie das allgemein verbreitete Low-Cost-Multi-Sensor-System Smartphone. Es verbindet zum einen Sensorik und zum anderen auch viele Vorzüge moderner Computer in einem tragbaren handlichen Gerät.

Die Buchsuche soll auf dem Smartphone mit der von der Bibliothek angebotenen Website stattfinden. Anschließend soll der Weg zum Buch auf einer Karte dargestellt werden. Beschleunigungssensoren werden genutzt, um einen Schrittzähler zu realisieren. In Kombination mit Gyroskopdaten kann so eine Koppelnavigation durchgeführt werden. Zur zusätzlichen Stützung werden Routinggraphen genutzt, um Laufrichtung einzugrenzen.

2 Indoornavigation am Beispiel der Bibliothek der HafenCity Universität Hamburg

Sich in einer Bibliothek zurechtzufinden kann mitunter sehr schwierig sein. In der Bibliothek der HafenCity Universität Hamburg (HCU) wird dies zusätzlich dadurch erschwert, dass die Signaturen der Bücher zur Katalogisierung inhomogen aufgebaut sind. Dies hat den Grund, dass der aktuelle Bestand aus drei verschiedenen alten Beständen zusammengetragen wurde. Die Neukatalogisierung stellt einen sehr hohen Aufwand dar, welche die Bibliotheksleitung möglichst vermeiden möchte.

Der Bestand ist auf drei Stockwerke verteilt, wobei es sein kann, dass ein Exemplar eines Buches sich in einem Stockwerk, ein anderes Exemplar desselben Buches aber auch in einem anderen Stockwerk befinden kann. Die aktuelle Darstellung des Standortes des Buches ist nur stockwerksgenau angegeben, sodass man innerhalb dieses Stockwerks nach dem Regal suchen muss, in dem sich das Buch befinden sollte. Dazu nutzen die Suchenden die Beschriftung der Regale an der Stirnseite, die den Signaturenbereich des Regals angibt. Die angesprochenen Hürden führen dazu, dass die Suchenden unnötig viel Zeit zum Auffinden des gesuchten Buches benötigen und womöglich nur kurz durchblättern, um festzustellen, dass es doch nicht ganz den Erwartungen entspricht.

Solch ein Problem lässt sich anhand einer Anwendung einer Indoornavigation reduzieren. Dieser Beitrag gliedert sich in die Kapitel Grundlagen der Indoornavigation, Beschreibung der Algorithmen, Darstellung von Testreihen sowie einem Ausblick in die weitere Forschung.

3 Grundlagen der Indoornavigation

Grundsätzlich gibt es zwei Arten von Lösungsansätzen für das Problem des Aufbaus einer Anwendung für die Innenraumnavigation:

- Infrastrukturbasierte Indoornavigation,
- Infrastrukturlose Indoornavigation.

Die erste Kategorie setzt auf das Anbringen und Nutzen eines Infrastrukturnetzwerkes bzw. nutzt vorhandene Infrastruktur, um eine Position relativ innerhalb dieses Netzwerkes zu ermitteln. Zum Einsatz kommt bspw. die Technologie Ultra-Wide-Band (UWB), bei der im einfachsten Fall die Laufzeit zwischen einem Ankerknoten, dessen Position bekannt ist, zu einem mobilen Gegenstück, im Gebrauch "Tag" genannt, ermittelt wird. Über die Laufzeit kann eine Strecke bestimmt und über die Bestimmung der Strecke zu verschiedenen Ankerknoten ein Schnitt gebildet werden, um die Position zu ermitteln (BLANKENBACH 2007).

Ein weiteres Beispiel dieser Kategorie ist das WLAN-Fingerprinting. Dieses Verfahren nutzt das in der Regel vorhandene WLAN-Netzwerk, um eine Karte von sog. Fingerprints aufzubauen. Diese Fingerprints sind bestimmte Punkte im Gebäude, an denen über einen gewissen Zeitraum alle Empfangsstärken aller Zugangspunkte in der näheren Umgebung aufgenommen werden. Jeder dieser Fingerprints erhält somit ein einzigartiges Muster, welches in der Nutzungsphase wiedererkannt werden kann. Hier wird in der Nutzungsphase ebenfalls kurzeitig ein Fingerprint erstellt und mit der Datenbank der vorherigen Aufnahme verglichen, um den aktuellen Fingerprint mit einer Position in Beziehung zu bringen (KHALAJMEHRABADI et al. 2017).

Die zweite Kategorie setzt namentlich auf Technologien, die nicht von einer (zuvor) aufgebauten Infrastruktur abhängig sind. Hier sind verschiedene Arten der Inertialnavigation, wie z. B. die Koppelnavigation, oder die Nutzung von Kameras angesiedelt (BLANKENBACH 2007). Die Inertialnavigation wird hier unter anderem genutzt, um anhand von doppelter Integration von Beschleunigungen Positionen zu erhalten. Ein anderer Ansatz ist das Verwenden von Beschleunigungen zum Ableiten von Schritten. Zusammen mit Drehraten aus einer Inertialmesseinheit (IMU) können in beiden Fällen relative Trajektorien erhalten werden (WILLEMSEN 2016, EHRLICH et al. 2016). Kameras können verwendet werden um Visual Odometrie zu betreiben, wobei innerhalb der Kamerabilder Punkte gesucht werden, die in aufeinanderfolgenden Bildern identisch sind. Durch die Lageänderung in dem 2D-Bild kann auf eine unskalierte Translation und die Rotation der Kamera geschlossen werden (BLOESCH et. al 2015). Viele der Anwendungen von infrastrukturbasierenden Navigationslösungen finden Anwendungen im Bereich von Industrieanlagen, um bspw. Werkzeugtrolleys zu lokalisieren. Dies kann zur Auffindung oder aber zum Betreten von restriktierten Arealen genutzt werden (LEUGNER & HELBRÜCK 2018).

Vorteilig sind diese Anwendungen insofern, dass sie recht genau lokalisieren können und keine zeitabhängige Drift besitzen wie die Anwendungen mit IMUs. Nachteilig sind die hohen Anschaffungskosten, der Installationsaufwand und die Wartung. Im Falle des WLAN-Fingerprintings reduziert sich die Anschaffung und der größte Teil des Installationsaufwands, da das vorhandene Netz nur an einigen Stellen optimiert werden muss; allerdings verändern sich die Fingerprints mit jedem neuen Zugangspunkt, wodurch eine Neuaufnahme notwendig wird (KHALAJMEHRABADI et al. 2017). Würde man diese Ansätze für die Ausstattung eines Bereiches wie der Bibliothek in Betracht ziehen, so würde man um eine eigens entwickelte Sensorplattform nicht herumkommen. Dies beinhaltet zudem den Nachteil, dass durch eine zu geringe Stückzahl von Plattformen nicht alle Suchende mit einer solchen ausgestattet werden könnten.

Die infrastrukturlosen Ansätze haben geringere Anschaffungskosten, vor allem dann, wenn man auf Multisensorplattformen setzt, die i. d. R. dem Nutzer bereits bekannt und vorhanden sind. Solch eine Plattform ist das Smartphone. Da so das Problem der beschränkten Stückzahl umgangen wird, kann potenziell jeder Suchende die Lösung nutzen. Zudem ist man nicht abhängig von äußerer Veränderung wie beim WLAN-Fingerprinting. Nachteilig ist jedoch, dass die günstigen Inertialeinheiten, die im Smartphone verbaut sind, stark einer zeitabhängigen Drift unterliegen. Diese Drift entsteht, da die Sensoren ein starkes Rauschen aufweisen und sich diese als zufällige Abweichungen auf die wahre Position akkumuliert niederschlagen. Ohne Filterung oder andere Stützung würde die resultierende Trajektorie stark von der wahren abweichen.

4 Beschreibung der Algorithmen

Die vorgestellte Anwendung zur Innenraumnavigation setzt auf die Ansätze der Inertialnavigation und basiert auf dem Smartphone. In der Abbildung 1 werden die genutzten Sensoren und ihre Verwendung dargestellt.





4.1 Anforderungen an die Anwendung

Die Anwendung wird für Android-Smartphones entwickelt. Es wird eine Buchsuche auf dem Smartphone mittels von der Bibliothek angebotenem Katalog durchgeführt. Anhand der Signatur des gewählten Buchs wird ein Routing berechnet, welches den Nutzer von der aktuellen Position zum Regal mit dem gewünschten Buch führt. Die Genauigkeit der Position soll kleiner zwei Metern entsprechen, da die Regalreihen einen Abstand zueinander von ca. einem halben Meter haben.

4.2 Schätzung der Lage und Orientierung des Smartphones

Grundlegend setzt die Anwendung auf die Fußgängerkoppelnavigation, bei der, anders als bei der Doppelintegration, die zeitliche Drift nur in der Ausrichtung des Smartphones auftritt. Um dies zu erreichen werden dann Positionen geschätzt, wenn ein Schritt vollzogen wird. Dazu wird der Beschleunigungssensor des Smartphones genutzt, um Schritte abzuleiten. Dabei gilt die Annahme, dass das Smartphone in der Hand in einem Winkel zwischen 20° bis 70° gehalten wird, sodass der Nutzer den Bildschirm betrachten kann. Durch das Schwingen der Hand während der Bewegung zeichnet der Beschleunigungssensor ein charakteristisches Muster auf, welches in der Abbildung 2 zu sehen ist.



Abb. 2: Schrittzähler nach WILLEMSEN (2016). Beschleunigungswerte gestrichelt, Grenzwerte als Kreise, Zeitpunkt des erkannten Schritts als schwarze Punkte.

Zum Erkennen eines Schrittes nach WILLEMSEN (2016) müssen zwei initial definierte Grenzwerte über- bzw. unterschritten werden. Anders als in WILLEMSEN (2016) werden die Beschleunigungsdaten nicht verebnet und nur die Z-Achse betrachtet, sondern der Betrag des Vektors aller drei Achsen. In beiden Fällen wird der betrachtete Wert aber um die Erdbeschleunigung reduziert. Dieser Schrittzähler benötigt initial zwei Parameter:

- Grenzwert,
- Skalierung.

Der Grenzwert stellt die initiale Grenze im positiven und negativen Bereich dar. Wird er zu niedrig gesetzt, werden durch das Rauschen viele falsche Schritte erkannt. Gegensätzlich dazu kann ein zu hoher Wert dazu führen, dass zu wenig bis hin zu gar keinen Schritten erkannt werden. Die Grenzwerte werden mit jedem Passieren dynamisch angepasst, wenn der aktuelle Wert des Beschleunigungsmessers diesen Grenzwert sowie der Skalierung über-/untersteigt. So wird sichergestellt, dass das Schrittverhalten des jeweiligen Nutzers an den Schrittzähler angepasst wird. Die Beschleunigungen werden zudem genutzt, um die Schrittlänge zu schätzen. Dazu kommt die Formel (1) von WEINBERG (2002) zum Einsatz.

$$l_i = K \cdot \sqrt[4]{A_{max} - A_{min}} \tag{1}$$

In der Formel ist der Faktor K enthalten, der eine Einheitstransformationskonstante darstellt, um von dem einheitslosen Term auf Meter zu kommen. Zusätzlich werden die maximalen und minimalen Beschleunigungswerte während eines Schrittes verwendet. Diese Formel wurde aufgrund von Untersuchungen in STOECK & STERNBERG (2019) gewählt. Zudem ist Kfür unterschiedliche Benutzer unterschiedlich. Ebenfalls aus diesen Untersuchungen ergab sich ein mittlerer Wert von 0,45 für K, um generell für verschiedene Benutzer zu gelten.

Die Höhenänderung des Smartphones wird über die internationale barometrische Höhenformel berechnet, welche die Höhenänderung zu einem Referenzpunkt, dessen Druck bekannt ist, ermittelt.

$$h = \frac{288.15 - 288.15 \cdot \sqrt[5.255]{p(h)}}{0.0065}$$
(2)

Die Formel (2) ist die nach der Höhe umgestellte internationale Höhenformel mit eingetragenen Werten für Temperatur (in K), Temperaturgradient (in K) und Luftdruck (in hPa) für die Standardatmosphäre auf Meereshöhe. Setzt man für p(h) den aktuellen Druck ein, erhält man die Höhe.

Die Ausrichtung des Smartphones wird relativ zum Startpunkt über Integration von Drehraten erhalten. Um die Rotation mit der Translation aus Schrittzähler und Schrittlänge zu vereinen, muss die Rotation um die Z-Achse des Smartphones in die Ebene gebracht werden. Um dies zu erreichen, werden die Neigungswinkel α und β aus dem Verhältnis der X-, bzw. Y-Achse zur Z-Achse des Beschleunigungssensors berechnet. Dazu kommen die Formeln (3) und (4) zum Einsatz.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{x}{z}\right) \tag{3}$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{y}{z}\right) \tag{4}$$

Mit diesen Neigungswinkeln werden die Drehraten in die Ebene rotiert, sodass jegliche Änderung der Drehwinkel um die Z-Achse vollzogen wird. Diese Drehraten werden über die Zeit integriert, um Drehwinkel zu erhalten.

Zum Zeitpunkt eines Schrittes sind somit Translation und Rotation bekannt, weshalb mit der Formel (5) mit der vorherigen Koordinate X_{i-1} , der Rotationsmatrix um Z $R_{Z,i}$ und dem Translationsvektor t_i die Koppelnavigation durchgeführt werden kann. Mit ihr erhält man so Koordinaten in der Ebene und zusammen mit der Höhe aus der barometrischen Höhenformel erhält man eine 2D + 1D Trajektorie.

$$X_i = X_{i-1} + R_{Z,i} * t_i (5)$$

4.3 Stützung der resultierenden Position

Wie eingangs erwähnt, unterliegen Low-Cost-IMUs einer zeitlichen Drift, bedingt durch das Sensorrauschen der Gyroskope und Beschleunigungsmesser. Ungestützt würden die Positionen der Koppelnavigation mit jedem Schritt ungenauer. Um diesem Umstand entgegen zu wirken, werden in dieser Anwendung die Karteninformationen als Stützung herangezogen. In erster Linie wird dazu der Routinggraph genutzt, welcher bereits neben dem Kartenmaterial vorhanden sein muss. Auf diesem Routinggraphen erfolgt die Navigation zum Ziel.

Ist eine Position innerhalb einer gewählten Distanz zum nächsten Teil des Routinggraphen (Abbildung 3 links oben), und ist die absolute Differenz zwischen der Ausrichtung des Smartphones und der Ausrichtung dieses Teils innerhalb einer gewissen Spanne (Abbildung 3 rechts oben), so wird die Position des Smartphones auf den Routinggraphen und die Ausrichtung des Smartphones auf die Ausrichtung des Routinggraphen gesetzt (Abbildung 3 links unten). Stimmt die Bedingung der Ausrichtung nicht mehr, wird der Graph wieder verlassen. So wird sichergestellt, dass der natürliche Verlauf während des Gehens um eine Kurve nachverfolgt wird.



Abb. 3: Stützung der Position und Ausrichtung durch Hinzunahme von Kartendaten.

Eine weitere Stützung, anhand von vorher definierten Bereichen in der Karte, stellt sicher, dass die Schrittlänge beim Treppensteigen auf die Länge einer Treppenstufe reduziert wird,

da dies mit der Formel nach WEINBERG (2002) nicht abgebildet werden kann. Zudem kann, sofern kein Barometer im Smartphone verbaut ist, eine künstliche Höhenveränderung angebracht werden.

4.4 Workflow

Nach dem Öffnen der Anwendung wird der Katalog der Bibliothek gezeigt, in dem der Nutzer die Buchsuche durchführt. Ist das gewünschte Buch im Katalog gefunden, wird per Betätigung des Knopfs "Buch finden" die Signatur ausgelesen und aus einer Datenbank die Position des Buches abgefragt (Abbildung 4 links). Anschließend wird der Nutzer aufgefordert, einen QR-Code abzuscannen, um die eigene Position sowie Initialausrichtung zu bestimmen. Danach wird ein Routing durchgeführt, um den Weg von der aktuellen Position zum gewünschten Buch darstellen zu können (Abbildung 4 Mitte). Mit jedem erfolgten Schritt, wird eine neue Position berechnet und die Karte auf dem Smartphone nachgeführt und aktualisiert (Abbildung 4 rechts).



Abb. 4: Links: Katalog der Bibliothek zum Suchen des Buches; Mitte: Route vom Standpunkt bis zum Stockwerkswechsel; rechts: Route vom Stockwerkswechsel bis zum Regal, in dem sich das Buch befindet.

5 Ergebnisse

Die Anwendung wurde in der Bibliothek der HCU getestet. Dazu wurde dasselbe Buch in 13 Durchläufen gesucht und jeweils von derselben Position im Erdgeschoss vor der Treppe zum 1. Obergeschoss gestartet. Der angezeigten Route wurde gefolgt und die letzte geschätzte Position ausgegeben. In der Abbildung 5 sind die Ergebnisse dargestellt.



Die jeweils letzten geschätzten Positionen der Durchläufe sind in einem durchschnittlichen Abstand von 1,35 Meter mit einer Standardabweichung von 0,5 Metern zum Zielknoten und erfüllen somit die Anforderungen an die Positionsgenauigkeit von unter zwei Metern. Die Positionen liegen alle weiter südwestlich der angestrebten Position, was darauf hindeutet, dass die Parameter des Schrittzählers nicht genau genug abgestimmt sind und somit ein bis zwei Schritte zu wenig erkannt worden sind. Nichtsdestotrotz reichen diese Ergebnisse aus, um den Nutzer sehr nah an sein gewünschtes Ziel zu bringen.

6 Verbesserung der Zielpositionierung

Die erreichbaren Genauigkeiten erreichen zwar das angestrebte Ziel, jedoch ist weiterhin unklar, welche Regalseite gesucht ist.

Eine Möglichkeit zur weiteren Reduzierung und Aufdeckung der Abweichung zwischen gewünschter und geschätzter Position ist das Einsetzen von weiteren Sensoren. Bspw. könnte ein Smartphone, welches mit einer Tiefenkamera ausgestattet ist (wie das Lenovo Phab 2 Pro), während des Ablaufens der Routingempfehlung Punktwolken aufnehmen, die zueinander anhand der Sensordaten des Smartphones ausgerichtet werden. Dabei werden die Punktwolken mit Hilfe der Lagewinkel α und β sowie des Orientierungswinkels um die Z-Achse zum Zeitpunkt eines Schrittes und der zu diesem Zeitpunkt gehörenden Koordinate aus der Koppelnavigation transformiert. Da die Tiefenkamera mit ca. 5 Hz aufnimmt, wird die Lage der Punktwolken zwischen den Schritten interpoliert.

Die durch die Ungenauigkeiten der Sensoren entstandenen Abweichungen könnten mittels Iterative Closest Point Algorithmus (ICP) ausgeglichen werden und damit kann dann auch die Position des Nutzers verbessert werden.

Um diese Möglichkeit zu untersuchen, wurde in einem ersten Versuch in den Büroflächen der HCU eine gerade Trajektorie aufgenommen (Abbildung 6). Die Länge beträgt ca. 18 Meter.



Abb. 6: Mit einem Lenovo Phab 2 Pro aufgenommene Trajektorie (durchgezogene Linie in Abbildungsmitte) in den Büroflächen der HCU.

Das Ergebnis der Transformation aus den Sensordaten und der Interpolation zwischen zwei Schritten ist in Abbildung 7 dargestellt.



Abb. 7: Ergebnis der Transformation der Punktwolken. Links Draufsicht, rechts Seitenansicht.



Abb. 8: Registrierte Punktwolke nach ICP-Algorithmus in CloudCompare. Links Draufsicht, rechts Seitenansicht.

Die Punktwolken wurden anschließend mit dem ICP-Algorithmus aus der Software CloudCompare noch einmal zueinander registriert. In der Anwendung, mit der die Punktwolken aufgenommen worden sind, ist dieser Algorithmus noch nicht implementiert. Die registrierte Punktwolke ist in der Abbildung 8 zu sehen.

Deutlich ist die fehlerhafte Registrierung erkennbar. Die Probleme bei der Registrierung entstehen u. a. dadurch, dass die Kamera des Smartphones im Landschaftsmodus gehalten wurde. Dies hat zur Folge, dass mehr Punkte zur rechten und zur linken Seite des Smartphones liegen, als ober- und unterhalb. Zudem ist das Smartphone bei natürlicher Nutzung näher am Boden (und auch dorthin ausgerichtet) als zur Decke, was dazu führt, dass kaum Punkte an der Decke aufgenommen wurden. Das führt dazu, dass die durch den ICP registrierten Punktwolken zum Boden hin rotiert werden, da dort der Großteil der Punkte liegt. Die aufgenommenen Flächen links und rechts vom Smartphone sind beide in etwa gleichgroß, weshalb dieses Phänomen hier nicht auftaucht.

Ein weiteres Problem liegt darin, dass sich in lang gestreckten Fluren die Geometrien der Punktwolken stark ähneln, wodurch einige Punktwolken fälschlicherweise negativ (entlang der Trajektorie gesehen) verschoben werden. Durch diesen Effekt wird die registrierte Strecke kürzer als die tatsächlich abgelaufene.

7 Fazit und Ausblick

Die hier vorgestellte Anwendung dient dazu, die Dauer der Suche eines Buches zu reduzieren. Der Nutzer sucht ein Buch mit Hilfe eines Onlinekatalogs und bekommt dessen Standort dann als Ziel seiner Innenraumnavigation in der Bibliothek angezeigt. Im Gegensatz zur allgemeinen Anforderung an die Genauigkeit einer Innenraumnavigation von zwei bis fünf Metern ist hier eine Genauigkeit von unter zwei Metern gefordert, da die Regale der Bibliothek sehr eng zusammenstehen. Durch eine zusätzliche Stützung der Position und der Ausrichtung durch die Hinzunahme von Kartendaten reduziert sich die auftretende Drift auf ein Minimum.

Die Abweichungen von 1,35 Metern im Mittel mit einer Standardabweichung von 0,5 Metern erfüllen die Anforderungen, jedoch ist es für den Nutzer und Sucher immer noch nicht ersichtlich, auf welcher Seite der Regalreihe das gesuchte Buch lokalisiert ist. Um diesen letzten Abschnitt zu optimieren, können weitere Sensoren, wie die Kamera, genutzt werden. Neben einer üblichen bildgebenden Kamera kann aber auch eine Tiefenkamera verwendet werden, welche in einigen Smartphones verbaut ist. Diese Geräte und Anwendungen zeigen ein hohes Potenzial. Durch die Punktwolke, die durch Laufzeitmessung von emittierten Laserstrahlen entsteht, können Ungenauigkeiten, die aus der Drift und dem Sensorrauschen der infertilen Smartphonessnoren entstehen, reduziert werden. Dazu werden aufeinanderfolgende Punktwolken mittels Iterative Closest Point Algorithmus zueinander registriert. Die berechnete Transformationsmatrix wird dann an die Koordinaten der Koppelnavigation angebracht.

Die Ergebnisse einer ersten Untersuchung zeigen einige Probleme auf, die es weiter zu untersuchen gilt. Zum einen spielt die Ausrichtung des Smartphones und somit der Kamera eine große Rolle, um eine gute Aufnahme der Geometrie zu erhalten. Im besten Falle sollte die Aufnahme Wände sowie Decke und Boden des Raumes gleich verteilt aufnehmen, damit die Punktwolken nicht driften. Zum anderen sind aufeinanderfolgende Punktwolken in homogenen Geometriebereichen, wie einem langgestreckten Flur, sich sehr ähnlich, sodass der ICP die Punktwolken unter Umständen in die falsche Richtung bzw. falsche Position transformiert.

Um dieses zweite Problem anzugehen, muss ein eigener ICP entwickelt werden, der die Plausibilität der Transformation testet. Sollte die Translation durch den ICP deutlich größer als eine Schrittlänge sein, ist die Transformation mit großer Wahrscheinlichkeit falsch, die Näherungswerte aus der Koppelnavigation können hier für einen Stützalgorithmus genutzt werden.

Eine andere Weiterentwicklung bietet das Robot Operating System (ROS), das u. a. eine sehr gute Möglichkeit bietet, Transformationen zwischen verschiedenen Koordinatensystem einer Multisensorumgebung wie dem Smartphone zu handhaben. Wenn man einmal das Verhältnis zwischen Gerätekoordinatensystem und Tiefenkamera aufgestellt hat, kann man die Punktwolken der Tiefenkamera ohne weitere Prozesse mit jeder Aufnahme in das Gerätekoordinatensystem transformieren. Wird zusätzlich das Verhältnis zwischen Geräte- und Weltkoordinatensystem aufgestellt, liegen die Punktwolken im Weltkoordinatensystem vor und lassen sich weiter bearbeiten. ROS ist zudem auch für Android und eine Vielzahl der im Smartphone verbauten Sensoren verfügbar, sodass die Indoornavigationsanwendung dorthin portiert werden kann.

Literatur

- BLANKENBACH, J. (2007): Handbuch der mobilen Geoinformation. Architektur und Umsetzung standortbezogener Dienste unter Berücksichtigung von Interoperabilität, Wichmann-Verlag.
- BLOESCH, M., OMARI, S., HUTTER, M. & SIEGWART, R. (2015): Robust visual inertial odometry using a direct EKF-based approach. In: 2015 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS) (pp. 298–304). IEEE.
- EHRLICH, C. R., BLANKENBACH, J. & SIEPRATH, A. (2016): Towards a robust smartphonebased 2,5D pedestrian localization. In: 2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN) (pp. 1–8). IEEE.
- KHALAJMEHRABADI, A., GATSIS, N. & AKOPIAN, D. (2017): Modern WLAN fingerprinting indoor positioning methods and deployment challenges. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 19(3), 1974–2002.
- LEUGNER, S. & HELLBRÜCK, H. (2018): Lessons learned: Indoor Ultra-Wideband localization systems for an industrial IoT application. Universitätsbibliothek Braunschweig. https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201807191346-0.
- STOECK, J. & STERNBERG, H. (2019): Navigation in a library using smartphones. In: Proceedings of the 4th KuVS/GI Expert Talk on Localization.
- WEINBERG, H. (2002): Using the ADXL202 in pedometer and personal navigation applications. Analog Devices AN-602 application note, 2(2), 1–6.
- WILLEMSEN, T. (2016): Fusionsalgorithmus zur autonomen Positionsschätzung im Gebäude, basierend auf MEMS-Inertialsensoren im Smartphone.

Maßstabskalibration von elektronischen Distanzmessern

Daniel WILLI, Jérôme CARREL und Steven BROSSI

1 Einleitung

Elektronische Distanzmesser, wie sie in den meisten Totalstationen eingebaut werden, sind sehr verbreitet (DEUMLICH & STAIGER 2002, MÖSER et al. 2012). Vor dem GNSS-Zeitalter wurden elektronische Distanzmessungen (EDM) für die Erstellung von Grundlagen- (z. B. DEICHL & FISCHER 1984) und Testnetzen (z. B. GEIGER et al. 1992) verwendet. Heute finden EDM hauptsächlich in der Ingenieurgeodäsie Verwendung (z. B. KISTLER et al. 2017).

EDM tragen in geodätischen Netzen zur Zuverlässigkeit und zur Bestimmung des Maßstabs bei (NIEMEIER 2008). Im zweiten Fall ist es zentral, dass der Maßstabsfaktor des verwendeten EDM-Instruments kalibriert ist.

In diesem Beitrag wird nach einer kurzen Einführung in die Prinzipien von EDM eine Methode zur Kalibration ebendieses Maßstabsfaktors vorgestellt. Der vierte Teil beinhaltet erste Resultate der neu in Betrieb genommenen Kalibrationsanlage, gefolgt von Schlussfolgerungen.

2 Funktionsweise von EDM

EDM-Messverfahren lassen sich in folgende Hauptkategorien einordnen (DEUMLICH & STAIGER 2002, RÜEGER 1996, MAAR & ZOGG 2014):

- Impulsverfahren
- Phasenvergleichsverfahren
- Wave-Form-Digitizer-(WFD)-Verfahren, als Kombination der obigen Verfahren

Impulsmessverfahren nutzen die Messung der Laufzeit des Licht-Impulses für den Hin- und Rückweg:

$$d = \frac{c}{2}\Delta t \tag{1}$$

wobei d die gemessene Distanz ist, c die Lichtgeschwindigkeit und Δt die gemessene Zeitdifferenz zwischen Sendezeitpunkt und Empfangszeitpunkt des Impulses.

Phasenvergleichsverfahren messen eine Phasenverschiebung zwischen ausgehender und einkommender Phase:

$$d = \frac{1}{2} \left(\lambda \, k + \frac{\Phi \, \lambda}{2\pi} \right) \tag{2}$$

wobei λ die Wellenlänge der Modulationsfrequenz ist, k die Phasenmehrdeutigkeit und Φ die Phasenverschiebung, als Winkel ausgedrückt.

Zur Vereinfachung können die Phasenmehrdeutigkeit und die Phasenverschiebung, in Anzahl Zyklen, zu Δn zusammengefasst werden, wodurch Gleichung (2) zu folgendem Ausdruck wird:

$$d = \frac{\lambda \,\Delta n}{2} \tag{3}$$

2.1 Fehlerquellen von EDM

Der limitierende Faktor bei der erreichbaren Genauigkeit von EDM-Beobachtungen liegt heute in der ungenügenden Erfassung von repräsentativen meteorologischen Parametern, namentlich der Temperatur entlang der Messtrecke (DEUMLICH & STAIGER 2002). Ein Fehler von 1 °C bei der Erfassung der repräsentativen Temperatur führt zu einem Fehler von 1 ppm (10⁻⁶) in der Distanzberechnung. Der Einfluss der Atmosphäre auf EDM-Messungen wird in der Fachliteratur detailliert beschrieben (z. B. in RÜEGER 1996, EDLÉN 1966) und ist nicht Inhalt dieses Beitrags.

Abgesehen von atmosphärischen Einflüssen weisen EDM hauptsächlich folgende instrumentellen Fehlerquellen auf (DEUMLICH & STAIGER 2002, RÜEGER 1996):

- Additionskonstanten
- Zyklische Fehler
- Maßstabsfaktor
- weitere Fehlerquellen

Additionskonstanten entstehen, weil die Nullpunkte der EDM sowohl am Instrument wie auch am Reflektor von der mechanischen Achse abweichen (RÜEGER 1996). Die Additionskonstante wird üblicherweise vom Hersteller bestimmt und direkt im Instrument korrigiert. Der Restfehler kann auf einer EDM-Teststrecke oder auf einer Interferometer-Bahn kalibriert werden (RÜEGER 1996, Kapitel 11). Die Additionskonstanten können unabhängig vom Maßstabsfaktor des Instruments bestimmt werden.

Zyklische Fehler entstehen durch elektrische Kopplung zwischen Referenzsignal und Sendesignal und durch optisches Übersprechen zwischen Sende- und Empfangssignal (RÜEGER 1996, Kapitel 12.2). Diese Fehler sind abhängig von der gemessenen Distanz und lassen sich auf einer entsprechenden Kalibrationsbasis kalibrieren. Die Frequenz der zyklischen Fehler entspricht der doppelten Modulationsfrequenz bzw. den Harmonischen dieser Grundfrequenz. Die Grössenordnung der zyklischen Fehler liegt bei modernen Instrumenten und normalen Messbedingungen (Standardprismen) innerhalb der spezifizierten Messgenauigkeit der Hersteller (LAND VICTORIA 2014). Bei kurzen Distanzen und Mini-Prismen können die zyklischen Fehler aber zum Beispiel beim TDA 5005 bis zu 6 mm betragen.

Der Maßstabsfaktor eines Instruments wird durch den internen Oszillator bestimmt. Als Oszillatoren werden üblicherweise Quarzoszillatoren verwendet. Oven Controlled Crystal Oscillators (OCXO) sind in punkto Genauigkeit und Stabilität den Temperature Compensated Crystal Oscillators (TCXO) überlegen, weil sie in einem Gehäuse mit Temperaturregelung eingebaut sind und so immer bei der gleichen Temperatur betrieben werden. TCXO sind mit Schaltungen versehen, die der Temperaturabhängigkeit des Quarzes entgegenwirken. Instrumente mit Quarzoszillatoren ohne Temperaturkorrektur weisen Gradienten von 0.45 ppm/°C auf (RÜEGER 1996, Kapitel 12.3.1). Des Weiteren sind Quarzoszillatoren einer Alterung ausgesetzt, wobei die Frequenz des Quarzoszillators mit der Zeit abnimmt. Der Effekt der Alterung auf die Frequenz beträgt weniger als 1 ppm/Jahr (RÜEGER 1996, Kapitel 12.3.1). Abweichungen der Frequenz der Lichtquelle (z. B. Infrarot-Diode oder Laser) von der nominalen Frequenz haben ebenfalls einen Einfluss auf den Maßstab (RÜEGER 1996, Kapitel 12.3.2).

Weitere Fehler, die sich nicht den drei vorgängigen Kategorien zuordnen lassen, werden als nichtlineare distanzabhängige Fehler bezeichnet (RÜEGER 1996, Kapitel 12.4). Sie finden ihren Ursprung in der Inhomogenität der Sende- und Empfangs-Dioden.

3 Kalibrationsanlage

Die Kalibrationsanlage für Maßstabsfaktoren verfolgt zwei Ziele. Einerseits soll mithilfe von präzisen EDM-Beobachtungen die Bestimmung des Maßstabs in geodätischen Netzen verbessert werden. Zweitens dient die routinemäßige Kalibrierung vor und nach Messkampagnen der Qualitätskontrolle der Instrumente. Somit lässt sich der Alterungsprozess der EDM-Instrumente verfolgen und überwachen.

Die Kalibrationsanlage ist in Abbildung 1 dargestellt. Herzstück der Anlage ist der Frequenzzähler TF930 von Thurlby Thandar Instruments, der den Abgleich von zwei Frequenzen ermöglicht. Der Frequenzzähler wird mit einer 10 MHz Referenzfrequenz aus einem Trimble Thunderbolt E gespeist. Die Stabilität des 10 MHz Ausgangssignals ist besser als 10⁻¹¹ für alle Zeitspannen bis zu einem Tag (TRIMBLE 2011).

3.1 Kalibrationsablauf

Falls die Instrumente über eine entsprechende Buchse verfügen, werden sie direkt elektrisch mit dem Frequenzzähler verbunden (das ist beim Kern Mekometer ME5000 der Fall). Andernfalls (Leica TDA5005, Leica TS30) werden sie über einen Kollimator, eine Glasfaser und einen Photodetektor mit dem Frequenzzähler verbunden (siehe Abbildung 2). Induktive Verbindungen sind in der Literatur erwähnt (RÜEGER 1996, Kapitel 13.4.1), wurden aber nicht umgesetzt.

Die Leica Tachymeter müssen vor der Messung in den EDM-Testmodus gesetzt werden, in welchem sie ein stetiges Signal senden. Der weitere Messablauf wird von der Software *Kalibro* (Eigenentwicklung) gesteuert. Die Messungen des Frequenzzählers werden mit einer Integrationszeit von 100 s durchgeführt und über die COM-Schnittstelle des Frequenzzählers automatisch in *Kalibro* registriert. Bei 100 s Integrationszeit ist die Auflösung des Frequenzzählers deutlich besser als 1 ppb (10^{-9}).

Beim Leica TS30 wird das Instrument über die GeoCOM-Schnittstelle (LEICA 2006) in den Testmodus versetzt. Dann wird wiederum über GeoCOM die nominale Frequenz ausgelesen. Beim Leica TDA5005 ist diese Funktion nicht implementiert, weswegen eine Webcam ver-

wendet wird. Die Webcam filmt den LCD-Bildschirm, der im Testmodus die nominale Frequenz anzeigt. Die Frequenz wird mithilfe der quelloffenen Software-Bibliothek *Tesseract*¹ direkt in *Kalibro* extrahiert und aufgezeichnet. Der Median aus mehreren Messungen dient schlussendlich als Messwert.



Abb. 1: Frequenzkalibrationsanlage von swisstopo während einer Messung mit einem Kern Mekometer ME5000 (A). Die Anlage besteht aus einem Frequenzzähler (B), einem GNSS-Empfänger (C), einem Steuercomputer (D), einem Kollimator (E) sowie aus einem Photodetektor (F). Die Webcam (G) wird bei Instrumenten ohne serielle Schnittstelle zum Auslesen der nominalen Frequenz verwendet.

Der Messablauf beim Kern Mekometer unterscheidet sich ein wenig. Das Mekometer misst nicht explizit eine Phasendifferenz zwischen zwei Signalen. Vielmehr wird die Modulationsfrequenz angepasst, bis die Phasendifferenz null beträgt (DEUMLICH & STAIGER 2002, Kapitel 5.3.4; RÜEGER 1996, Kapitel 9.2.4). Dieser Besonderheit wird bei der Kalibration Rechnung getragen. Mittels seriellem Datenkabel wird die Frequenz des Mekometers eingestellt und so der Frequenzbereich abgetastet (BELL 1992). In der Grundeinstellung von Kalibro werden die Frequenzen von 466 MHz bis 516 MHz in 2-MHz-Schritten abgetastet. Dies umfasst den Standard-Messbereich des Mekometers, der zwischen 470 MHz und 490 MHz liegt (BELL 1992).

Weitere Instrumente, insbesondere Instrumente von anderen Herstellern, wurden noch nicht getestet. Prinzipiell sind auch Instrumente anderer Hersteller mit der Kalibrationsanlage kompatibel, vorausgesetzt, sie besitzen einen EDM-Testmodus. Je nach Modulationsfrequenz, Modulationsart, Wellenlänge der Trägerwelle, Leistung, Pulsdauer und Optik (wegen

¹ https://github.com/tesseract-ocr/



Abb. 2: Leica TDA5005 mit aufgesetztem Adapter und Kollimator. Die hellere Glasfaser ist gut zu erkennen. Im Hintergrund sind der Frequenzzähler und der Photodetektor zu sehen.

der Einkopplung in die Glasfaser) des zu testenden Instruments können Inkompatibilitäten auftreten.

3.2 Berechnung des Maßstabsfaktors

Eine wahre Distanz \check{d} lässt sich aus einer gemessenen Distanz d_{δ} und einem Maßstabsfaktor m wie folgt berechnen:

$$\check{d} = d_{\delta}(1+m) \tag{4}$$

Mithilfe von $\Delta t = \Delta n/f$ beziehungsweise $\lambda = c/f$ lassen sich Gleichung (1) beziehungsweise Gleichung (3) in folgende Form bringen:

$$d(f) = \frac{c}{2} \frac{\Delta n}{f} \tag{5}$$

Interessanterweise lassen sich beide Messprinzipien, sowohl Impulsmessungen wie auch Phasenmessungen, auf diese Gleichung reduzieren. Im ersten Fall steht Δn für die Anzahl Schwingungen des internen Oszillators und damit zusammen mit 1/f für eine Zeitdauer. Im zweiten Fall hingegen steht Δn für eine Anzahl Wellenlängen (Δn ist für beide Fälle nicht zwangsläufig ganzzahlig). In beiden Fällen ist die gemessen Funktion abhängig von der Modulationsfrequenz und damit vom Oszillator des Instruments.

Gleichung (5) ist nur in der Annahme gültig, dass die Modulationsfrequenz stimmt. Eine fehlerbehaftete Modulationsfrequenz f_{δ} würde zu einer fehlerbehafteten Distanz d_{δ} führen:

$$\check{d} = \frac{c}{2} \frac{\Delta n}{f_{nom}}; \ d_{\delta} = \frac{c}{2} \frac{\Delta n}{f_{\delta}}$$
(6)

Ein Einsetzen dieser Terme in Gleichung (4) ergibt:

$$\check{d} = \frac{c}{2} \frac{\Delta n}{f_{nom}} = \frac{c}{2} \frac{\Delta n}{f_{\delta}} (1+m)$$
(7)

Umformung von Gleichung (7) führt zum endgültigen Ausdruck für den Maßstabsfehler:

$$m = \frac{f_{\delta}}{f_{nom}} - 1 = \frac{f_{\delta} - f_{nom}}{f_{nom}} \tag{8}$$

Vollständigkeitshalber sei hier nochmals festgehalten, dass der so bestimmte Maßstab nur den Oszillatorfehler beinhaltet. Etwaige andere Fehler, die einen Einfluss auf den Maßstab haben, sind nicht erfasst (RÜEGER 1996, Kapitel 13.4.1). Solche Fehler lassen sich einzig auf einer Kalibrationsbasis mit bekannter Länge bestimmen.

4 Ergebnisse

Im Rahmen einer ersten Erprobung des Systems wurden die drei elektronischen Distanzmesser von swisstopo einer Kalibration unterzogen. Bei den drei Instrumenten handelt es sich um ein Leica TDA5005, ein Leica TS30 sowie ein Kern Mekometer ME5000. Die technischen Daten der Instrumente sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

Instrument	Тур	Beschaf- fungsjahr	Messprinzip	Genauigkeit gemäß Hersteller (genaueste Messung)
Leica TDA5005	Totalsta- tion	2008	Phasenmessverfahren	1 mm + 2 ppm (Leica 2004)
Leica TS30	Totalsta- tion	2009	Phasenmessverfahren (LEICA 2009)	0.6 mm + 1 ppm (Leica 2009)
Kern Me- kometer ME5000	Nur EDM	1986	Phasenvergleich unter Modulation der Frequenz (KERN 1986)	0.2 mm + 0.2 ppm (KERN 1986)

Tabelle 1: Technische Spezifikationen der verwendeten Instrumente.

4.1 Leica TDA5005

Der Leica TDA 5005 wurde insgesamt viermal einer Kalibration unterzogen, dreimal vor den Sommerkampagnen und einmal nach den Sommerkampagnen. Dazwischen stand das Instrument ca. eine Woche im Feldeinsatz. Die vier Kalibrationen sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Der TDA5005 weist insgesamt über alle Kalibrationen einen sehr kleinen und stabilen Maßstabsfaktor auf. Über 19 h (Kalibration 1) weist der Maßstabsfaktor eine Drift von bloß -0.003 ppm/h auf. In der 1. Betriebsstunde ist die Drift höher, aber für geodätische Messungen immer noch nicht relevant. Vor und nach dem Sommereinsatz (Vergleich der Kalibrationen 1 bis 3 mit Kalibration 4) ist kein Unterschied auszumachen. Die Resultate der ersten Kalibration (19.6.2019) sind in Abbildung 3 dargestellt.

In den ersten zwei Stunden ist der Maßstabsfaktor relativ unstabil, wobei die Variationen weniger als 0.1 ppm betragen und damit sehr klein sind. Anschließend nimmt der Maßstabsfaktor langsam ab, wobei sich nach 20 h keine Stabilisierung abzeichnet. Die Trendlinie ist mit Zurückhaltung zu interpretieren, da sich das Verhalten des Instruments in den ersten zwei Stunden deutlich vom späteren Verhalten unterscheidet. In der Messpraxis ist nicht davon auszugehen, dass sich ein Instrument mehrere Stunden lang mit eingeschaltetem EDM aufwärmen kann.

Tabelle 2: Kalibrationsresultate des Leica TDA5005. Der Mittel- und Medianwert sowie die Standardabweichung ("Std.") wurden über die ganze Dauer gerechnet. a und b stehen für das Best-fit-Polynom 1. Grades a + bx, über die gesamte Zeitreihe respektive über die erste Stunde ("1. Std.").

					Gesamt		1. Std.	
Datum	Dauer [h]	Mittel [ppm]	Median [ppm]	Std. [ppm]	a [ppm]	b [ppm/h]	a [ppm]	b [ppm/h]
19.06.2019	19	-0.09	-0.10	0.02	-0.07	-0.003	-0.02	-0.017
01.07.2019	1.9	-0.08	-0.08	0.01	-0.06	-0.023	-0.06	-0.034
01.07.2019	3.8	-0.12	-0.12	0.02	-0.09	-0.015	-0.10	-0.001
27.08.2019	1.7	-0.09	-0.09	0.01	-0.09	-0.006	-0.09	-0.012



Abb. 3: Maßstabsfaktor des Leica TDA5005 in der Kalibration des 19.6.2019.

Die Sprünge zwischen ca. 6 h und 10 h entsprechen 0.02 ppm Unterschied im Maßstab und damit 1 Hz Unterschied in der nominalen Frequenz. Womöglich handelt es sich bei diesen Sprüngen um Fehler bei der Texterkennung in den Webcam-Bildern. Die bestehende Datengrundlage erlaubt keine schärfere Aussage.

4.2 Leica TS30

Die Leica TS30 wurde zweimal einer Kalibration unterzogen. Dazwischen stand das Instrument mehrere Tage im Feldeinsatz. Der Maßstabsfaktor hat in dieser Zeit eine nichtsignifikante Änderung von 0.04 ppm erfahren.

Die Resultate der Kalibration des 8.7.2019 sind der Abbildung 4 zu entnehmen. Der Maßstabsfaktor zeigt einen Trend von ca. -0.01 ppm pro Stunde. Im Vergleich zum TDA5005 weist die TS30 deutlich größere Variationen aus. Auch die Drift des Maßstabs über die gesamte Kalibration ist deutlich ausgeprägter als beim TDA5005 und erreicht bei der TS30 Werte von ca. 0.01 ppm pro Stunde. In der ersten Stunde ist die Drift ca. zwei- bis sechsmal höher und damit in der gleichen Größenordnung wie die Drift in der ersten Betriebsstunde beim TDA5005.



Abb. 4: Maßstabsfaktor der Leica TS30 in der Kalibration des 8.7.2019.

Tabelle 3: Kalibrationsresultate der Leica TS30. Der Mittel- und Medianwert sowie die Standardabweichung ("Std.") wurden über die ganze Dauer gerechnet. a und b stehen für das Best-fit-Polynom 1. Grades a + bx, über die gesamte Zeitreihe respektive über die erste Stunde ("1. Std.").

					Gesamt		1. Std.	
Datum	Dauer [h]	Mittel [ppm]	Median [ppm]	Std. [ppm]	a [ppm]	b [ppm/h]	a [ppm]	b [ppm/h]
08.07.2019	5	0.17	0.17	0.02	0.20	-0.011	0.21	-0.024
27.08.2019	5	0.21	0.20	0.02	0.23	-0.010	0.26	-0.064

4.3 Kern Mekometer ME5000

Das Kern Mekometer wurde im Zeitraum von Juli bis August 2019 dreimal kalibriert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 festgehalten. Als einziges der drei kalibrierten Instrumente weist das Mekometer einen signifikanten Unterschied im Maßstabsfaktor auf. Innerhalb von ca. sieben Wochen hat der Maßstabsfaktor um 0.22 ppm zugenommen. Damit sind die Spezifikationen des Instrumentenherstellers überschritten (siehe Tabelle 1). Diese Veränderung des Maßstabsfaktors ist aufgrund der Stichprobe von nur zwei Messungen nicht repräsentativ.



Abb. 5: Maßstabsfaktor des ME5000 in der Kalibration des 22.8.2019 für alle Frequenzen von 466 MHz bis 516 MHz in 2-MHz-Schritten.

Tabelle 4: Kalibrationsresultate des Mekometers ME5000. Der Mittel- und Medianwert sowie die Standardabweichung ("Std.") wurden über die ganze Dauer gerechnet. a und b stehen für das Best-fit-Polynom 1. Grades a + bx, über die gesamte Zeitreihe respektive über die erste Stunde ("1. Std.").

					Gesamt		1. Std.	
Datum	Dauer [h]	Mittel [ppm]	Median [ppm]	Std. [ppm]	a [ppm]	b [ppm/h]	a [ppm]	b [ppm/h]
04.07.2019	2.5	0.89	0.89	0.01	0.90	-0.007	0.91	-0.042
04.07.2019	18	0.88	0.88	0.01	0.90	-0.002	0.89	0.006
22.08.2019	18	1.10	1.10	0.01	1.11	-0.001	1.17	-0.111

Der aufgezeichnete Maßstabsfaktor während der Kalibration vom 22.8.2019 ist in Abbildung 5 dargestellt. Nach einer Aufwärmphase von ca. 2 h ist der Maßstabsfaktor stabil. Während der ersten Betriebsstunde wies das Mekometer eine Drift von -0.1 ppm/h auf (siehe auch Tabelle 4). Kurzperiodische Variationen liegen an den unterschiedlichen Maßstabsfaktoren der unterschiedlichen Frequenzen des Mekometers. Dieser Effekt ist in Abbildung 6 exemplarisch anhand von zwei Frequenzen dargestellt. Der Unterschied zwischen den Frequenzen beträgt bis zu 0.01 ppm. Die zeitliche Variation des Maßstabsfaktors über die 18 Stunden ist jedoch klar dominierend.



Abb. 6: Maßstabsfaktor des ME5000 in der Kalibration des 22.8.2019 für die Frequenzen 468 MHz und 486 MHz.

5 Schlussfolgerungen

Die Frequenzkalibrationsanlage von swisstopo ist in Betrieb und wurde erfolgreich verwendet, um drei verschiedene Instrumente zu kalibrieren. Die erhaltenen Werte sind plausibel. Nur das Kern Mekometer ME5000 weist einen Maßstabsfaktor auf, der seit der Inbetriebnahme der Kalibrationsanlage eine signifikante Änderung erfahren hat. Bei allen Instrumenten wurde eine Abnahme des Maßstabsfaktors mit zunehmender Betriebszeit des Instruments festgestellt. Die Drift liegt in einer Größenordnung, die für Messungen unter realen Bedingungen nicht relevant ist, da das Fehlerbudget weitgehend von meteorologischen Einflüssen dominiert wird. Die festgestellten mittleren Maßstabsfaktoren von ca. -0.1 ppm (TDA5005) bis ca. +1 ppm (ME5000) hingegen sind auch für Messungen unter realen Bedingungen von Belang.

Weiterführende Arbeiten sind nötig, um diese ersten Resultate auf reale Messungen zu übertragen. Die GeoCOM-Schnittstelle des Leica TS30 erlaubt das Ein- und Ausschalten des Distanzmessmodus. Damit wird ein typischer Betrieb des Instruments mit Messpausen zwischen den einzelnen Distanzmessungen simuliert werden können.

Des Weiteren werden die Instrumente alle drei Jahre einer Kalibration auf einer Kalibrationsbasis unterzogen. Ebenso ist nächstes Jahr eine Kalibration auf einer klimatisierten 50-m-Interferometermessbahn geplant. Der Vergleich dieser Kalibrationen mit der Frequenzkalibration wird Anhaltspunkte zur Frage liefern, inwiefern die Frequenzkalibration auf reale Messungen übertragbar ist.

Schließlich wird swisstopo einen kleinen Ringversuch anstreben, um die Resultate dieser Kalibrationsanlage mit Resultaten anderer Gruppen abzugleichen.

Literatur

- BELL, B. (1992): ME5000 Test Measurements. In: Bell, B. (Hrsg.): Proceedings of the Workshop on the Use and Calibration of the Kern ME5000 Mekometer. Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford, CA, USA.
- DEICHL, K. & FISCHER, W. (1984): Elektromagnetische Distanzmessungen im Basisvergrößerungsnetz. In: Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz, Band 30, Teil IV, Schweizerische Geodätische Kommission, Zürich, Schweiz.
- DEUMLICH, F. & STAIGER, R. (2002): Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. ISBN 978-3-87907-305-4.
- EDLÉN, B. (1966): The Refractive Index of Air. Metrologia 2:71–80. https://doi.org/10.1088/0026-1394/2/2/002
- GEIGER, A., KAHLE, H.-G., KÖCHLE, R., MEIER, D., NEININGER, B., SCHNEIDER, D. & WIRTH B. (1992): Dreidimensionales Testnetz Turtmann 1985 - 1990 – Teil 1. In: Astronomischgeodätische Arbeiten in der Schweiz, Band 45, Schweizerische Geodätische Kommission, Zürich, Schweiz.
- GOTTWALD, R., MÜLLER, I. & OBRIST, M. (1997): Leica TDA5000 -- Short Range Performance Tests with Corner Cube and Tooling Ball Reflectors. In: Proceedings of the 5th International Workshop on Accelerator Alignment, Argonne, Illinois, USA. eConf C971013. https://www.slac.stanford.edu/econf/C971013/

- KERN (1986): Bedienungsanleitung Präzisionsdistanzmesser Mekometer ME 5000. Kern, Aarau, Schweiz.
- KISTLER, M., MAHLER, P., SCHEFER, S. & CONDAMIN, S. (2017): 10 Jahre geodätisches Grundlagen- und Überwachungsnetz im Felslabor Mont Terri. In: Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz, 2017. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. ISBN 978-38790-763-07.
- LAND VICTORIA (2014): EDM Calibration Handbook Edition 15. Land Victoria, Department of Transport, Planning and Local Infrastructure, Melbourne, Australien.
- LEICA (2004): Technische Daten für TDM/TDA5005 «733 013 I.2004». Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz.
- LEICA (2006): GeoCOM Reference Manual «754953-1.10.0en». Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz.
- LEICA (2009): Leica TS30 Technische Daten «766428de III.09 RVA». Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz.
- MAAR, H. & ZOGG H.-M. (2014): Wave Form Digitizer Technology White Paper. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz.
- MÖSER, M., HOFFMEISTER, H., MÜLLER, G., STAIGER, R., SCHLEMMER, H., WANNINGER, L. (2012): Grundlagen. In: Möser, M., MÜLLER & G., SCHLEMMER, H. (Hrsg.): Handbuch Ingenieurgeodäsie. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. ISBN 978-3-87907-504-1
- NIEMEIER, W. (2008): Ausgleichungsrechnung. Walter de Gruyter, Berlin. ISBN 978-3-11019-055-7
- RÜEGER, J. M. (1996): Electronic Distance Measurement. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-80233-1
- TRIMBLE (2011): The Trimble® Thunderbolt® E GPS Disciplined Clock, Broschüre, Trimble Navigation Limited, Sunnyvale CA, USA.

Entwicklung und Evaluierung eines kompakten Multisensorsystems für den Einsatz auf Drohnen

Denise BECKER, Simon STEMMLER und Alexander REITERER

1 Zusammenfassung

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) stellen sich als sehr flexible und praxistaugliche Geräte auch für die Vermessung dar. Der Großteil der Systeme wird derzeit mit handelsüblichen Kameras betrieben – daraus abgeleitete Orthofotos oder Punktwolken werden vielfach für die Planung und Dokumentation verschiedener Anwendungen erfolgreich eingesetzt. Der Nachteil, der sich daraus ergibt, liegt zum einen in der sehr aufwändigen Berechnung von 3D-Punktwolken aus hochauflösenden Kamerabildern, zum anderen aber auch in der Unfähigkeit, Vegetation zu durchdringen und damit ein Geländemodell mit hoher Zuverlässigkeit zu erzeugen. Ebenfalls schwierig ist das Durchdringen von halbdurchlässigen Medien (z. B. Wasser). Abhilfe schaffen Multisensorsysteme, welche neben Kameras auch entsprechende Abstandsmodule integriert haben und somit aus mehreren Datenströmen einen Mehrwert generieren können. Die Integration unterschiedlicher Sensoren inkl. der notwendigen Verortung bringt aber auch einige Herausforderungen mit sich, u. a. eine komplexe und aufwändige Kalibration.

Das Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM in Freiburg hat ein leichtgewichtiges und kompaktes Multisensorsystem entwickelt, welches aus folgenden Teilen besteht: schnelles laserbasiertes Abstandsmessmodul, zwei Farbkameras, inertiale Messeinheit (Inertial Measurement Unit, IMU) und Positionierungssystem (Global Navigation Satellite System, GNSS). Alle mechanischen Komponenten und das Gehäuse wurden soweit gewichtsoptimiert ausgeführt, dass ein Gesamtgewicht von knapp über 2 kg realisiert werden konnte. Die maximale Messdistanz des auf dem Pulslaufzeitverfahren basierenden Abstandsmessmoduls liegt bei 300 m (bei einer idealen Reflektivität der Oberfläche von 100 %). Die Präzision der Einzelpunktmessung (3 σ) liegt bei 15 mm.

Durch Integration von zwei RGB-Kameras kann nicht nur die erfasste Punktwolke entsprechend texturiert werden, sondern auch hochaufgelöste Orthofotos gerechnet werden. Durch diese zwei Datenströme (Punktwolke und Bilder) gelingt eine vollautomatisierte Auswertung der Daten mit Hilfe des maschinellen Lernens schnell und zuverlässig.

Der wissenschaftliche Beitrag wird zum einen die Entwicklungsschritte des Systems im Detail präsentieren, dann aber auch konkrete Ergebnisse aus der Anwendung vorstellen und eine Charakterisierung (Evaluierung) der Systemkomponenten darlegen.

2 Einleitung

Die schnelle technologische Entwicklung unbemannter Flugplattformen (englische Bezeichnung UAVs) steigert die Attraktivität für den Einsatz auch im zivilen Sektor. In Kombination mit einem Multisensorsystem wird eine Erfassung komplexer Strukturen, wie Städte, Baustellen und Wälder, in kürzester Zeit ermöglicht (SCHWARZ 2017).

Die Erfassung von Infrastruktur ist bis dato mit einem hohen finanziellen und zeitlichen Aufwand verbunden. Jedoch ist gerade bei kritischen Infrastrukturen eine engmaschige Überwachung von breitem Interesse, um etwaige Beschädigungen oder Veränderungen frühestmöglich erkennen zu können. Auch für die Erfassung, Kontrolle und Wuchsbestimmung von Wäldern wird vermehrt auf UAVs mit Multisensorsystemen (MSS) gesetzt (WALLACE et al. 2017).

Auch im Bereich der Deformationsvermessung, vor allem in alpinen Regionen, kommen immer häufiger UAV-getragene Messsysteme zum Einsatz. Lawinen- und Murenabgänge, Hangrutschungen und Steinschläge stellen ein enormes Sicherheitsrisiko für Menschen und deren Lebensraum, Siedlungs- und Infrastrukturraum dar. Durch eine regelmäßige Erfassung gefährdeter Hänge oder Böschungen können oberflächennahe Veränderungen in Lage und Morphologie erkannt werden. Die Kombination der 3D-Geometrie-Erfassung mittels LiDAR und semantischer Information aus den Kameras generiert eine fundierte Basis für eine Risikoabschätzung, um Schadereignisse verhindern zu können (TSCHARF et al. 2016).

Betrachtet man all diese Anwendungsfälle, ist der Vorteil leichtgewichtiger MSS mit UAVs offensichtlich. Messkampagnen können periodisch mit kurzen zeitlichen Abständen durchgeführt werden. Der zeitliche und finanzielle Aufwand für diese Messkampagnen ist dabei sehr gering.

Das Fraunhofer IPM hat dafür ein leichtgewichtiges MSS entwickelt – den Lightweight Airborne Profiler (LAP). Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Ermittlung der Spezifikationen des LAP-Systems im Realeinsatz.

3 Lightweight Airborne Profiler (LAP)

Der LAP wurde mit folgenden Komponenten aufgebaut: schnelles laserbasiertes Abstandsmessmodul (bis zu 60 000 Punkte pro Sekunde), Laserablenkvorrichtung (bis zu 60 Messprofile pro Sekunde), zwei RGB-Kameras sowie eine GNSS-gestützte IMU. Eine schematische Darstellung der Anordnung der Komponenten des LAP ist in Abbildung 1 zu sehen. Durch die kompakte Bauweise und konsequente Verwendung von Leichtbaumaterialien konnte ein Systemgewicht von 2,3 kg erreicht werden.

Im LAP wurde ein LiDAR-Modul integriert, welches direkt die Lichtlaufzeit eines gepulsten Lasers misst (Time-of-Flight, TOF). Der eingesetzte Laser arbeitet mit einer Wellenlänge von 905 nm und ist der Laserklasse 1M zugeordnet. Die Ablenkung erfolgt mittels eines vierseitigen Polygons, um das linear messende System in ein scannendes System zu überführen. Die Spezifikationen des LiDAR-Moduls sind Tabelle 1 zu entnehmen.



Abb. 1: Schematische Darstellung des LAP mit den Koordinatensystemen der einzelnen Komponenten.

Laser	905 nm, Laserklasse 1M		
Auflösung Scanner	1 mm		
Winkelauflösung	0.09° oder 0,18° (einstellbar)		
Scanfrequenz	30 Hz / 1000 px oder 60 Hz / 500 px		
Arbeitsbereich	2,5 m – 300 m (bei 100 % Remission)		
	2,5 m – 90 m (bei 10 % Remission)		

Tabelle 1: Spezifikation des LiDAR Moduls

Die Time-of-Flight Messtechnik bringt den großen Vorteil mit sich, dass es möglich ist, mittels eines Messpulses mehrere Objekte zu erfassen. Diese Mehrpulsauswertung ist von besonderem Interesse bei der Erfassung von Waldflächen, da sowohl Oberflächenpunkte als auch Bodenpunkte mit nur einer Messung erfasst werden können.

Ebenfalls erfolgte die Integration von zwei RGB-Kameras. Dabei wurde auf CMOS-Sensoren mit Global Shutter gesetzt, um die Bewegungsunschärfe der Aufnahmen im Flug zu minimieren. Der Einsatz von Festbrennweiten-Objektiven mit 25 mm ergeben pro Kamera einen Öffnungswinkel von 32°. Die Kameras sind zum Scanner so ausgerichtet, dass sie mit einem leichten Überlapp einen Winkel von ca. 62° abdecken. Abbildung 2 illustriert die Anordnung der Systemeinheiten Kameras und Scanner.



Die Pixelwerte der Kameras können direkt auf die 3D-Punkte projiziert werden. Somit erhält man eine texturierte 3D-Punktwolke. Grundlage hierfür ist die Aufzeichnung der exakten Winkelstellung der Ablenkvorrichtung zum Zeitpunkt der Aussendung des Lichtimpulses. Durch die Transformation der Ursprungspunkte der Kameras auf den Ursprungpunkt des Scanners kann mittels des aufgezeichneten Abstrahlwinkels und der optischen Achsen errechnet werden, welcher Pixelfarbwert welchem 3D-Punkt zugewiesen werden soll.

Bei der integrierten GNSS-gestützten IMU handelt es sich um eine *APX15* von *Applanix*. Diese IMU wurde speziell für UAV-Anwendungen entwickelt. Eine genaue Positionierung des Systems wird mittels Trägerphasenauswertung der L1 und L2 Frequenzen von GLONASS und GPS Satelliten erreicht. Die räumliche Orientierung wird über Kreisel- und Beschleunigungssensoren ermittelt. Aus diesen beiden Datenströmen kann eine exakte Trajektorie des LAP und der Winkellage im Raum errechnet werden. Dies bildet die Grundlage für die Aufbereitung der Scan- und Kameradaten und der Georeferenzierung.

Essentiell ist eine hochgenaue Kalibrierung des LAP vor dem Einsatz. Dabei müssen die Ursprünge der Koordinatensysteme der Einzelkomponenten (Kamers, IMU und Scanner) auf einen gemeinsamen Ursprung transformiert werden (STEMMLER et al. 2019).

4 Systemevaluierung – praktische Durchführung

Für eine Evaluierung des LAP wurde eine Messkampagne mit mehreren Testflügen geplant. Um komparable Messergebnisse zu erhalten, wurde ein Messkonzept erarbeitet, wie in Abbildung 3 gezeigt, welches eine schematische, reproduzierbare Analyse ermöglicht.



Abb. 3: Messkonzept zur Systemevaluierung des LAP.

4.1 Durchführung der Messflüge

Für die Testflüge wurde eine ein Hektar große Fläche gewählt. Schiffscontainer und kleine Gebäude erlauben eine Analyse an geometrisch fest definierten Objekten. Die Ausbringung von neun Bodenkontrollpunkten (GCP) und Einmessung dieser GCP mithilfe des RTK-Verfahrens (Real Time Kinematic) und virtueller Referenzstation (VRS) bilden die Grundlage für die Bestimmung der absoluten Lagegenauigkeit. Die Einmessung der GCP erfolgte über einen Zeitraum von 10 min pro Punkt, um eine Positionsgenauigkeit < 1 cm zu erreichen. Abbildung 4 zeigt die Untersuchungsfläche mit den Positionen der ausgebrachten GCP. Für die GCP wurde das Targetdesign des Instituts für Geodäsie und Geoinformation (IGG) der Universität Bonn verwendet um die Koordinatenschätzung aus der Punktwolke zu optimieren (JANSEN et al. 2018).



Abb. 4: Befliegungsgebiet mit Positionen der GCP

Als Trägerplattform wurde ein Oktokopter mit koaxialer Rotoranordnung eingesetzt. Die koaxiale Anordnung der Rotoren ermöglicht ein sehr ruhiges Flugverhalten und der etwaige Ausfall eines Motors kann kompensiert werden. Die Flugzeit dieses Oktokopters beschränkt sich auf maximal 15 Minuten. Abbildung 5 zeigt den eingesetzten Oktokopter mit montiertem LAP und GNSS-Antennen, sowohl für die Flugsteuerung als auch für die Positionierung des LAP. Bei der Montage der GNSS-Antenne ist darauf zu achten, dass diese über der Rotationsfläche der Rotoren liegt, um Störungen des GNSS-Empfangs zu minimieren.



Abb. 5: Abflugbereites UAV mit unterseitig montiertem LAP.

Für die Messflüge wurden Flugplanungen für eine autonome Befliegung angelegt. Dabei sind der Flugpfad und die Fluggeschwindigkeit von 3 m/s für alle Flüge identisch. Die Flughöhe wurde variiert zwischen 45 m über Grund und 55 m über Grund.

4.2 Aufbereitung der Daten

Die Aufbereitung der Daten erfolgt in zwei Prozessen. Zuerst wird die Trajektorie aus den Rohdaten der GNSS-gestützten IMU berechnet. Die Genauigkeit der Georeferenzierung wird durch den Einsatz von Korrekturdaten einer Referenzstation mit Hilfe der Basislinienauswertung erhöht (HOFMANN-WELLENHOF et al. 2008). Anschließend werden die Scandaten mittels der Trajektorie decodiert und georeferenziert. Die Texturierung der Punktwolke stellt den letzten Schritt der Aufbereitung dar. Die Ausgabe der Punktwolke erfolgt als LAS-Datei.

5 Evaluierung

Bei der Trajektorienbestimmung weisen die Messflüge sehr unterschiedliche Genauigkeiten auf. Bei näherer Betrachtung war dies auf eine ungünstige GNSS-Satellitenkonstellation zurückzuführen. Ein weiterer Einflussfaktor auf die Genauigkeiten der Positionsbestimmungen sind elektromagnetische Interferenzen, welche durch die Abschirmung der GNSS-Antenne mittels einer Metallplatte minimiert wurden.

Die absolute Genauigkeit wird unter Zuhilfenahme des angelegten Referenzpunktfeldes bestimmt. Über die globalen, im Vorfeld aufgenommenen GCP-Koordinaten kann die Qualität der Messungen bewertet werden. Durch den Vergleich zwischen Soll-Koordinaten und Ist-Koordinaten besteht die Möglichkeit, die absoluten Abweichungen der Messungen zu bestimmen. Die GCP, die mittels differentiellem GPS eingemessen wurden, definieren die SollKoordinaten. Aus der Punktwolke erfolgt die Suche der Ist-Koordinaten anhand der visuell detektierten Targets.

Die Koordinaten Xg, Yg und Zg, wie in Abbildung 6 dargestellt, geben den globalen Bezug an. Der nächstgelegene Laserscanpunkt, welcher den Mittelpunkt der gekreuzten Linien darstellt, wird als Koordinate gespeichert und mit den global aufgenommenen Referenzpunkten verglichen.



Abb. 6: GCP in der Punktwolke mit entsprechenden Koordinaten.

Durch die GCP-Suche in der Punktwolke treten Unsicherheiten auf und führt die Mittelpunktbestimmung nicht zu eindeutigen Ergebnissen. Der exakte, reale Schnittpunkt der Mitte der GCP ist bedingt durch die Punktdichte der Punktwolke nicht immer exakt gegeben. Bei fehlerbehafteten Projektionen der RGB-Werte auf die Punktwolke kann es zu einer verschobenen bzw. falschen Einfärbung der GCP kommen, was eine eindeutige händische Festlegung des Mittelpunktes erschwert. Aufgrund der beschriebenen Tatsachen wird im Vorhinein ersichtlich, dass nicht nur die absoluten Messabweichungen untersucht werden, sondern vielmehr ein Zusammenschluss von mehreren Abweichungsquellen vorliegt. Die primären Einflussfaktoren der Genauigkeit der Georeferenzierung sind vor allem die Projektions- sowie Trajektoriengenauigkeit.

Die Genauigkeiten der GNSS-gestützten IMU wird vom Hersteller mit ca. \pm 5,0 cm angegeben. Abbildung 7 zeigt die Abweichungen der Soll- und Ist-Koordinaten. Die mittlere Abweichung liegt bei ca. \pm 10 cm.

Ein weiterer Aspekt ist der vertikale Versatz, welcher an einer Objektebene beobachtet werden kann. Als Prüfobjekt dient hier ein Schiffscontainer. Durch die Mehrfachaufnahme des Containers in mehreren Flugstreifen ergeben sich deutliche Unterschiede in der Höhenlage. In Abbildung 8 werden die verschiedenen Höhenlagen der verschiedenen Überflüge visualisiert.

Insgesamt wurde der Container fünfmal überflogen. Jede Ebene wird mit dem Aufnahmezeitpunkt (t_k) sowie der ellipsoidischen Höhe (Z) angegeben. Die Differenz zwischen den beiden äußersten Ebenen beträgt knapp 25,0 cm. Dieser Höhenversatz wird durch die stark differierenden Höhenmessungen des GNSS-Systems verursacht.



Abb. 7: Abweichungen der GCP zwischen Soll- und Ist-Koordinaten. Bis auf GCP 4 weisen alle Abweichungen ungefähr dieselben Größenordnungen auf. Aufgrund seiner Lage in direkter Nähe zu einem Baum ist GCP 4 mit einer hohen Ungenauigkeit behaftet.



Abb. 8: Frontalansicht des Schiffscontainers. Deutliche Abzeichnung der Höhenversätze in Abhängigkeit des Zeitpunkts der Messung.
6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Erfassung von Strukturen mit der Hilfe von MSS an UAVs ist von größter Relevanz für vielzählige Anwendungen von Forschung bis Industrie. Die Kombination von Laserscannern mit RGB-Kameras zur Kolorierung der Punktwolken ermöglicht den Einsatz des LAP für viele verschiedene Szenarien. Grundvoraussetzung für erfolgreiche Messungen sind eine exakte Kalibrierung des Systems und die exakte Aufzeichnung der Positionsdaten und der Winkellage des LAP während der Befliegung.

Für die weitere Entwicklung der Hardware ist eine weitere Reduzierung des Gewichts und der Größe des LAP geplant, um die Flugzeiten mit UAVs, die stark abhängig von der Zuladung sind, zu maximieren.

Die Integration der Verwendung von GCP zur Verbesserung der Georeferenzierung als auch eine automatisierte Auswertung bilden die Schwerpunkte für die weitere Entwicklung der Software. Die automatisierte Auswertung soll mittels neuronaler Netze erfolgen, die direkt mittels 3D-Daten und den enthaltenen RGB-Informationen trainiert werden. Erste Ergebnisse dieser automatisierten Auswertung sind in Abbildung 9 dargestellt.



Abb. 9: Links: RGB-Beispielbild aus dem LAP; Rechts: klassifiziertes Bild.

Literatur

- HOFMANN-WELLENHOF, B., LICHTENEGGER, H. & WASLE, E. (2008): GNSS Global Navigation Satellite Systems., Springer-Verlag, Wien
- JANSEN, J., HOLST, C. & KUHLAMNN, H. (2018): Registrierung mit Targets: Wie genau ist das? In: DVW – Gesellschaft f
 ür Geod
 äsie, Geoinformation und Landmanagement e. V.: Terrestrisches Laserscanning 2018, Band 93.
- SCHWARZ, W. (2017): Ingenieurgeodäsie. In: FREEDEN, W., RUMMEL, R. (Hrsg.): Handbuch der Geodäsie, Springer-Verlag, Berlin
- STEMMLER, S. & REITERER, A. (2019): Hochpräzises Laserscanning aus der Luft leichtgewichtige Sensortechnologie eröffnet neue Anwendungsgebiete durch die Fusion von 3D-LiDAR-Daten und 2D-Bilddaten. In: LUHMANN, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2019

TSCHARF, A., RUMPLER, M., MAYER, G., FRAUNDORFER, F. & BISCHOF, H. (2016): UAV Vermessung im Bergbau – Stand der Forschung und Ausblick. In: Tagungsband Geokinematischer Tag 2016, Freiberg

Entwicklung multisensorischer low-cost GNSS/MEMS Plattformen und Algorithmen zum Structural Health Monitoring (SHM) in moderner Datenkommunikationsstruktur und Anwendung auf den Stuttgarter Fernsehturm

Reiner JÄGER, Lyudmila GOROKHOVA, Naznin AKTER und Eberhard MESSMER

1 Zusammenfassung

Mit den Begriff Geomonitoring verbinden sich vielfältige Aufgaben in Geoforschung, Frühwarnung bei Naturkatastrophen sowie der Überwachung baulicher Anlagen. Die im Rahmen des FuE-Projekts GOCA (www.goca.info) unter dem Titel "Der Stuttgarter Fernsehturm als Referenzobjekt für Forschung, Entwicklung und Erprobung innovativer Sensorsysteme, mathematischer Modelle, Algorithmen, Software und IT zur Früherkennung von Schäden und Gefährdungspotenzialen baulicher Anlagen (SHM)" erfolgenden Forschungs- und Entwicklungsvorhaben widmen sich - entlang der Geomonitoringkette (Datenerfassung, Modellierung, Reporting, Alarmmanagement) - neuen mathematischen Modellen, Multisensorsystemen und Kommunikationsstrukturen zum integrierten Geomonitoring (Structural-Health-Monitoring (SHM)).

Der erste Schwerpunkt behandelt die FuE zu TCP/IP-kommunikationsfähigen low-cost GNSS/MEMS-Multisensoreinheiten im Kettenglied Datenerfassung, als Beitrag zur hochfrequenten Zustandserfassung lokaler dreidimensionaler Verschiebungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen von Objekten (Brücken, Türme, Hochbauten). Die Sensorboard-Entwicklung erfolgt vollumfänglich mit Entwicklungsumgebungen des Elektrotechnik-/Sensorsystemtechnologie-Sektors. Im Unterschied zur konventionellen Navigationszustandsschätzung können - bei gleicher Sensorik - im mathematischen Modell des SHM objektbedingt gezielt Ungleichungen des Objektzustandsvektors (Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Orientierung und Rotationsraten) formuliert werden. So verbessern sich die Eigenschaften (Driftverhalten, Genauigkeit, Zuverlässigkeit) der multisensorischen Zustandsschätzung wesentlich. Als geeignete mathematisch-algorithmische Methoden zur Zustandsschätzung werden Simplexalgorithmen vorgestellt, die eine zugleich robuste L1-Norm des Zustandsvektors ermöglichen. Präsentiert wird ferner eine Simplex-basierte Ambiguity-freie und Cycleslip-resistente redesignte Ambiguityfunktionsmethode (RAF) als robuste Multi-GNSS-Multi-Frequenz DGNSS- und PPP-Systemkomponente; vorteilhaft insbesondere für low-cost-Sensorik sowie Gebäudeumgebungen.

Die Zustandsdaten dienen als Schnittstelle zum zweiten Kettenglied, der FE-Modellierung im Zeit- oder Spektralbereich, unter Parametrisierung physikalischer Zustandsparameter und Änderungen im Fall dynamischer Prozesse des SHM. Geeignete Ansätze und mathematische Modelle aus dem Bereich FEM werden vorgestellt.

Abschließend wird anhand des "Fernsehturm Stuttgart"-Projekts ein App-gestützter allgemeiner Internet-basierter Server-Client für SHM präsentiert.

Datenerfassung und -evaluierung

Aufbau einer Einrichtung zur Kalibrierung und Evaluierung von Mobile Mapping Systemen

Erik HEINZ, Lasse KLINGBEIL und Heiner KUHLMANN

1 Einleitung

Mobile Mapping ist inzwischen ein anerkanntes Messverfahren zur schnellen 3D-Erfassung unserer Umwelt in Form von Punktwolken. In der Geodäsie und seinen Nachbardisziplinen werden Mobile Mapping Systeme für vielfältige Anwendungen genutzt. Dazu gehören die Bestandserfassung von Straßenzügen und Gebäuden, das Monitoring von Infrastrukturobjekten, die Vermessung von Lichtraumprofilen für Straßen- und Schienenwege, die Bestimmung von Straßenzustandsparametern, die Extraktion von Straßenmarkierungen und Bordsteinkanten sowie die Kartierung von Objekten des Straßenraumes. Unter diesen Anwendungen befinden sich auch sicherheitskritische Anwendungen. Aus diesem Grund werden belastbare Aussagen zur Qualität der aufgenommenen Daten immer wichtiger.

Der Begriff Qualität umfasst im Rahmen dieses Beitrags Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Weitere Qualitätsmerkmale wie Vollständigkeit oder Aktualität werden nicht angesprochen. Die Bewertung der Qualität von Mobile Mapping Systemen ist aufgrund ihrer Komplexität und der Vielfältigkeit in Hinblick auf Sensorzusammenstellung und Auswertemethodik sehr schwierig. Der Datenerfassung liegt eine äußerst komplexe und ineinandergreifende Verarbeitungskette zugrunde, die folgende Aspekte umfasst:

- Fusion der georeferenzierenden Sensoren (z. B. GNSS, IMU, Odometer) in einem Filter-Algorithmus zur fortlaufenden Schätzung von Position und Orientierung der sich bewegenden Plattform in einem übergeordneten Koordinatensystem,
- Erfassung der Umgebung mithilfe der Aufnahmesensoren (z. B. Laserscanner oder Kameras) unter Beachtung der Objekteigenschaften und der Messkonfiguration,
- Berücksichtigung des Unsicherheitsbudgets der einzelnen Sensoren und konsistente Einbindung ihrer stochastischen Modelle in die Auswerteroutinen,
- Kalibrierung der Einzelsensoren und Bestimmung ihrer gegenseitigen Einbaulage auf der Trägerplattform (Hebelarme und Boresight-Winkel),
- Zeitsynchronisation zwischen den Sensoren.

Das funktionale Modell und die Eingangsgrößen (Beobachtungen und Kalibrierparameter) dieser Verarbeitungskette sind – zumindest für den Nutzer – nur in Teilen bekannt. Darüber hinaus sind auch die Verteilungsfunktionen der Eingangsgrößen häufig nicht bekannt oder schwer abzuschätzen, da sie nicht zwangsläufig einer Normalverteilung folgen und zudem zeitlich und räumlich sehr stark variieren können (z. B. GNSS). Dies führt dazu, dass die Abweichungscharakteristiken eines Systems und damit die Kovarianzmatrix der Punktwolke je nach Anwendung (z. B. Horizontfreiheit vs. Innenstadtbereich) vollkommen unterschiedlich sein können, selbst wenn das gleiche Sensorsystem verwendet wird. Aus diesem Grund ist eine Modellierung der Genauigkeit der Punktwolke sehr schwierig und vermutlich nicht zielführend.

Dieser Beitrag konzentriert sich daher auf die empirische Bestimmung der Genauigkeit der Systeme unter typischen Messbedingungen. Aufgrund der undurchsichtigen Verarbeitungskette liegt der Fokus auf einer Evaluierung des Gesamtsystems auf Basis der Punktwolke. Eine Evaluierung von Einzelkomponenten ist in Teilen aber auch möglich und wird ebenfalls im Beitrag angesprochen. Neben der Evaluierung liegt der zweite Fokus auf der Kalibrierung von Mobile Mapping Systemen, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Qualität der Punktwolke hat. Hierbei beschränken wir uns auf die äußere Kalibrierung von Mobile Mapping Systemen für kinematisches Laserscanning, d. h. auf die Bestimmung des Hebelarms und der Boresight-Winkel zwischen Laserscanner und GNSS/IMU-Einheit.

Im Folgenden werden vorhandene Strategien zur Kalibrierung und Evaluierung von Mobile Mapping Systemen übersichtsmäßig dargestellt. Diese Übersicht erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll einen Einblick in aktuelle Vorgehensweisen geben. Auf Grundlage der vorhandenen Ansätze wurde von der Universität Bonn eine Einrichtung zur Kalibrierung und Evaluierung von Mobile Mapping Systemen aufgebaut, die im Rahmen dieses Beitrags näher beschrieben wird.

1.1 Ansätze zur Kalibrierung von Mobile Mapping Systemen

Zur äußeren Kalibrierung von Mobile Mapping Systemen für kinematisches Laserscanning werden vielfältige Ansätze eingesetzt. Eine Möglichkeit besteht darin, dass man Hebelarme und Boresight-Winkel im Labor direkt oder indirekt mithilfe von Zusatzsensorik misst, wie z. B. Tachymetern, Lasertrackern, Theodolitmesssystemen, Messarmen oder Nahbereichsphotogrammetrie (z. B. GRÄFE 2007, HESSE 2007, VENNEGEERTS 2011, ELING et al. 2014, KELLER 2015). Eine andere Möglichkeit besteht darin, eine Selbstkalibrierung der Systeme durchzuführen, z. B. indem man Fahrmanöver entlang spezieller Objektstrukturen durchführt (z. B. RIEGER et al. 2010, KELLER & STERNBERG 2013, KELLER 2015) oder auf entropiebasierte Ansätze zurückgreift, die durch Optimierung einer Kostenfunktion die Kalibrierung und damit die Konsistenz innerhalb der Punktwolke verbessern (z. B. MADDERN et al. 2012, KELLER 2015, HILLEMANN et al. 2019A, HILLEMANN et al. 2019B). Sehr verbreitet sind auch geometriebasierte Ansätze, die Bedingungsgleichungen zwischen geometrischen Primitiven und Scanpunkten des Mobile Mapping Systems nutzen. Ebenenbasierte Ansätze stechen dabei besonders heraus und werden im Bereich Airborne Laserscanning (z. B. FILIN 2003, SKALOUD & LICHTI 2006), für schiffgebundene Systeme (z. B. LU et al. 2017), für fahrzeuggebundene Systeme (z. B. GRÄFE 2007, RIEGER et al. 2010, CHAN et al. 2013, KELLER 2015, HEINZ et al. 2015, HAUSER et al. 2016, HEINZ et al. 2017, HONG et al. 2017) und auch für Indoor-Systeme (z. B. STRÜBING & NEUMANN 2013, HARTMANN et al. 2017, HARTMANN et al. 2019) eingesetzt. In unserer Einrichtung wurde ein ebenenbasierter Ansatz realisiert, da dieser auf einer Kleinsten-Quadrate-Ausgleichung basiert, die hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit einer durchgreifenden geodätischen Qualitätsanalyse unterzogen werden kann.

1.2 Ansätze zur Evaluierung von Mobile Mapping Systemen

Die Evaluierung von Mobile Mapping Systemen wird häufig mithilfe von natürlichen oder künstlichen Kontrollpunkten durchgeführt, deren Koordinaten aus den Punktwolken extrahiert und mit Referenzwerten verglichen werden, die vorab über klassische Messverfahren, z. B. GNSS, TLS, Tachymetrie oder Nivellement, eingemessen wurden (z. B. GRÄFE 2007, HESSE 2007, BARBER et al. 2008, VENNEGEERTS 2011, KAARTINEN et al. 2012, KUKKO et al. 2012, SCHLICHTING et al. 2014, HOFMANN & BRENNER 2016, HEINZ et al. 2019). Die Kontrollpunkte können auch als Messung in die Trajektorienschätzung integriert werden. Neben punkthaften Verfahren gibt es flächenhafte Evaluierungsstrategien für Mobile Mapping Systeme, z. B. durch Nutzung von 3D-Stadtmodellen, die ebenfalls zur Verbesserung der Trajektorie einsetzbar sind (z. B. HAALA et al. 2008, BUREICK et al. 2019, DEHBI et al. 2019). In jüngster Zeit sind auch Evaluierungen auf Basis von TLS-Referenzpunktwolken sehr beliebt geworden (z. B. GLENNIE et al. 2013, HEINZ et al. 2015, HAUSER et al. 2016, HEINZ et al. 2017). In diesem Kontext stellen einige Softwarepakete Algorithmen zur Verfügung, die einen direkten Vergleich zweier Punktwolken ermöglichen. Die Schwierigkeit besteht jedoch in der korrekten Bewertung der Ergebnisse. Zuletzt sei angemerkt, dass auch eine Evaluierung im Rahmen der Anwendung möglich ist. So können aus der Punktwolke abzuleitende Zielparameter mehrfach bestimmt werden, um die Wiederholbarkeit zu prüfen (z. B. KALENJUK et al. 2019, HEINZ et al. 2019). In unserer Einrichtung können Mobile Mapping Systeme sowohl über Kontrollpunkte als auch mithilfe von TLS-Referenzpunktwolken evaluiert werden. Auf diese Weise sind die Vorteile beider Strategien nutzbar.

2 Einrichtung zur Kalibrierung und Evaluierung

In diesem Kapitel wird die aufgebaute Einrichtung zur Kalibrierung und Evaluierung von Mobile Mapping Systemen vorgestellt. Die einzelnen Bestandteile sind übersichtsmäßig in Abbildung 1 zusammengestellt und werden in den Abschnitten 2.1 bis 2.4 näher erläutert.



Abb. 1: Einrichtung für die Kalibrierung und Evaluierung von Mobile Mapping Systemen (links: Netz aus Kontrollpunkten (Quelle: Google Earth, modifiziert), oben rechts: TLS Referenzpunktwolke, unten mittig: schienengebundene Referenztrajektorie, unten rechts: ebenenbasiertes Kalibrierfeld für Systeme mit Laserscannern).

2.1 Netz aus Kontrollpunkten

Innerhalb der Einrichtung wurde ein Netz von Kontrollpunkten angelegt, das aus 6 Pfeilern, 15 Gebäudepunkten sowie 16 Bodenpunkten besteht (Abbildung 1 links). Das Netz wurde mithilfe von GNSS, Tachymetrie und Nivellement lage- und höhenmäßig eingemessen und an das deutsche Landesvermessungssystem angeschlossen. Zur Prüfung der Punktstabilität wurde das Netz in zwei Epochen gemessen (Juni 2017 & Juli 2018) und eine geodätische Deformationsanalyse durchgeführt. In der kombinierten Auswertung beider Epochen konnten die Koordinaten der Punkte mit einer Standardabweichung von ≤ 1 mm geschätzt werden. Die Pfeiler und die Gebäudepunkte sind so konstruiert, dass Targets für Laserscanning bzw. Photogrammetrie daran befestigt werden können (Abbildung 5). Bei den Targets handelt es sich um spezielle Targets, die an der Universität Bonn zum Zwecke der Registrierung von TLS-Scans entwickelt wurden (JANBEN et al. 2019). Mithilfe dieser Targets, die im Folgenden als BOTA8 Targets (Bonn Target 8) bezeichnet werden, können jedoch auch Mobile Mapping Systeme punkthaft evaluiert werden.

2.2 TLS Referenzpunktwolken

Neben den Kontrollpunkten wurden die umliegenden Gebäude mittels TLS aufgenommen (Abbildung 1 oben rechts). Die Punktwolken wurden mithilfe der Kontrollpunkte georeferenziert und ermöglichen eine flächenhafte Evaluierung von Mobile Mapping Systemen.

2.3 Schienengebundene Referenztrajektorie

Sowohl die Kontrollpunkte als auch die Referenzpunktwolken ermöglichen es, ein System als Ganzes zu evaluieren. Um zusätzlich einzelne Komponenten eines Systems analysieren zu können, wurde eine schienengebundene Referenztrajektorie aufgebaut (Abbildung 1 unten mittig). Diese Referenztrajektorie hat eine Länge von rund 140 m und weist Änderungen in Lage und Höhe sowie Orientierungsänderungen (Roll-Winkel $\pm 10^{\circ}$, Pitch-Winkel $\pm 20^{\circ}$ und Kurswinkel $\pm 180^{\circ}$) auf. Zurzeit wird ein Schienenfahrzeug zur Adaption von Mobile Mapping Systemen entwickelt. Auf der Schienenbahn lässt sich eine definierte Trajektorie unter kontrollierten Bedingungen wiederholt abfahren. Dadurch kann die Qualität der Trajektorienschätzung untersucht werden. Direkt neben der Schienenbahn befinden sich zwei Vermessungspfeiler, sodass auch das Tracking von Systemen möglich ist (z. B. mit einem Tachymeter oder einem Lasertracker).

2.4 Ebenenbasiertes Kalibrierfeld

Zur Kalibrierung des Hebelarms und der Boresight-Winkel zwischen einem Laserscanner und einer GNSS/IMU-Einheit wurde ein ebenenbasiertes Kalibrierfeld aufgebaut (Abbildung 1 unten rechts). Bei den Ebenen im Kalibrierfeld handelt es sich um stabile Sichtbetonelemente mit einer hohen Planarität. Die Anordnung der Ebenen hat großen Einfluss auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der geschätzten Kalibrierparameter. Aus diesem Grund wurde die Anordnung der Ebenen mithilfe einer Simulation soweit optimiert, dass die Kalibrierparameter mit ausreichender Genauigkeit ($\sigma_{Hebelarm} < 1 \text{ mm}, \sigma_{Boresight} < 0.005^{\circ}$) bestimmt werden können. Das Kalibrierverfahren wird in Kapitel 4 näher beschrieben.

3 Mobile Mapping System der Universität Bonn

Das Mobile Mapping System des Instituts für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn wurde innerhalb der hier vorgestellten Einrichtung kalibriert und evaluiert. Das System besteht aus einem Inertialmesssystem iMAR iNAV-FJI-LSURV sowie einem Profillaserscanner Z+F Profiler 9012A (Abbildung 2). Das Inertialmesssystem nutzt neben Beschleunigungssensoren auch faseroptische Gyroskope und RTK-GNSS. Ein Odometer kann optional integriert werden. Das Mobile Mapping System ist so konfiguriert, dass es auf verschiedenen Trägerplattformen – z. B. Bus oder Trolley – eingesetzt werden kann.



Abb. 2: Mobile Mapping System der Universität Bonn bestehend aus einem Inertialmesssystem iMAR iNAV-FJI-LSURV und einem Laserscanner Z+F Profiler 9012A.

4 Kalibrierung des Mobile Mapping Systems

Wie bereits in Abschnitt 2.4 erläutert, wurde innerhalb der Einrichtung ein ebenenbasiertes Kalibrierfeld für die Kalibrierung des Hebelarms und der Boresight-Winkel zwischen einem Laserscanner und einer GNSS/IMU-Einheit realisiert. Das zugehörige Kalibrierverfahren basiert auf einem von STRÜBING & NEUMANN (2013) publizierten Ansatz, der für unsere Zwecke auf den Outdoor-Bereich übertragen und methodisch modifiziert wurde. Diesbezüglich sei auch auf HEINZ et al. (2015) und HEINZ et al. (2017) verwiesen.

Zur Bestimmung der Kalibrierparameter werden die Ebenen zunächst mithilfe von TLS und unter Nutzung der Kontrollpunkte georeferenziert eingemessen. Aus den TLS Punktwolken werden Ebenenparameter abgeleitet, die als Referenzinformation für die Kalibrierung dienen. Danach werden die Ebenen mit dem zu kalibrierenden Mobile Mapping System zweifach abgescannt, wobei sich die Orientierung des Mobile Mapping Systems bei der zweiten Durchfahrt um 180° gedreht hat (Abbildung 3). Basierend darauf lassen sich Bedingungsgleichungen zwischen den Scanpunkten des Mobile Mapping Systems und den Ebenenparametern aufstellen. In einem Kleinste-Quadrate-Ausgleich im Gauß-Helmert-Modell können die Kalibrierparameter anschließend geschätzt werden.



Abb. 3: Simulation der ebenenbasierten Kalibrierung (links) und Durchführung einer echten Kalibrierung des Mobile Mapping Systems im Kalibrierfeld (rechts).

Die Anordnung der Ebenen hat einen großen Einfluss auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Kalibrierergebnisse. Daher wurde der Kalibriervorgang mithilfe einer Simulationsumgebung (Abbildung 3) analysiert. Dabei wurde der Einfluss von zufälligen und systematischen Abweichungen sowie von groben Fehlern auf die Kalibrierergebnisse untersucht. Im Zuge dessen wurde der Kleinste-Quadrate-Ausgleich der Kalibrierung als geodätisches Netz interpretiert und die Parameterschätzung mit geodätischen Qualitätskriterien für Genauigkeit (Kovarianzmatrix der Parameter, a-posteriori Varianzfaktor) und Zuverlässigkeit (Redundanzanteile, kleinste aufdeckbare grobe Fehler und Einflussfaktoren) bewertet (siehe auch HEINZ et al. 2017). Die in der Simulation gewonnenen Erkenntnisse wurden genutzt, um die Ebenenanordnung zu verbessern, sodass vorab definierte Qualitätskriterien für die Kalibrierung erfüllt sind. Als alternative Strategie zur Verbesserung der Ebenenanordnung sei hier auf HARTMANN et al. (2019) verwiesen, die genetische Algorithmen zur Bewältigung der Optimierungsaufgabe anwenden.

Die Kalibrierung des Mobile Mapping Systems (Abbildung 2) wurde 98-mal durchgeführt, um die Genauigkeit der Kalibrierung empirisch feststellen zu können. Die zugehörigen Messungen wurden an zwei Tagen in vier unabhängigen Blöcken durchgeführt, wobei das System für jeden Block neu initialisiert wurde. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 und Abbildung 4 dargestellt. Beim Hebelarm ist erkennbar, dass die horizontalen Komponenten Δx und Δy mit $\sigma_{\Delta x} = 0.9$ mm bzw. $\sigma_{\Delta y} = 1.1$ mm genauer bestimmt sind als die vertikale Komponente Δz mit $\sigma_{\Delta z} = 4.5$ mm (σ : Standardabweichung). Dies liegt daran, dass Δz ungefähr gleichgerichtet mit der Höhenkomponente ist. Laut Simulation beeinflussen systematische Höhenabweichungen in der geschätzten Trajektorie die Bestimmung von Δz . Bei den Boresight-Winkeln ist der Winkel α mit $\sigma_{\alpha} = 0,0012^{\circ}$ am genauesten bestimmt. Der Winkel β ist demgegenüber deutlich ungenauer mit $\sigma_{\beta} = 0,0188^{\circ}$. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Ebenenanordnung für den Winkel β am wenigstens sensitiv ist. Für den Winkel γ erhält man $\sigma_{\gamma} = 0,0166^{\circ}$. Der Winkel γ dreht in etwa um die gleiche Achse wie der Kurswinkel. Ähnlich wie beim Hebelarm Δz können systematische Abweichungen in der Kurswinkelbestimmung den Winkel γ beeinflussen und verschlechtern seine Genauigkeit.

Tabelle 1: Resultate der Kalibrierung (Konstruktionsplan vs. Ebenen). Hebelarm: Δx, Δy, Δz; Boresight-Winkel: α, β, γ; Nullpunktabweichung Laserscanner: d₀. Die Genauigkeit der Kalibrierwerte ist als Standardabweichung (STD) angegeben.

Konstruktion	Δx	Δy	Δz	α	β	γ	do
Kalibrierwert	-0,5594 m	0,0390 m	0,2962 m	0,0000°	-30,0000°	0,0000°	0,00 mm
Ebenen	Δx	Δy	Δz	α	β	γ	do
Kalibrierwert	-0,5559 m	0,0452 m	0, 2994 m	0,1420°	-29,9620°	0,0058°	-0,05 mm
STD: $\sigma_{Einzel(n=1)}$	0,0009 m	0,0011 m	0,0045 m	0,0012°	0,0188°	0,0166°	0,08 mm
STD: $\sigma_{Mittel (n=98)}$	0,0001 m	0,0001 m	0,0005 m	0,0001°	0,0019°	0,0017°	0,01 mm

Die Genauigkeit einer einzelnen Kalibrierung kann durch Mittelbildung verbessert werden. Bildet man das Mittel über alle 98 Realisierungen und berechnet die Genauigkeit des Mittelwertes über das \sqrt{n} -Gesetz, erhält man Standardabweichungen von < 1 mm für den Hebelarm und $< 0,002^{\circ}$ für die Boresight-Winkel (Tabelle 1). Wie man anhand einer Abschätzung zeigen kann, ist diese Genauigkeit für den praktischen Einsatz ausreichend.

Zusätzlich zum Hebelarm und den Boresight-Winkeln ist es in der Kalibrierung auch möglich, eine potentielle Nullpunktabweichung des Laserscanners als inneren Kalibrierparameter des Systems mitzuschätzen. Die so bestimmte Nullpunktabweichung des Laserscanners liegt im Mittel bei -0,05 mm. Dies ist für die Praxis vernachlässigbar. Neben der ebenenbasierten Kalibrierung zeigt Tabelle 1 auch eine Kalibrierung, die aus den Konstruktionsplänen des Systems abgeleitet wurde. Dies wird in Abschnitt 5.2 näher diskutiert.



Abb. 4: Die 98 Einzelkalibrierungen des Mobile Mapping Systems, jeweils reduziert um den Mittelwert. Die Kalibrierungen wurden an zwei verschiedenen Tagen in vier separaten Blöcken mit 14, 21, 31 bzw. 32 Kalibrierungen durchgeführt.

5 Evaluierung des Mobile Mapping Systems

Das Mobile Mapping System (Abbildung 2) wurde mithilfe des Netzes aus Kontrollpunkten (Abschnitt 5.1) und der TLS-Referenzpunktwolken (Abschnitt 5.2) evaluiert. Insgesamt wurden fünf Testfahrten unternommen, bei denen die Kontrollpunkte und die angrenzenden Gebäude wiederholt aufgenommen wurden. Das System wurde im Zuge dessen sowohl auf einem Trolley als auch auf einem Bus betrieben. Für jede der Testfahrten wurde das System neu initialisiert.

5.1 Evaluierung auf Basis von Kontrollpunkten

Während der fünf Testfahrten wurden 16 verschiedene Kontrollpunkte insgesamt 148mal abgescannt. Im Anschluss wurden die Koordinatenmittelpunkte der abgescannten BOTA8 Targets geschätzt und mit den gegebenen Sollkoordinaten verglichen. In Abbildung 5 sind beispielhaft die Lageabweichungen für eine der fünf Testfahrten abgebildet. Man erkennt, dass die Pfeile unterschiedliche Richtungen und Größen aufweisen, was auf einen zufälligen Charakter der Abweichungen hinweist. Allerdings zeigen die Pfeile an manchen Kontrollpunkten auch in ähnliche Richtungen. Aufgrund der zeitlichen Nähe der Messungen an den Kontrollpunkten könnte dies auf systematische Abweichungen in der Trajektorienschätzung – z. B. hervorgerufen durch GNSS – zurückzuführen sein.

Betrachtet man die Gesamtheit aller 148 Targetscans, ergeben sich sowohl für die Lage als auch für die Höhe Abweichungen, die sich einer Normalverteilung sehr gut annähern. Dies deutet darauf hin, dass die in Abbildung 5 erkennbaren Systematiken aufgrund der verschiedenen Messbedingungen an den einzelnen Kontrollpunkten unterschiedlich in Größe und Vorzeichen auftreten und im statistischen Mittel einen eher zufälligen Charakter erhalten. Aussagen zu einzelnen Komponenten des Systems lassen sich hier nicht tätigen.



Abb. 5: Evaluierung des Mobile Mapping Systems auf Grundlage der Kontrollpunkte, die mit BOTA8 Targets signalisiert wurden (Pfeiler □, Gebäudepunkte ○). Die Pfeile zeigen beispielhaft die Lageabweichungen zu den Sollkoordinaten für eine der fünf Testfahrt (Quelle: Google Earth, modifiziert).

Tabelle 2: Resultate der punkthaften Evaluierung des Systems auf Basis von 16 Kontroll-
punkten, die insgesamt 148mal abgescannt wurden. Die Tabelle zeigt die statis-
tischen Maße der Abweichungen der Targetscans zu den Sollkoordinaten.

Statistische Kennzahl	UTM Ost	UTM Nord	Ellipsoidische Höhe
Mittelwert	-0,9 mm	-1,9 mm	0,0 mm
Median	-1,6 mm	-0,7 mm	-0,7 mm
Standardabweichung	7,5 mm	7,1 mm	8,7 mm
RMS-Wert	7,5 mm	7,4 mm	8,7 mm

In Tabelle 2 sind die statistischen Kennzahlen der Abweichungen getrennt für die Lage und die Höhe zusammengefasst. Man erkennt, dass Mittelwert und Median für die Lagekomponenten bei < 2 mm liegen. Für Standardabweichung und RMS werden Werte von < 8 mm erreicht. Für die Höhe ist die mittlere Abweichung sogar < 1 mm. Die Standardabweichung und der RMS sind mit knapp 9 mm geringfügig größer als für die Lage. Auch wenn der Unterschied zwischen Lage und Höhe im vorliegenden Fall marginal ist, gilt grundsätzlich, dass bei GNSS/IMU-basierten Sensorsystemen die Lagekomponenten genauer bestimmt werden können als die Höhenkomponente. Auf Basis der vorgestellten Ergebnisse kann die Genauigkeit des Gesamtsystems für einzelne Koordinatenrichtungen mit einer Standardabweichung von < 1 cm spezifiziert werden. Dies bestätigt die Ergebnisse einer vorangegangenen Studie (HEINZ et al. 2019).

5.2 Evaluierung auf Basis von Punktwolken

Ergänzend zur punkthaften Evaluierung wird in diesem Abschnitt die flächenhafte Evaluierung auf Basis von TLS Referenzpunktwolken dargestellt. Aus Platzgründen beschränken wir uns auf ein Beispiel. In Abbildung 6 ist die Fassade einer Halle mit zugehörigem Vordach abgebildet. Bei der Aufnahme der Halle wurde das Mobile Mapping System parallel an der Fassade vorbeibewegt. Um das Potential der flächenhaften Evaluierung zu demonstrieren, wurde die kinematische Punktwolke mit zwei unterschiedlichen Sets an Kalibrierparametern berechnet (siehe hierzu Tabelle 1):

- 1. Näherungskalibrierung (abgeleitet aus dem Konstruktionsplan)
- 2. Ebenenbasierte Kalibrierung (Mittel der 98 Einzelkalibrierungen)

In der Auswertung wurde für beide Punktwolken ein M3C2-Punktwolkenvergleich zur TLS-Referenzpunktwolke in CloudCompare berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 in Form von Scatterplots und Histogrammen visualisiert. In Abbildung 6 (links) ist zu erkennen, dass bei Verwendung der Näherungskalibrierung erhöhte Abweichungen von bis zu +30 mm an der Oberkante der Fassade auftreten. Diese werden durch die dunklere Schattierung angezeigt. Auch das zugehörige Histogramm ist nicht normalverteilt und weist eine große Streuung auf (RMS: 12,3 mm). Im Gegensatz dazu sind die Abweichungen bei Nutzung der ebenenbasierten Kalibrierung (Abbildung 6 rechts) viel kleiner (RMS: 5,7 mm). Zwar erhält man auch hier keine normalverteilten Abweichungen, allerdings sind die erhöhten Abweichungen an der Oberkante der Fassade verschwunden. Die erhöhten Abweichungen an der Oberkante der Fassade lassen auf eine Verkippung der Punktwolke schließen. Unter Berücksichtigung der kinematischen Aufnahme kann eine solche Verkippung entweder auf einen Fehler im Roll-Winkel der Trajektorie oder auf eine fehlerhafte Boresight-Kalibrierung zurückgeführt werden. In Tabelle 1 erkennt man, dass es bei den zwei verwendeten Kalibrierungen eine große Abweichung von 0,1420° im Boresight-Winkel α gibt, der um eine ähnliche Achse dreht wie der Roll-Winkel der Plattform. Folglich ist die Verkippung der Punktwolke am wahrscheinlichsten mit einer fehlerhaften Boresight-Kalibrierung zu begründen. Diese Art der Evaluierung wurde schon in früheren Arbeiten von RIEGER et al. (2010), KELLER & STERNBERG (2013) und KELLER (2015) vorgeschlagen und verdeutlicht, dass eine flächenhafte Evaluierung bei Verwendung eines geeigneten Objektes in Verbindung mit einem wohldefinierten Fahrmanöver detailliertere Einblicke in die Leistungsfähigkeit eines Mobile Mapping Systems ermöglicht.



Abb. 6: Flächenhafte Evaluierung des Mobile Mapping Systems auf Grundlage einer TLS-Referenzpunktwolke für eine Näherungskalibrierung (links) und eine ebenenbasierten Kalibrierung (rechts). Die Differenzen zur TLS-Referenzpunktwolke wurden mithilfe des M3C2-Punktwolkenvergleichs in CloudCompare bestimmt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde der Aufbau einer neuen Einrichtung zur Kalibrierung und Evaluierung von Mobile Mapping Systemen vorgestellt. Die Einrichtung beinhaltet ein ebenenbasiertes Kalibrierfeld zur Bestimmung des Hebelarms und der Boresight-Winkel zwischen einem Laserscanner und einer GNSS/IMU-Einheit. Darüber hinaus können Systeme mithilfe von Kontrollpunkten oder TLS-Referenzpunktwolken evaluiert werden. Eine schienengebundene Referenztrajektorie befindet sich im Aufbau. Innerhalb der Einrichtung konnte das Mobile Mapping System der Universität Bonn erfolgreich kalibriert und evaluiert werden. Demzufolge weist das System eine Gesamtgenauigkeit von mm bis cm auf. Die Einrichtung soll zukünftig zur Evaluierung beliebiger Systeme genutzt werden (Abbildung 7 links). Hinsichtlich der Kalibrierung sind erste Tests zur Integration von Kameras durchgeführt worden (Abbildung 7 mittig). Auch hier bieten sich ebenenbasierte Ansätze an, bei denen häufig Schachbrettmuster eingesetzt werden (z. B. GEIGER et al. 2012). Ferner sind erste Tests durchgeführt worden, um das in diesem Beitrag verwendete Mobile Mapping System (Abbildung 2) mithilfe eines Tachymeters anstelle von GNSS auch im Indoor-Bereich anwenden zu können (Abbildung 7 rechts).



Abb. 7: Aufbau eines low-cost Laserscanning-Systems (links), Erweiterung der ebenenbasierten Kalibrierung um Kameras mithilfe eines Schachbrettmusters (mittig), Indoor-Anwendung des Mobile Mapping Systems aus Abbildung 2 (rechts).

Literatur

- BARBER, D., MILLS, J. & SMITH-VOYSEY, S. (2008): Geometric validation of a ground-based mobile laser scanning system. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 63, 128–141.
- BUREICK, J., VOGEL, S., NEUMANN, I., UNGER, J. & ALKHATIB, H. (2019): Georeferencing of an Unmanned Aerial System by Means of an Iterated Extended Kalman Filter Using a 3D City Model. In: PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, doi.org/10.1007/s41064-019-00084-x.
- CHAN, T. O., LICHTI, D. D. & GLENNIE, C. L. (2013): Multi-feature based boresight self-calibration of a terrestrial mobile mapping system. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 82, 112–124.
- DEHBI, Y., LUCKS, L., BEHMANN, J., KLINGBEIL, L. & PLÜMER, L. (2019): Improving GPS Trajectories Using 3D City Models and Kinematic Point Clouds. In: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume IV-4/W9, 2019, 4th International Conference on Smart Data and Smart Cities, 1-3 October 2019, Kuala Lumpur, Malaysia.
- ELING, C., KLINGBEIL, L., WIELAND, M. & KUHLMANN, H. (2014): Direct Georeferencing of Micro Aerial Vehicles – System Design, System Calibration and First Evaluation Tests. In: Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation (PFG), 2014(4), 227–237.
- FILIN, S. (2003): Recovery of Systematic Biases in Laser Altimetry Data Using Natural Surfaces. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 69 (11), 1235-1242.

- GEIGER, A., MOOSMANN, F., CAR, Ö. & SCHUSTER, B. (2012): Automatic Camera and Range Sensor Calibration using a single Shot. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), RiverCentre, Saint Paul, Minnesota, USA, May 14–18, 2012, 3936–3943.
- GLENNIE, C., BROOKS, B., ERICKSEN, T., HAUSER, D., HUDNUT, K., FOSTER, J. & AVERY, J. (2013): Compact Multipurpose Mobile Laser Scanning System – Initial Tests and Results. In: Remote Sensing 2013, 5, 521–538, doi:10.3390/rs5020521.
- GRÄFE, G. (2007): Kinematische Anwendungen von Laserscannern im Straßenraum. Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.
- HAALA, N., PETER, M., KREMER, J. & HUNTER, G. (2008): Mobile LIDAR mapping for 3D point cloud collection in urban areas – A performance test. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 37, 1119–1127.
- 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 143 (4), 04017012.
- HARTMANN, J., VON GÖSSELN, I., SCHILD, N., DORNDORF, A., PAFFENHOLZ, J.-A. & NEUMANN, I. (2019): Optimisation of the Calibration Process of a k-TLS Based Multi-Sensor-System by Genetic Algorithms. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W13, 2019, ISPRS Geospatial Week 2019, 10–14 June 2019, Enschede, The Netherlands.
- HAUSER, D., GLENNIE, C. & BROOKS, B. (2016): Calibration and Accuracy Analysis of a Low-Cost Mapping-Grade Mobile Laser Scanning System. In: Journal of Surveying Engineering 142 (4), 04016011.
- 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), 227–243.
- 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, Österreich, Wichmann Verlag, Berlin, 131–145.
- HEINZ, E., METTENLEITER, M., KUHLMANN, H. & HOLST, C. (2018): Strategy for Determining the Stochastic Distance Characteristics of the 2D Laser Scanner Z+F Profiler 9012A with Special Focus on the Close Range. In: Sensors, 18, 2253, doi:/10.3390/s18072253.
- HEINZ, E., ELING, C., KLINGBEIL, L. & KUHLMANN, H. (2019): On the applicability of a scanbased mobile mapping system for monitoring the planarity and subsidence of road surfaces – Pilot study on the A44n motorway in Germany. In: Journal of Applied Geodesy (ahead of print).
- HESSE, C. (2007): Hochauflösende kinematische Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern. Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.
- HILLEMANN, M., WEINMANN, M., MUELLER, M. S. & JUTZI, B. (2019A): Automatic Extrinsic Self-Calibration of Mobile Mapping Systems Based on Geometric 3D Features. In: Remote Sensing 2019, 11, 1955, doi:10.3390/rs11161955.
- HILLEMANN, M., MEIDOW, J. & JUTZI, B. (2019B): Impact of Different Trajectories on Extrinsic Self-Calibration for Vehicle-Based Mobile Laser Scanning Systems. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W16, 2019, PIA19+MRSS19 – Photogrammetric Image Analysis & Munich Remote Sensing Symposium, 18-20 Sep. 2019, Munich, Germany.

- HOFMANN, S. & BRENNER, C. (2016): Accuracy Assessment of Mobile Mapping Point Clouds Using the Existing Environment as Terrestrial Reference. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B1, 2016, XXIII ISPRS Congress, 12-19 July 2016, Prague, Czech Republic.
- HONG, S., PARK, I., LEE, J., LIM, K., CHOI, Y. & SOHN, H.-G (2017): Utilization of a Terrestrial Laser Scanner for the Calibration of Mobile Mapping Systems. In: Sensors 17, 474, doi:10.3390/s17030474.
- JANBEN, J., MEDIC, T., KUHLMANN, H. & HOLST, C. (2019): Decreasing the Uncertainty of the Target Center Estimation at Terrestrial Laser Scanning by Choosing the Best Algorithm and by Improving the Target Design. In: Remote Sensing 2019, 11, 845, doi.org/10.3390/rs 11070845.
- KAARTINEN, H., HYYPPÄ, J., KUKKO, A., JAAKKOLA, A. & HYYPPÄ, H. (2012): Benchmarking the Performance of Mobile Laser Scanning Systems Using a Permanent Test Field. In: Sensors 12, 12814–12835, doi:10.3390/s120912814.
- KALENJUK, S., REBHAN, M. J., LIENHART, W. & MARTE, R. (2019): Large-scale monitoring of retaining structures: new approaches on the safety assessment of retaining structures using mobile mapping. In: Proceedings SPIE, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical ad Aerospace Systems 2019, Vol. 10970, International Society of Optics and Photonics, 12814–12835.
- 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 2013, 5, 5805–5824, doi:10.3390/rs5115805.
- KELLER, F. (2015): Entwicklung eines forschungsorientierten Multi-Sensor-Systems zum kinematischen Laserscanning innerhalb von Gebäuden. Dissertation, HafenCity Universität Hamburg (HCU).
- KUKKO, A., KAARTINEN, H., HYYPPÄ, J. & CHEN, Y. (2012): Multiplatform Mobile Laser Scanning: Usability and Performance. In: Sensors 12, 11712–11733, doi:10.3390/ s120911712.
- LU, X., FENG, C., MA, Y., YANG, F., SHI, B. & SU, D. (2017): Calibration method of rotation and displacement systematic errors for ship-borne mobile surveying systems. In: Survey Review, doi:10.1080/00396265.2017.1362731.
- MADDERN, W., HARRISON, A. & NEWMAN, P. (2012): Lost in Translation (and Rotation): Rapid Extrinsic Calibration for 2D and 3D LIDARs. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 3096–3102.
- RIEGER, P., STUDNICKA, N., PFENNIGBAUER, M. & ZACH, G. (2010): Boresight alignment method for mobile laser scanning systems. In: Journal of Applied Geodesy 4 (4), 13–21.
- SCHLICHTING, A., BRENNER, C. & SCHÖN, S. (2014): Bewertung von Inertial/GNSS-Modulen mittels Laserscannern und bekannter Landmarken. In: Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG) 1/2014, 5–15.
- SKALOUD, J. & LICHTI, D. (2006): Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne laser scanning. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 61, 47– 59.
- STRÜBING, T. & NEUMANN, I. (2013): Positions- und Orientierungsschätzung von LIDAR-Sensoren auf Multisensorplattformen. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement 138 (3), 210–221.
- VENNEGEERTS, H. (2011): Objektraumgestützte kinematische Georeferenzierung für Mobile-Mapping-Systeme. Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Klassifizierung von fehlerhaft gemessenen Punkten in 3D-Punktwolken mit ConvNet

Eike BARNEFSKE und Harald STERNBERG

Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung durch anonyme Fachkollegen als "peer reviewed paper" angenommen.

1 Einleitung

Punktwolken dienen als einfaches Modell oder als Grundlage von Planungen, geometrischen Analysen und komplexen Modellierungen. Häufig sind im ersten Schritt Teilpunktwolken für diese Aufgaben zu erstellen. Eine Filterung nach fehlerhaft gemessenen Punkten oder ein modellbasiertes Reduzieren der Punktwolkendichte sind häufig die ersten Klassifizierungen, die auf eine Punktwolke angewendet werden. Hierfür werden vorrangig händische oder modellbasierte Verfahren genutzt. Alternativ zu modell- bzw. wissensbasierten Klassifizierungsverfahren werden datenbasierte Klassifizierungen entwickelt, um die Auswertungszeit zu reduzieren, die Klassifizierungsqualität bei unterschiedlichen Aufnahmesystemen und Szenen zu steigern, sowie um die Klassifizierung zu automatisieren. Hierfür finden u. a. Convolutional Neural Networks (ConvNet) Anwendung, die das Wissen aus den klassifizierten Punktwolken (Trainingsdaten) lernen und dieses in der Anwendungsphase nutzen, um unbekannte Punkte zu klassifizieren. Die Klassifizierungsleistung der ConvNet wird folglich durch die Netzwerkarchitektur und die Trainingsdaten (Wissen des Algorithmus) beeinflusst.

Arbeiten von QI ET AL. (2017A), HACKEL ET AL. (2017) u. a. zur semantischen Klassifizierung mit ConvNet richten sich auf folgendes Ziel: Es sollen die Punkte identifiziert werden, welche bestimmte Objekte in der Aufnahmeszene (z. B. Bäume oder Straßen) beschreiben. Hierbei werden aber fehlerhaft gemessene Punkte, die i. d. R. nur wenige Prozent der gesamten Punktwolke einnehmen, nicht betrachtet und einfach einer Objektklasse zugeordnet. Diese fehlerhaften Punkte treten z. B. in Form von Mixed Pixel, Mehrwegeeffekten, einem großen Oberflächenrauschen oder Phantompunkten auf.

Der Einfluss der fehlerhaft gemessenen Punkte auf die semantische Klassifizierung und eine Klassifizierung nach fehlerhaften gemessenen Punkten ist Gegenstand der Untersuchungen dieser Arbeit. Hierfür werden händisch klassifizierte Punktwolken in unterschiedlichen Klassenkombinationen für das Training und die Evaluierung der Klassifizierungsleistung verwendet.

Es werden die Unterschiede und Ähnlichkeiten von modell- und datenbasierten Klassifikationsverfahren vorgestellt (Abschnitt 2.1). Die Funktionsweise von ConvNet (Abschnitt 2.2) und verschiedene ConvNet-Modelle für strukturierte und unstrukturierte Punktwolken werden erläutert (Abschnitte 2.3 und 2.4). Der Einfluss bei vier unterschiedlichen Klassenkombinationen mit und ohne fehlerhafte Punkte auf die Klassifizierungsleistung wird am Beispiel der Netzwerkarchitektur von *PointNet* untersucht (Abschnitte 3.1 bis 3.3). Aufbauend auf den Beobachtungen der Untersuchungen werden Strategien für das Training von ConvNet zur Klassifizierung von fehlerhaft gemessenen Punkten vorgestellt. Zudem werden Ideen vorgestellt, um den Einfluss von fehlerhaft gemessenen Punkten bei Klassifizierungen zu minimieren (Abschnitt 3.4).

2 Klassifizierung von Punktwolken

Punktwolken stellen geometrisch einen erfassten Raum dar, lassen aber ohne weiteres Wissen eine semantische Trennung von einzelnen Objekten in der erfassten Szene nicht zu. Diese semantische Zerlegung der Punktwolke in Unterpunktwolken ist ein wichtiger Schritt des Auswertungsprozesses von Punktwolken, damit zum einen fehlerhaft gemessene Punkte aus der Punktwolke entfernt werden und zum anderen Objekte in einer Szene semantisch unterschieden werden können. Eine semantische Unterscheidung ist wichtig, da nicht alle erfassten Objekte für eine Fragestellung von Interesse sind. Für die Erstellung von Stadtmodellen sind z. B. Bauwerke von Interesse, Fahrzeuge hingegen werden hier als störende Objekte deklariert. Soll die Punktwolke für die Analyse des Verkehrsraums, z. B. bei der Verkehrsplanung oder der Navigation, verwendet werden, sind Punkte, die Objekte auf den Verkehrswegen (Autos, Fußgänger und Radfahrer) erfassen, von vornehmlichem Interesse.

Die Trennung von Punkten, die Objekte beschreiben, und Punkten, die aufgrund von Messfehlern entstanden sind, wird i. d. R. mit Filtern durchgeführt. Diese Filter nutzen allgemeine oder sensorspezifische Modelle zur Unterscheidung, ob ein Punkt zu einem Objekt gehört oder aufgrund eines Messfehlers entstanden ist. Zudem werden die Filter zum Homogenisieren der Punktwolkendichte und zur Auswahl von Punktwolkenabschnitten eingesetzt. Filter haben den Nachteil, dass viel Wissen über die Punktwolke vorhanden sein muss und dieses für jeden möglichen Fall angewendet werden muss.

In einem nachfolgenden Schritt kommen i. d. R. andere Modelle zur automatischen semantischen Trennung der Punktwolken nach Objektklassen zum Einsatz. Beispielhaft werden diese modellbasierten Verfahren vorgestellt. Im Gegensatz zu den modellbasierten Klassifizierungsverfahren werden vermehrt datenbasierte Klassifizierungsverfahren entwickelt, die die Trennung der Punktwolken nicht aufgrund von vorgegebenem Wissen, sondern von erlerntem Wissen für die semantische Trennung der Punktwolken durchführen. Den populärsten Ansatz stellt zurzeit ConvNet dar, dessen Einsatz an einigen Beispielen vorgestellt wird.

2.1 Modellbasierte Segmentierung und Klassifizierung

Die Klassifizierung von Punktwolken basiert auf vier zentralen Arbeitsschritten, und zwar (1) der Detektion von Merkmalen, (2) dem Sortieren der Punkte nach diesen Merkmalen, (3) dem Festlegen von Grenzen, die die Gruppen (Segmente) mit ähnlichen Merkmalen voneinander unterscheiden, und (4) dem Zuweisen eines Klassennamens an alle Segmente mit gleichen bzw. ähnlichen Merkmalen. Die Arbeitsschritte 1 bis 3 werden als Segmentierung bezeichnet, auf die eine Klassifikation folgen kann. Bei modellbasierten Verfahren können diese Arbeitsschritte i. d. R. eindeutig von dem der Klassifikation unterschieden werden. Dies ist bei datenbasierten Verfahren zunehmend nicht mehr möglich, da die Generierung der Segmente aufgrund von Klassenmerkmalen in einem Schritt erfolgt. Eine modellbasierte Auswertung von Punktwolken hingegen ist in verschiedenen Auswertestufen gut zu unterteilen. In jeder Stufe wird nach einem bestimmten und beschreibbaren Merkmal in der Punktwolke gesucht. Punkte, die das gesuchte Merkmal mit ähnlicher Ausprägung tragen, werden als Segmente oder Klassen zusammengefasst. Ein Beispiel hierfür ist die Unterteilung von Punktwolken in zwei oder mehrere Segmente in Abhängigkeit von der Distanz zum Aufnahmestandort (Merkmal ist hier die Distanz). Die erste Auswertungsstufe ist häufig das "Filtern" von fehlerhaften Punkten, deren Auftreten in der Punktwolke zum Teil beschrieben werden kann. Dieser Stufe folgen verschiedene weitere Stufen, in denen Segmentierungsund Klassifikationsverfahren mit dem Ziel der Generierung von Objektklassen angewendet werden.

Die graphbasierte Segmentierung von Punktwolken ist ein weit verbreitetes Verfahren, anhand dessen die Arbeitsschritte 1 bis 3 der Segmentierung gut nachzuvollziehen sind. Die einzelnen Punkte der Punktwolke stellen die Knoten des Graphen dar, die durch Kanten miteinander verbunden sind. Jede Kante erhält, aufgrund der Merkmalsunterschiede zwischen den Punkten, ein oder mehrere Gewichte, die gemessen oder berechnet werden (1). STORM ET AL. (2010) nutzen z. B. Farbinformationen (RGB-Werte), euklidische Distanzen und die Richtungen der Punktnormalen, die über ein lokales Netz berechnet werden. Weitere Merkmale, die Laserscanner messen und für die Unterscheidung von Objekten einen Mehrwert darstellen, sind die Intensität oder die Rückkehrreihenfolge des empfangenen Signals. Bei der graphbasierten Segmentierung werden die Kanten mit den dazugehörigen Punkten anhand der Gewichte eines Merkmales, i. d. R. absteigend, sortiert (2) und ein Startgrenzwert für jedes Gewicht wird festgelegt (3). In einem iterativen Prozess werden Punkte einem Segment zugeordnet, Segmente zusammengefasst oder neue Segmente erstellt. Die Entscheidung, ob Segmente zusammengefasst oder neue Segmente gebildet werden, wird durch einen Grenzwert oder durch alle Grenzwerte bestimmt (FELZENSZWALB & HUTTENLOCHER 2004). Erweiterungen des Algorithmus sehen ein dynamisches Anpassen der Grenzwerte vor, um optimale und detaillierte Segmente zu berechnen. Dieses Verfahren wird häufig um Voxel-Gitter erweitert (wie bei AIJAZI ET AL. 2013), da bei unstrukturierten Punktwolken durch ein festes oder ein dynamisches Gitter die Auswertung vereinfacht und beschleunigt werden kann. Die graphbasierte Segmentierung kann auf verschiedenen Oberflächen, wie vermaschten Punktwolken, Voxel-Gittern oder Oberflächenmodellen, erfolgen. Bei der Erstellung dieser Modelle erfolgt immer eine Generalisierung der Messwerte, so dass eine punktscharfe Segmentierung, wie sie für die Klassifikation von Messfehlern notwendig wäre, nicht mehr möglich ist.

2.2 Klassifizierung mit ConvNet

ConvNets werden für die detaillierte und automatische Klassifikation von Bildern eingesetzt, um die Inhalte der Bilder automatisch zu entschlüsseln und diese nach semantischen Aspekten zu clustern (GIRSHICK ET AL. 2014, GIRSHICK 2015, REN ET AL. 2016). In digitalen Bildern sind die Merkmale, die für die Klassifikation von Objekten verwendet werden, in gleichmäßigen und gleich großen Rastern (Pixel) angeordnet. Diese Anordnung der Merkmale und die scharfe Abgrenzung der Merkmale bei gleichzeitiger lückenloser Verfügbarkeit ermöglichen ein sofortiges und effizientes Verarbeiten der Bilder mit Verfahren der Matrizenrechnung. Mittels der Merkmale in den Eingabebildern und dessen Nachbarschaft, werden neue multidimensionale Merkmale in einer Convolutional-Schicht extrahiert. Neue Merkmale werden durch das Multiplizieren der Information mit festen Gewichten, die in einem ein- oder mehrdimensionalen Filter angeordnet sind, bestimmt. Die Größe des Filters und die Gewichte werden für die Klassifizierungsaufgabe so ausgewählt, dass eindeutige Merkmale bestimmt werden können (Abbildung 1).



Abb. 1: Funktion einer Convolutional-Schicht am Beispiel einer 5 x 5 Eingabe und eines 3 x 3 Filters ohne Ausfüllen des Filters. Im Anschluss an diese Schicht können weitere Convolutional- oder Pooling-Schichten folgen.

Liegt für jeden Merkmalsträger mehr als ein Merkmal vor (dieses ist z. B. der Fall, wenn ein Bild aus drei Farbkanälen besteht), dann wird der Filter auf jeden Informationskanal angewendet und die Summe der neuen Merkmale je Träger bestimmt. Die Merkmale aus einer oder mehreren Convolutional-Schichten werden durch das Pooling aggregiert. Hierbei wird ein weiteres Raster über eine feste Anzahl an Merkmalsträgern gelegt und die Merkmale werden zu einem Wert in einer Rasterzelle zusammengefasst. Hierfür wird meist der größte, der kleinste oder der mittlere Merkmalswert verwendet. Die eigentliche Klassifizierung wird durch ein "normales" künstliches neurales Netz (KNN) durchgeführt, in dem alle Merkmale der letzten Convolutional-Pooling-Schicht mit den möglichen Netzausgaben (Klassen) verknüpft werden, sodass ein Vektor aufgestellt wird, der für jede Klasse eine Netzausgabe ausgibt. Funktionen wie Softmax, die auf dem Vektor angewendet werden, ermöglichen das Bestimmen der wahrscheinlichsten Klasse für jeden Merkmalsträger bzw. jedes Pixel (SZE ET AL. 2017).

2.3 ConvNet für Punktwolkenklassifikationen mit Gitterstrukturen

Punktwolken sind i. d. R. unsortiert und weisen regional unterschiedliche Punktdichten und eine unregelmäßige Verteilung der Merkmale auf, sodass viele Punktwolkenklassifizierungsverfahren einen Zwischenschritt benötigen. Dieser Zwischenschritt hat das Ziel, die Punktwolken in eine Struktur zu überführen, die Pixel oder Voxel nutzt. Hierfür werden die Punktwolken in andere Räume projiziert und Informationen zusammengefasst. Details gehen durch diese Vorverarbeitung verloren und fehlerhafte Punkte, die nur vereinzelt auftreten, werden bei der späteren Klassifizierung fälschlicherweise einer anderen Objektgruppe zugeordnet.

Anwendungen, bei denen größere einzelne Objekte in der Punktwolke während der Aufnahme zu klassifizieren bzw. durch eine *Bounding Box* zu markieren sind, sind aktuell nur durch eine Generalisierung der Punktwolke vor der Klassifizierung möglich. *PIXOR* (YANG ET AL. 2018) ist ein ConvNet für die Klassifizierung von Fahrzeugen und deren Bewegungsrichtungen in dreidimensionalen Punktwolken. Hierfür wird eine Generalisierung durch das Erzeugen einer Vogelperspektivenansicht durchgeführt. Diese 2D-Ansicht wird in Voxel / Pixel unterteilt. Auf dieser vorverarbeiteten Punktwolke können die 2D-ConvNet angewendet werden.

Die Voxel-Struktur wird in einer Vielzahl von Arbeiten als Grundlage für ein *occupancy grid* verwendet. Ein *occupancy grid* ist eine Rasterstruktur, in der die Zellen dem Zustand "Vorhandensein" oder "Nichtvorhandenensein" von Punkten zugeordnet werden. Durch dieses Raster werden die Punktwolken abstrahiert. Ziel der Verwendung des occupancy grids ist es, eine Punktwolke effizient in die 26 Klassen des *Sydney Urban Objects Dataset* (DEUGE ET AL. 2013) zu unterteilen. Bei *VoxNet* (MATURANA & SCHERER 2015) wird die Punktwolke in quadratische Voxel-Segmente unterteilt. Jedes Voxel-Segment wird wiederum in 32³ Subvoxel unterteilt, für die ein Wert für den Besetzungszustand (z. B. binärer oder Punktdichte-Wert) berechnet wird. Jedes Voxel-Segment ist ein Tensor aus 32 x 32 z 32 Einträgen. Dieser Tensor wird an ein 3D-ConvNet übergeben und für das Voxel-Segment wird eine Klasse bestimmt, der alle Punkte, die in dieses Segment fallen, zugeordnet werden.

HACKEL ET AL. (2017) folgen diesem Verfahren, berechnen aber um jeden Punkt der Punktwolke ein 16 x 16 x 16 großes Voxel-Gitter bei fünf unterschiedlich großen Kantenlängen (von 2,5 bis 40 cm). Für jedes der Voxel wird ein Besetzungszustand berechnet, sodass ein 5 x 16 x 16 x 16 Tensor entsteht, der die geometrische Nachbarschaft des Punktes beschreibt. Die Merkmale dieses Tensors für jeden Punkt werden mit einem ConvNet in Anlehnung an das ConvNet VGG von SIMONYAN & ZISSERMAN (2014) verarbeitet, sodass für jeden Punkt die Klassifizierung durch den *Softmax*-Layer (Klassifizierungsfunktion) erfolgt. Dieser Ansatz der punktorientierten Klassifizierung von komplexen dreidimensionalen Punktwolken wird bei *PointNet* und dessen Erweiterungen weiterverfolgt.

2.4 PointNet und Erweiterungen

Das PointNet (QIET AL. 2017A) in seiner Grundform besteht aus einer Eingabeschicht, in der eine vollständige, kleine Punktwolke (2000 bis 4000 Punkte) oder ein Punktwolkensegment (Ausschnitt einer großen Punktwolke) als Tensor verarbeitet wird. Die Punktwolke bzw. der Tensor besteht mindestens aus den Punkten (n) mit Koordinatentripeln (obligatorisch) und den optionalen Merkmalen (m), wie Normalenvektoren der Punkte, RGB- oder Intensitätswerten. Die Werte des eingelesenen Tensors werden durch ein T-Net, ein ConvNet für eine Starrkörpertransformation, in den Schwerpunkt des Punktwolkensegments transformiert. Diese Transformation kann sowohl auf Merkmale als auch auf Koordinaten angewendet werden. Nach der Transformation folgen die Verarbeitungsschritte des PointNet: die hochdimensionale Merkmalsextraktion, die Sortierung und das Zusammenfassen von Merkmalen, sodass Punkte aufgrund der Merkmale einer Klasse zugeordnet werden können. Die Funktionsweise von PointNet entspricht dabei zweier verketteter Funktionen. Die innere Funktion extrahiert die Merkmale auf Grundlage der Merkmale der vorherigen Schichten. Dieses wird durch Multilayer Perceptron (MLP) erreicht. MLP sind mehrere Schichten von verketteten Knoten eines KNN. Die äußere Funktion ist die sortierende bzw. aggregierende Funktion, die Merkmale zusammenfasst. Diese wird durch eine Max-Pooling-Schicht umgesetzt. Für die Segmentierung bzw. punktweise Klassifikation werden lokale und globale Merkmale miteinander kombiniert. D. h. ein neuer Tensor mit den Dimensionen (n x m_{lokal} + m_{gobal}), der aus den aggregierten Merkmalen und den lokalen Merkmalen jedes Punktes besteht, wird erstellt. Aus diesem Tensor werden wieder neue Merkmale je Punkt extrahiert und aggregiert. Für jeden Punkt werden Merkmale durch die MLP zusammengefasst, so dass eine Klassifizierung, in *k* vorgegebenen Klassen, erfolgen kann. Diese Klassifizierung erfolgt aufgrund des höchsten Wertes des Klassenvektors jedes Punktes (Abbildung 2).



Abb. 2: Vereinfachte Darstellung des *PointNet*-Verfahrens zur Segmentierung und Klassifizierung von Punktwolken in Anlehnung an QIET AL. (2017A). Multilayer Perceptron (MLP) werden für die Extraktion von Merkmalen verwendet, die durch eine Max-Pooling Funktion zusammengefasst werden. Die Concat-Funktion kombiniert Tensoren. Für jeden Punkt wird der höchste Ausgabewert aus den vorgegebenen Klassen bestimmt und so klassifiziert.

PointNet in dieser Grundform kann nur Merkmale nutzen, die im Punktwolkensegment vorhanden sind. Bei großen und unterschiedlich dichten Punktwolken führt dies zu fehlerhaften Klassifikationsergebnissen. OI ET AL. (2017B) nutzen PointNet als einen Baustein, führen aber eine Struktur von unterschiedlichen Schichten ein, in denen eine große Punktwolke schrittweise verkleinert wird (PointNet++). Aus der Punktwolke werden Punkte mit dem farthest-point-sample (fps) -Algorithmus ausgewählt, die das Zentrum einer Region bilden. Die Punkte, die zu dieser Region gruppiert werden, werden über einen festen Radius ausgewählt, wodurch die Größe der Region immer konstant ist, aber die Anzahl der Punkte variiert. Für jede Region wird auf Grundlage der Merkmale ein regionaler Merkmalsvektor durch PointNet berechnet, sodass für jede Region ein neuer Merkmalsvektor entsteht. Aus allen neuen Merkmalsvektoren werden in gleicher Weise in der folgenden Schicht neue Merkmalsvektoren berechnet. Wenn ein bestimmtes Abstraktionslevel für die Punktwolke - bzw. nun die Merkmale – erreicht ist, dann werden diese Merkmale in der Segmentierungsphase wieder entschlüsselt. Schichtweise werden die Merkmale an die Zentralpunkte übertragen. Die Merkmale werden durch eine Interpolation an die benachbarten Punkte in der jeweiligen Schicht übertragen, so dass alle Punkte einen Merkmalsvektor mit ihren Merkmalen der zwei vorherigen Schichten haben. Mittels eines PointNet Bausteins werden für jeden Punkt aus diesen Merkmalen neue Merkmale aggregiert. In der letzten Segmentierungsschicht hat jeder Punkt ein Set an Merkmalen, welches für die Klassifizierung jedes Punktes verwendet wird. Hierbei liegt die Annahme vor, dass sich Merkmale gleichmäßig ausbreiten, was aber bei Punktwolken mit heterogenen Objektvorkommen nicht zwangsläufig ist. *PointNet++* kann um Berechnungsschritte, die die unterschiedliche Punktdichte berücksichtigen, erweitert werden.

ENGELMANN ET AL. (2017) adressieren ebenfalls das *PointNet* Problem, dass keine Merkmale außerhalb eines Punktsegmentes geteilt werden und optimieren die Klassifikationsleistung durch das Teilen von Merkmalen zwischen benachbarten Punktsegmenten. Dieses entspricht der natürlichen Merkmalsausbreitung in Punktwolken mit einer Vielzahl von unterschiedlichen Objekten. In dieser Erweiterung werden zwei Prozessketten vorgestellt, die zum einen die Eingabeschicht und zum anderen die Aggregation von Merkmalen verschiedener Punktsegmente betreffen. In der ersten Prozesskette werden Punktsegmente mit verschiedenen Größen um einen Punkt gebildet, die unabhängig mit einem *PointNet* Baustein ausgewertet werden. In einer Verdichtungsschicht werden die Merkmalsvektoren der einzelnen Blöcke vereinigt und durch eine *Max-Pooling-Schicht* aggregiert. Die aggregierten Merkmale und lokalen Merkmale werden wieder verkettet (*concat*) und für alle Punkte wird ein $n \ge k$ Tensor aufgestellt, mit dem die Klassifizierung für jeden Punkt berechnet wird.

Die zweite Prozesskette sieht vor, dass eine feste Anzahl an benachbarten Punktsegmenten gleichzeitig Merkmale extrahiert und diese teilt. Die Aggregation der Merkmale erfolgt durch ein *Recurrent* (wiederholendes) Neuronales Netz (RNN). Mit dieser Art des KNN werden Informationsketten verarbeitet, um neue Merkmale über einen Abschnitt oder die gesamte Informationskette zu erhalten (GOODFELLOW ET AL. 2016, S. 368ff.). Diese aggregierten Merkmale werden punktsegmentweise zusammengefasst und für alle Punkte aller Punktsegmente erfolgt eine Klassifikation separat.

3 Einfluss von Trainingsdaten

Die Klassifizierungsleistung von ConvNet wird neben der Art und Weise, wie die Merkmale extrahiert und aggregiert werden (Netzwerkarchitektur), maßgeblich von den Daten, mit denen das Wissen erlernt wird (Trainingsdaten), beeinflusst. Für eine zuverlässige Klassifizierung einer Punktwolke ist das ConvNet mit Trainingsdaten zu trainieren, in denen ausreichend viele Punkte mit ähnlichen Merkmalen vorhanden sind, damit die Klassen der Punktwolke zuverlässig erlernt werden können. Als Einschränkung zu dieser Forderung müssen die Merkmale aber eine Verschiedenheit bzw. Streuung innerhalb der Klassen aufweisen, damit auch eine Klassifizierung erfolgen kann, wenn Objekte in einem anderen szenischen Zusammenhang auftreten, ein Messrauschen vorliegt oder fehlerhaft gemessene Punkte in der Punktwolke vorhanden sind. Der Einfluss von fehlerhaft gemessenen Punkten ist ein noch wenig untersuchtes Themenfeld.

In BARNEFSKE & STERNBERG (2019) konnte beobachtet werden, dass Punktwolken, in denen fehlerhafte Punkte vorhanden sind, weniger zuverlässig klassifiziert werden, als Punktwolken, in denen diese Punkte entfernt wurden. Der Einfluss dieser fehlerhaften Punkte, die vornehmlich von Brechung und Reflexion an Glas- und Spiegelflächen, der Strahlendivergenz an Ecken und Kanten oder beweglichen Objekten in der Aufnahmeszene stammen, wird nun anhand von zwei Punktwolkensets näher untersucht. Für die Untersuchungen werden Punktwolken von mehreren Standpunkten des Punktwolkensets mit *PointNet* trainiert und evaluiert.

3.1 Netzwerkarchitektur, Trainingsparameter und Optimierungsmethode

Die Untersuchung der Klassifizierungsleistung von Punktwolken, die aus verschiedenen Klassenkombinationen bestehen, wird mit der Netzwerkarchitektur *PointNet* für die semantische Klassifikation von Szenen durchgeführt. Hierfür wird *PointNet* mehrfach mit den gleichen Trainingsparametern trainiert und die Evaluationsergebnisse werden nach 50 Epochen verglichen. Für das Training wird, in Anlehnung an QI ET AL. (2017A), die *Adam*-Optimierungsfunktion und eine *Batchsize* von 20 verwendet. Alle Gewichte des Netzes werden für jeden Trainingsdurchgang zufällig initialisiert. Die Blöcke der Eingabeschicht beinhalten 4096 Punkte und bestehen nur aus geometrischen Merkmalen in Form der Koordinatentripel. Diese Restriktion auf 4096 Punkte je Block ist notwendig, damit die Berechnungen auf einem *Nvidia GeForce GTX 1080 GPU* durchgeführt werden können.

3.2 Trainings- und Untersuchungspunktwolken

Die Klassifizierungsleistung wird mit Punktwolken untersucht, die Straßen und einen Park in der Hamburger HafenCity zeigen. Die Punktwolken wurden mit zwei verschiedenen Laserscannern an denselben Aufnahmeorten erstellt, sodass die gleichen Objekte in jeder Punktwolke vertreten sind. Variationen treten durch Fahrzeuge und Fußgänger auf. Die Punktwolken des ersten Sets wurden mit dem Laserscanner Zoller + Fröhlich Imager5010 mit einer Auflösungseinstellung von 6 mm bei 10 m erfasst. In der Nachbearbeitung wurden die Punktwolken durch Panoramabilder eingefärbt, die an der gleichen Position erstellt wurden. Das zweite Punktwolkenset wurde mit dem Faro Focus3D Laserscanner erstellt. Die Punktdichte in einer Entfernung von 10 m ist ähnlich zu der des ersten Punktwolkensets. Die Kolorierung der Punktwolke erfolgt durch die integrierte Kamera des Laserscanners.

Alle Punktwolkensets wurden manuell in elf Klassen (Straße, Gehweg, Bodenvegetation, Mensch, Stativ, Auto, Bauwerk, Baum, Straßenschild, fehlerhafte Punkte und Sonstiges) eingeteilt und können für die folgenden Untersuchungsfragen kombiniert werden. Diese elf Klassen teilen die Punktwolke in die größten Sinnklassen und in die Klassen, die für die Untersuchung von besonderem Interesse sind, auf. Die Anzahl der Punkte in jeder Klasse variiert von weniger als 1 % (z. B. Stativ) bis zu 30 % (z. B. Bauwerk). Dies entspricht den normalen Verhältnissen in gemessenen Punktwolken, stellt aber für das Training eine ungünstige Kombination dar, da einige Klassen nur durch sehr wenige Punkte erlernt werden können. Es werden vier Kombinationen an Klassen erstellt:

- (A) Alle Klassen
- (B) Alle Klassen, die mit mehr als 2 % an Punkten vertreten sind
- (C) Alle Klassen aus (B) und die Klasse fehlerhafte (gemessene) Punkte
- (D) Fehlerhafte (gemessene) Punkte und alle restlichen Klassen zusammengefasst als eine Klasse.

Die Anzahl der Punkte, die in einzelnen Punktwolken vorkommen, variiert in einigen Fällen sehr stark, sodass für das Training verschiedene Punktwolken kombiniert werden, damit die Anzahl der Punkte möglichst ausgeglichen ist. Die Evaluation erfolgt immer anhand derselben Punktwolke, sodass die Untersuchungen in sich vergleichbar sind, aber nicht zwingend auf andere Punktwolken übertragen werden können. Die Klassifizierungsleistung von Punktwolken wird mittels einer Punktwolke evaluiert, die keine Überschneidung zu den Trainingspunktwolken aufweist, aber aus dem gleichen Umfeld stammt. Das bedeutet, dass die Bauwerke, die Bodenoberflächen und die Straßenschilder gleich sind. Für die Bewertung der Klassifizierungsleistung wird der Parameter *Intersection over Union* (IoU) verwendet. Die IoU ist die Schnittmenge der wahren und prädizierten Punkteklassen. Dieser Parameter setzt sich aus den zwei Parametern Recall und Präzision zusammen. Der Recall beschreibt das Verhältnis zwischen richtig klassifizierten Punkten und den wahren Punkten einer Klasse. Die Präzision drückt das Verhältnis zwischen richtig klassifizierten Punkten und Punkten, die fehlerhafterweise dieser Klasse zugeordnet wurden, aus.

3.3 Untersuchung der Klassifizierungsleistung

Die erste Klassenkombination (A) umfasst alle Klassen und zeigt die Klassifizierungsleistung für die gesamte Punktwolke. Alle Punkte der *Imager5010* Punktwolke werden in eine von vier Klassen, und zwar Baum, Bauwerk, Straßenschild oder fehlerhafte Punkte, eingeordnet. Die Klassifizierung von Bodenoberflächen ist für diese Klassenkombination nicht möglich, auch werden die kleinen Klassen nicht berücksichtigt. Die Werte des Recall und der Präzision von kleiner 50 % sowie einer maximalen IoU über alle Klassen von 10 % deuten darauf hin, dass für diese Klassenkombination keine zuverlässige Klassifizierungsleistung erzielt werden kann (Tabelle 1).

Alle Punkte der *Focus3D* Punktwolke werden bei allen Klassifizierungsdurchgängen nur der größten Klasse Bauwerk zugeordnet (Tabelle 1), sodass festzustellen ist, dass eine Klassifizierung mit *PointNet* für diese Punktwolke nicht gelingt.

en		Recall in %				Präzisi	on in %	ó	IoU in %				
Punktwolk	Baum	Bauwerk	Straßens.	f. Punkte	Baum	Bauwerk	Straßens.	f. Punkte	Baum	Bauwerk	Straßens.	f. Punkte	
Imager501	0												
(b)	26	35	16	29	47	49	2	4	20	26	2	4	
(s)	12	44	0	34	37	47	0	4	10	29	0	4	
Focus3D													
(b)	0	100	0	0	0	33	0	0	0	33	0	0	

Tabelle 1:	Klassifikationsergebnis bei Verwendung aller Klassen. b = beste Klassifizierung
	und s = schlechteste Klassifizierung. Den Klassen Straße, Gehweg, Mensch,
	Sonstiges, Stativ, Auto und fehlerhafte Punkte wurden keine Punkte zugewiesen.

QI ET AL. (2017A) klassifizieren mit *PointNet* eine photogrammetrische Innenraumpunktwolke des Datensets *3D Semantic Parsing of Large-Scale Indoor Spaces* in 13 Klassen und erreichen eine IoU von 48 %. In dieser Punktwolke existiert keine Klasse von fehlerhaften Punkten. Die Verhältnisse der Klassengrößen werden nicht näher beschrieben bzw. sind nicht Gegenstand von Untersuchungen. Zudem sind diese Punktwolken durch ein anderes Messsystem aufgenommen worden. Im Folgenden wird u. a. anhand der Kombinationen (B) und (C) untersucht, welchen Einfluss die Klassengrößen (B) und die Klasse "fehlerhafte Punkte" (C) auf die Klassifizierungsleistung von LIDAR-Punktwolken, die mit *PointNet* klassifiziert werden, haben.

Auffällig bei der Klassenkombination (B) ist, dass es zu einer Verwechslung bei den Klassen der Bodenoberflächen kommt. In der *Imager5010* Punktwolke wird die Straße nicht richtig klassifiziert und die Klassen Gehweg (Recall 95 %) und Bodenvegetation (Recall 59 %) gut klassifiziert. Eine gegensätzliche Beobachtung kann für die *Focus3D* Punktwolke gemacht werden. Hier wird die Klasse Straße mit bis zu 99 % Recall klassifiziert und die Klassen Gehweg und Bodenvegetation schwach bzw. nicht klassifiziert (Tabelle 2). Es ist festzustellen, dass es bei diesen drei Klassen mit einer ähnlichen geometrischen Ausprägung zu einer Überklassifizierung einer Klasse bzw. Minderklassifikation der anderen Klassen kommt. Die Klassen Bauwerk und Baum, die ein Volumen ausfüllen können, können für beide Punktwolken mit höheren Recallwerten klassifizierungen von 3D-Objekten entwickelt wurde und dass für die Klassifizierung in diesen Untersuchungen nur geometrische Merkmale verwendet wurden. Eine Unterscheidung von ebenen Klassen ist mit diesen Daten besonders ungünstig.

Tabelle 2:	Klassifikationsergebnis unter Verwendung der sechs Objektklassen, die mehr als
	2 % der Punkte repräsentieren. b = beste Klassifizierung und s = schlechteste
	Klassifizierung.

g Recall in %							Präzision in %							IoU in %				
Punktwolk	Straße	Baum	Bauwerk	Straßens.	Bodenv.	Gehweg	Straße	Baum	Bauwerk	Straßens.	Bodenv.	Gehweg	Straße	Baum	Bauwerk	Straßens.	Bodenv.	Gehweg
Ima	ger5	010																
b	0	92	89	1	59	95	0	90	87	3	40	53	0	87	79	1	31	52
s	0	94	67	6	0	94	0	71	75	24	0	53	0	68	55	5	0	51
Focu	us3D																	
b	99	70	72	40	0	0	46	69	87	6	0	0	46	53	65	5	0	0
s	82	88	72	84	0	17	43	73	95	18	0	51	39	67	70	17	0	15

Die Untersuchungen mit der Klassenkombination (B) zeigen des Weiteren, dass Klassifizierungsleistungen mit einer IoU von 57 % für den *Imager5010* und von 51 % für den *Focus3D* erzielt werden können. Diese Klassifizierungsleistung ist mit den Ergebnissen QI ET AL. (2017A) vergleichbar, sodass festgestellt werden kann, dass das Messsystem, mit dem eine Punktwolke aufgenommen ist, nicht zwangsmäßig einen Einfluss auf die Klassifizierungsleistung von *PointNet* hat. Eine Steigerung der Klassifizierungsleistung wird hervorgerufen, wenn a) keine sehr kleinen Klassen oder / und b) keine fehlerhaften Punkte in der Punktwolke vorhanden sind. Zur Klärung, welche dieser Einflussgrößen maßgeblich verantwortlich sein kann, werden Klassifizierungen mit der Kombination (C) durchgeführt.

Die Klassenkombination (C) umfasst zusätzlich zu den Klassen aus (B) die Klasse der fehlerhaften Punkte. Mittels dieser Untersuchung wird überprüft, ob das Vorhandensein dieser Klasse die Klassifizierungsleistung beeinflusst, welches für die *Imager5010* Punktwolke festgestellt werden kann. Für diese Punktwolke erfolgt eine Klassifizierung, wie bei der Klassenkombination (A), nur in die gleichen vier Klassen. Die Werte für Recall und Präzision sind mehrheitlich um nur wenige Prozent höher, sodass eine signifikante Steigerung, aufgrund des Einflusses der Klassengrößen, hier nicht bestätigt werden kann (Tabelle 3).

Tabelle 3:Klassifikationsergebnis unter Verwendung der sechs Objektklassen, die mehr als
2 % der Punkte repräsentieren und der Klasse fehlerhafte Punkte. Mit b = beste
Klassifizierung und s = schlechteste Klassifizierung. Die Klassen für Bodenflä-
chen Straße, Bodenvegetation und Gehweg wurden durch *PointNet* nicht klassi-
fiziert.

en		Recal	l in %]	Präzisio	on in %	6	IoU in %				
Punktwolk	Baum	Bauwerk	Straßens.	f. Punkte	Baum	Bauwerk	Straßens.	f. Punkte	Baum	Bauwerk	Straßens.	f. Punkte	
Imager501	10												
(b)	10	54	4	5	37	24	1	2	8	20	1	2	
(s)	8	29	15	28	41	89	1	4	7	28	1	3	

Tabelle 4: Klassifikationsergebnis bei einer Aufteilung der Punktwolke in die zwei Klassen
fehlerhafte Punkte und Objekte. Mit b = beste Klassifizierung und s = schlech-
teste Klassifizierung. Für den *Focus3D* wurden immer dieselben Ergebnisse er-
zielt.

		IoU in %	Verteilung in Punkte in %				
Punktwolken	alle	Objekte	fehlerh. Punkte	Objekte	fehlerh. Punkte		
Imager5010 (b)	80	89	8	93,1	6,9		
Imager5010 (s)	28	43	3	93,1	6,9		
Focus3D	92	96	0	96,0	4,0		

Eine mögliche Strategie, den Einfluss von fehlerhaften Punkten zu eliminieren, kann sein, die Klassifikation in mehreren Stufen, ähnlich den modellbasierten Klassifizierungsverfahren, durchzuführen. In der ersten Stufe werden nur fehlerhafte Punkte von allen übrigen Objektklassen durch ein ConvNet getrennt. In den anschließenden Stufen wird die Punktwolke

in Objektklassen unterteilt. Zur Untersuchung, ob mit *PointNet* eine Vorklassifikation durchgeführt werden kann, werden Punktwolken in die zwei Klassen fehlerhafte Punkte und Objekte aufgeteilt (Kombination D) und es wird mit *PointNet* trainiert. Es ist anzumerken, dass der Anteil der fehlerhaften Punkte zwischen den Laserscannern unterschiedlich groß ist. Für die Punktwolke des *Imger5010* sind 6,9 % der Punkte fehlerhafte Punkte und für den *Focus3D* 4,0 %. Für die Punktwolken des *Focus3D* konnte eine Unterscheidung zwischen Objekten und fehlerhaften Punkten nicht erreicht werden. Alle Punkte werden der anzahlmäßig stärksten Klasse zugeordnet, welches immer zu einer IoU von 96,0 % bzw. 99,9 % führt. Eine Differenzierbarkeit ist nur bei den Punktwolken des *Imager5010* zu beobachten, die zwischen 28,0 % und 80,0 % *IoU* stark variiert (Tabelle 4). In dieser Untersuchung zeigt sich erneut, dass das Verhältnis zwischen der Punktanzahl bei verschiedenen Klassen die Klassifizierung beeinflusst.

3.4 Umgang mit den Einflussgrößen

Die Klassifizierungsuntersuchungen zeigen, dass der Inhalt und die Form der Trainingspunktwolken (z. B. die Klassenaufteilung, in der die Punktwolken für das Training bereitgestellt werden) einen Einfluss auf die Klassifizierung haben. Die Netzwerkarchitektur *Point-Net* ohne Erweiterungen wurde in dieser Arbeit angewendet und nicht verändert. ENGELMANN ET AL. (2017) zeigen, dass für synthetische Punktwolken durch einfache Erweiterungen an der Eingabeschicht und der Aggregation Klassifizierungen mit einer IoU von 90 % möglich sind. Ähnliche Adaptionen und die Vorschaltung von weiteren Vorverarbeitungsnetzwerken sind zentrale Parameter für die Entwicklung eines praxistauglichen Klassifizierungsverfahrens.

Die in dieser Arbeit untersuchten Einflussgrößen betreffen die Trainingsdaten. Hierbei wurden das Vorhandensein von fehlerhaften Punkten, die Anzahl der Klassen und das Punkteverhältnis bei verschiedenen Klassen untersucht. Fehlerhafte Punktwolken sind aufgrund der Untersuchungsergebnisse einflussgebend für die Klassifizierungsleistung. Eine einfache Klassifizierung nach fehlerhaften und nicht fehlerhaften Punkten ist, aufgrund der Ergebnisse für die Klassenkombination (D), nicht möglich. Es ist hier zu untersuchen, ob bei einem günstigeren Verhältnis von fehlerhaften und nicht fehlerhaften Punkten beim Training eine Unterscheidung möglich ist.

Eine Optimierung der Klassifizierung bei einer großen Anzahl von Klassen mit stark variierender Punktanzahl ist durch eine Verkettung von ConvNet, die verschiedene Teilklassifizierungen durchführen, zu untersuchen. Unabhängige ConvNet führen zunächst eine Grobklassifizierung durch, die immer feinmaschiger wird. Beispielsweise werden erst Bauwerke von den Bodenflächen getrennt und in einem folgenden Schritt wird mittels ConvNet nach Klassen für Bodenflächen klassifiziert. Merkmale, die für eine Unterscheidung notwendig sind, könnten ggf. schneller und zuverlässiger detektiert werden.

4 Fazit und Ausblick

Datenbasierte Verfahren wie ConvNet bieten neue Möglichkeiten für eine detaillierte und effiziente *end-to-end* Punktwolkenklassifikation. Die Leistung dieser Verfahren ist u. a. von der Form und dem Inhalt der Trainings- und Anwendungsdaten abhängig. Je strukturierter

die Daten vorliegen, desto effizienter sind die Trainings- und die Anwendungsphasen. Können Daten nicht in eine Datenstruktur überführt werden (z. B. Verlust von relevanten Details), dann ist die Auswertung aufwändiger und fehleranfälliger. Am Beispiel von *PointNet* wurde der Einfluss von fehlerhaften Punkten auf die Klassenaufteilung untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass fehlerhafte Punkte die Klassifikation bei unstrukturierten Punktwolken negativ beeinflussen. Unterschiedlich große Anzahlen an Punkten je Klasse beeinflussen zudem die Klassifizierung, da bei sehr großen Unterschieden die Klasse, die die meisten Daten repräsentiert, überklassifiziert wird. Ungünstigen Konstellationen in den Trainingsdaten kann mit einem Anpassen der Trainingsdatengröße und dem Inhalt der Klassen sowie ggf. mit einer Verkettung von ConvNet begegnet werden.

Literatur

- AIJAZI, A., CHECCHIN, P. & TRASSOUDAINE, L. (2013): Segmentation Based Classification of 3D Urban Point Clouds: A Super-Voxel Based Approach with Evaluation. Remote Sensing, 5, 4, 1624–1650.
- BARNEFSKE, E. & STERNBERG, H. (2019): PCCT: A Point Cloud Classification Tool To Create 3D Training Data To Adjust And Develop 3D ConvNet. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 4216, 35-40.
- DEUGE, M. D., QUADROS, A., HUNG, C., DOUILLARD, B. (2013): Unsupervised Feature Learning for Classification of Outdoor 3D Scans. Australasian Conference on Robotics and Automation.
- ENGELMANN, F., KONTOGIANNIA, T., HERMANS, A. & LEIBE, B. (2017): Exploring Spatial Context for 3D Semantic Segmentation of Point Clouds. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 716-124.
- FELZENSZWALB, P. F. & HUTTENLOCHER, D. P. (2004): Efficient Graph-based Image Segmentation. International Journal of Computer Vision, 59, 2, 167–181.
- GIRSHICK, R. (2015): Fast R-CNN. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1440–1448.
- GIRSHICK, R., DONAHUE J., DARRELL, T. & MALIK, J. (2014): Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 580–587.
- GOODFELLOW, I., BENGIO, Y. & COURVILLE, A. (2016): Deep Learning. The MIT Press.
- HACKEL, T., SAVINOV, N., LADICKY, L., WEGNER, J.D., SCHINDLER, K. & POLLEFEYS, M. (2017): SEMANTIC3D.NET: A New Large-scale Point Cloud Classification Benchmark. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 91–98.
- MATURANA, D. & SCHERER, S. (2015): VoxNet: A 3D Convolutional Neural Network for Real-Time Object Recognition. Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 922–928.
- QI, C. R., SU, H., MO, K. & GUIBAS, L. J. (2017A): PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 77-85.
- QI, C. R.; YI, L.; SU, H. & GUIBAS, L. J. (2017B): PointNet++: Deep Hierarchical Feature Learning on Point Sets in a Metric Space. Advances in Neural Information Processing Systems, 5099-5108

- REN, S., HE, K., GIRSHICK, R. & SUN, J (2016): Faster R-CNN: Towards Real-time Object Detection with Region Proposal Networks. Advances in Neural Information Processing Systems, 91–99.
- SIMONYAN, K. & ZISSERMAN, A. (2014): Very Deep Convolutional Networks for Largescale Image Recognition, Proceedings of the ICLR, 1409-1556.
- STROM, J., RICHARDSON, A. & OLSON, E. (2010): Graph-based Segmentation for Colored 3D Laser Point Clouds. Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2131-2136.
- SZE, V., CHEN, Y.-H., YANG, T.-J. & EMER, J.S. (2017): Efficient Processing of Deep Neural Networks: A tutorial and survey. Proceedings of the IEEE, 105, 12, 2295-2329.
- YANG, B., LUO, W. & URTASUN, R. (2018): PIXOR: Real-Time 3D Object Detection from Point Clouds. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 7652–7660.

Vollautomatisierte Auswertung von Mobile-Mapping-Daten mit Hilfe von Machine Learning

Alexander REITERER, Dominik STÖRK, Katharina WÄSCHLE und Achim LEYDECKER

1 Zusammenfassung

Messsysteme wie Laserscanner oder Kameras zur Erfassung geometrischer Strukturen liefern immer hochwertigere 3D-Daten. Um diese Daten zu nutzen, mussten sie bisher manuell gesichtet und interpretiert werden – ein aufwendiger und ineffizienter Prozess. Das Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM in Freiburg entwickelt deshalb entsprechende Verfahren für die automatische Erfassung, Klassifizierung und Interpretation von 3D-Daten. Im Mittelpunkt stehen lernende Algorithmen, die auf dem Konzept des sogenannten "Deep Learning" beruhen. Der vorliegende Beitrag präsentiert den entwickelten Prozess im Überblick und zeigt Ergebnisse.

2 Einführung

Im letzten Jahrzehnt wurde ein Großteil der Laserscanner-Daten im Straßenraum mit Mobile-Mapping-Systemen erfasst. Der große Vorteil dieser Systeme ist die Erfassung der Daten auch bei hohen Fahrgeschwindigkeiten und damit im fließenden Verkehr. Die Datenqualität hat direkten Einfluss auf die zu erwartenden Ergebnisse.

Ein Mobile-Mapping-System besteht i. d. R. aus einem Positionierungssystem, welches das Primärsystem darstellt. Die Position wird durch die Kombination eines Kreiselsystems, eines globalen Positionierungssystems (GNSS) und eines Wegstreckensensors ermittelt. Dies geschieht mathematisch meist durch ein Kalman-Filter, das eine kontinuierliche Vorwärtslösung in Echtzeit berechnet. Alle weiteren Sensoren sind Sekundärsensoren, die entweder durch den Weg oder die Zeit mit dem Positionierungssystem synchronisiert sind. Diese Sensoren können Videokameras, CCD/CMOS-Einzelbildkameras, Laserscanner, Laserdistanzsensoren oder Georadarsensoren sein. Ergebnis einer Messfahrt mit einem solchen Fahrzeug (vgl. Abbildung 1) ist eine sog. Punktwolke (vgl. Abbildung 2).

Eine Punktwolke stellt die Repräsentation einer Szene als zunächst unsortierte Menge von Punkten in 3D-Koordinaten dar (3D-Punktwolke). Zusätzlich zur 3D-Information steht der vom Laserscanner empfangene Intensitätswert zur Verfügung (4D-Punktwolke).



Abb. 7: Messfahrzeug mit Sensorik des Fraunhofer IPM.

3 Stand der Technik der Objekterkennung

Um einzelne Objekte in Punktwolken zu lokalisieren und zu klassifizieren, gibt es eine Vielzahl verschiedener Ansätze. Für die Analyse von komplexen Szenen werden klassischerweise geometrische Eigenschaften von Objekten sowie a-priori-Wissen über den typischen Aufbau der Umgebung kombiniert. So entsteht ein mehrstufiges Vorgehen, indem z. B. zunächst über die Suche nach einer ebenen Fläche eine grobe Kategorisierung in Fahrbahn, Objekte auf der Fahrbahn sowie Objekte über der Fahrbahn erfolgt, vgl. PU (2011). Bordsteine lassen sich z. B. über Sprünge in den Höhenwerten bestimmen. Andere Methoden zur Objekterkennung in 3D gehen stärker merkmalsbasiert vor, wie es ähnlich aus der Bildverarbeitung bekannt ist. Darunter sind auch Ansätze, welche für komplexere Szenen mit Verdeckungen und einer größeren Anzahl an Objekten geeignet sind. Unterscheiden lassen sich hierbei globale und lokale Ansätze, je nach Art der verwendeten Merkmale. Einen Überblick über die Methoden, welche lokale Merkmale auf Oberflächen betrachten, bietet z. B. GUO (2014). Die verschiedenen Ansätze zur Objektidentifikation in Punktwolken beschränken sich aber meist auf wenige Objekte bzw. Objektklassen, oder auf Objekte, welche in ihrer Erscheinung nur geringer Variation unterliegen. Bei stärker variierenden Objekten wie Bäumen reichen geometrische Merkmale nicht aus. Für die detaillierte Unterscheidung einer größeren Anzahl komplexerer Objektklassen ist es deshalb notwendig, weitere Informationsquellen einzubeziehen.


Abb. 8: Punktwolke farblich (bzw. in Graustufen) codiert.

State-of-the-Art-Techniken zur Objekterkennung in 3D-Daten beruhen auf einem Lernprozess. Dabei werden Merkmale bestimmt, welche die relevanten Objekte möglichst vollständig beschreiben, z. B. Farbe, Form, Abmessungen etc. Komplexe Objekte lassen sich jedoch in den meisten Fällen nur schwer mit einer überschaubaren Anzahl von Parametern beschreiben, z. B. Vegetation. Um komplexe und vor allem auch sehr große Objekte voneinander abzugrenzen, müssen umfangreiche Bereiche analysiert werden, im Extremfall ganze Straßenzüge oder Städte. Dies ist eine äußerst komplexe Aufgabe, die mit klassischen Methoden der Objekterkennung anhand manuell definierter Beschreibungsmerkmale i. d. R. unmöglich ist. Daher sind in der Objekterkennung schon seit geraumer Zeit Verfahren auf Basis künstlicher neuronaler Netze (KNN) den klassischen Erkennungsverfahren überlegen. Dies gilt vor allem dann, wenn es darum geht, sehr viele verschiedene Objekte zu erkennen, deren Erscheinung zudem stark variiert. Solche KNN-basierten Methoden können auch robuster gegenüber Variationen der einzelnen Objekte sein (z. B. Verdeckungen, Farbausbleichungen, Beschädigungen oder Verschmutzungen). Bereits Ende der 1980er Jahre wurden mithilfe von KNN einfache Aufgaben wie z. B. eine Handschrifterkennung gelöst.

Der Aufbau der Netze von damals wird heute als flach bezeichnet; sie umfasste maximal acht bis zehn Schichten mit meist weniger als 20 000 Neuronen. *Deep Learning* unterscheidet sich von den klassischen Methoden zur Objekterkennung vor allem dadurch, dass die zu erkennenden Objekte nicht durch einen Satz manuell vordefinierter Merkmale beschrieben werden, sondern dass die beschreibenden Parameter eines Objektes vom neuronalen Netz selbst bestimmt werden. Für den industriellen Einsatz ist die Lokalisierung und Klassifizierung einer Vielzahl verschiedener Objektklassen (vgl. Abbildung 3) im 3D-Raum gefordert, welche in ihrer Erscheinung stark variieren können.



Abb. 9: Punktwolke farblich nach Objektklassen codiert

4 Prozesskette des Fraunhofer IPM zur Klassifizierung von Umgebungsdaten

Fraunhofer IPM verfolgt zur Klassifizierung der Punktwolken primär einen Ansatz aus dem Feld des Deep Learning, bei welchem geeignete Merkmale aus einem Trainingsdatensatz automatisch gelernt und sowohl zur Lokalisierung als auch zur Klassifizierung übernommen werden. Der Prozess ist dabei wie folgt: Ein spezielles KNN zur semantischen Anreicherung von 2D- und 3D-Daten klassifiziert die von einem Messsystem aufgenommenen Daten. Die getrennten Datenströme, die durch die Umgebungserfassung entstehen, werden dafür miteinander kombiniert. Objekte, welche in Bildern erkannt werden, überführt der Auswerteprozess vollautomatisiert in den 3D-Raum. Das notwendige Wissen dafür entstammt einem ausführlichen Kalibrationsprozess, der die Position und Ausrichtung aller Messsensoren auf dem Messfahrzeug bestimmt und in ein verwertbares Format überführt. Das KNN analysiert jeden 3D-Punkt einzeln und ordnet ihn mitunter auch mehreren Objektklassen zu, da gleiche Objekte aus mehreren Perspektiven aufgenommen werden. Oft lassen sich Objekte sogar nur dann eindeutig klassifizieren, wenn auch mehrere Aufnahmeperspektiven zur Verfügung stehen; z. B. wenn eine Laterne durch einen Baum mit Ästen verdeckt wird. Mit nur einer Perspektive bestände die Gefahr, die Laterne zu übersehen und den Bereich fälschlicherweise als Baum oder als Teil eines Baumes zu klassifizieren. Erst die getrennte Verarbeitung und Gewichtung der Aufnahmeperspektiven lässt die punktgenaue Identifizierung von Objekten zu. Dieser Schritt trägt wesentlich zur Robustheit des Ansatzes bei. Objekte mit ähnlichen Merkmalen können anschließend zu Gesamtobjekten zusammengefasst werden (z. B. alle Punkte, die zu einer Laterne gehören). Für diese Identifizierung von Gesamtobjekten wird ein komplexes Regelwerk angewandt. Abbildung 3 zeigt das Ergebnis der Klassifizierung anhand einer Farbdarstellung in einer Punktwolke.

Das Ergebnis kann am Ende als 2.5D-Karte ausgegeben werden (d. h. 2D-Objektumriss und Objekthöhe) – siehe Abbildung 4. Das KNN bildet dabei eine zentrale Komponente, es entscheidet jedoch nicht final über die Zuordnung zu einer Objektklasse. Die Entscheidung wird vielmehr aus der Kombination von Klassifizierung *und* dem Wissen über Objektgeometrien und Umgebungszusammenhänge getroffen. So muss eine Fahrbahnmarkierung beispielsweise immer Teil der Fahrbahn sein, ein Gehweg sich immer am Rand einer Fahrspur befinden und ein Gebäude darf niemals die Fahrbahn kreuzen.

Für den Aufbau der Prozesskette werden entsprechende Trainingsdaten benötigt. Diese Trainingsdaten werden für jedes Projekt am Fraunhofer IPM individuell erfasst und annotiert. Bei sehr umfangreichen Projekten mit entsprechend hoher geforderter Klassifizierungszuverlässigkeit sprechen wir von über 100 000 Trainingsdatensätzen. Entscheidend für den Erfolg der Objektklassifizierung sind diese qualitativ hochwertigen, manuell annotierten Trainingsdaten, die auf der einen Seite exakt auf die Zielanwendung zugeschnitten sind, aber auf der anderen Seite auch noch genügend Variation für eine Generalisierung aufweisen.



Abb. 10: Projektion des Ergebnisses aus Abbildung 3 in die Ebene und Überlagerung mit Kartendaten.



Abb. 11: Annotations-Tool von Fraunhofer IPM, welches das Annotieren komplexer Daten erleichtert. Die Bilddaten werden durch die Annotation farblich überlagert (in diesem Beispiel steht dunkel erscheinendes Violett für Fahrzeug); auf der linken Seite sind entsprechende Steuereinheiten aufgelistet, um die Klassen zuzuordnen.

Aufgrund der Komplexität der tiefen Netzarchitektur ist nur schwer nachvollziehbar, welche Merkmale das KNN beim Lernen extrahiert. Daher ist die Steuerung der Annotation (das sog. *Labeling*) mit empirischen Experimenten eine Schlüsselaufgabe der Datenaufbereitung. Dafür hat das Fraunhofer IPM ein eigenes Annotations-Tool entwickelt, das die entsprechende Qualitätskontrolle einfacher und effizienter macht (Abbildung 5).

Der Prozess der Klassifizierung produziert während des Trainings kontinuierlich Output, der dann mit der Annotation abgeglichen werden kann. Auf Grundlage dieses Abgleichs werden die Parameter des Netzwerks dann vollautomatisiert angepasst.

Da für die Annotation von Datenmengen in der Größenordnung von 100 000 Bildern und mehr in jedem Fall eine größere Gruppe von Annotatoren bzw. Annotatorinnen mit diversem (kulturellen und fachlichen) Hintergrund eingesetzt werden muss, ist die Kommunikation und die Sicherstellung von Konsistenz beim Prozess eine herausfordernde Aufgabe. Wichtig ist, den Menschen den Hintergrund der Anwendung beizubringen und die Richtlinien für die Annotation eindeutig zu klären. Nur so kann der Fokus der Annotation von den für Menschen besonders beachteten Klassen wie Personen oder Fahrzeugen auf die für die Anwendung relevanten Annotationen gelenkt werden. Zu diesem Zweck wurde vom Team am Fraunhofer IPM ein visueller Annotations-Leitfaden erstellt.

Für wissenschaftliche Veröffentlichungen genügt es meist, wenn die Algorithmen als *Proof-of-Concept* evaluiert wurden – also nur auf kleinen Datensätzen mit isolierten Objekten getestet werden und nicht auf Punktwolken realer Szenen. In der Realität ist jedoch die tatsächliche Erscheinung von Objekten oftmals unerwartet starker Variation unterworfen. Für verschiedene Projekte wurden am Fraunhofer IPM Trainingsdaten erzeugt, die einen ungeheuren

Schatz für zukünftige Forschung und Anwendungen bilden. In Summe stehen dem Fraunhofer IPM weit über 100 000 Datensätze zur Verfügung, die zukünftig flexibel für verschiedene Projekte eingesetzt werden können.

Es werden Variationen sowohl hinsichtlich der verschiedenen Jahreszeiten abgedeckt als auch bezüglich der regional typischen städtebaulichen und architektonischen Eigenheiten.

Die Prozesskette des Fraunhofer IPM wird derzeit von mehreren Unternehmen erfolgreich eingesetzt, u. a. von der Strabag AG, der Deutschen Telekom und der Bundesanstalt für Straßenwesen BASt.

5 Zusammenfassung

Der Beitrag präsentiert den Prozess des Fraunhofer IPM zur vollautomatischen Klassifizierung von 3D-Daten. Als Datenquellen werden dabei Laserscanner- und/oder Bilddaten vorausgesetzt. Anwendungen in der Praxis haben gezeigt, dass eine instanzbasierte Zuverlässigkeit von über 80 % erreichbar ist – Voraussetzung dafür ist, dass ausreichend Trainingsdaten in guter Qualität vorliegen.

Literatur

- GUO, Y. (2014): 3D object recognition in cluttered scenes with local surface features: a survey. Pattern Analysis and Machine Intelligence. In: IEEE Transactions on, 36(11), S. 2270-2287.
- PU, S. (2011): Recognizing basic structures from mobile laser scanning data for road inventory studies. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66(6), S. S28-S39.

Analyse flächenhafter Schwingungen mit 3D-Laserscanning

Christoph HOLST, Heiner KUHLMANN und Hans NEUNER

1 Motivation

Zur Analyse von Bauwerksschwingungen werden in der Regel mehrere Sensoren am Bauwerk installiert, die jeweils hochfrequent punkthafte Messungen durchführen. Beispiele sind GNSS-Empfänger (PAZIEWSKI et al. 2019, YIGIT et al. 2019, ROBERTS et al. 2014), Beschleunigungssensoren oder Neigungssensoren (GIKAS et al. 2019, HOLST et al. 2014, NEITZEL et al. 2012). Eine aktuelle Neuentwicklung stellt die Nutzung motorisierter Totalstationen (Robot Total Station RTS) oder bildgebender Totalstationen (Image Assisted Total Station, IATS) dar (LIENHART et al. 2017, PAAR et al. 2017). Gegebenenfalls wird aus den punkthaften Messungen dann auf die flächenhaften Schwingungen geschlossen, entweder nur entlang der Hauptkomponente des Bauwerks (2D, z.B. Brücke oder Turm) oder entlang beider Ausdehnungskomponenten (3D). Im Falle der Analyse von 2D-Schwingungen werden mittlerweile auch Profillaserscanner eingesetzt (KUTTERER et al. 2009, SCHILL & EICHHORN 2019).

Für alle Fälle gilt stets die Voraussetzung, dass die Dauer einer einzelnen Messepoche sehr kurz und die Abtastfrequenz sehr hoch ist, jeweils bezogen auf die erwarteten Frequenzen der Bauwerksschwingung. Nur unter dieser Voraussetzung können gemäß den aktuellen Grundlagen der Zeitreihenanalyse die Charakteristika der Schwingungen, in der Regel Amplituden, Frequenzen usw., aufgedeckt werden (HEUNECKE et al. 2013). Die räumliche Zuordnung der Messungen zur Herleitung dieser Schwingungskenngrößen erfolgt unmittelbar durch die Platzierung der Sensoren am Bauwerk (GNSS, Beschleunigungssensoren, Neigungssensoren, Prismen, photogrammetrische Zielpunktdefinitionen), was direkten Zugang zum Bauwerk erfordert. Im Falle von Profillaserscannern erfolgt die räumliche Zuordnung rechnerisch, was das Treffen von Annahmen impliziert (SCHILL 2018).

Ein Einsatz des terrestrischen 3D-Laserscannings für die Analyse der Schwingungen eines Bauwerks eröffnet die Möglichkeit, den Schwingungszustand berührungslos und flächenhaft zu beschreiben. Allerdings werden dabei im Standardfall die oben genannten Voraussetzungen verletzt: Je nach gewähltem Punktabstand dauert der 3D-Scan eines Bauwerks mindestens einige Sekunden. Da Bauwerksschwingungen in der Regel höherfrequent sind, kann das Messobjekt während einer Messepoche nicht als starr angesehen werden. Jeder einzelne Messpunkt der 3D-Punktwolke bezieht sich demnach auf einen anderen geometrischen Zustand des Bauwerks. Zudem tastet der Laserscanner das Bauwerk in den verschiedenen Messepochen nicht zwangsweise an identischen Positionen ab, wie es bei der o. g. punktweisen Messung der Fall ist.

In diesem Beitrag werden erste methodische Ansätze zur Umgehung der oben beschriebenen Limitierungen eingeführt. Dafür werden die TLS-Beobachtungen als ortsabhängige, zeitliche harmonische Schwingungen parametrisiert, wobei zusätzlich räumliche Abhängigkeiten zwischen diesen harmonischen Schwingungen eingeführt werden. Hier diskutieren wir verschiedene Möglichkeiten, diese räumlichen Abhängigkeiten in der Ausgleichung zu formulieren. Diese methodischen Ansätze beschränken sich im vorliegenden Artikel auf die Simulation und Analyse von Schwingungen entlang eines Profils, also auf den 2D-Fall. Eine Übertragung auf den 3D-Fall ist möglich.

Unser neuer Ansatz der 3D-Zeitreihenananlyse führt zu einem geschlossen formulierten raumzeitlichen Schwingungsmodell. Als Konsequenz können zur hochfrequenten 3D-Schwingungsanalyse erstmalig auch terrestrische Laserscanner verwendet werden. Die bisherigen Schwierigkeiten einer TLS-basierten flächenhaften Schwingungsanalyse,

- der Laserscanner misst einzelne Bauwerkspositionen nicht zeitgleich, sondern nacheinander an,
- die Messdauer einer Messepoche (gesamtes Bauwerk) dauert relativ lange verglichen mit der Schwingfrequenz des Bauwerks und
- zwischen zwei Messepochen werden nicht identische Punkte angemessen,

können demnach überwunden werden. Gleichzeitig ergeben sich unmittelbar zwei Vorteile:

- Flächenhafte Schwingungen können auch mit 3D-Laserscanning analysiert werden. Dies bedeutet eine erhebliche Minimierung des logistischen Aufwandes durch den Wegfall des direkten Zugangs zum Bauwerk, verglichen mit der Schwingungsanalyse basierend auf GNSS-Empfängern, Beschleunigungssensoren, Neigungssensoren, Prismen oder photogrammetrischer Zielpunktdefinitionen.
- Bisherige Restriktionen der einzelpunktbasierten Zeitreihenanalyse bzgl. einer minimalen Messfrequenz (Nyquistfrequenz) und einer minimalen Beobachtungsdauer können voraussichtlich abgeschwächt werden. Insbesondere hängt die Überbestimmung der Ausgleichung nicht mehr rein von der Messdauer, sondern auch von der räumlichen Auflösung der Messpunkte ab.

Kapitel 2 beschreibt die Vorgehensweisen bisheriger Schwingungsanalysen von Bauwerken, Kapitel 3 stellt dem unser neues Konzept gegenüber. In Kapitel 4 werden erste Umsetzungen und simulationsbasierte Ergebnisse für Schwingungen entlang eines Profils gezeigt. Kapitel 5 diskutiert die Ergebnisse und Kapitel 6 schließt die vorliegende Studie mit einem Fazit.

2 Bisherige Konzepte zur Schwingungsanalyse von Bauwerken

In Kapitel 1 wurden bereits verschiedene Messsysteme eingeführt, auf deren Basis Bauwerksschwingungen analysiert werden: GNSS-Empfänger, Beschleunigungssensoren, Neigungssensoren, RTS, IATS oder im 2D-Fall auch Profillaserscanner. Mit Ausnahme des Profillaserscanners wurden alle Messsysteme dazu verwendet, das Schwingungsverhalten eines Bauwerks an einzelnen punktweise vermarkten Positionen zu bestimmen. So wie in diesem Beitrag auch, wird dabei meistens von der Annahme harmonischer Schwingungen ausgegangen. Die Analyse findet entweder im Frequenzbereich durch die Berechnung von Amplitudenspektren oder im Zeitbereich durch die Parametrisierung dieser punktweise aufgezeichneten Schwingungen als harmonische Schwingung in Abhängigkeit der Zeit t statt. Im Fall gemessener Höhen z_{xvi} an definierten Einzelpositionen $(x, y)_i$ auf dem Bauwerk gilt:

$$z_{xy_i}(t) = \bar{z}_{xy_i} + z_{0,xy_i} \cdot \sin(\omega_{xy_i} \cdot t + \varphi_{xy_i}).$$

$$\tag{1}$$

Hierbei wird für jeden Messpunkt $(x, y)_i$ auf dem Bauwerk separat ein Mittelwert \bar{z}_{xy_i} , eine Amplitude z_{0,xy_i} , eine Frequenz ω_{xy_i} sowie eine Phasenlage φ_{xy_i} geschätzt. In den meisten Anwendungen sind diese Messungen nur entlang der Hauptausdehnung des Messobjekts durchgeführt (z.B. y), sodass sich die Zeitreihe $z_{y_i}(t)$ ergibt.

In jedem Fall gilt, dass etwaige räumliche Abhängigkeiten zwischen den Parametern – z. B. sind die Schwingfrequenzen räumlich benachbarter Messpunkte in der Regel ähnlich – nicht bei der Identifikation der Parameter berücksichtigt werden. Daher gelten die Restriktionen der Zeitreihenanalyse und der Ausgleichungsrechnung (z. B. bzgl. nötiger Messdauer, Nyquistfrequenz, Redundanz) für jeden Einzelpunkt individuell.

Gleiches gilt für die bisherige Analyse im Frequenzbereich. Die räumliche Generalisierung findet allenfalls im Nachhinein statt, sie trägt also nicht zur Identifikation der Parameter aus Gleichung (1) bei. Ein Bespiel ist hier die räumliche Modalanalyse von Bauwerken aus den unabhängigen Zeitreihenanalysen der Einzelpunkte. Diese zweitgenannte räumliche Generalisierung findet insbesondere beim Structural Health Monitoring (SHM) oder Structural Condition Monitoring (SCM) statt (z. B. WHELAN et al. 2008).

Terrestrische Laserscanner können diese Vorgehensweise insofern bereichern, als dass die räumlich hochaufgelösten Messungen viel mehr Informationen über die nachbarschaftlichen Ähnlichkeiten harmonischer Schwingungen oder Amplitudenspektren liefern können. Für die Analyse linienhafter Schwingungen ist dies schon erprobt, wie SCHILL & EICHHORN (2019) zeigen. Hier wird die räumliche Generalisierung der Schwingeigenschaften eines Bauwerks anhand eines Wasserfalldiagramms durchgeführt. Ein solches Wasserfalldiagramm stellt die Frequenzspektren mehrerer Messpunkte nebeneinander dar. Diese räumliche Generalisierung ist aber weiterhin rein optisch, die Zeitreihenanalyse selber wird für jeden Messpunkt separat durchgeführt. Alternativ zeigen SCHILL et al. (2019) eine rein räumliche Parametrisierung der Geometrie des beobachteten Trägers mit Hilfe von Splines.

Die bisherigen Konzepte zur Schwingungsanalyse von Bauwerken basieren demnach vornehmlich auf der isolierten Betrachtung von Einzelpunkten über die Zeit. Eine funktionale Integration räumlicher Nachbarschaftsbeziehungen in die Identifikation relevanter Parameter findet nicht statt. Allenfalls für Profillaserscanner wurden erste Ansätze der räumlichen Parametrisierung, jedoch isoliert von der zeitlichen Betrachtung, erprobt. 3D-Laserscanning wurde demnach, evtl. aufgrund der in Kapitel 1 genannten Schwierigkeiten, bisher noch nicht zur Untersuchung von Bauwerksschwingungen eingesetzt.

3 Grundzüge des neuen Konzepts zur Analyse flächenhafter Schwingungen mit 3D-Laserscanning

Das neue Konzept zur Analyse von Schwingungen basiert auf einer räumlichen Betrachtung: Nachbarschaftsbeziehungen gemessener Punkte sollen genutzt werden, um einerseits die Parameter der Zeitreihenanalyse präziser und zuverlässiger als bei einer rein einzelpunkthaften Betrachtung zu schätzen. Andererseits sollen sie dazu genutzt werden, die Zeitreihenanalyse bei Vorliegen kurzer Messreihen oder niedriger Abtastraten – bezogen auf die Schwingfrequenz – zu ermöglichen. Mathematisch gesehen ist das Ziel, die parametrisierte Zeitreihe – ausgedrückt als harmonische Schwingung z(x, y, t) analog zu Gleichung (1) – raumzeitlich kontinuierlich, also in Abhängigkeit der zweidimensionalen Position (x, y) auf dem schwingenden Bauwerk und der Zeit *t*, darzustellen:

$$z(x, y, t) = \overline{z}(x, y) + z_0(x, y) \cdot \sin(\omega(x, y) \cdot t + \varphi(x, y)).$$
⁽²⁾

Die Parametrisierung aus Gleichung (2) setzt voraus, dass der Mittelwert der beobachteten Fläche – also die Ruhelage $\bar{z}(x, y)$ – zeitlich konstant und ortsabhängig ist. Gleiches gilt für die Amplitude der Schwingung $z_0(x, y)$. Im Falle von zeitlich abklingenden Schwingeffekten wäre zusätzlich noch eine Dämpfung zu modellieren. Ferner ist modelliert, dass die Frequenz der Schwingung $\omega(x, y)$ und die Phasenlage $\varphi(x, y)$ räumlich variabel sein können. Diese Annahmen sind je nach den statischen und dynamischen Eigenschaften des Messobjekts anzupassen. Wie im folgenden Kapitel 4 anhand einer 2D-Simulation linienhafter Schwingungen entlang eines Trägers gezeigt wird, wird die Parameterschätzung durch diese raumzeitliche Modellierung gutmütiger verglichen mit der klassischen Betrachtung aus Kapitel 2.

4 Erste Umsetzungen zur Analyse linienhafter Schwingungen

Abschnitt 4.1 bespricht die Simulation der linienhaften Schwingungen, Abschnitt 4.2 die Realisierung des in Kapitel 3 genannten Konzepts zur raumzeitlichen Analyse der Schwingungen und Abschnitt 4.3 die Ergebnisse der Analysen. Wir beziehen uns hier immer auf die Analyse von harmonischen Schwingungen entlang eines Profils. Das in Kapitel 3 beschriebene dreidimensionale Konzept wird also hier zweidimensional umgesetzt. Daher basieren die simulierten Messungen auch auf einem Profillaserscanner anstelle eines 3D-Laserscanners. Die Übertragung auf den 3D-Fall wird in zukünftigen Arbeiten behandelt.

4.1 Simulation linienhafter Schwingungen

Zur Implementierung des neuen Konzeptes simulieren wir Beobachtungen eines Profillaserscanners, der einen schwingenden Träger beobachtet (Abbildung 1). Der Träger ist 10 m lang. Die statische Form des Trägers gleicht einer horizontalen Geraden. Der Träger schwingt mit einer (Eigen-)Frequenz von 0,5 Hz, einer Amplitude von 50 mm und einer Phasenlage von $\pi/0,12$ (Zufallswert), wobei dieser zeitlichen harmonischen Schwingung eine räumliche harmonische Schwingung überlagert ist mit einer Frequenz von 0,2 m⁻¹ und einer Phasenlage von $\pi/4$. Diese räumliche harmonische Schwingung sorgt dafür, dass die Amplitude von 50 mm räumlich variabel ist, wobei bei der gewählten Frequenz und der Länge des Trägers zwei vollständige harmonische Schwingungen vorliegen (Abbildung 3).

Dieser Träger wird mit Hilfe eines Profillaserscanners beobachtet, der sich 16 m mittig unterhalb des Trägers befindet. Der Laserscanner misst den Träger polar mit einer Punktfrequenz von 10 kHz und einer Winkelauflösung von 0,1° an. Die Beobachtungsdauer beträgt 4 sec. Hierbei simulieren wir das tatsächliche polare Messprinzip eines Laserscanners, d. h. wir verschneiden die räumliche Messrichtung des Laserscanners mit der momentanen Tragwerkskurve. Zur Vereinfachung nehmen wir hinterher aber an, dass nur die resultierenden z-Koordinaten stochastisch sind. Wir nehmen eine konstante Standardabweichung von $\sigma_z = 10$ mm an. Die Position des Messpunktes auf dem Träger (y-Richtung) betrachten wir als varianzfrei: $\sigma_y = 0$ mm.





Diese Messkonstellation führt dazu, dass der Laserscanner insgesamt 3817 Punkte aufnimmt, wobei sich diese in elf Profile unterteilen lassen (Abbildung 2). Pro Profil tastet der Laserscanner den Träger mit 347 Punkten ab, was zu einem Punktabstand auf dem Träger von etwa 30 mm führt. Die Positionen der Messpunkte entlang des Trägers sind in jedem Profil identisch, wobei dies keine grundsätzliche Voraussetzung für unseren neuen Ansatz ist. Bei der Eigenfrequenz von 0,5 Hz des Trägers und einer Messdauer von 4 sec führt der Träger während der Messzeit zwei komplette Schwingungen durch.

Abbildung 3 zeigt die erfassten elf Profile entlang des Ausdehnung des Trägers (y-Achse). Wie auch schon in Abbildung 2 erkenntlich, bilden die Messungen unterschiedliche zeitliche Zustände des Trägers ab. Manche Profile beinhalten Messungen ungefähr zum Zeitpunkt der Hauptauslenkung des Trägers von 50 mm (Profile 3, 6, 9), in der Regel wird jedoch nicht die Hauptauslenkung des Trägers erfasst.

Die zugrundeliegende eher ungünstige Messkonstellation (insb. kurze Messdauer, geringes Signal-Rausch-Verhältnis, nur fünf Beobachtungen pro Periode) führen wir absichtlich herbei, um in diesem Beitrag die Vorteile der raumzeitlichen Modellierung darzustellen. Denn wie in Abschnitt 4.3 analysiert wird, gelingt die Schwingungsanalyse ohne Hinzunahme räumlicher Abhängigkeiten nicht an jeder Messposition. Zwar stellen wir an dieser Stelle nur eine einzige Realisierung unserer Simulation vor. Die darauf basierenden Rückschlüsse haben wir jedoch anhand weiterer Realisierungen validiert. Deren Analyse ist den weiteren Arbeiten vorbehalten.



Abb. 2: Simulierte Zeitreihe (durchgezogene Linie) mit verrauschten Beobachtungen (Punkte) und Trennung in die Profile 1 bis 11 (gestrichelte vertikale Linien).



Abb. 3: Simulierte Profilmessungen (durchgezogene Linie) mit verrauschten Beobachtungen (Punkte) entlang der Ausdehnung des Trägers.

4.2 Stufenweise Realisierung des Konzeptes

Das Konzept der raumzeitlichen Schwingungsanalyse führen wir schrittweise ein, um die Vorteile unterschiedlicher räumlicher Verknüpfungen differenziert betrachten zu können. Dafür stellen wir unterschiedliche funktionale Modelle auf, mit denen wir die in Abbildung 2 und 3 dargestellte Zeitreihe jeweils approximieren, um die relevanten Parameter der harmonischen Schwingungen zu schätzen.

4.2.1 Stufe 1

Die erste Stufe gleicht dem bisherigen Vorgehen der Parametrisierung der Schwingung rein in der zeitlichen Komponente. Demnach werden keine räumlichen Beziehungen eingepflegt und für jeden Messpunkt y_i wird separat eine Schätzung der Parameter der harmonischen Schwingung durchgeführt:

$$z_{y_i}(t) = \bar{z}_{y_i} + z_{0,y_i} \cdot \sin(\omega_{y_i} \cdot t + \varphi_{y_i}).$$

$$\tag{3}$$

Die Messungen z_{y_i} an den Positionen y_i sind hier die originären Messungen, da die y-Koordinaten in der Simulation in jedem Profil reproduziert werden. In der Realität könnten sie ähnlich wie in NEUNER et al. (2014) oder SCHILL (2018) aus einer räumlichen Mittelung hervorgehen.

4.2.2 Stufe 2

In Stufe 2 nehmen wir an, dass die Frequenz und die Phasenlage der Schwingung räumlich konstant sind, sodass gilt:

$$\omega_{y_i} = \omega_{y_{i+1}} = \omega$$
; $\varphi_{y_i} = \varphi_{y_{i+1}} = \varphi$. (4)

Dadurch wird Gleichung (3) insofern vereinfacht, als dass wird lediglich eine einzige Frequenz ω und eine einzige Phasenlage φ schätzen. Dadurch ergibt sich eine erste räumliche, funktionale Verknüpfung aller vorher separat betrachten Zeitreihen an den einzelnen Messpunkten y_i . Diese räumliche Verknüpfung ist mechanisch gesehen nachvollziehbar, da die Eigenfrequenz schwingender Träger durchaus räumlich konstant sein kann. Gleiches gilt für die Phasenlage.

4.2.3 Stufe 3

Stufe 3 erweitert das Modell aus Stufe 2 insofern, als dass wir nun auch annehmen, dass sich der Mittelwert \bar{z}_{y_i} zwischen benachbarten Messpositionen y_i und y_{i+1} nicht beliebig ändern kann. Gleiches gilt für die Amplitude der Schwingung z_{0,y_i} . Demnach gilt:

$$\bar{z}_{y_i} \approx \bar{z}_{y_{i+1}}$$
; $z_{0,y_i} \approx z_{0,y_{i+1}}$. (5)

Diese räumlichen Ähnlichkeiten der harmonischen Schwingungen implementieren wir als Pseudobeobachtungen mit einer gewissen Varianz, da räumliche Variationen im statischen Mittelwert des Trägers und in der Amplitude der Schwingung gegeben sein können. Da die räumliche Variation in der vorliegenden Simulation bezogen auf den Mittelwert tatsächlich Null ist, nehmen wir die zugehörige Varianz mit $\sigma_{\bar{z}} = 0,1$ mm an. Für die tatsächlich vorhandene Variation der Amplituden (siehe Abbildung 3) nehmen wir $\sigma_{z_0} = 1$ mm an.

4.2.4 Stufe 4

In den Stufen 1 bis 3 wird analog zu vorherigen Studien angenommen, dass der Laserscanner den Träger reproduzierbar an diskreten Positionen y_i erfasst. Diese Annahme möchten wir eigentlich vermeiden, da diese Positionen in der Realität nicht identisch sein müssen. Dies gilt gerade für den 3D-Fall, der zukünftig anvisiert wird.

Daher basiert die Stufe 4 der raumzeitlichen Modellierung auf einer komplett kontinuierlich gedachten raumzeitlichen Zeitreihenanalyse:

$$z(y,t) = \underbrace{d \cdot y + b}_{\overline{z}(y)} + \underbrace{z_y \cdot \sin(\omega_y \cdot y + \varphi_y)}_{z_0(y)} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi).$$
(6)

Die Mittelwerte \bar{z}_{y_i} und Amplituden z_{0,y_i} , die sich jeweils auf diskrete Messpunkte y_i beziehen, parametrisieren wir nun räumlich kontinuierlich durch eine Gerade (bezogen auf den Mittelwert), sowie abermals durch eine harmonische – nun räumliche betrachtete – Schwingung (bezogen auf die Amplitude). Dafür integrieren wir die Parameter d (Steigung) und b (Offset) für den räumlichen Mittelwert und die Parameter z_y (räumliche Amplitude), ω_y (räumliche Frequenz) sowie φ_y (räumliche Phasenlage) für die räumliche Schwingung.

Anstelle der Parametrisierungen als Gerade und als harmonische Schwingung wären natürlich auch andere geometrische Modelle denkbar, wie etwa Polynome oder Splines, die sich zur räumlichen Parametrisierung der Schwingung von langgestreckten Trägern bewährt haben (z.B. NEUNER et al. 2014, HOLST et al. 2014, HOLST 2019, SCHILL et al. 2019).

4.3 Ergebnisse der unterschiedlichen Stufen

Die in Abschnitt 4.1 eingeführte Zeitreihe wird mit Hilfe der in Abschnitt 4.2 beschriebenen funktionalen Modelle approximiert. Zur Bestimmung von Näherungswerten werden jeweils die bekannten Parameterwerte verrauscht mit Standardabweichungen von 100 mm für die Amplituden und Mittelwerte, 0,1 Hz für die Frequenz und 0,1 für die Phasenlage. Während die Startwerte bei der vorliegenden Datenlage bzgl. Amplitude und Mittelwert unkritisch sind, führen große Abweichungen insbesondere bei der Frequenz zu Problemen bei der Konvergenz des Ausgleichs. Prinzipielle Angaben zur nötigen Genauigkeit der Startwerte sollen aber in einer späteren Studie getroffen werden und sind nicht Bestandteil dieses Artikels. Die folgenden Abschnitte besprechen die Bedingungsdichte der Ausgleiche, die Redundanzanteile sowie die geschätzten Parameter.

4.3.1 Auswirkungen auf die Bedingungsdichte

Abbildung 4 zeigt die Bedingungsdichte (z.B. HEUNECKE et al. 2013) der in vier Stufen eingeführten raumzeitlichen Modellierung der Schwingungen in Abhängigkeit der Anzahl an gemessenen Profilen auf dem Träger und in Abhängigkeit der Punkte pro Profil. Die maximalen Werte entsprechen dabei immer der aktuellen Simulation (11 Profile, 347 Punkte pro Profil).

Bei Betrachtung der Stufe 1 – der üblichen Vorgehensweise ohne räumliche Beziehungen – fällt auf, dass die Bedingungsdichte nur von der Anzahl gemessener Profile abhängig ist, nicht aber von den Punkten pro Profil. Dies ist dadurch begründbar, dass jede Messposition

unabhängig voneinander entlang der Zeitachse betrachtet wird. Also alleinig die Anzahl wiederholt gemessener Profile führt zu einer Überbestimmung im Ausgleich.

Die Stufen 2 bis 4 zeigen, dass die räumlichen Abhängigkeiten generell zu einer höheren Bedingungsdichte führen, die auch jeweils mit der Anzahl an Punkten pro Profil weiter ansteigt. Bei Stufe 2 ist die Steigerung der Bedingungsdichte in Abhängigkeit der Punkte pro Profil noch mäßig, bei Stufe 3 noch etwas ausgeprägter und am größten bei Stufe 4. In Stufe 3 und 4 führen die räumlichen Annahmen selbst bei nur einem einzigen gemessenen Profil zu einer Überbestimmung. Dennoch sind in diesem Fall nicht alle Parameter schätzbar, da die zeitliche von der räumlichen Schwingung kaum trennbar ist. Dies gilt bei Stufe 4 insbesondere für den hier vorliegenden Fall, da sowohl die zeitliche als auch die räumliche Modellierung auf einer harmonischen Schwingung beruhen (siehe Gleichung (6)).

Insgesamt zeigt diese Betrachtung, dass die Einführung räumlicher Abhängigkeiten zu einer gutmütigeren Schätzung führt. Die Stützung der Schätzung erfolgt nicht mehr nur anhand der Messdauer, sondern auch anhand der räumlichen Auflösung entlang des Messobjekts.



Abb. 4: Bedingungsdichten der vier vorgestellten Modelle in Abhängigkeit der Anzahl an Punkten pro Profil und der Anzahl an Profilen. Die jeweils weißen Bereiche (links) unten in den Abbildungen weisen darauf hin, dass dort ein unterbestimmtes Gleichungssystem vorliegt (z.B. Stufe 1 bei weniger als vier gemessenen Profilen).

4.3.2 Redundanzanteile

Die Redundanzanteile (z.B. HEUNECKE et al. 2013) sind in Abbildung 5 für die Stufen 2 bis 4 dargestellt. Bei Stufe 1 konvergiert die Schätzung nicht an allen Messpositionen, die in dieser Stufe 1 unabhängig voneinander betrachtet werden. Dies liegt an der insgesamt kurzen Beobachtungsdauer, der geringen Anzahl von 5 bis 6 Beobachtung pro Schwingung und dem an manchen Positionen geringen Signal-Rausch-Verhältnis (siehe Abbildung 3). Daher sind die Redundanzanteile von Stufe 1 nicht dargestellt.



Abb. 5: Redundanzanteile der Stufen 2 bis 4. Die 11 gemessenen Profile sind insbesondere bei Stufe 2 durch stark unterschiedliche Redundanzanteile erkennbar.

Bei Stufe 2 sind die Schwankungen der Redundanzanteile innerhalb eines Profils relativ gering verglichen mit den Schwankungen zwischen den Profilen. Unter Hinzunahme von Abbildung 2 zeigt sich, dass Profile, die den Träger zum Zeitpunkt seiner maximalen Auslenkung anmessen (Profile 3, 6 und 9), wichtig für die Parameterschätzung sind – diese Beobachtungen haben also eher geringe Redundanzanteile. Profile, bei denen das Signal im Rauschen untergeht (insb. Profile 2 und 10), sind weniger wichtig für die Schätzung – diese Beobachtungen haben also eher hohe Redundanzanteile.

Die Variationen in Stufe 3 sind viel geringer als bei Stufe 2. Neben den gleichen Effekten wie bei Stufe 2 – nur viel geringer ausgeprägt – kommt hier noch hinzu, dass Beobachtungen am Anfang und Ende eines Profils einen vergleichsweise geringeren Redundanzanteil aufweisen. Dies ist durch die Einführung der Pseudobeobachtungen zu erklären. Da am Rand eines jeden Profils die zugehörigen Nachbarschaftsbeziehungen immer nur in eine einzige Richtung eingeführt werden können, stützen die Pseudobeobachtungen die Schätzung dort weniger.

Bei Stufe 4 sind die Variationen der Redundanzanteile nur noch sehr gering, weil die Redundanz allgemein sehr hoch ist. Die Bedeutung der einzelnen Profile verschwindet hier aufgrund der kontinuierlichen raumzeitlichen Betrachtung. Für die Größe des Redundanzanteils ist nun einzig die Messposition auf dem Träger sowie die Größe des Signal-Rausch-Verhältnisses von Bedeutung. Dies ist ein großer Unterschied zu den Stufen 2 und 3.

4.3.3 Geschätzte Parameter

Bei der Analyse der Parameter beschränken wir uns in diesem Beitrag auf die geschätzten Amplituden z_{0,y_i} , die im Fall von Stufe 4 durch drei andere Parameter substituiert sind (siehe Gleichung (6)). Abbildung 5 zeigt die geschätzten Amplituden aller vier Stufen in Abhängigkeit der Messposition y_i . Hierbei sind die Schätzwerte der Stufen 3 und 4 visuell kaum zu unterscheiden. Bei beiden Stufen wird die Glättungswirkung der Pseudobeobachtungen (Stufe 3) bzw. der Parametrisierung der räumlichen harmonischen Schwingung (Stufe 4) deutlich: Die Abweichungen zur simulierten Schwingung (siehe Abschnitt 4.1) sind sehr gering.



Abb. 5: Geschätzte Amplituden für die Stufen 1 bis 4.

Während die Schätzungen bei Stufe 2 auch im Mittel um diese räumliche harmonische Schwingung streuen, sind die Abweichungen verglichen mit Stufe 3 und 4 ungleich größer und räumlich viel variabler. Selbst bei Stufe 1 streuen die Schätzungen in den meisten Fällen um die simulierte Schwingung bzw. um die Schätzungen von Stufen 3 und 4. Nur an vereinzelten Stellen treten große Abweichungen auf. An diesen Positionen ist der Ausgleich – der

jede Messposition unabhängig voneinander betrachtet – selbst nach 30 Iterationen auch meistens noch nicht konvergiert.

Diese Betrachtung zeigt demnach, dass die Einführung räumlicher Beziehungen zu einer erheblichen Stützung des Ausgleichs mit räumlicher Glättungswirkung beiträgt: Singuläre Variationen zwischen benachbarten Amplituden werden von Stufe 1 zu Stufe 4 immer geringer. Somit kann mit diesen Modellen eine realistischere Analyse realer Strukturen, wie z.B. schwingender Brücken, erfolgen.

6 Fazit und Ausblick

Dieser Beitrag stellt eine Einführung in die Analyse flächenhafter Schwingungen mit 3D-Laserscanning dar. Obwohl die Simulationen rein auf 2D-Laserscanning beruhen, lassen sich die Erkenntnisse auf den 3D-Fall übertragen. Wir ziehen folgende Erkenntnisse:

- Es lassen sich raumzeitliche Modelle entwickeln, um terrestrische Laserscanner für die Zeitreihenanalyse von Bauwerken zu verwenden, selbst wenn das Bauwerk während einer Messepoche nicht als statisch angesehen werden kann.
- Eine rein zeitliche Analyse von Schwingungen an unterschiedlichen Bauwerkspositionen ohne die Einbindung von räumlichen Beziehungen gelingt nur bei einer ausreichend langen Messdauer mit ausreichend hoher Messfrequenz sowie einem ausreichenden Signal-Rausch-Verhältnis an jeder Messposition.
- Durch die Einführung räumlicher Beziehungen wird die Ausgleichungsaufgabe günstiger, sodass selbst bei kurzen Messdauern Zeitreihenanalysen raumzeitkontinuierlich durchgeführt werden können.
- Diese räumlichen Beziehungen sind abhängig von der Bauwerksmechanik zu formulieren.

Dieser Beitrag stellt nur eine Einführung in die Thematik der 3D-Zeitreihenalalyse basierend auf terrestrischem Laserscanning dar, zumal er sich auch nur auf den 2D-Fall beschränkt. Zukünftig werden wir die vorgestellten Modelle weiterentwickeln, auf den 3D-Fall übertragen und mit realen Messungen empirisch validieren.

Literatur

- GIKAS, V., MPIMIS, T., PINIOTIS, G., PERAKIS, H., PAPADIMITRIOU, F., DRIMERIS, K. & SOTIRIOU, P. (2019): Long-term monitoring of the Tall Piers of a Multi-span Beam Bridge Using a Network of Digital Inclinometers: First Results and Perspectives, 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), 15-17 May 2019, Athens, Greece
- HEUNECKE, O., KUHLMANN, H., WELSCH, W., EICHHORN, A. & NEUNER, H. (2013): Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen (2. Auflage), Ein Band der Reihe: Handbuch Ingenieurgeodäsie, H. Wichmann Verlag, Berlin.
- HOLST, C. (2019): Terrestrisches Laserscanning 2019: Von großen Chancen, großen Herausforderungen und großen Radioteleskopen, zfv, 2/2019, 94-108.

- HOLST, C., BURGHOF, M. & KUHLMANN, H. (2014): Modeling the beam deflection of a gantry crane under load, J. Surv. Eng., 140 (1), 52-59.
- KUTTERER, H., PAFFENHOLZ, J.-A. & VENNEGEERTS, H. (2009): Kinematisches terrestrisches Lserscanning. ZfV, 2/2009, 79-87.
- LIENHART, W., ERHART, M. & GRICK, M. (2017): High frequent total station measurements for the monitoring of bridge vibrations, J. Appl. Geodesy, 11 (1), 1-8.
- NEITZEL, F., NIEMEIER, W., WEISBRICH, S. & LEHMANN, M. (2012): Investigation of low-cost accelerometer, terrestrial laser scanner and ground-based radar interferometer for vibration monitoring of bridges. Proceedings of the Sixth European Workshop on Structural Health Monitoring. Dresden.
- NEUNER, H., SCHMITT, C. & NEUMANN, I. (2014): Zur Bestimmung der verkehrsseitig verursachten Dehnung an einem Brückenbauwerk mittels terrestrischem Laserscanning. In: Wieser, A. (Hrsg.): Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Zürich, 2014, Wichmann Verlag, Berlin, 231-243.
- PAAR, R., MARENDIĆ, A., WAGNER, A., WIEDEMANN, W., WUNDERLICH, TH., ROIĆ, M. & DAMJANOVIĆ, D. (2017): Using IATS and digital levelling staffs for the determination of dynamic displacements and natural oscillation frequencies of civil engineering structures. Conference Proceedings INGEO 2017 – 7th International Conference on Engineering SurveyingAt: Lisbon, Portugal.
- PAZIEWSKI, J., WIELGOSZ, P. SIERADZKI, R. & BARYLA, R. (2019): Detection of structural vibration with high-rate GNSS Precise Point Positioning – methodology and case study results, 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), 15-17 May 2019, Athens, Greece.
- ROBERTS, G. W., BROWN, C. J., TANG, X., MENG, X. & OGUNDIPE, O. (2014): A Tale of Five Bridges; the use of GNSS for Monitoring the Deflections of Bridges. J. Appl. Geodesy, 8 (4), 241-264.
- SCHILL, F. (2018): Überwachung von Tragwerken mit Profilscannern, Dissertation, DGK, Reihe C, Nr. 820.
- SCHILL, F. & EICHHORN, A. (2019): Deformation Monitoring of Railway Bridges with a Profile Laser Scanner, zfv, 2/2019, 109-118.
- SCHILL, F., SVIRIDOVA, A. & EICHHORN, A. (2019): Deformation monitoring of noise barriers with profile laser scanning, 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), 15-17 May 2019, Athens, Greece
- WHELAN, M.J., GANGONE, M.V., JANOYAN, K.D. & JHA, R. (2008): Wireless Vibration Monitoring for Damage Detection of Highway Bridges, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, May 2008
- YIGIT, C.O., DINDAR, A. A., EL-MOWAFY, A., BEZCIOGLU, M. & GIKAS, V. (2019): Investigating the ability of high-rate GNSS-PPP for determining the vibration modes of engineering structures: small scale model experiment, 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), 15-17 May 2019, Athens, Greece

Kamerabasiertes Messsystem zur Bestimmung der Rauigkeit von Bauteiloberflächen – Kalibrierung und erste Ergebnisse

Baris ÖZCAN, Raimund SCHWERMANN und Jörg BLANKENBACH

Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung durch anonyme Fachkollegen als "peer reviewed paper" angenommen.

1 Einleitung

Die Rauigkeit von Bauteiloberflächen stellt für die Instandhaltung und Sanierungsplanung von Bauwerken einen wichtigen Faktor dar. Soll beispielsweise ein Reparatursystem auf den Unterbeton aufgebracht werden, ist die Adhäsion zwischen Unterbeton und Reparatursystem zu gewährleisten. Neben der spezifischen Adhäsion – bestehend aus physikalischen, chemischen und thermodynamischen Wechselwirkungen der Oberflächen – spielt ebenfalls die mechanische Adhäsion eine wichtige Rolle. Der mechanischen Adhäsion liegt das Prinzip zugrunde, dass das flüssige Beschichtungsmaterial, auch Adhäsiv genannt, in die Poren und Vertiefungen des Festkörpers fließt, aushärtet und sich dort – ähnlich wie Dübel oder Druck-knöpfe – mechanisch verankert (BIKERMANN 1968). Einen wichtigen Einflussparameter auf die mechanische Adhäsion stellt dabei die Rauigkeit dar. Darüber hinaus ist die Kenntnis der Rauigkeit ebenfalls für die Volumenabschätzung des aufzubringenden Beschichtungsmaterials erforderlich.

1.1 Motivation und Zielsetzung

Das im Bauwesen verwendete Standardverfahren zur Ermittlung der Rauigkeit von Oberflächen ist das Sandflächenverfahren nach Kaufmann (KAUFMANN 1971). Hierbei wird eine definierte Menge an Sand auf der zu vermessenden Oberfläche ausgebracht und so lange kreisförmig verteilt, bis sie sich nicht weiter verteilen lässt. Anschließend kann in Abhängigkeit vom Durchmesser des Sandflecks ein Wert für die Rauigkeit abgeleitet werden. Obwohl das Verfahren sehr einfach in der Durchführung ist, weist es einige maßgebliche Mängel auf. So ist beispielweise die Reproduzierbarkeit des Ergebnisses nicht gegeben. Bei jeder Durchführung des Vorgangs weichen die Ergebnisse voneinander ab. Weiterhin hängt das Ergebnis entscheidend vom Anwender ab. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Ergebnisse von Person zu Person um bis zu 20 % variieren können (MELLMANN & OPPAT 2008). Ein weiteres Defizit ist die Voraussetzung einer direkten Berührung mit der Objektoberfläche. Der Kontakt mit der zu vermessenden Oberfläche kann diese nämlich entscheidend verändern bzw. verschleißen, so dass das Ergebnis verfälscht wird. Eine wesentliche Beschränkung besteht zudem darin, dass das Verfahren nicht an stark geneigten bzw. vertikalen Flächen (z.B. Wandflächen) oder an Decken angewendet werden kann.

Eine modernere Methode zur Bestimmung der Rauigkeit ist das Profilmessverfahren mithilfe von Laser-Triangulation (SCHULZ 2016 & SCHULZ 2017). Hierbei wird mit einer Laserdiode eine Laserebene aufgespannt, die auf die zu vermessende Oberfläche projiziert wird und sich auf dieser als Linie abbildet. Schräg zur Laserquelle befindet sich ein positionsempfindlicher Detektor (PSD), welcher auf die Laserlinie ausgerichtet ist und diese so erfasst. Eine Änderung des Abstands zwischen Laserquelle und Messobjekt bewirkt dementsprechend auch eine Änderung der Position des Signals auf dem Detektor. Ist die relative Lage des Detektors zur Laserquelle bekannt, kann durch trigonometrische Zusammenhänge die Tiefe des Messobjekts ermittelt werden. Das Verfahren ist zwar – im Gegensatz zum Kaufmann-Verfahren – fortschrittlicher und ermöglicht eine berührungsfreie und reproduzierbare Messung der Oberfläche, jedoch wird die Oberfläche nur linienhaft und nicht in der Fläche erfasst.

Daher wird im Rahmen eines Forschungsprojektes in Kooperation mit dem Unternehmen Nedo GmbH & Co. KG ein neuartiges Messsystem entwickelt, das die flächenhafte Bestimmung der Rauigkeit ermöglichen soll. Das kamerabasierte System besteht im Wesentlichen aus einem Kreuzschlitten mit Steuerung und Antrieb, welches eine monokulare Industriekamera mäanderförmig über die zu vermessende Oberfläche führt. In gleichmäßigen Abständen werden Bildaufnahmen von der Oberfläche erfasst und es wird mithilfe einer eigens entwickelten Software zur Auswertung die Objektoberfläche durch eine dreidimensionale Punktwolke rekonstruiert. Die Software basiert auf der freien Programmbibliothek OpenCV und realisiert die Erzeugung einer dichten dreidimensionale Punktwolke der Oberfläche durch ein (zweistufiges) Bildzuordnungsverfahren. Im Anschluss kann die Punktwolke für unterschiedliche Analysen genutzt werden, wie bspw. im vorliegenden Fall für die Ableitung von Rauigkeitsparametern.

Das neuartige Messsystem beinhaltet die folgenden Innovationen:

- berührungslos / zerstörungsfrei
- passives, optisches Verfahren
- bildbasiert
- anwendbar auf beliebig ausgerichtete Flächen
- portabel
- flächenhafte Datenauswertung
- digitales Verfahren

Vor dem Einsatz des Messsystems ist die Kamera zu kalibrieren, um auf diese Weise die inneren Abbildungseigenschaften zu bestimmen. Der vorliegende Beitrag stellt das im Rahmen des Projektes entwickelte Verfahren für die Kalibrierung der im Messsystem eingesetzten Kamera vor und es werden erste Ergebnisse für die Ableitung von Rauigkeitswerten präsentiert.

2 Grundlagen

2.1 Gestaltabweichungen

Nach DIN 4760 werden die Abweichungen einer Ist-Oberfläche, die von einem Messgerät erfasst wurde, von einer geometrisch idealen Oberfläche als Gestaltabweichung definiert.

Diese sind insgesamt in sechs Ordnungen eingegliedert, die im Folgenden veranschaulicht werden (Tabelle 1).

Gestaltabweichur	ng	
1. Ordnung Formabweichung	Die Gestaltabweichung der 1. Ordnung beschreibt die Formabweichung einer Oberfläche. Diese zeichnet sich bspw. als Krümmung bzw. Unebenheit aus.	
2. Ordnung Welligkeit	Die 2. Ordnung der Ge- staltabweichung gibt perio- disch auftretende Abwei- chungen der Oberfläche wieder.	
3. Ordnung Rauigkeit	Die 3. Ordnung charakteri- siert die Rauigkeit in Form von Rillen.	
4. Ordnung Rauigkeit	Die Rauigkeit in Form von Riefen, Schuppen oder Kuppen wird mithilfe der 4. Ordnung kenntlich ge- macht.	###~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
5. Ordnung Rauigkeit	Hier wird die Rauigkeit an- hand der Gefügestruktur des Materials beschrieben.	nicht mehr auf einfache Weise bildlich darstellbar
6. Ordnung	Die letzte Ordnung gibt den Gitteraufbau des Werk- stoffs an.	nicht mehr auf einfache Weise bildlich darstellbar

Tabelle 1:	Übersicht der Arten von Gestaltabweichungen technischer Oberflächen (in An-
	lehnung an DIN 4760)

Während die ersten beiden Ordnungen die Formabweichung und Welligkeit von Oberflächen angeben, beschreiben die Abweichungsarten dritter bis fünfter Ordnung die für den vorliegenden Anwendungszweck relevanten Eigenschaften einer Oberfläche. Die tatsächliche Oberfläche eines Bauteils besteht allerdings aus der Zusammensetzung aller Gestaltabweichungsarten. In Abbildung 1 ist ein zusammengesetztes Oberflächenprofil beispielhaft skizziert.



Abb. 1: Kenngröße: arithmetischer Mittenrauwert

2.2 Kenngrößen

Für die Beschreibung der Rauigkeit dienen verschiedene Maße, wie beispielsweise der arithmetische Mittenrauwert, bei dem die absoluten Werte der Profilabweichungen über eine Bezugsstrecke aufsummiert und die Summe durch die Länge der Strecke dividiert werden. Die Berechnungsvorschrift für den arithmetischen Mittenrauwert lautet demzufolge:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| \, dx \tag{1}$$

In Abbildung 1 wird der arithmetische Mittenrauwert R_a anhand einer beispielhaften Profillinie verdeutlicht. Weitere Maße sind die quadratische Rauheit und die gemittelte Rautiefe. Auf die Kenngrößen und deren Unterschiede soll im Rahmen des Beitrags jedoch nicht weiter eingegangen werden. Für nähere Informationen sei auf die Fachliteratur verwiesen (u. a. DIN 4287).

2.3 Photogrammetrische Abbildung

Dem Prinzip der photogrammetrischen Abbildung liegt das vereinfachte Modell der Lochkamera zugrunde. Wird ein Objektpunkt P von einer Kamera aufgenommen, läuft der Bildstrahl vom Objekt geradlinig über das optische Zentrum O_{cam} der Kamera und trifft auf den Bildsensor als Bildpunkt p auf. Somit ist das optische Zentrum einer Kamera der mathematische Raumpunkt, durch den alle Bildstrahlen der abgebildeten Objektpunkte durchlaufen. Daher wird die Abbildung bekanntermaßen auch als Zentralprojektion bezeichnet.

Die zentralprojektive Abbildung der Objektpunkte in die Bildpunkte (x', y') können mathematisch mit den Kollinearitätsgleichungen Gl. (2a, b) beschrieben werden. Auf die Herleitung der bekannten Zusammenhänge wird an dieser Stelle verzichtet und dafür auf die einschlägige Literatur verwiesen (vgl. u. a. KRAUS 2004, LUHMANN 2018).

$$x' = x'_{H} - c \cdot \frac{(X - X_{0}) \cdot r_{11} + (Y - Y_{0}) \cdot r_{21} + (Z - Z_{0}) \cdot r_{31}}{(X - X_{0}) \cdot r_{13} + (Y - Y_{0}) \cdot r_{23} + (Z - Z_{0}) \cdot r_{33}}$$
(2a)

$$y' = y'_{H} - c \cdot \frac{(X - X_{0}) \cdot r_{12} + (Y - Y_{0}) \cdot r_{22} + (Z - Z_{0}) \cdot r_{32}}{(X - X_{0}) \cdot r_{13} + (Y - Y_{0}) \cdot r_{23} + (Z - Z_{0}) \cdot r_{33}}$$
(2b)

mit x'_H, y'_H :Bildhauptpunktkoordinatenc:Kamerakonstante X_0, Y_0, Z_0 :Lage der Kamera r_{ij} :Parameter der RotationsmatrixX, Y, Z:Objektpunktkoordinaten

Das Lochkameramodell ist jedoch nur ein idealisiertes mathematisches Modell der photogrammetrischen Abbildung. Daneben spielt auch das physikalische Modell eine wichtige Rolle. Die Objektive der Kameras bestehen aus mehreren Linsen, an denen die einfallenden Bildstrahlen mehrmals gebrochen werden, bevor sie auf den Bildsensor fallen. Die Brechung an den Linsen oder ein asymmetrischer Aufbau des Objektivs haben zur Folge, dass die Bildstrahlen gekrümmt auf den Bildsensor fallen und nicht mehr linear wie beim Lochkameramodell. Diese Abbildungsfehler, auch Verzeichnung genannt, bestehen größtenteils aus radial-symmetrischen und radial-asymmetrisch tangentialen Anteilen und können u. a. mit Korrekturpolynomen modelliert werden. Während sich der Einfluss der radial-symmetrischen Verzeichnung in Abhängigkeit vom Abstand r eines Bildpunktes zur Bildhauptpunktlage bemerkbar macht, wirkt sich die tangentiale Verzeichnung asymmetrisch zum Bildhauptpunkt aus.

Zur Modellierung der photogrammetrischen Abbildung unter Berücksichtigung der Abbildungsfehler werden zusätzliche Korrekturterme $\Delta x'$, $\Delta y'$ an die Kollinearitätsgleichungen angebracht. Diese werden im Folgenden eingeführt.

Radial-symmetrische Korrekturterme:

$$\Delta x'_{rad} = x' \frac{\Delta r'_{rad}}{r'}$$
(3a)

$$\Delta y'_{rad} = y' \frac{\Delta r'_{rad}}{r'}$$
(3b)

mit
$$\Delta r'_{rad} = k_1 r'^3 + k_2 r'^5 + k_3 r'^7 + \cdots$$

Tangentiale Korrekturterme:

$$\Delta x'_{tan} = p_1(r'^2 + 2x'^2) + 2p_2 x' y' \tag{4a}$$

$$\Delta y'_{tan} = p_2(r'^2 + 2y'^2) + 2p_1 x' y' \tag{4b}$$

Gesamtkorrektur:

$$\Delta x' = \Delta x'_{rad} + \Delta x'_{tan} \tag{5a}$$

$$\Delta y' = \Delta y'_{rad} + \Delta y'_{tan} \tag{5b}$$

2.4 Bildbasierte 3D-Punktwolkenerzeugung

Ziel der bildbasierten 3D-Rekonstruktion ist es, ausgehend von photogrammetrischen Bildaufnahmen, die abgebildete Szene in Form einer dreidimensionalen Punktwolke wiederherzustellen. Das auf Bildzuordnung basierende Verfahren besteht im Wesentlichen aus zwei Algorithmen: dem Structure-from-Motion (SfM) und Dense Image Matching (DIM). Beim SfM-Algorithmus werden zunächst mithilfe von sogenannten Interest-Operatoren (LOWE 2004, BAY et al. 2008, CALONDER et al. 2010) markante Bildpunkte in den Bildern identifiziert und einander eindeutig zugeordnet (XIA 2013). Durch diese Bildpunktkorrespondenzen können u. a. die Objektkoordinaten der Bildpunkte und die äußere Orientierung der Kamera ermittelt werden. Schließlich werden im Zuge einer Bündelblockausgleichung die ermittelten Ergebnisse optimiert. Während beim SfM-Algorithmus die Objektkoordinaten nur von markanten Bildpunkten ermittelt werden, ist das Ziel des DIM, jedem Bildpunkt des einen Bildes den korrespondierenden Bildpunkt seines Nachbarbildes eindeutig zuzuordnen (DALL'ASTA & RONCELLA 2014, HIRSCHMULLER 2008, REMONDINO 2013). Durch Vorwärtseinschneiden der korrespondierenden Bildpunkte können schließlich die Objektkoordinaten der Bildpunkte ermittelt werden. Für weitere Details sei auf weiterführende Publikationen verwiesen (vgl. u. a. HARTLEY & ZISSERMAN 2003).

3 Vorstellung des Messsystems

Die Hardwarekomponente des Messsystems besteht aus einem Kreuzschlitten mit Steuerung und Antrieb, welcher eine Industriekamera automatisch über die Aufnahmefläche bewegt. Die monokulare Kamera wird hierbei auf zwei Achsen mäanderförmig über die zu vermessende Oberfläche bewegt und die Bilder im Stop-and-Go-Verfahren ausgelöst. Die Bilder werden dabei per USB an den Messrechner übertragen. Die gesamte Aufnahmedauer ist abhängig vom eingestellten Überlappungsgrad der Bilder bzw. von der Bildanzahl und beträgt bei insgesamt 30 Bildaufnahmen (5 Bilder in x-Richtung und 6 Bilder in y-Richtung) derzeit knapp 5 Minuten. Als Kamera kommt die monochrome Industriekamera Basler acA3800-14um zum Einsatz. Einige der wichtigsten Spezifikationen der Kamera können der Tabelle 2 entnommen werden.

Spezifikation	
Auflösung (H \times V)	3840 px × 2748 px
Pixelgröße ($H \times V$)	1,67 μm × 1,67 μm
Bittiefe	12 bit
Signal-Rausch-Verhältnis	32,9 dB
Mono/Farbe	Mono
Shutter-Technologie	Rolling Shutter

Tabelle 2: Spezifikationen der eingesetzten Industriekamera Basler acA3800-14um

Für eine gleichmäßige diffuse Ausleuchtung der aufzunehmenden Fläche sind an der Apparatur ringsum LED-Lichtleisten angebracht. Die Intensität des Lichts kann nach Bedarf stufenlos gedimmt werden. Dadurch ist das Messergebnis kaum vom Tageslicht abhängig. In Abbildung 2 ist das Messsystem als Demonstrator dargestellt.



Abb. 2: Das bildbasierte Messsystem

3.1 Bestimmung der inneren Orientierung

Für eine möglichst genaue Rekonstruktion der Objektoberfläche waren zunächst die Abbildungseigenschaften der Kamera einmalig zu bestimmen. Diese bestehen aus der Brennweite, der Bildhauptpunktlage in x- und y-Richtung, den radial-symmetrischen Verzeichnisparametern $k_1 - k_3$ und den radial-asymmetrisch tangentialen Verzeichnisparametern p_1, p_2 . Eine Selbstkalibrierung, bei der die Kamera ohne Passpunkte, sondern ausschließlich mit gemessenen Bildkoordinaten einer (ebenen) Betonoberfläche kalibriert wurde, führte zu unbefriedigenden Ergebnissen. Die Ursache hierfür liegt in erster Linie in der schlechten räumlichen Verteilung der Punkte und hat zur Folge, dass innere Abbildungsparameter der Kamera miteinander korrelieren. In der Tabelle 3 sind die Abhängigkeiten der Kameraparameter in Form der Korrelationskoeffizienten nach der Selbstkalibrierung dargestellt.

Anhand dieser ist deutlich zu erkennen, dass insbesondere die radial-symmetrischen Verzeichnungsparameter $(k_1 - k_3)$ mit der Brennweite (f) korrelieren. Rekonstruiert man anschließend mit diesen Kameraparametern die Betonoberfläche, enthält sowohl der wiederhergestellte Bildverband als auch die Punktwolke eine auffällige Wölbung. Zur Visualisierung der Wölbung wurde durch die rekonstruierte Punktwolke ein Schnitt gelegt und eine Profillinie extrahiert. Diese Profillinie ist in 10-facher Erhöhung im unteren Bereich von Abbildung 3 dargestellt. Im Histogramm der Punktwolke ist ebenfalls eine nach oben verschmierte Normalverteilung zu erkennen (Ab0ildung. 3, rechts).



Abb. 3:

Nach der Selbstkalibrierung rekonstruierte gewölbte Punktwolke (oben), extrahierte Profillinie (unten, 10-fach überhöht dargestellt) und Histogramm der Höhenwerte (rechts)

Tabelle 3:	Abhängigkeiten der Parameter der inneren Orientierung nach der Selbstkalibrie-
	rung der Kamera anhand einer ebenen Oberfläche

	f	c _x	c _y	<i>k</i> ₁	k ₂	<i>k</i> ₃	p_1	p_2
f	1,00	-0,06	0,15	-1,00	0,99	-0,97	0,22	0,13
c_x		1,00	0,05	0,06	-0,06	0,06	0,04	0,01
<i>c</i> _y			1,00	-0,15	0,14	-0,13	0,04	-0,02
<i>k</i> ₁				1,00	-0,99	0,97	-0,22	-0,13
<i>k</i> ₂					1,00	-0,99	0,22	0,13
<i>k</i> ₃						1,00	-0,21	-0,13
<i>p</i> ₁							1,00	0,03
p ₂								1,00

3D-Kalibrierfeld

Da als Ursache für die unbefriedigenden Ergebnisse der Selbstkalibrierung die fehlende räumliche Tiefe des Kalibrierobjektes ausgemacht wurde, wurde ein räumliches Kalibrierfeld konzipiert.

Als Ergebnis ergab sich ein Kalibrierfeld mit einem Grundriss von 17 cm x 17 cm, auf dem sich insgesamt 144 Säulen in quadratischer Formierung befinden. Die Säulen haben dabei 3 unterschiedliche Höhen, die in abwechselnder Reihenfolge angeordnet sind, sodass eine gute räumliche Verteilung der Passpunkte gewährleistet ist. Die Passpunkte werden innerhalb des Kalibrierfeldes verteilt, sodass auf den Säulen jeweils eine uncodierte Kreismarke und auf der Grundfläche insgesamt 121 codierte Marken angebracht werden. Der maximale Höhenunterschied der Passpunkte beträgt auf diese Weise 2,25 cm. Durch die alternierende Reihenfolge der unterschiedlich hohen Säulen wird sichergestellt, dass in jeder der Bildaufnahmen mehrere Marken aus verschiedenen Tiefen abgebildet werden. Aufgrund der vergleichsweise geringen Dimension bzw. erforderlichen Feinheit wurde die Herstellung des Kalibrierfeldes



Abb. 4: Das mittels 3D-Druck hergestellte 3D-Kalibrierfeld

mittels 3D-Druck durchgeführt. Das dafür notwendige Modell wurde hierfür mithilfe einer CAD-Software konstruiert. In Abbildung 4 ist das hergestellte 3D-Kalibrierfeld dargestellt. Außen, am Rand des 3D-Kalibrierfeldes, sind außerdem vier Kalibrierstäbe angebracht, auf denen sich jeweils an beiden Enden eine Marke befindet. Durch die im Vorfeld interferometrisch ermittelten Strecken zwischen den Markenpaaren auf den einzelnen Stäben kann später der Maßstab für die Passpunkte des 3D-Kalibrierfeldes eingeführt werden.

Einmessung

Für die Bestimmung der Soll-Koordinaten des 3D-Kalibrierfeldes wurde dieses auf einem Stativ mit einer drehbaren Holzplatte befestigt und mit einer Spiegelreflexkamera (DSLR) aufgenommen. Die DSLR wurde hierfür auf ein Kugelgelenk montiert, welches an zwei Achsen, parallel zum Kalibrierfeld, verfahren werden kann. Das Kalibrierfeld wurde für die Einmessung systematisch mit insgesamt 69 Fotos aus verschiedenen Richtungen erfasst und anschließend mithilfe der photogrammetrischen Software PHIDIAS ausgewertet (PHOCAD 2019). Hierbei wurden zunächst Bildmessungen der Passpunkte durchgeführt und im nächsten Schritt mit einer Bündelblockausgleichung die Soll-Koordinaten der Passpunkte bestimmt. Im Zuge der Bündelblockausgleichung werden außerdem Angaben über die Bildmessgenauigkeit ermittelt. Diese liegt in x-Richtung bei 0,57 μ m bzw. 0,12 Pixel und in y-Richtung bei 0,59 μ m bzw. 0,12 Pixel.

Kalibrierung der Industriekamera

Zur Kalibrierung der inneren Orientierung der Kamera wurden insgesamt 30 gleichmäßig über das Objekt verteilte Bilder aufgenommen. Anschließend wurde erneut in PHIDIAS mit den Bildmessungen der Passpunkte eine Bündelblockausgleichung gerechnet, in die allerdings ausschließlich die Parameter der inneren Orientierung als Unbekannte eingeflossen sind. Die mittels der DSLR eingemessenen Soll-Koordinaten der Punkte wurden bis auf 10 Punkte als Passpunkte in die Ausgleichung eingeführt. Die restlichen 10 Soll-Koordinaten der Punkte wurden als Neupunkte mit übergeben, um nach der Ausgleichung die Abweichungen der Neupunkte mit den Soll-Koordinaten durch Kreuzvalidierung zu ermitteln. Durch die Berechnung des quadratischen Mittelwerts (RMS) der Abweichungen kann die Objektmessgenauigkeit des Systems abgeschätzt werden. Diese beträgt für die x-Koordinate 3,40 μ m, für die y-Koordinate 4,19 μ m und in der Tiefe z = 18,42 μ m. Die auffällig größere Abweichung für die z-Komponente lässt sich durch die Aufnahmekonfiguration und die damit verbundenen schleifenden Schnittwinkel der Bildstrahlen begründen. Es ergeben sich für die Parameter der inneren Orientierung die in Tabelle 4 angegebenen Werte und Standardabweichungen. Alle Parameter wurden dabei mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % als signifikant getestet.

Im Zuge der vermittelnden Ausgleichung werden außerdem die Korrelationen der Parameter in Form der Korrelationskoeffizienten berechnet. In Tabelle 5 sind diese aufgeführt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die zuvor vorhandenen Korrelationen von Brennweite und radialsymmetrischen Verzeichnungsparameter signifikant reduziert wurden. Die verbleibenden Korrelationen zwischen den *k*-Parametern bzw. zwischen p_1 und c_x sowie p_2 und c_y sind in den mathematisch-funktionalen Modellierungen begründet und insofern nicht zu vermeiden (vgl. z. B. auch LUHMANN 2018).

Parameter	Wert	Standardabweichung
f	8,2545 mm	0,0007 mm
C_{χ}	0,0737 mm	0,0012 mm
c _y	0,0051 mm	0,0007 mm
$k_1 (\cdot 10^{-4})$	-43,8231	0,2449
$k_2 (\cdot 10^{-7})$	565,8091	36,7678
$k_3 (\cdot 10^{-10})$	-10555,4693	1665,3598
$p_1(.10^{-5})$	5,1708	0,2624
$p_2(\cdot 10^{-5})$	10,2455	0,2549

Tabelle 4: Mittels 3D-Kalibrierfeld ermittelte Kameradaten der inneren Orientierung

 Tabelle 5:
 Abhängigkeiten der Parameter der inneren Orientierung nach der Kalibrierung der Kamera anhand des speziellen Kalibrierfeldes

	f	c_x	c _y	<i>k</i> ₁	k ₂	<i>k</i> ₃	p_1	p_2
f	1,00	0,00	0,01	0,03	-0,01	0,00	0,00	0,00
c_x		1,00	0,00	-0,01	0,01	-0,01	0,72	0,00
c _y			1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,38
<i>k</i> ₁				1,00	-0,98	0,93	0,01	0,00
<i>k</i> ₂					1,00	-0,99	-0,01	0,00
<i>k</i> ₃						1,00	0,01	0,00
<i>p</i> ₁							1,00	0,00
p_2								1,00



Abb. 5:

Rekonstruierte Punktwolke (oben), extrahierte Profillinie (unten, 10-fach überhöht dargestellt) und Histogramm der Höhenwerte (rechts) nach Anbringung der mittels 3D-Kalibrierfeld ermittelten Parameter der inneren Orientierung

Auch der visuelle Eindruck der mit den neuen Parametern der inneren Orientierung erzeugten Punktwolke bestätigt das deutlich verbesserte Ergebnis. Eine Wölbung der Punktwolke ist nach Rekonstruktion mit dem neuen Parametersatz nicht mehr festzustellen. Zur Veranschaulichung werden die Punktwolke und eine daraus extrahierte Profillinie (in 10-facher Überhöhung) in Abbildung 5 dargestellt. An dieser Stelle sollte auch dem Histogramm der Punktwolke (Abbildung 5, rechts) Beachtung geschenkt werden. Dieses nähert sich nun einer Normalverteilung an.

4 Vorläufige Rauigkeitsermittlung

Nach der Kalibrierung der Kamera mithilfe des 3D-Kalibrierfeldes kann das Messsystem verwendet werden, um die Rauigkeit von Betonoberflächen zu ermitteln. Hierfür wird durch die rekonstruierte Punktwolke mithilfe der linearen Regressionsanalyse eine ausgleichende Ebene geschätzt und die Abstände der Punkte zur Ebene berechnet. Auf diese Weise erhält man die flächenhafte Ausführung des arithmetischen Mittenrauwerts. Ebenfalls können wie bei der konventionellen Berechnung des arithmetischen Mittenrauwerts einzelne Profillinien aus der Punktwolke extrahiert werden und diese für die Berechnung des arithmetischen Mittenrauwerts herangezogen werden (s. Abschnitt 2.2).

Zur Evaluierung der Rauigkeitsermittlung wurden versuchsweise 18 Betonproben unterschiedlicher Oberflächenstruktur mit dem Messsystem aufgenommen und anschließend im Hinblick auf die Rauigkeit analysiert. Exemplarisch wurde eine Betonprobe selektiert, die visuell die gröbste und inhomogenste Oberfläche aufwies und nachfolgend umfassender untersucht. Als Stichprobe wurden aus dieser Betonprobe jeweils 11 Profillinien aus der Längsund Querrichtung in gleichmäßigen Abständen extrahiert und die arithmetischen Mittenrauwerte R_a in diesen Profilen ermittelt. In der unteren Tabelle sind diese aufgeführt (Tabelle 6).

	Lin1	Lin2	Lin3	Lin4	Lin5	Lin6	Lin7	Lin8	Lin9	Lin10	Lin11
Längs	1,319	0,703	1,328	0,701	0,852	0,798	0,545	0,894	0,704	0,975	0,954
Quer	0,763	0,943	0,723	0,866	0,824	1,023	0,549	1,292	1,082	0,795	0,939

 Tabelle 6:
 Arithmetische Mittenrauwerte R_a für die einzelnen extrahierten Profillinien in Längs- und Querrichtung (Angaben in mm)

Dabei beträgt für die Messreihe in Längsrichtung der arithmetische Mittelwert $\bar{x} = 0,8885$ mm mit einer Standardabweichung s = 0,2494 mm, für die Messreihe in Querrichtung $\bar{x} = 0,8908$ mm mit s = 0,1989 mm. Es zeigt sich, dass die profilweise berechneten Mittenrauwerte stark streuen, was auch durch die vergleichsweise hohe Standardabweichung zum Ausdruck kommt. Testet man in einem Hypothesentest die Einzelwerte gegenüber dem jeweiligen Mittelwert, weisen 6 der 11 Profile in Längsrichtung bzw. 4 der 11 Profile in Querrichtung signifikante Differenzen auf. Die Abweichungen dieser Linien zum Mittelwert sind somit nicht mehr rein stochastisch begründet. Dieses Ergebnis führt zu dem Schluss, dass eine singuläre Profillinie häufig nicht repräsentativ für die Rauigkeit einer Fläche ist und somit die flächenhafte Bestimmung der Rauigkeit ein belastbareres Ergebnis liefert. Errechnet man im Vergleich zu den profilhaften Mittenrauwerten den Mittenrauwert in der flächenhaften Ausführung zur gesamten Punktwolke, ergibt sich ein Wert von R_a = 0,9053 mm.

5 Fazit und Ausblick

Vorgestellt wurde ein neuartiges Messsystem für die flächenhafte Ermittlung der Rauigkeit von Bauteiloberflächen. Das System basiert auf einem Kreuzschlitten, der automatisiert eine Kamera über die zu vermessende Oberfläche führt. Die dabei aufgezeichneten Bildaufnahmen können in nachfolgenden Schritten zur dreidimensionalen Rekonstruktion der Oberfläche genutzt werden. Anschließend kann die rekonstruierte Oberfläche ausgewertet werden, um Rauigkeitsparameter daraus abzuleiten.

Vor dem Einsatz des Systems zu Messzwecken war zunächst die Kalibrierung der inneren Orientierung der Kamera notwendig. Eine Selbstkalibrierung der verwendeten Industriekamera anhand eines Objekts ohne Passpunkte – in unserem Fall einer (ebenen) Betonoberfläche – führte zu unbefriedigenden Ergebnissen. Durch die ungünstige räumliche Verteilung der Objektpunkte korrelierten die radial-symmetrischen Verzeichnungsparameter mit der Brennweite, weshalb die Parameter nicht eindeutig bestimmt werden konnten. Dieser Umstand machte sich in der rekonstruierten Punktwolke in Form einer Wölbung bemerkbar.

Daher wurde für eine genaue Bestimmung der inneren Orientierung ein spezielles 3D-Kalibrierfeld mit guter dreidimensionaler Punktverteilung konzipiert, hergestellt und die Kalibrierprozedur der Kamera anhand dieser durchgeführt. Durch die Kalibrierung mithilfe des 3D-Kalibrierfeldes wurden die Korrelationen der Parameter der inneren Orientierung signifikant reduziert.

Um erste Ergebnisse für die Rauigkeitsableitung zu erzielen, wurde das Berechnungsmodell für die Ermittlung des arithmetischen Mittenrauwerts herangezogen und in die Software zur Auswertung integriert. In den Untersuchungen anhand von 18 Betonproben zeigte sich, dass die Ergebnisse einzelner Profile für die Rauigkeit nicht repräsentativ für die gesamte Fläche sind und daher eine flächenhafte Bestimmung der Rauigkeit vorzuziehen ist. Im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts werden ergänzende empirische Untersuchungen, u. a. Vergleiche zwischen verschiedenen Verfahren (z. B. Laser-Triangulation, bildbasierte Verfahren, Kaufmann-Verfahren), durchgeführt, um das im vorliegenden Beitrag vorgestellte kamerabasierte Verfahren zu validieren.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den Projektpartnern im Kooperationsprojekt Oberflächenrauigkeit sowie für die Förderung des Forschungsvorhabens durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Förderkennzeichen: 16KN062126).

Literatur

- BAY, H., ESS, A., TUYTELAARS, T. & VAN GOOL, L. (2008): Speeded-Up Robust Features (SURF). In: Computer Vision and Image Understanding. 110 (3). S. 346–359
- BIKERMANN, J.J. (1968): The Science of Adhesive Joints. 2nd Edition, Academic Press, New York, London.
- CALONDER, M., LEPETIT, V., STRECHA, C. & FUA, P. (2010): BRIEF: Binary Robust Independent Elementary Features. In: K. Daniilidis, P. Maragos, N. Paragios (Eds.) Computer Vision – ECCV 2010. 110 (3). S. 346–359
- DALL'ASTA, E. & RONCELLA, R. (2014): A comparison of semiglobal and local dense matching algorithms for surface reconstruction. In: ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XL-5. S. 187–194
- DIN 4760: 1982-06: Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem
- DIN EN ISO 4287: 2010-07: Geometrische Produktspezifikation (GPS) Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit
- HARTLEY, R. & ZISSERMAN, A. (2003): Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press, New York, NY, USA.
- HIRSCHMULLER, H. (2008): Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 30 (2), S. 328–341
- KAUFMANN, N. (1971): Das Sandflächenverfahren. In: Straßenbautechnik 24, Heft 3, S. 131– 135
- KRAUS, K. (2004): Photogrammetrie. Band 1: Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. W. de Gruyter Verlag, Berlin
- LOWE, D., G. (2004): Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. In: International Journal of Computer Vision. 60 (2). S. 91–110
- LUHMANN, T. (2018): Nahbereichsphotogrammetrie Grundlagen, Methoden, Beispiele. 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Wichmann, VDE Verlag GmbH Berlin Offenbach
- MELLMANN, G. & OPPAT, K. (2008): Maß für Maß: Rautiefen-Bestimmung von Betonoberflächen mittels Laserverfahren. In: Bautenschutz + Bausanierung 31, Heft 2, S. 30–32

- PHOCAD (2019): PHIDIAS, das digitale photogrammetrische Auswertesystem für MicroStation. http://www.phocad.de/de/PHIDIAS/phidias.html (15.09.2019).
- REMONDINO, F., SPERA, M.G., NOCERINO, E., MENNA, F., NEX, F. & GONIZZI-BARSANTI, S. (2013): Dense image matching: Comparisons and analyses. In: 2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage). Marseille. S. 47–54
- SCHULZ, R.-R. (2016): Fortschritte bei der Rauheitsbewertung von Betonoberflächen. In: beton. 66. S. 442–448
- SCHULZ, R.-R. (2017): Laser schlägt Sand Rautiefenmessung an Betonoberflächen. In: B+B Bauen im Bestand. 40. S. 131–135
- TRIGGS, B., MCLAUCHLAN, P.F., HARTLEY, R.I. & FITZGIBBON, A.W. (2000): Bundle Adjustment — A Modern Synthesis. In: Vision Algorithms: Theory and Practice. S. 298–372
- XIA, Y. & TANG, X. (2013): Extracting Method of Control Point Pairs for Remote Sensing Image Based on Regional Matching. In: International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition 6, Heft 2, S. 145–154

Weniger ist manchmal mehr – Strategien zur Selektion von Satelliten für präzise GNSS-Positionsbestimmungen unter schwierigen Messbedingungen

Florian ZIMMERMANN, Ansgar DREIER, Lasse KLINGBEIL, Christoph HOLST und Heiner KUHLMANN

1 Einleitung

Die satellitengestützte Positionsbestimmung hat sich in den letzten Jahren in vielen Anwendungsbereichen zu einem unverzichtbaren Verfahren entwickelt, wenn absolute Positionsinformationen mit hoher Genauigkeit gefordert sind. Obwohl eine Vielzahl an potentiellen Abweichungsquellen für GNSS-Signale existieren und in Jahrzehnten der Forschung zahlreiche effektive Minimierungsmethoden für verschiedene Abweichungsquellen entwickelt wurden, sind auch weiterhin die stationsspezifischen Abweichungen als einer der genauigkeitsbegrenzenden Faktoren zu nennen (SMYRNAIOS et al. 2013). Dies liegt im Wesentlichen daran, dass die Effekte in ihrer Entstehung und Auswirkung sehr stark von der individuell vorliegenden Antennenumgebung abhängig sind. Durch den in den letzten Jahren ständig vorangetriebenen Übergang von statischen zu kinematischen Vermessungsaufgaben, wie beispielsweise die kinematische Objekterfassung mit Mobilen Multisensorsystemen (KUHLMANN et al. 2014), kommt es zu einer ständigen Variation der Antennenungebung, was die Minimierung stationsspezifischer Abweichungen in solchen Anwendungsfällen zusätzlich erschwert.

Mehrwegeeffekten, welche die Überlagerung von direkten und reflektierten Signalen beschreiben, kann prinzipiell durch eine sorgfältige Stationsauswahl vorgebeugt werden (TEUNISSEN & MONTENBRUCK 2017). Allerdings ist die Antennenposition und damit auch die Umgebung nicht immer frei wählbar und gerade in kinematischen Anwendungen ist die Meidung von potentiellen Störgegenständen nur schwer realisierbar. In statischen Anwendungen kann die Auswirkung von Mehrwegeeffekten durch Mittelbildung über einen ausreichend langen Beobachtungszeitraum gemindert werden (HOFMANN-WELLENHOF et al. 2008). Ändert sich die Antennenumgebung allerdings, so wie es beispielsweise bei bewegten Plattformen der Fall ist, oder müssen hochfrequente Positionslösungen einer statischen Antenne bereitgestellt werden, greift dieser Ansatz nicht mehr (WÜBBENA et al. 2001). Methoden wie die siderische Filterung (LAU 2012), Multipath-Stacking-Maps (FUHRMANN et al. 2015) oder Antennen-Arrays (ZHANG & SCHWIEGER 2016) sind weitere Beispiele für effektive Minimierungsansätze, welche zwar eine erhebliche Genauigkeitssteigerung ermöglichen können, allerdings nicht immer für alle Anwendungsfälle geeignet sind.

Neben den Mehrwegeeffekten zählen auch die Effekte der Signalbeugung und des NLOS-Empfangs zu den stationsspezifischen Abweichungen. Diese liegen immer dann vor, wenn der direkte Signalweg geblockt ist und die Antenne die Signale nur auf indirektem Weg empfängt. Bei Positionsbestimmungen im urbanen Bereich mit Genauigkeitsanforderungen im Meterbereich können Kamerasysteme genutzt werden, um geblockte Satelliten zu identifizieren (MOREAU et al. 2017). Da Beugungseffekte im Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR)

177

der Signale sichtbar werden, können SNR-Werte in spezielle Methoden zur Beobachtungsgewichtung integriert werden (WIESER 2002). Ein weiteres wirksames Verfahren auf Basis der SNR-Werte stellen daraus abgeleitete dynamische Elevationsmasken dar, welche Satellitensignale über einen Vergleich der vorliegenden SNR-Werte und zu erwartenden SNR-Werte auf Grundlage der verwendeten Antennen vorselektieren (KERSTEN & SCHÖN 2017).

In diesem Beitrag wird ein ähnlicher Ansatz verfolgt, wobei die Satellitenselektion nicht auf Basis von SNR-Werten, sondern durch Integration von 3D-Umgebungsinformationen in Form von Punktwolken oder Gebäudemodellen erfolgt. Im Fokus der hier vorgestellten Untersuchungen zur Selektion von potentiell durch stationsspezifische Abweichungen betroffenen Satellitensignalen stehen drei Fragestellungen:

- Welche Genauigkeitssteigerung kann im statischen und kinematischen Anwendungsfall durch die Minimierung von NLOS-Empfang und Signalbeugung durch eine Selektion von Satelliten auf Basis geometrischer Sichtbarkeitsprüfungen erreicht werden?
- 2. Wie groß sind die Leistungsunterschiede zwischen Sichtbarkeitsprüfungen basierend auf terrestrischen Punktwolken und auf LoD2-Gebäudemodellen?
- 3. Lassen sich auch klassische Mehrwegeeffekte durch eine Satellitenselektion auf Basis von Fresnel-Zonen minimieren?

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen werden zunächst in Kapitel 2 kurz die theoretischen Grundlagen zu den stationsspezifischen Abweichungen dargelegt. In Kapitel 3 werden die unterschiedlichen Strategien zur Satellitenselektion beschrieben und in Kapitel 4 erfolgt die Evaluierung der Methoden anhand eines statischen und eines kinematischen Testdatensatzes. Kapitel 5 fasst die wesentlichen Erkenntnisse der Untersuchungen nochmals zusammen und gibt einen kurzen Ausblick auf weiterführende Vorhaben.

2 Theoretische Grundlagen

GNSS-Signale unterliegen während ihres Wegs von der Satelliten- zur Empfangsantenne einer Vielzahl an systematischen Beobachtungsabweichungen. Im Falle einer relativen Basislinienauswertung, also der Verwendung von zeitgleich an zwei Antennen beobachteten Signalen, kann jedoch ein Großteil der Abweichungen durch Bildung von Einfach- und Doppeldifferenzen der Beobachtungen eliminiert oder zumindest weitgehend minimiert werden. Dies gilt insbesondere für Abweichungen in den Satellitenorbits und Satellitenuhren, für ionosphärische und troposphärische Laufzeitverzögerungen sowie für die Abweichung der Empfängeruhr (TEUNISSEN & MONTENBRUCK 2017). Nach der Differenzbildung verbleiben stationsspezifische Effekte als einer der wesentlichen genauigkeitsbegrenzenden Einflüsse, welche im Folgenden in enger Anlehnung an ZIMMERMANN (2019) kurz erläutert werden.

2.1 Stationsspezifische Abweichungen

Stationsspezifische Abweichungen werden häufig unter dem Begriff Mehrwegeeffekte (engl. multipath) zusammengefasst und als Überlagerung von Signalen, welche auf direktem und nach Reflektion auf indirektem Weg die Antenne erreichen, beschrieben. Streng genommen ist dieser Effekt, der Mehrwegeeffekt aus dem Fernfeld, allerdings nur ein Teilaspekt der
stationsspezifischen Abweichungen und aufgrund ihrer unterschiedlichen Entstehung und Auswirkung ist eine Abgrenzung zwischen den einzelnen Effekten notwendig. Hierbei handelt es sich um die Signalbeugung, den sogenannten NLOS-Empfang (NLOS: non-line-ofsight), und Effekte aus dem Antennennahfeld. Da der Fokus der Untersuchungen in diesem Beitrag auf der Signalbeugung, dem NLOS-Empfang und den Mehrwegeeffekten aus dem Fernfeld liegt, werden die Antennennahfeldeffekte an dieser Stelle nicht weiter betrachtet und es wird auf die einschlägige Literatur verwiesen (BALANIS 2005, DILßNER 2007). In Abbildung 1 sind diese stationsspezifischen Abweichungen schematisch dargestellt.



Abb. 1: Stationsspezifische Abweichungen unterteilt in Mehrwegeeffekte aus dem Fernfeld (links), NLOS-Empfang (Mitte) und Signalbeugung (rechts) (modifiziert aus ZIMMERMANN 2019).

Wie zuvor beschrieben, liegen Mehrwegeeffekte aus dem Fernfeld (im Weiteren als Mehrwegeeffekte bezeichnet) immer dann vor, wenn das Satellitensignal, zusätzlich zu dem direkten Signalweg, die Antenne auf einem oder mehreren indirekten Wegen erreicht (vgl. Abbildung 1 links). Ist der direkte Signalweg durch ein Hindernis geblockt und die Antenne empfängt dennoch ein Signal, so liegt entweder eine Beugung des Satellitensignals oder NLOS-Empfang vor. Der Effekt der Signalbeugung basiert auf dem Huygen'schen Prinzip (VOGEL & GERTHSEN 2013) und liegt vor, wenn ein Satellitensignal beispielsweise an einer Dachkante in den vom Satelliten nicht sichtbaren Schattenraum hineingebeugt wird (vgl. Abbildung 1 rechts). Der NLOS-Empfang bezeichnet den Fall, wenn das direkte Signal geblockt ist und nur ein reflektiertes Signal die Antenne erreicht (vgl. Abbildung 1 Mitte).

2.2 Fresnel-Zonen

Die schematischen Darstellungen der stationsspezifischen Abweichungen in Abbildung 1 beinhalten die Annahme einer punkthaften Reflektion der Satellitensignale an Objekten. Da die Satellitensignale mit einem Öffnungswinkel von etwa 13,9° ausgestrahlt werden, trifft diese Annahme in der Realität allerdings nicht zu. Statt eines einzelnen Reflektionspunktes existieren vielmehr Bereiche auf der Reflektoroberfläche, welche zu dem Reflektionsprozess beitragen, indem sie die meiste Energie des Signals reflektieren (ROST 2011). Diese Bereiche werden als Fresnel-Zonen bezeichnet und sind in Abbildung 2 dargestellt. Die Fresnel-Zone ergibt sich als elliptische Schnittfläche zwischen der Reflektorebene und einem Rotationsellipsoid, in dessen Brennpunkten sich der Satellit S und die an der Reflektorebene gespiegelte Antennenposition A' befindet. Die Berechnung der Fresnel-Zone kann ZIMMERMANN et al. (2019) entnommen werden.





Eine der wesentlichen Voraussetzungen für die Entstehung von Mehrwegeeffekten ist eine ausreichende Überlappung zwischen der Fresnel-Zone und der Reflektoroberfläche. Untersuchungen diesbezüglich haben gezeigt, dass eine Überlappung von 50 % zwischen der Fresnel-Zone und dem Reflektor ausreichend ist, um eine signifikante Mehrwegebelastung des Signals hervorzurufen (ZIMMERMANN et al. 2019). Diese Erkenntnis wird in Kapitel 3 als Entscheidungskriterium in die Selektionsstrategien für Satelliten integriert.

3 Selektionsstrategien

3.1 Sichtbarkeitsprüfung über Umgebungsmodelle

Die Identifikation von Satellitensignalen, welche dem Effekt der Signalbeugung oder NLOS-Empfang unterliegen, kann über eine geometrische Sichtbarkeitsprüfung unter Verwendung von Umgebungsmodellen erfolgen. In diesem Beitrag werden zwei Arten von Umgebungsmodellen genutzt: (1) 3D-Punktwolken von terrestrischen Laserscannern (TLS) und (2) LoD2-Stadtmodelle im GML-Format. Die Sichtbarkeitsprüfung erfolgt für die unterschiedlichen Datengrundlagen durch zwei verschiedene Ansätze.

Ansatz 1: Adaptive Elevationsmasken aus TLS-Punktwolken

Liegt eine georeferenzierte Punktwolke der Antennenumgebung vor, so kann für eine vorgegebene Antennenposition aus der Punktwolke eine Elevationsmaske abgeleitet werden, welche, im Gegensatz zu einer festen Maske (bspw. 5° oder 10°), adaptiv an die vorliegende Abschattungssituation angepasst ist. Hierzu werden zunächst in der Punktwolke die Punkte detektiert, welche die Grenzen der Abschattungsbereiche definieren. Anschließend wird unter Berücksichtigung der Unsicherheit der vorliegenden Antennenposition ein vollbesetzter 360°-Vektor erzeugt. Dieser ermöglicht durch die Überprüfung der jeweiligen Einstrahlrichtung der Satellitensignale die Identifikation der von nicht sichtbaren Satelliten empfangenen Signale. Im Folgenden werden diese adaptiven Elevationsmasken als *OAEM* (engl.: Obstruction adaptive elevation mask) bezeichnet. Die einzelnen Berechnungsschritte zur Erzeugung der OAEM können ZIMMERMANN et al. (2017) entnommen werden.

Ansatz 2: Geradenschnitt mit LoD2-Modell

Grundlage für die Prüfung von Satellitenabschattungen mittels Geradenschnitt bildet das LoD2-Modell der näheren Antennenumgebung, welches durch Eckpunkte von Polygonen im GML-Format repräsentiert wird. Die Koordinatendefinition bilden dabei das ETRS89 und zugehörige Höhenangaben in Form der Normalhöhe. Damit sowohl Modell als auch GNSS-Koordinaten in einem einheitlichen Koordinatensystem vorliegen, werden alle Koordinaten des Modells, nach Anbringung der Quasigeoidundulation aus dem GCG2016, in das WGS84 überführt. Um daraufhin die Sichtbarkeit von Satelliten zu bestimmen, wird zunächst mit Hilfe von drei Polygonpunkten eine Ebene im Raum parametrisiert und mit der Gerade zwischen Satellit und Antennenposition geschnitten (GLASSNER 1990). Falls der Schnittpunkt zwischen Antenne und Satellit innerhalb einer Polygonfläche liegt, wird der zugehörige Satellit als abgeschattet detektiert und aus der Positionierung entfernt. Analog zur Sichtbarkeitsanalyse für Punktwolken besteht auch für GML-Modelle die Möglichkeit, diese mittels Punktinterpolation in eine Punktwolke umzuwandeln und selbige Methodik anzuwenden.

3.2 Test auf potentielle Mehrwegebelastung

Die in Abschnitt 3.1 beschriebenen Selektionsstrategien zielen darauf ab, den Einfluss von Signalbeugung oder NLOS-Empfang auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung zu minimieren. Folglich verbleibt der Mehrwegeeffekt (vgl. Abschnitt 2.1) als dominante stationsspezifische Abweichung. Eine Selektionsstrategie, welche auf einer geometrischen Sichtbarkeitsprüfung basiert, greift in diesem Fall allerdings nicht, da hier auch das direkte Satellitensignal durch die Antenne empfangen wird. Aus diesem Grund wird das in Abschnitt 2.2 beschriebene Konzept der Fresnel-Zonen als Entscheidungskriterium in eine entsprechende Selektionsstrategie integriert. Das bedeutet, dass die in Abschnitt 3.1 beschriebenen Strategien um eine zweite Stufe ergänzt werden, in der die verbleibenden Satellitensignale hinsichtlich einer potentiellen Mehrwegebelastung getestet werden. Hierfür wird auf Basis des Prozentsatzes der Überlappung zwischen Fresnel-Zone und Reflektorfläche die Entscheidung getroffen, ob das jeweilige Satellitensignal potentiell durch Mehrwegeeffekte beeinflusst ist und somit von der Positionsbestimmung ausgeschlossen werden muss.

4 Datensätze/Szenarien

Die Leistungsfähigkeit der in Kapitel 3 beschriebenen Selektionsstrategien zur Minimierung stationsspezifischer Abweichungen wird anhand zweier unterschiedlicher Szenarien evaluiert. Bei dem ersten Datensatz handelt es sich um eine statische GNSS-Messung im Bereich einer Talsperre (vgl. Abschnitt 4.1). Hier liegt der Fokus auf der Evaluierung der Satellitenselektion mittels abgeleiteter OAEMs aus terrestrischen Laserscans. Das zweite Szenario (vgl. Abschnitt 4.2) repräsentiert eine kinematische Anwendung im urbanen Bereich. Zum einen soll anhand dieser Daten ein Vergleich zwischen der Satellitenselektion auf Basis terrestrischer Laserscans und auf Basis von LoD2-Modellen vorgenommen werden. Zum anderen soll in diesem Szenario auch die Möglichkeit, Mehrwegeeffekte durch eine Satellitenselektion auf Basis von Fresnel-Zonen zu minimieren, untersucht werden.

4.1 Statische GNSS-Messung Brucher-Talsperre

4.1.1 Datenaufzeichnung und -vorbereitung

Bei der Brucher-Talsperre handelt es sich um eine Staumauer mit einer Kronenlänge von 200 Metern, einer Kronenbreite von 4,5 Metern und einer Höhe von etwa 25 Metern. Für regelmäßige Überwachungsmessungen ist ein terrestrisches Netz über 8 stabile Messpfeiler realisiert, für welche präzise Lagekoordinaten und Höheninformationen vorliegen (vgl. Abbildung 3, links).



Abb. 3: Messumgebung an der Brucher-Talsperre. (Links) Luftbild der Talsperre mit Anordnung der Antennenstandpunkte und Messpfeiler, ©www.tim-online.nrw.de. (Rechts) Frontansicht der Staumauer und Lage der Antennenstandpunkte.

Für die Testmessung wurden eine Antenne auf der Staumauer (Rover) und eine Antenne auf der Luftseite (Master) vor der Staumauer, jeweils auf schweren Metallstativen, platziert. Um präzise Sollkoordinaten für die beiden frei gewählten Antennenstandpunkte zu generieren, wurden beide Stative in das terrestrische Netz der Messpfeiler eingebunden und die Antennenhöhen mittels Feinnivellement bestimmt. Anschließend wurden an beiden Standpunkten mit Antennen vom Typ Leica AS10 für etwa 4,5 Stunden Rohdaten von GPS- und GLONASS-Satelliten aufgezeichnet.

Für die Erzeugung einer georeferenzierten Punktwolke der Antennenumgebung wurden mit einer Leica ScanStation P50 von den beiden Antennenstandpunkten Einzelscans durchgeführt, wobei alle sichtbaren Messpfeiler mit BOTA8-Zielzeichen (JANBEN et al. 2019) für die im Anschluss vorgenommene Registrierung und Georeferenzierung der Punktwolken besetzt wurden.

4.1.2 Auswertung und Evaluierung

Entsprechend dem in Abschnitt 3.1 beschriebenen 1. Ansatz wurde aus der georeferenzierten TLS-Punktwolke an beiden Antennenstandpunkten die OAEM berechnet. Als initiale Anten-

nenposition wurde hierbei das Ergebnis einer statischen Basislinienlösung mit allen verfügbaren Satellitensignalen genutzt. Abbildung 4 zeigt die OAEMs für die Masterantenne (links) und die Roverantenne (rechts).

Durch den Vergleich der Satellitenspuren mit der jeweiligen OAEM können nun alle Satellitensignale identifiziert werden, welche nicht auf direktem Signalweg empfangen wurden. Da sich die Staumauer bezogen auf die Masterantenne in südöstlicher Richtung befindet, können die aus dieser Richtung empfangen Signale eindeutig dem Effekt der Signalbeugung zugewiesen werden.



Abb. 4: Skyplot mit OAEM für die Masterantenne (links) und die Roverantenne (rechts). Die durch die schwarze Linie eingefasste, hellgrau schattierte Fläche entspricht der jeweiligen OAEM. Die grauen Linien repräsentieren die Satellitenspuren der verwendeten GPS- und GLONASS-Satelliten.



Abb. 5: Abweichungen der Up-Komponente für die originären Beobachtungsdaten (hellgrau) und die durch die OAEMs modifizierten Daten (schwarz).

Im Fall der Roverantenne ist der durch die OAEM gekennzeichnete abgeschattete Bereich erwartungsgemäß wesentlich kleiner und wird hauptsächlich durch Vegetation bestimmt. Nach dem Anbringen der jeweiligen OAEM an die Beobachtungsdaten der beiden Antennen wurde eine kinematische (epochenweise) Basislinienauswertung für originäre und modifizierte Datensätze durchgeführt und die Differenzen zu der terrestrischen Referenzlösung bestimmt.

In Abbildung 5 ist exemplarisch die Zeitreihe der Positionsdifferenzen der Up-Komponente dargestellt. In Tabelle 1 sind die minimalen und maximalen Differenzen, der Mittelwert und

die Standardabweichung der Zeitreihen aller Komponenten sowie der Prozentsatz an Beobachtungsepochen mit fixierten Trägerphasenmehrdeutigkeiten aufgelistet.

Tabelle 1:	Abweichungen der East-, North- und U	p-Komponente (E,N,U) und Prozentsatz
	an Beobachtungsepochen mit fixierten	Frägerphasenmehrdeutigkeiten.

	Originale Daten			Modifizierte Daten		
	$\Delta E [m]$	$\Delta N [m]$	$\Delta U[m]$	$\Delta E [m]$	$\Delta N [m]$	$\Delta U[m]$
Min	-0,171	-0,370	-0,811	-0,008	-0,015	-0,039
Max	0,081	0,413	0,725	0,008	0,008	0,025
Mittel $\overline{\Delta}$	0,001	0,000	-0,011	0,000	0,001	-0,005
Std σ_{Δ}	0,004	0,007	0,017	0,002	0,003	0,007
% fix		64%			100%	

Der Vergleich der dargestellten Zeitreihen und die zugehörigen Zahlenwerte zeigen eine deutliche Verbesserung der Positionsgenauigkeit durch die Satellitenselektion. Während in einigen Beobachtungsepochen nach der Prozessierung der originären Daten Abweichungen von einigen Dezimetern auftreten, liegen die Abweichungen nach der Selektion in allen drei Koordinatenkomponenten zwischen -3.9 cm und 2.5 cm. Die in Abbildung 5 sichtbare geringere Streuung der Differenzen wird auch durch die geringere Standardabweichung der Zeitreihen bestätigt.

Die Verbesserung der Positionsgenauigkeit wird primär durch die Erhöhung der Anzahl an Epochen mit fixierten Mehrdeutigkeiten hervorgerufen. Während die ganzzahlige Fixierung im Falle der originären Beobachtungsepochen nur in 64 % der Fälle erfolgreich war, ist dies nach der Satellitenselektion in allen Beobachtungsepochen der Fall. Bei genauerer Betrachtung der Mittelwerte der beiden Zeitreihen fällt allerdings auf, dass die Verbesserung hier geringer ausfällt. Dies lässt den Schluss zu, dass speziell Anwendungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen an epochenweise Positionslösungen von dieser Art der Satellitenselektion profitieren können.

4.2 Kinematische GNSS-Messung Campus Poppelsdorf

4.2.1 Datenaufzeichnung und -vorbereitung

Die Auswertung einer kinematischen GNSS-Messung zur Evaluation der gezeigten Methodiken erfolgt anhand eines auf dem in Abbildung 6 dargestellten Campus Poppelsdorf der Universität Bonn aufgezeichneten Datensatzes.

Die Rover-Trajektorie wurde mit dem in HEINZ et al. (2019a) beschriebenen Multisensorsystems aufgezeichnet, bei dem die Auswertung auf einer Kombination aus differentiellem GNSS und den Daten einer inertialen Messeinheit (IMU) beruht. Die Berechnung durch differentielles GNSS erfolgt mit Hilfe der Masterantenne (Abbildung 6 links) und beinhaltet die Navigationssysteme GPS, Galileo und GLONASS. Die mit dem Multisensorsystem erzeugte Trajektorie dient im weiteren Verlauf als Referenzlösung und soll mit allein auf GNSS basierten Lösungen mit zusätzlicher Satellitenselektion verglichen werden. Die Annahme als Referenz wird insbesondere durch die hochwertige IMU (iMAR iNAV-FJI-LSURV) und deren Verwendung in Bereichen mit schlechten GNSS-Bedingungen begründet.



Abb. 6: Kinematische GNSS-Messung auf dem Campus Poppelsdorf mit dargestellter Referenzlösung des Multisensorsystems (Rover-Track) und verwendeter Masterantenne (links), ©https://www.google.de/maps/.

Neben der Referenztrajektorie werden 3D-Umgebungsmodelle aus terrestrischem Laserscanning und einem LoD2-Stadtmodell benötigt. Für das Messgebiet liegt aus früheren Untersuchungen eine präzise und georeferenzierte TLS-Punktwolke vor (ZIMMERMANN et al. 2018). Das als Vergleich verwendete LoD2-Stadtmodell gehört zu den digitalen Geobasisdaten, welche durch die Landesvermessung NRW kostenfrei zur Verfügung gestellt werden².

4.2.2 Auswertung und Evaluierung

Die Auswertung der kinematischen GNSS-Messung besteht aus zwei aufeinanderfolgenden Stufen. Im ersten Teil wird ein Vergleich der Sichtbarkeitsüberprüfungen aus Abschnitt 3.1 basierend auf der TLS-Punktwolke (OAEM) und dem LoD2-Modell (GML) durchgeführt. Diese Satellitenselektion erfolgt sowohl für die Masterantenne als auch jede Position entlang des Rover-Tracks. Um das Potential des in diesem Beitrag verfolgten Ansatzes für die kinematische Anwendung zu evaluieren, wird eine möglichst ideale Selektion von Satelliten basierend auf den Positionen der Referenztrajektorie des Multisensorsystems verwendet. Im zweiten Teil dieser Evaluation wird die zusätzliche Auswertung nach Abschnitt 3.2 durch Berechnung der Fresnel-Zonen für die Masterantenne angewandt.

Die Auswertung des Vergleichs zwischen den Ergebnissen mit unterschiedlichen Umgebungsmodellen ist in Abbildung 7 durch die Differenzen der Up-Komponente zur Referenztrajektorie veranschaulicht. Neben den Lösungen mit Selektion, gekennzeichnet als GML und OAEM, enthält die Zeitreihe auch die ursprüngliche GNSS-Auswertung (Standard) berechnet mit den originären Messdaten.

 $^{^2\} https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/hoehenmodelle/3d_gebaeudemodelle/index.html$



Abb. 7: Zeitreihe der Höhendifferenzen zwischen Referenztrajektorie und unterschiedlichen Auswertungen basierend auf Satellitenselektion durch OAEM und GML.

Diese Zeitreihe verdeutlicht bereits visuell die Problematik der Standardlösung, welche insbesondere in den Abschnitten mit schwierigen GNSS-Bedingungen große Höhendifferenzen außerhalb der Skala aufweist. Eine Analyse der Abweichungen zur Referenzlösung ist in Tabelle 2 in Form des Root-Mean-Square Errors (RMS) und der maximalen absoluten Höhendifferenz quantifiziert. Es zeigt sich eine Steigerung der Genauigkeit bei Betrachtung der RMS-Werte von 7 m der Standardlösung auf einen RMS um die 4 cm für beide Lösungen mit Satellitenselektion. Außerdem zeigt sich eine weitaus wichtigere Verbesserung der maximalen absoluten Differenz, welche von über 30 Metern auf ca. 46 cm mit Satellitenselektion verringert werden konnte. Die Verbesserung der Positionierung wird auch hier primär durch die höhere Anzahl an Epochen mit fixierten Mehrdeutigkeiten hervorgerufen. Die Anzahl an Epochen mit ganzzahligen Mehrdeutigkeiten liegt mit der Standardlösung bei etwa 57 % und steigert sich mit beiden Selektionsstrategien auf über 95 %. Neben der Verbesserung fixierter Positionslösung kann außerdem die Anzahl von einfachen Codelösungen vollständig beseitigt werden, welche die große maximale Differenz der Standardlösung begründet haben.

Tabelle 2: Differenzen der Up-Komponente (U) mit Satellitenselektion durch GML und
OAEM zur Referenzlösung aus dem Multisensorsystem. Die Lösungstypen der
Trägerphasenmehrdeutigkeiten (*fixed, float* oder *Code*) sind als Prozentsatz der
Beobachtungsepochen angegeben.

	$\Delta U[m]$		Mehrdeutigkeitsfixierung		
Rover	$RMS_{\Delta U}$	$\max \Delta U $	fixed	float	Code
Standard	7,390	38,769	57,6%	29,4%	13,0%
GML	0,045	0,455	95,5%	4,5%	0,0%
OAEM	0,044	0,462	96,3%	3,6%	0,0%

Zusammenfassend zeigt sich eine erhebliche Genauigkeitssteigerung der kinematischen GNSS-Auswertung durch die Verwendung von Selektionsstrategien. Der direkte Vergleich zwischen den Umgebungsmodellen aus TLS-Messungen und LoD2-Modellen zeigt nur einen unwesentlichen Unterschied, welcher in diesem Fall zu einer leicht besseren Positionierung durch die OAEM-Selektion geführt hat. Eine Verallgemeinerung für diese Aussage geht

aus dieser Auswertung nicht hervor, weshalb die Wahl des Umgebungsmodells der Situation angepasst werden muss.

Im darauffolgenden Evaluationsschritt erfolgt die zusätzliche Berechnung der Fresnel-Zonen aus Abschnitt 3.2 für die Masterantenne. Die Auswertung der Masterantenne beruht einerseits auf den unveränderten Messdaten (Standard), einer Selektion der Masterantenne durch die OAEM und einer Selektion mit OAEM und Fresnel-Zonen (OAEM+). Die verwendete Roverantenne wird für alle drei Auswertungen mit der Selektion basierend auf OAEMs verwendet. Die Bewertungskriterien, analog zur bisherigen kinematischen Auswertung, sind für die gesamte Trajektorie in Tabelle 3 dargestellt.

Bei Beurteilung der drei dargestellten Lösungen zeigt sich eine Steigerung der Positionsgenauigkeit durch die unterschiedliche Selektion an der Masterantenne. Die absolute Abweichung sinkt von 60 cm ohne Selektion der Masterantenne auf 46 cm mit Anbringung der OAEM und auf 40 cm durch Verwendung der OAEM+. Eine analoge Systematik zeigt sich in den RMS-Werten, welche für die letzte Auswertungsstrategie zum besten Ergebnis in Relation zur Referenzlösung führt. Neben diesen Kriterien in Bezug auf die Referenztrajektorie zeigen sowohl die OAEM- als auch OAEM+-Lösung eine Steigerung der fixierten Mehrdeutigkeiten. Die Anzahl an Epochen mit Fixierungen steigt von 93,6 % ohne Selektion der Masterantenne auf 96,3 % bzw. 95,8 % durch die zusätzlichen Selektionsstrategien. Der leicht geringeren Anzahl fixierter Mehrdeutigkeiten für den OAEM+-Ansatz wird aufgrund des besseren Abschneidens in Bezug auf die Referenz keine zusätzliche Beachtung geschenkt.

Tabelle 3: Differenzen der Up-Komponente (U) mit erweiterter Satellitenselektion für die Masterstation. Die Lösungstypen der Trägerphasenmehrdeutigkeiten (*fixed, float* oder *Code*) sind als Prozentsatz der Beobachtungsepochen angegeben.

	Δ <i>U</i> [<i>cm</i>]		Mehrdeutigkeitsfixierung		
Master	$RMS_{\Delta U}$	$\max \Delta U $	fixed	float	Code
Standard	5,17	60,03	93,6%	6,5%	0,0%
OAEM	4,46	46,21	96,3%	3,6%	0,0%
OAEM+	4,05	40,16	95,8%	4,3%	0,0%



Abb. 8: Zeitreihe der Höhendifferenzen zwischen Referenztrajektorie und unterschiedlichen GNSS Auswertungen für den Ausschnitt 1 aus Abbildung 6.

Eine weitere Darstellung der Höhendifferenzen bezogen auf die Referenztrajektorie zeigt Abbildung 8, welche dem in Abbildung 6 (rechts) eingezeichneten Ausschnitt der Trajektorie entspricht.

Die Masterantenne steht für die gesamte Messung in der Nähe eines relativ hohen Gebäudes (vgl. Abbildung 6), das neben dem Boden den einen einzelnen dominanten Reflektor darstellt, wodurch das Potenzial der hier verwendeten Methodik veranschaulicht werden soll. In diesem Ausschnitt verringert sich die Höhendifferenz an den zwei kritischen Stellen bereits durch eine zusätzliche Verwendung der OAEM um einige cm. Durch die Einbringung der Fresnel-Zonen während der OAEM+-Lösung werden alle größeren Ausschläge beseitigt und die Abweichung zur Referenzlösung bewegt sich im einstelligen cm-Bereich oder niedriger. Durch diese Darstellung wird das Potenzial der zusätzlichen Satellitenselektion von Masterantennen verdeutlicht. Es zeigt sich sowohl mit OAEM als auch OAEM+ eine Verbesserung der Trajektorienschätzung und damit eine Empfehlung zur Anwendung dieser Selektionsstrategien bei Auswertung präziser kinematischer Anwendungen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die stationsspezifischen Abweichungen kategorisiert in Signalbeugung, den NLOS-Empfang und die Fernfeld-Mehrwegeeffekte zählen zu den genauigkeitsbegrenzenden Faktoren für die GNSS-Positionierung. Die in diesem Beitrag behandelte Satellitenselektion ermöglicht eine geometriebasierte Bestimmung und den darauffolgenden Ausschluss von beeinflussten Signalen mit Hilfe von georeferenzierten 3D-Punktwolken und LoD2-Stadtmodellen. Die Anwendung der OAEM auf eine statische GNSS-Messung zeigte das grundsätzliche Potential der Positionierung mit Satellitenselektion, welche sich insbesondere durch eine Steigerung der fixierten Phasenmehrdeutigkeiten von 64 % auf 100 % wiederspiegelte. Im Fall der kinematischen GNSS-Anwendung wurde der Vergleich zwischen den Umgebungsmodellen der georeferenzierten Punktwolke und dem LoD2-Stadtmodell in den Vordergrund gestellt. Grundsätzlich bietet die TLS-basierte Punktwolke den Vorteil der besseren Genauigkeit, eines höheren Detailgrads und der Aufnahme von umliegender Vegetation. Im direkten Vergleich der Auswirkung auf die GNSS-Positionierung mit dem LoD2-Modell erreichen beide Ansätze das nahezu identische Ergebnis, wodurch keines der Verfahren als wesentlich besser eingeschätzt werden kann. Der essentielle Unterschied ist daher in der Datenerfassung zu sehen, welche für georeferenzierte Punktwolken größerer Messgebiete mit einem vergleichsweise hohen Aufwand einhergeht. Insbesondere für kinematische Anwendung über größere innerstädtische Bereiche bietet das frei verfügbare GML-Modell die bessere Alternative. Die Anwendung beider Ansätze auf die GNSS-Positionierung bietet eine signifikante Verbesserung der Trajektorienschätzung, welche sich mit einem RMS von unter 5 cm im Vergleich zur Referenztrajektorie quantifizieren lässt.

Als letzter Punkt wurde eine zusätzliche Selektion der von Mehrwegeeffekten beeinflussten Signale mit Hilfe der Fresnel-Zonen durchgeführt, wodurch eine weitere Verbesserung der geschätzten Trajektorie ermöglicht wird. Die Anwendung dieser Fresnel-Zonen wurde in diesem Beitrag lediglich auf die Masterantenne angewandt und muss im nächsten Schritt auf die kinematische Positionierung der Roverantenne übertragen werden. Ein weiterer Aspekt in diesem Zusammenhang ist die zur Satellitenselektion des Rovers verwendete Referenztrajektorie, welche aus der Sensorfusion einer hochgenauen IMU und GNSS stammt. Da die Genauigkeit einer GNSS-basierten Position im urbanen Bereich als initiale Position der Selektionsstrategie nicht ausreicht, soll in weiterführenden Untersuchungen die Bestimmung der initialen Position mittels eines Multisensorsystem mit low-cost IMU (HEINZ et al. 2019b) analysiert werden.

Literatur

- GLASSNER, A. S. (1990): Graphics gems I, S. 390-393, Academic Press Professional, Inc, San Diego, USA
- BALANIS, C. A. (2005): Antenna Theory: Analysis and Design. Wiley-Interscience, New York, NY, USA
- DILBNER, F. (2007): Zum Einfluss des Antennenumfeldes auf die hochpräzise GNSS-Positionsbestimmung. Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik, Univ. Hannover, Nr. 271
- FUHRMANN, T., LUO, X., KNÖPFLER, A., & MAYER, M. (2015): Generating statistically robust multipath stacking maps using congruent cells. In: GPS Solutions 19(1), S. 83–92
- GROVES, P. (2013): GNSS solutions: Multipath vs. NLOS signals. How does Non-Line-of-Sight reception differ from multipath interference. In: Inside GNSS 8(6), S. 40-42
- HEINZ, E., ELING, C., KLINGBEIL, L. & KUHLMANN, H. (2019a): On the applicability of a scan-based mobile mapping system for monitoring the planarity and subsidence of road surfaces - Pilot study on the A44n motorway in Germany. In: J. Appl. Geodesy, (ahead of print)
- HEINZ, E., KLINGBEIL, L. & KUHLMANN, H. (2019B): Aufbau einer Einrichtung zur Kalibrierung und Evaluierung von Mobile Mapping Systemen. In: WUNDERLICH, T. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 20, Beiträge zum 19. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, München, Wichmann Verlag, Berlin, Offenbach, (in diesem Tagungsband)
- HOFMANN-WELLENHOF, B., LICHTENEGGER, H. & WASLE, E. (2008): GNSS-Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and more. Springer Verlag, Wien, NY
- JANBEN, J., MEDIC, T., KUHLMANN, H. & HOLST, C. (2019): Decreasing the Uncertainty of the Target Center Estimation at Terrestrial Laser Scanning by Choosing the Best Algorithm and by Improving the Target Design. In: Remote Sensing 11(7), 845
- KERSTEN, T. & SCHÖN, S. (2017): GNSS-Monitoring of Surface Displacements in Urban Environments. In: LIENHART, W (Hrsg.): Ingenieurvermessung 17, Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, Österreich, S. 415–426, Wichmann Verlag, Berlin, Offenbach
- KUHLMANN, H., SCHWIEGER, V., WIESER, A. & NIEMEIER, W. (2014): Engineering Geodesy – Definition and Core Competencies. In: J. Appl. Geodesy 8(4), S. 327–334
- LAU, L. (2012): Comparison of measurement and position domain multipath filtering techniques with the repeatable GPS orbits for static antennas. In: Survey Review 44(324), S. 9–16
- MOREAU, J., AMBELLOUIS, S., & RUICHEK, Y. (2017): Fisheye-based method for GPS localization improvement in unknown semi-obstructed areas. In: Sensors 17(1), 119
- ROST, C. (2011): Phasenmehrwegereduzierung basierend auf Signalqualitätsmessungen geodätischer GNSS-Empfänger. Dissertation, Technische Universität Dresden, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften, Dresden

- SMYRNAIOS, M., SCHÖN, S., & NICOLÁS, M.L. (2013): Multipath Propagation, Characterization and Modeling in GNSS. In: Geodetic Sciences-Observations, Modeling and Applications. Shuanggen Jin, IntechOpen
- TEUNISSEN, P. & MONTENBRUCK, O. (2017): Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer Verlag, Wien, New York
- VOGEL, H. & GERTHSEN, C. (2013): Gerthsen Physik, Springer-Lehrbuch. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- WIESER, A. (2002): Robust and fuzzy techniques for parameter estimation and quality assessment in GPS. Dissertation, Ingenieurgeodäsie – TU Graz, Shaker Verlag, Aachen
- WÜBBENA, G., BAGGE, A., BOETTCHER, G., SCHMITZ, M. & ANDREE, P. (2001): Permanent object monitoring with GPS with 1 millimeter accuracy. In: Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2001), Salt Lake City, UT, USA, September 11-14, 2001, S. 1000-1008
- ZHANG, L. & SCHWIEGER, V. (2016): Improving the Quality of Low-Cost GPS Receiver Data for Monitoring Using Spatial Correlations. In: J. Appl. Geodesy 10(2), S. 119–129
- ZIMMERMANN, F., ELING, C., & KUHLMANN, H. (2017): Empirical assessment of obstruction adaptive elevation masks to mitigate site-dependent effects. In: GPS Solutions 21(4), S. 1695–1706
- ZIMMERMANN, F., HOLST, Ch., KLINGBEIL, L. & KUHLMANN, H. (2018) Accurate georeferencing of TLS point clouds with short GNSS observation durations even under challenging measurement conditions. In: J. Appl. Geodesy 2018, 12(4),
- ZIMMERMANN, F. (2019): Analysis and mitigation of site-dependent effects in static and kinematic GNSS applications. Dissertation, Universitäts-und Landesbibliothek Bonn
- ZIMMERMANN, F., SCHMITZ, B., KLINGBEIL, L., & KUHLMANN, H. (2019): GPS Multipath Analysis using Fresnel Zones. In: Sensors 19(1), 25

Genauigkeitsanalyse der automatischen Werkzeugsteuerung eines Laderaupenmodells

Otto LERKE und Volker SCHWIEGER

Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung durch anonyme Fachkollegen als "peer reviewed paper" angenommen.

1 Einleitung

Durch die Automatisierung von Bauprozessen können Qualitätssteigerungen und Zeitersparnisse erreicht werden (KILPELÄINEN et al. 2011). Der Baubetrieb ist im Allgemeinen in Arbeitsprozesse unterteilt. Die Prozessregelung im Baubetrieb ist z.B. in PAUL (1998) beschrieben. Während der Bauausführung werden viele Arbeitsprozesse von automatisierten Baumaschinen durchgeführt. MÖHLENBRINK & SCHWIEGER (2006) teilen die Bauausführung in einen inneren und äußeren Regelkreis ein, wobei die Baumaschinensteuerung dem inneren Regelkreis bei der Bauausführung zugeordnet wird. Im Bereich Erdarbeiten und -transport kommen Radlader und Laderaupen zum Einsatz (KÜHN 1991). Jedoch ist deren Automatisierungsgrad niedrig bzw. nicht vorhanden (STEMPFHUBER & INGENSAND 2008). Das definierte Ziel ist die Entwicklung eines automatischen Systems für Laderaupen, das in der Lage ist, Belade- und Entladevorgänge ohne Eingriffe eines Maschinenoperators durchzuführen. Das System soll als vollständig automatisches 3D-System realisiert werden. Dazu müssen einzelne Fahrzeugkomponenten automatisiert werden. Wie in SCHWIEGER & BEETZ (2017) gezeigt werden konnte, werden für die Automatisierung der Fahrfunktionalität Lenkmodelle für das Raupenchassis der Trägermaschine benötigt. Des Weiteren sind Messsysteme, wie Tachymeter oder Inertialmesseinheiten, für die Konzeption und Implementierung entsprechender Regelkreise für die Quer- und Längsregelung unabdingbar. Das Werkzeug muss für die Automatisierung mit einem geometrischen Modell beschrieben werden (BEETZ 2012) und mit zwei Werkzeugregelkreisen, bestehend aus einem Auslegerregelkreis und einem Ladeschaufelregelkreis, ausgestattet werden. Zusätzlich können durch ein stochastisches Modell des Werkzeugs Analysen der Arbeitsgenauigkeit vorgenommen werden.

Der Fokus dieses Beitrags liegt auf der Untersuchung der Genauigkeit einer automatischen Ladewerkzeugsteuerung anhand einer Modellladeraupe im Maßstab 1:14. Zunächst soll die Untersuchung in einer Simulation durchgeführt und anschließend am 1:14–Modell umgesetzt und anhand von realen Testfahrten verifiziert werden. Das Ziel ist dabei die Überprüfung der Übertragbarkeit der Ergebnisse aus der Projektierungsphase auf die Umsetzungsphase. Darüber hinaus soll ein, ebenfalls auf einer Simulation basierender, theoretischer Vergleich der Genauigkeiten mit einer realen Laderaupe stattfinden. Die für die Untersuchungen eingesetzte Methodik ist die Fehlerfortpflanzung.

Die Ladewerkzeugsteuerung beinhaltet eine Höhen- und Neigungssteuerung des Werkzeugs. Die Genauigkeitsangaben beziehen sich auf den sogenannten Arbeitspunkt AP, der sich an der vorderen Spitze der Ladeschaufel befindet und die Kontaktstelle zwischen dem Maschinenwerkzeug und dem zu bearbeitenden Medium darstellt. Für die Projektierungsphase des Automatisierungsvorhabens soll zunächst eine a-priori-Genauigkeitsbestimmung auf Grundlage des geometrischen und stochastischen Modells durchgeführt werden. Nach der Umsetzung und Implementierung der Werkzeugautomatisierung sollen a-posteriori-Genauigkeiten des Systems aus Testfahrten ermittelt und den a-priori-Genauigkeiten gegenübergestellt werden. Aus den gewonnenen Erkenntnissen können auch, im Sinne einer Rückkopplung, Anpassungen bei der Auswahl der Sensorik vorgenommen werden, um das a-priori-Modell zu verbessern.

Für die Durchführung der Untersuchung sei angenommen, dass die Funktionen der Modellladeraupe die Funktionen einer realen Laderaupe hinreichend genau abbilden und dass in beiden Fällen gleiche Sensorik zum Einsatz kommt. Alle praktischen Experimente finden unter Laborbedingungen statt, wo stabile atmosphärische Bedingungen vorherrschen und der Untergrund eben ist. Die Zielweiten im Labor betragen in allen Fällen ca. 7 Meter.

2 Automatisierung des Werkzeugs

Das Werkzeug besteht aus einem Ausleger und einer Ladeschaufel (vgl. Abbildung 1). Diese beiden Werkzeugkomponenten werden mittels hydraulischer Kreise bewegt. Zum einen kann der Ausleger um den Gelenkpunkt A (Abbildung 1 rechts) rotiert werden und so seine Höhe ändern. Zum anderen kann die Lage der Ladeschaufel durch Kippung um den Gelenkpunkt B geändert werden. Die beiden hydraulischen Kreise werden durch eine elektrisch angesteuerte Pumpe versorgt. Die Steuerbefehle an das Werkzeug erfolgen durch Spannungswerte.



Abb. 1: links - Lokales Maschinenkoordinatensystem; rechts - Positionen relevanter Maschinenpunkte (LERKE 2019)

Die Automatisierung benötigt zum einen eine vollständige geometrische Modellierung des Werkzeugs (BEETZ 2012). Die Modellierung wird in Kapitel 3 detailliert beschrieben. Zum anderen müssen Regelkreise entworfen und implementiert werden. Der grundsätzliche Aufbau eines geschlossenen Regelkreises ist in Abbildung 2 dargestellt (BUSCH 2012).

Für das vorliegende Werkzeug sind, wie bereits in der Einleitung erwähnt, zwei Regelkreise notwendig. Der erste Regelkreis bedient den Ausleger. Der zweite Regelkreis bedient die Ladeschaufel. Die beiden Regelkreise sind gekoppelt, wobei der Auslegerregelkreis als "Master" und der Ladeschaufelregelkreis als "Slave" definiert ist. In dieser Konfiguration reagiert der Schaufelregelkreis auf den Auslegerregelkreis. Die Verknüpfung zwischen den



Abb. 2: Schema geschlossener Regelkreis

Komponenten eines Standardregelkreises nach Abbildung 2 und den Komponenten des Ausleger- bzw. des Ladeschaufelregelkreises ist ein wichtiger Aspekt beim Entwurf eines gut funktionierenden Reglers. Die entsprechenden Zuordnungen sind in den Tabellen 2 und 3 dargestellt (LERKE 2019). Die zugehörigen Regelkreisparameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

3 Modellbildung für das Werkzeug

Zur geometrischen Beschreibung des Werkzeugs wird ein lokales Maschinenkoordinatensystem eingeführt (Abb. 1 links). Die drei Raumwinkel, Roll-, Nick- und Gierwinkel erlauben es, die Lage der Maschine im Raum zu beschreiben. Zur genaueren Analyse müssen nun relevante Punkte in der Maschinengeometrie festgelegt werden. Deren Maschinenpositionen sind in Abbildung 1 (rechts) dargestellt. Dabei genügt die Betrachtung der Geometrie in der Y'-Z'-Ebene, da das Werkzeug in X'-Richtung starr mit der Trägermaschine verbunden ist und somit Richtungsänderung des Werkzeugs nur durch Richtungsänderungen der Trägermaschine realisiert werden können. Im Punkt P befindet sich ein Reflektor, auf den Tachymetermessungen erfolgen. Diese sind meist im übergeordneten Tachymetersystem definiert (nicht im lokalen Maschinensystem). Der Punkt AP ist der zu untersuchende Arbeitspunkt.

Da im Kapitel 1 die Annahme getroffen wurde, dass das Laderaupenmodell eine reale Maschine hinreichend genau abbildet, ist die folgende Modellbildung auch für die reale Maschine gültig.

Variable	Bedeutung
w(t)	Führungsgröße
e(t)	Regelabweichung
u(t)	Stellgröße
y(t)	Regelgröße

Tabelle	1: Regelkreisparameter	(BUSCH 2012)
I GOULU	1. Hegennersparameter	

 Tabelle 2: Zuordnung zwischen Regelkreiskomponenten und Werkzeugmodulkomponenten für den Ausleger

Regelkreis	Ausleger	
Führungsgröße	Soll-Höhenprofil (z-Komponente der Solltrajek- torie)	
Regelabweichung	Höhendifferenz zwischen Soll und Ist	
Stellgröße	Steuerbefehl für den Hydraulikkreislauf Ausle- ger/Spannungswerte für die Öffnung und Schlie- ßung der Ventile des Auslegerkreislaufs	
Regelgröße	Eingestellte Ist-Werkzeughöhe	
Regler	P-Regler*	
Regelstrecke	Ausleger/Auslegerhydraulik	
Sensor	Neigungsmesser (IMU Microstrain 3DM-GX2)**	

Tabelle 3 : Zuordnung zwischen	Regelkreiskomponenten und	Werkzeugmodulkomponenten
für die Schaufel		

Regelkreis	Schaufel
Führungsgröße	Soll-Lage/Schaufelneigung
Regelabweichung	Differenz zwischen Soll- und Ist-Lage
Stellgröße	Steuerbefehl für den Hydraulikkreislauf Schau- fel/Spannungswerte für die Öffnung und Schlie- ßung der Ventile des Ladeschaufelkreislaufs
Regelgröße	Eingestellte Ist-Lage/Schaufelneigung
Regler	3-Punkt-Regler**
Regelstrecke	Schaufel
Sensor	Neigungsmesser (IMU MTi X-Sens)++

*Parameter des P-Reglers: P = 3

**Parameter des 3-Punkt-Reglers: $-e_{ref} \le e(t) \le e_{ref} \Rightarrow u(t) = 0, e(t) < -e_{ref} \Rightarrow u(t) > 0, e(t) > e_{ref} \Rightarrow u(t) < 0.$

⁺⁺Die Auswahl der Sensoren folgte pragmatischen Gründen. Diese waren im Untersuchungszeitraum an der Einrichtung verfügbar. Die Wahl ist somit rein zufällig.

3.1 Geometrisches Modell des Werkzeugs

Um den Punkt AP beschreiben zu können, wird ein "einseitig angeschlossener geometrischer Polygonzug" entlang der Hebelarme der Maschine und unter Berücksichtigung der Drehwinkel in den Gelenken A und B aufgestellt.

Zunächst kann der Arbeitspunkt AP im lokalen Maschinenkoordinatensystem beschrieben werden. Der lokale Arbeitspunktvektor lautet wie folgt:

$$\boldsymbol{X}_{AP}^{l} = \begin{pmatrix} Y'\\ X'\\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -dy + \cos\theta_{1} \cdot L_{1} + \cos\theta_{2} \cdot L_{2}\\ 0\\ -dz - \sin\theta_{1} \cdot L_{1} - \sin\theta_{2} \cdot L_{2} \end{pmatrix}$$
(1)

mit

Y', X', Z':	Vektorkomponenten des Arbeitspunktes im lokalen 3D-Maschinenkoordina- tensystem,
dy:	Abstand Reflektor – Punkt A in Y'-Richtung,
dz:	Abstand Reflektor – Punkt A in Z' -Richtung,
θ_1 :	Gemessener Neigungswinkel um Punkt A,
θ_2 :	Gemessener Neigungswinkel um Punkt B,
<i>L</i> 1:	Länge des Auslegers (Abstand zwischen Punkt A und Punkt B),
L2:	Länge der Ladeschaufel (Abstand zwischen Punkt B und Punkt AP).

Nach KAHMEN & RETSCHER (1999) soll die Positionsbestimmung und Orientierung einer Baumaschine jedoch in einem übergeordneten 3D-Koordinatensystem geschehen, um diese vollständig im Raum zu beschreiben. Dies schließt die Positions- und Lagebestimmung des Werkzeugs mit ein. Dazu wird eine Transformation benötigt, die den lokalen Arbeitspunktvektor in einen globalen überführt. Die Transformationsgleichung kann wie folgt aufgestellt werden:

$$\boldsymbol{X}_{AP}^{g} = \boldsymbol{X}_{M} + \boldsymbol{R}(\boldsymbol{\Psi}, \boldsymbol{\Phi}, \boldsymbol{\Theta}) \cdot \boldsymbol{X}_{AP}^{l},$$
⁽²⁾

mit

X_{AP}^g :	Vektor des Arbeitspunktes im globalen 3D-Koordinatensystem,
X _M :	Gemessener Vektor des Maschinenschwerpunkts (Position des Reflektors P) im globalen 3D-Koordinatensystem,
$\mathbf{R}(\Psi, \Phi, \Theta)$:	Rotationsmatrix um die Lagewinkel Gieren Ψ , Nicken Θ und Rollen Φ .

Die Rotationsmatrix \boldsymbol{R} setzt sich dabei wie folgt zusammen:

$$\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\Psi},\boldsymbol{\Phi},\boldsymbol{\Theta}) = \boldsymbol{R}(\boldsymbol{\Theta}) \cdot \boldsymbol{R}(\boldsymbol{\Phi}) \cdot \boldsymbol{R}(\boldsymbol{\Psi}). \tag{3}$$

Dabei entspricht $\mathbf{R}(\Phi)$ der Drehung um die Y'-Achse, $\mathbf{R}(\Theta)$ der Drehung um die X'-Achse und $\mathbf{R}(\Psi)$ der Drehung um die Z'-Achse des Maschinenkoordinatensystems. Die Ausrichtung der Achsen entspricht dabei der geodätischen Definition eines Koordinatensystems. Es ergeben sich hierfür folgende Rotationsmatrizen:

$$\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\Theta}) = \begin{pmatrix} \cos\boldsymbol{\Theta} & 0 & -\sin\boldsymbol{\Theta} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\boldsymbol{\Theta} & 0 & \cos\boldsymbol{\Theta} \end{pmatrix}, \boldsymbol{R}(\boldsymbol{\Phi}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\boldsymbol{\Phi} & \sin\boldsymbol{\Phi} \\ 0 & -\sin\boldsymbol{\Phi} & \cos\boldsymbol{\Phi} \end{pmatrix}, \boldsymbol{R}(\boldsymbol{\Psi}) = \begin{pmatrix} \cos\boldsymbol{\Psi} & \sin\boldsymbol{\Psi} & 0 \\ -\sin\boldsymbol{\Psi} & \cos\boldsymbol{\Psi} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Mit den Gleichungen (1), (2) und (3) lassen sich für den AP folgende Modellgleichungen für dessen Vektorkomponenten im globalen 3D- Koordinatensystem aufstellen:

$$Y_{AP}^{g} = Y_{M} + (\cos\Psi \cdot \cos(\Theta) - \sin\Psi \cdot \sin(\Theta) \cdot \sin\Phi) \cdot (L1 \cdot \cos\theta_{1}) - dy + L2 \cdot \cos\theta_{2}) - \cos\Phi \cdot \sin(\Theta) \cdot (L1 \cdot \sin\theta_{1} - dz + L2 \cdot \sin\theta_{2})$$

$$X_{AP}^{g} = X_{M} + \sin\Phi \cdot (L1 \cdot \sin\theta_{1} - dz + L2 \cdot \sin\theta_{2}) - \cos\Phi \cdot \sin\Psi \cdot (L1 \cdot \cos\theta_{1} - dy + L2 \cdot \cos\theta_{2})$$
(5)

$$Z_{AP}^{g} = Z_{M} + (\cos\Psi \cdot \sin(\theta) + \cos\Psi \cdot \cos(\theta) \cdot \sin\Psi \cdot \sin\Phi) \cdot (L1 \cdot \cos\theta_{1} - dy + L2 \cdot \cos\theta_{2}) + \cos(\theta) \cdot \cos\Phi \cdot (L1 \cdot \sin\theta_{1} - dz + L2 \cdot \sin\theta_{2})$$
(6)

mit

 Y_M , X_M , Z_M : Elemente des Vektors X_M .

Mit den Gleichungen (4), (5) und (6) kann nun die Position des APs im übergeordnetem 3D-Koordinatensystem (Tachymetersystem) beschrieben werden.

3.2 Stochastisches Modell des Werkzeugs und Bestimmung der a-priori-Genauigkeiten

Das stochastische Modell wird benötigt, um Genauigkeiten des APs zu bestimmen. Das Modell ist von den zu berücksichtigenden Einflussgrößen (im weiteren Verlauf als Eingangsgrößen bezeichnet) abhängig. Diese Eingangsgrößen können zwei Kategorien zugeordnet werden: Sensorgenauigkeiten sowie Geometrien/Hebelarme. Es sei angenommen, dass die Größen dy und dz (Abbildung 1) fehlerfrei bestimmt worden sind. So können die folgenden, verbleibenden Elemente als Eingangsgrößen definiert werden: Y_m , $X_m, Z_m, \theta_1, \theta_2, \theta, \Phi, \Psi, L_1, L_2$. Die Längen des Auslegers L_1 sowie der Ladeschaufel L_2 sollen dabei den mechanischen Formänderungen im Lastfall Rechnung tragen, da sich diese unter der Dynamik der Arbeitslasten verformen können. Im Falle einer Verformung ist von einer Durchbiegung des Bauteils auszugehen. Aufgrund dieser Durchbiegung würden sich folglich die Abstände zwischen den Punkten A und B (L_1) sowie B und AP (L_2) ändern. Somit betreffen die ersten acht Eingangsgrößen die Sensorik und die letzten zwei Eingangsgrößen die Geometrie.

Für die Modellierung wird zunächst die Kovarianzmatrix der Einflussgrößen aufgestellt. Aus Gründen der Vereinfachung werden keine Korrelationen berücksichtigt.

Das stochastische Modell kann nun mit dem Varianzfortpflanzugsgesetz wie folgt aufgestellt werden (NIEMEIER 2008):

$$\boldsymbol{\Sigma}_{ff} = \boldsymbol{F} \cdot \boldsymbol{\Sigma}_{ll} \cdot \boldsymbol{F}^{\boldsymbol{T}} \tag{8}$$

mit

 Σ_{ff} : Kovarianzmatrix der Zielgrößen,

F: Jacobi-Matrix.

Für das weitere Vorgehen wird die Jacobi-Matrix benötigt. Dazu werden die partiellen Ableitungen der Modellgleichungen (4), (5) und (6) nach den Eingangsgrößen gebildet (LERKE 2019).

$$\boldsymbol{F} = \begin{pmatrix} \frac{\partial Y^g_{AP}}{\partial Y_m} & \frac{\partial Y^g_{AP}}{\partial X_m} & \frac{\partial Y^g_{AP}}{\partial Z_m} & \frac{\partial Y^g_{AP}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Y^g_{AP}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Y^g_{AP}}{\partial \theta} & \frac{\partial Y^g_{AP}}{\partial \Phi} & \frac{\partial Y^g_{AP}}{\partial \Psi} & \frac{\partial Y^g_{AP}}{\partial L_1} & \frac{\partial Y^g_{AP}}{\partial L_2} \\ \frac{\partial X^g_{AP}}{\partial Y_m} & \frac{\partial X^g_{AP}}{\partial X_m} & \frac{\partial X^g_{AP}}{\partial Z_m} & \frac{\partial X^g_{AP}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial X^g_{AP}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Y^g_{AP}}{\partial \theta} & \frac{\partial X^g_{AP}}{\partial \Phi} & \frac{\partial X^g_{AP}}{\partial \Psi} & \frac{\partial X^g_{AP}}{\partial L_1} & \frac{\partial X^g_{AP}}{\partial L_2} \\ \frac{\partial Z^g_{AP}}{\partial Y_m} & \frac{\partial Z^g_{AP}}{\partial X_m} & \frac{\partial Z^g_{AP}}{\partial Z_m} & \frac{\partial Z^g_{AP}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Z^g_{AP}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Y^g_{AP}}{\partial \theta} & \frac{\partial Z^g_{AP}}{\partial \Phi} & \frac{\partial Z^g_{AP}}{\partial \Psi} & \frac{\partial Z^g_{AP}}{\partial L_1} & \frac{\partial Z^g_{AP}}{\partial L_2} \end{pmatrix}$$
(9)

Auf die Darstellung der einzelnen Einträge der Jacobi-Matrix wird aus Übersichtsgründen verzichtet.

Unter Nutzung der Gleichung (8) lassen sich nun die Standardabweichungen der Vektorkomponenten des Arbeitspunktes AP wie folgt bestimmen:

$$\sigma_{Y_{AP}^g} = \sqrt{\Sigma_{ff}(1,1)}, \quad \sigma_{X_{AP}^g} = \sqrt{\Sigma_{ff}(2,2)}, \quad \sigma_{Z_{AP}^g} = \sqrt{\Sigma_{ff}(3,3)}. \tag{10}$$

4 Untersuchte Betriebsszenarien

Für die A-priori-Untersuchungen werden drei ausgewählte Stellungen betrachtet, jeweils die Maximalstellungen unten und oben sowie eine mittlere Stellung. Diese drei zu untersuchenden Stellungen sind in Abbildung 3 schematisch dargestellt.



Abb. 3: schematische Darstellung untersuchter Ausleger- und Ladeschaufelstellungen (dunkel dargestellt): links - Stellung 1; Mitte - Stellung 2; rechts - Stellung 3 (Vorlage: LIEBHERR 2019)

Für die Durchführung der Genauigkeitsanalyse wird ein Referenzhöhenprofil definiert. Der Ausleger soll dabei die entsprechende Profilhöhe einstellen, während die Ladeschaufel in einer Lage verweilen soll, bei der die Unterkante parallel zum Fahruntergrund gestellt ist. Dies gewährleistet die Lagefixierung der Ladeschaufel, so dass nur die Auslegerbewegung und die dadurch eingestellte Höhe gemessen wird. Während der Testfahrten erfolgt die Höheneinstellung kontinuierlich.

Die Testfahrten werden unter Laborbedingungen durchgeführt. Da es sich beim Fahruntergrund um einen ebenen glatten PVC-Boden handelt, sind die Lagewinkel Θ , Φ und Ψ zu Null gesetzt. Die absoluten Lagekoordinaten des Reflektors im Punkt P, Y_M und X_M , sind beliebig und werden für die a-priori Untersuchung ebenfalls zu Null gesetzt. Die Z_M -Komponente ist die Höhe des Reflektors über dem Fahruntergrund. Die Entfernungen zwischen dem Tachymeter und dem Reflektor betragen für den gesamten Testverlauf ca. 7 Meter. Diese Entfernung liefert die Grundlage für die Abschätzung der theoretischen Standardabweichungen σ_{Y_m} , σ_{X_m} , und σ_{Z_m} . Für das Tachymeter wurde in der Abschätzung eine Winkelgenauigkeit von 0.3 mgon und eine Streckengenauigkeit von 4 mm + 2 ppm angesetzt. Die Entfernungen gelten ebenfalls für die Messkonfiguration Lasertracker-SMR.

Die Geometrie des Laderaupenmodells ist zuvor bestimmt und in diesem Rahmen sind die Größen L_1 und L_2 exakt ermittelt worden. Die Geometrie der realen Maschine ist der Produktbeschreibung für die Laderaupe 636 Litronic entnommen.

Die numerischen Werte der Eingangsgrößen sowie deren Genauigkeiten für die a-priori-Untersuchung sind in Tabelle 4 für das 1:14–Modell und in Tabelle 5 für die reale Maschine zusammengestellt. Für die Bestimmung der Größen θ_1 und θ_2 werden Inertialmesseinheiten (IMU) unterschiedlicher Genauigkeit, die als Neigungsmesser dienen, eingesetzt (vgl. Tabellen 2 und 3). Die schattiert hinterlegten Werte signalisieren die Unterschiede in den Geometrien.

Eingangsgrößen Stellung 1	Eingangsgrößen Stellung 2	Eingangsgrößen Stellung 3	Theoretische Stan- dardabweichungen der Eingangsgrößen
$Y_m = 0 m$	$Y_m = 0 m$	$Y_m = 0 m$	$\sigma_{Y_m} = 0.004 \ m$
$X_m = 0 m$	$X_m = 0 m$	$X_m = 0 m$	$\sigma_{X_m} = 0.004 \ m$
$Z_m = 0.360 m$	$Z_m = 0.360 m$	$Z_m = 0.360 m$	$\sigma_{Z_m} = 0.004 \ m$
$\theta_1 = -36^\circ$	$\theta_1 = 5^{\circ}$	$\theta_1 = 36^\circ$	$\sigma_{\theta_1} = 0.22^{\circ *}$
$\theta_2 = 0^{\circ}$	$\theta_2 = 0^\circ$	$\theta_2 = 0^{\circ}$	$\sigma_{\theta_2} = 0.5^{\circ * *}$
$\Theta = 0^{\circ}$	$\Theta = 0^{\circ}$	$\Theta = 0^{\circ}$	$\sigma_{\varTheta} = 0.22^{\circ *}$
$\Phi = 0^{\circ}$	$\Phi = 0^{\circ}$	$\Phi = 0^{\circ}$	$\sigma_{\Phi} = 0.22^{\circ *}$
$\Psi = 0^{\circ}$	$\Psi = 0^{\circ}$	$\Psi = 0^{\circ}$	$\sigma_{\Psi} = 0.22^{\circ *}$
$L_1 = 0.213 m$	$L_1 = 0.213 m$	$L_1 = 0.213 m$	$\sigma_{L_1} = 0.001 m$
$L_2 = 0.081 m$	$L_2 = 0.081 m$	$L_2 = 0.081 m$	$\sigma_{L_2} = 0.001 m$

 Tabelle 4:
 Numerische Werte der Eingangsgrößen für die untersuchten Ausleger- und Ladeschaufelstellungen für das 1:14–Modell

*IMU Microstrain 3DM-GX2; **IMU MTi X-Sens

Eingangsgrößen Stellung 1	Eingangsgrößen Stellung 2	Eingangsgrößen Stellung 3	Theoretische Stan- dardabweichungen der Eingangsgrößen
$Y_m = 0 m$	$Y_m = 0 m$	$Y_m = 0 m$	$\sigma_{Y_m} = 0.004 \ m$
$X_m = 0 m$	$X_m = 0 m$	$X_m = 0 m$	$\sigma_{X_m} = 0.004 \ m$
$Z_m = 3.335 m$	$Z_m = 3.335 m$	$Z_m = 3.335 m$	$\sigma_{Z_m} = 0.004 \ m$
$\theta_1 = -36^\circ$	$\theta_1 = 5^{\circ}$	$\theta_1 = 36^{\circ}$	$\sigma_{\theta_1} = 0.22^{\circ *}$
$\theta_2 = 0^{\circ}$	$\theta_2 = 0^{\circ}$	$\theta_2 = 0^\circ$	$\sigma_{\theta_2} = 0.5^{\circ * *}$
$\Theta = 0^{\circ}$	$\Theta = 0^{\circ}$	$\Theta = 0^{\circ}$	$\sigma_{\Theta} = 0.22^{\circ *}$
$\Phi = 0^{\circ}$	$\Phi = 0^{\circ}$	$\Phi = 0^{\circ}$	$\sigma_{\Phi} = 0.22^{\circ *}$
$\Psi = 0^{\circ}$	$\Psi = 0^{\circ}$	$\Psi = 0^{\circ}$	$\sigma_{\Psi} = 0.22^{\circ*}$
$L_1 = 2.980 m$	$L_1 = 2.980 m$	$L_1 = 2.980 m$	$\sigma_{L_1} = 0.001 m$
$L_2 = 1.134 m$	$L_2 = 1.134 m$	$L_2 = 1.134 m$	$\sigma_{L_2} = 0.001 m$

 Tabelle 5:
 Numerische Werte der Eingangsgrößen für die untersuchten Ausleger- und Ladeschaufelstellungen für die reale Maschine

*IMU Microstrain 3DM-GX2; **IMU MTi X-Sens

5 Genauigkeitsanalyse

Für die bessere Einordnung nachfolgender Untersuchungen sollen zunächst die Genauigkeitsanforderungen realer Anwendungen angegeben werden. Die Klassifizierungstabelle der Baumaschinen nach Anwendungsgebiet von STEMPFHUBER & INGENSAND (2008) liefert entsprechende Anforderungen an die Höhen- und Positionsgenauigkeit. Die dort angegebenen Werte sind zwar für Radlader gültig, jedoch lassen sich diese ohne Einschränkungen auf Laderaupen übertragen, da die Werkzeuggeometrie bei beiden Maschinen gleich ist. Die Anforderung an die Höhengenauigkeit beträgt 20 bis 30 Millimeter. Die Anforderung an die Positionsgenauigkeit ist mit 20 bis 50 Millimeter angegeben.

5.1 Untersuchung der a-priori-Stellgenauigkeiten des Modells

Bei dieser Untersuchung handelt es sich um eine Simulation, die auf einer linearen Kovarianzfortpflanzung der Messgenauigkeiten entsprechend Kapitel 3.2 basiert. Die Genauigkeiten des AP sind für alle drei Koordinatenkomponenten entsprechend Gleichung (10) ausgewertet worden und in Tabelle 6 dargestellt.

Stellung	$\sigma_{Y^g_{AP}}[m]$	$\sigma_{X^g_{AP}}[m]$	$\sigma_{Z^g_{AP}}[m]$
1	0.0042	0.0041	0.0043
2	0.0043	0.0042	0.0043
3	0.0044	0.0042	0.0043

Tabelle 6: Genauigkeiten der Komponenten des Arbeitspunktvektors X_{AP}^{g} des Modells

Für den Vergleich mit den realen Testfahrten ist jedoch nur die Höhenkomponente Z_{AP}^{g} sowie ihre zugehörigen Standardabweichungen $\sigma_{Z_{AP}^{g}}$ von Bedeutung. Hierfür kann die Aussage getroffen werden, dass in der vorliegenden Konfiguration die simulierte Stellgenauigkeit der Höhe, verursacht durch die Bewegung des Auslegers, ca. 4 Millimeter beträgt. Dieser Wert gilt für alle untersuchten Ausleger- und Ladeschaufelstellungen (Abbildung 3) und kann somit für den gesamten Bewegungsbereich des Werkzeugs als gültig betrachtet werden. Auffallend ist, dass der Einfluss der Winkelmessung auf die Arbeitspunktgenauigkeit sehr gering bzw. nicht vorhanden ist, was den sehr kurzen Hebelarmen L_1 und L_2 geschuldet ist. Die Standardabweichungen $\sigma_{Z_{AP}^{g}}$ entspricht der theoretischen Standardabweichung der Tachymetermessung (vgl. Tabelle, 4).

5.2 Untersuchung der a-priori-Stellgenauigkeiten der realen Maschine

Analog zur durchgeführten Untersuchung des Modells wird die auf Kovarianzfortpflanzung basierende Simulation für die reale Raupe durchgeführt. Auch in diesem Fall sind die Genauigkeiten des AP für alle drei Koordinatenkomponenten entsprechend Gleichung (10) ausgewertet worden. Tabelle 7 stellt die Ergebnisse dar. Im Gegensatz zum Modell propagieren die Fehler der Neigungssensoren bei der realen Maschine deutlicher über die Hebelarme L_1 und L_2 . Die Höhenstellgenauigkeiten des APs erreichen, je nach Stellung, Werte von über 2 cm.

5.3 Untersuchung der a-posteriori-Stellgenauigkeiten des Modells

Zur Überprüfung des automatisierten Werkzeugs wird eine Evaluation mit einem unabhängigen Messsystem durchgeführt, das nicht Teil des automatisierten Systems ist. Solch ein Messsystem ist der Lasertracker von API Radian (Abb. 4). Das Instrument ist ein Polarmesssystem mit einer mit dem Tachymeter vergleichbaren Winkelmessgenauigkeit, aber einer um den Faktor 250 besseren Streckenmessgenauigkeit.



- Abb. 4: links: Lasertracker API RadianTM und Active TargetTM; rechts: Auswahl sphärischer Reflektoren (SMR) (AUTOMATED PRECISION INC. 2014)
- **Tabelle 7:** Genauigkeiten der Komponenten des Arbeitspunktvektors X_{AP}^{g} der realen Maschine

Stellung	$\sigma_{Y^g_{AP}}[m]$	$\sigma_{X^g_{AP}}[m]$	$\sigma_{Z^g_{AP}}[m]$
1	0.0080	0.0137	0.0192
2	0.0079	0.0170	0.0218
3	0.0147	0.0184	0.0192

Die technischen Spezifikationen des eingesetzten Lasertrackers sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8:	Technische	Spezifikationen	API	Radian TM	Lasertracker	(AUTOMATED
	PRECISION IN	JC. 2014)				

Winkelgenauigkeit	3.5 μm/m
Maximale Winkelgeschwindigkeit	180°/s
Statische Streckenmessgenauigkeit	$\pm 10 \ \mu m \ oder \ 5 \ ppm$
Kinematische Streckenmessgenauigkeit	10 ppm



Abb. 5:

Anordnung der Reflektoren und der Sensorik am Laderaupenmodell 1: Leica GRZ 101-Tachymeterprisma; 2: Lasertracker SMR 1.5" 3: IMU Microstrain 3DM-GX2 4: IMU MTi X-Sens (LERKE 2019)

Evaluationsmethode

Während des automatisierten Betriebs werden die Werkzeughöhen mit dem Lasertracker erfasst. Die Position bzw. die Höhe der Ladeschaufel kann durch Messungen auf einen an der Schaufel angebrachten SMR bestimmt werden. Diese Position kann anschließend der Soll-Höhe (Führungsgröße entsprechend Tabelle 2) gegenübergestellt werden. Zur Bestimmung der Stellgenauigkeit wird der Root Mean Square (RMS) verwendet. Dieser repräsentiert das Qualitätskriterium der automatischen Werkzeugsteuerung. Die Abtastrate wird dabei auf 20 Hz eingestellt. Die Synchronisation der Tracker-Messungen und der Systemoperationen ist zeitlich realisiert, wobei gleiche Abtastraten und gleiche Start- und Endzeitpunkte gewählt werden. Für die Messungen auf das 360°-Prisma vom Typ Leica GRZ 101 kommt das Tachymeter Trimble S7 zum Einsatz, mit einer Winkelgenauigkeit von 0.3 mgon und einer Streckengenauigkeit von 4 mm + 2 ppm im kinematischen Modus (TRIMBLE 2018). Das Messrauschen des eingesetzten Prismas durch wechselnde Orientierung (LACKNER & LIENHART 2016) ist hier vernachlässigt. Jedoch ist der Messaufbau so gestaltet, dass das Tachymeter fast orthogonal zur Trajektorie des Fahrzeugs aufgebaut ist, um so die Orientierung des Prismas ungefähr gleich zu halten und den Einfluss zu minimieren. Die Winkelgenauigkeiten der Inertialmesseinheiten sind in Tabellen 4 und 5 angegeben.



Abb. 6: Darstellung der Werkzeughöhenprofile; links: überhöhtes Profil; rechts: Betrag der Höhenabweichung; Fahrt 1: oben; Fahrt 2: Mitte; Fahrt 3: unten

Die realisierte Sensorkonfiguration am Fahrzeug während der Evaluation ist in Abbildung 5 dargestellt. Es ist zu beachten, dass der Höhenoffset zwischen dem Leica GRZ 101 360°-Miniprisma und dem SMR keine Rolle spielt. Dagegen ist der Höhenoffset zwischen dem SMR und der Unterkante der Ladeschaufel in der Form berücksichtigt, dass beim Aufliegen der Schaufel auf dem Untergrund (Abbildung 3, Stellung 1) das SMR eine Höhe von Null hat. Für die Untersuchung werden insgesamt drei Testfahrten durchgeführt. Das Höhenprofil (Führungsgröße) ist bei allen durchgeführten Tests gleich. In Abbildung 6 sind für die drei durchgeführten Testfahrten jeweils die Höhenstellungen des Werkzeugs, das Referenzhöhenprofil sowie die Beträge der Höhenabweichungen dargestellt.

In Tabelle 9 sind die aus den Testfahrten ermittelten RMS-Werte angegeben. Die Werte sind aus dem gesamten Bewegungsbereich des Werkzeugs ermittelt und sind somit ebenfalls für diesen gültig.

Tabelle 9: Aus den Testfahrten ermittelten RMS-Werte für die Höhenabweichung.

Fahrtnummer	RMS [<i>m</i>]		
1	0.006		
2	0.006		
3	0.006		

5.4 Analyse und Bewertung

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die a-posteriori-Genauigkeiten der Höhenkomponente des APs, ermittelt aus der durchgeführten Evaluation mittels Lasertracker, 6 Millimeter betragen. Die a-priori-Genauigkeiten, die mittels der auf der Kovarianzfortpflanzung der Messgenauigkeiten basierten Simulation bestimmt worden sind, sind mit 4 Millimetern ermittelt worden. Nach der vorangegangenen Definition gelten diese Angaben ebenfalls für den gesamten Bewegungsbereich des Werkzeugs. Somit liegt eine Verschlechterung der Genauigkeiten zwischen Messsimulation und realen Fahrten von etwa 2 Millimetern vor. Zum einen liegen die Gründe dafür im Regelverhalten bzw. der Regelcharakteristik des eingesetzten P-Reglers. Dieser kann nach MANN et al. (2005) eine Regelabweichung zwar minimieren, jedoch diese nicht vollständig ausregeln. Deutlich zu sehen ist diese Eigenschaft in der Darstellung des überhöhten Profils (Abbildung 6, links), wo die einzustellende Höhe um das Referenzhöhenprofil pendelt und ein "gezacktes" Muster aufweist. Da die Lage der Ladeschaufel mit Hilfe des Sensors 4 nach Abbildung 5 konstant gehalten wurde, kann das gezackte Muster nicht auf den dort wirkenden Regelkreis mit dem 3-Punkt-Regler zurückgeführt werden, sondern ausschließlich auf den Auslegerregelkreis. Als weiterer Grund für die ermittelten Genauigkeitsdifferenzen kann das Verhalten der hydraulischen Stellantriebe identifiziert werden. Die Hydraulik reagiert träge auf die sich dynamisch ändernde Führungsgröße und stellt die Höhe gegenüber den Steuerbefehlen nur zeitverzögert ein. Weitergehende Untersuchungen des Hydraulikverhaltens sind im Rahmen dieses Beitrags nicht erfolgt. Nicht zuletzt können auch die Vernachlässigung der Korrelationen in der Kovarianzmatrix Σ_{ll} (Kapitel 3.2, Gleichung (7)) sowie die Nichtlinearität der Modellgleichungen (Kapitel 3.1, Gleichungen (4), (5), (6)) eine Rolle spielen.

Abschließend lässt sich festhalten, dass trotz der Verschlechterung der Genauigkeit zwischen der Projektierungs- und Umsetzungsphase das Genauigkeitsniveau aus beiden Methoden im Sub-Zentimeterbereich liegt und somit ein hohes Niveau aufweist.

Im Hinblick auf die durchgeführten Untersuchungen der a-priori-Stellgenauigkeiten des Arbeitspunktes einer realen Maschine lässt sich feststellen, dass die berechneten Standardabweichungen des AP um den Faktor 5 schlechter sind als die des Modells. Bei einer Hochskalierung von Maßstab 1:14 auf Maßstab 1:1 ist dieser Faktor unerwartet klein, was bestätigt, dass die Ungenauigkeiten nicht linear mit der Größenskalierung wachsen. Es lässt sich jedoch festhalten, dass die in der Simulation festgestellten Standardabweichungen von ca. 20 Millimetern die Genauigkeitsanforderungen für reale Anwendungen, sowohl für die Höhe als auch für die Position, erfüllen.

6 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Genauigkeit einer automatisierten Ladewerkzeugsteuerung anhand einer Modellraupe im Maßstab 1:14 untersucht. Für die theoretische, auf Modellbildung und Simulation basierende a-priori-Genauigkeit der Höhenkomponente des Arbeitspunkts wurden 4 Millimeter ermittelt. Bei anschließenden Testfahrten und Evaluationen des automatischen Systems, unter Einsatz eines Lasertrackers, wurde eine a-posteriori-Genauigkeit von 6 Millimetern festgestellt. Die Gründe für die Abnahme der Genauigkeit in der Umsetzungsphase gegenüber der Projektierungsphase konnten zum einen in der Regelcharakteristik des P-Reglers und zum anderen in der Stellgenauigkeit und Stellgeschwindigkeit des hydraulischen Werkzeugantriebs ausgemacht werden. Weitere Gründe könnten die Vernachlässigung der Korrelationen und die Nichtlinearität sein. Grundsätzlich konnte jedoch ein hohes Genauigkeitsniveau im Sub-Zentimeterbereich für beide Phasen der Entwicklung festgestellt werden. Erkenntnisse aus der Projektierungsphase lassen sich demnach durchaus auf die Umsetzungsphase und den Betrieb übertragen. Ferner wurde die a-priori-Genauigkeit einer realen Maschine simuliert, um Aussagen über die Übertragbarkeit der Ergebnisse vom Modell auf eine reale Maschine machen zu können. Die Ergebnisse der Simulation zeigten eine Verschlechterung der Stellgenauigkeit des APs um Faktor 5 gegenüber dem Modell. Jedoch konnten die Genauigkeitsanforderung realer Anwendungen sowohl für die Lage- wie auch für die Höhenkomponente eingehalten werden.

In Zukunft wäre eine Genauigkeitsuntersuchung der Hydraulik wichtig, um diese zu quantifizieren und in der Modellierung zu berücksichtigen. Für die Regelung wäre die Einführung komplexerer Regler, z.B PID- oder Fuzzy-Regler, sinnvoll, um das Schwingen der Regelgröße um die Führungsgröße zu reduzieren bzw. zu eliminieren. Eine Erweiterung der Kovarianzmatrix für ein besseres, realistischeres Modell wäre in diesem Zusammenhang sinnvoll. Nicht zuletzt würden Testläufe auf realen Maschinen einen deutlichen Erkenntnisgewinn mit sich bringen, was die Übertragbarkeit von Ergebnissen aus der Projektierungs- auf die Umsetzungsphase betrifft.

Literatur

- AUTOMATED PRECISION INC. (2014): Technische Spezifikationen, API Radian Lasertracker. http://www.apisensor.com (11.09.2019).
- BEETZ, A. (2012): Ein modulares Simulationskonzept zur Evaluierung von Positionssensoren sowie Filter- und Regelalgorithmen am Beispiel des automatisierten Straßenbaus. Dissertation, Universität Stuttgart, Deutsche Geodätische Kommission, München, Reihe C, Heft Nr. 688.
- BUSCH, P. (2012): Elementare Regelungstechnik. 8. Überarbeitete Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg.
- KAHMEN, H. & RETSCHER, G. (1999): Precise 3-D Navigation of Construction Machine Platforms. Papers presented at the 2nd International Workshop on Mobile Mapping Technology, April 1999, Bangkok, Thailand, pp. 5A.2.1-5A.2.5.
- KILPELÄINEN, P., JAAKKOLA, M. & ALANAATU, P. (2011): Development of a Control System for a Multipurpose Road Repairing Machine. Automation in Construction Volume 20. ISSN: 0926-5805.
- KÜHN, G. (1991): Handbuch Baubetrieb: Organisation-Betrieb-Maschinen. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- LACKNER, S. & LIENHART, W. (2016): Impact of Prism Type and Prism Orientation on the Accuracy of Automated Total Station Measurements. In conference proceedings of Joint International Symposium on Deformation Monitoring, Wien.
- LERKE, O. (2019): Entwicklung eines Steuerungssystems für eine Laderaupe zur Durchführung vollautomatisierter Ladeprozesse unter Einsatz bildverarbeitender Robottachymeter und adaptiver Regelung. Eingereichte Dissertation Universität Stuttgart (in Druck).
- LIEBHERR (2019): Produktbeschreibung Laderaupe 636 Litronic. https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/baumaschinen/erdbewegung/laderaupen/ details/69842.html #lightbox (10.01.2019).
- MANN, H., SCHIFFELGEN, H. & FRORIER, P. (2005): Einführung in die Regelungstechnik. 10. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, Wien.
- MÖHLENBRINK, W. & SCHWIEGER, V. (2006): Navigation and control of construction processes. Proceedings of XXIII Inter national FIG Congress, München, Deutschland 8-13 Oktober 2006.
- NIEMEIER, W. (2008): Ausgleichsrechnung. Walter De Gruyter Verlag, Berlin, New York.
- PAUL, W. (1998): Steuerung der Bauausführung. Schriftenreihe des Instituts für Baubetriebslehre, Bd. 38. Universität Stuttgart (1998).
- SCHWIEGER, V. & BEETZ, A. (2017): Baumaschinensteuerung der ingenieurgeodätische Beitrag. In Ingenierugeodäsie, Hrsg. Willfried Schwarz. Springer Reference Naturwissenschaften, Springer Verlag, Berlin, Deutschland. ISSN: 2522-8161.
- STEMPFHUBER, W. & INGENSAND, H. (2008): Baumaschinenführung und –steuerung Von der statischen zur kinematischen Absteckung. Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV), Jahrgang 133, Heft 1.
- TRIMBLE INC. (2018): Datasheet Trimble S7 Total Station. <u>https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-s7#product-support</u> (11.11.2018).

Anmerkung

Teile dieses Beitrags sind der an der Universität Stuttgart, Fakultät für Luft- und Raumfahrt und Geodäsie eingereichten und im Druck befindlichen Dissertationsschrift "Entwicklung eines Steuerungssystems für eine Laderaupe zur Durchführung vollautomatisierter Ladeprozesse unter Einsatz bildverarbeitender Robottachymeter und adaptiver Regelung" entnommen.

Analyse des Messrauschens des Lasertrackers Leica AT960-LR

Alexander DORNDORF, Boris KARGOLL, Hamza ALKHATIB und Jens-André PAFFENHOLZ

1 Motivation und Zielsetzung

Das dreidimensionale (3D)-Messverfahren des Lasertrackings bietet dem Geodäten ausgezeichnete Möglichkeiten zur Bestimmung von räumlichen Objektveränderungen im unteren Millimeterbereich bis hin zum Sub-Millimeterbereich. Zeitliche Objektveränderungen lassen sich bei Messraten von 10 Hz bis zu 1000 Hz ebenfalls mit 3D-Punkten quantifizieren. Dabei zeichnet sich der Lasertracker durch seine hochfrequente, punktuelle Absolutdistanzmessung auf diskret signalisierte Corner Cube Reflektoren (CCR) aus.

Zur Beurteilung der Messergebnisse des Lasertrackers werden die dazugehörigen Messunsicherheiten benötigt. Das gesamte Unsicherheitsbudget eines Lasertrackers resultiert aus verschiedenen Einflüssen. Hierzu zählen unter anderem die gerätespezifischen Kalibrierparameter, die meteorologischen Umgebungseinflüsse, die Anzielgenauigkeit und die Messpräzision der Winkel- und Distanzmessung. Zur Bestimmung der Unsicherheit dieser Einflüsse existiert eine Vielzahl an Publikationen. Eine Untersuchung der Winkelmessung auf Richtungsstabilität, Wiederholgenauigkeit und Richtigkeit bei unterschiedlichen Messentfernungen wird in JURETZKO (2007) präsentiert. Im Gegensatz hierzu untersuchen GASSNER & RULAND (2008) die Horizontalwinkelmessung mittels eines Rotationstisches. In TANG et al. (2014) werden die Unsicherheit der Distanzmessung und die Einzelpunktmessungen bei verschiedenen Messentfernungen betrachtet. Einen allgemeinen Überblick über das gesamte Unsicherheitsmodell eines Lasertrackers und Ansätze zu dessen Bestimmung werden in MURALIKRISHNAN et al. (2016) gegeben. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die existierenden Untersuchungen zum Unsicherheitsmodell des Lasertrackers sich primär auf die Einzelpunktmessung beziehen und eine separate Betrachtung des Einflusses von horizontalen und steilen Zielen auf das Unsicherheitsmodell der polaren Messelemente eine untergeordnete Rolle spielt.

Die Zielsetzung dieses Beitrages hat sich aus dem Einsatz des Lasertrackers in den Forschungsprojekten am Geodätischen Institut Hannover (GIH) ergeben. Aufgrund seiner hochgenauen und hochfrequenten 3D-Punktbestimmung wurde der Lasertracker unter anderem als Referenz-/Validierungssensor (PAFFENHOLZ et al. 2015; STENZ et al. 2015), zur Bestimmung der Eigenformen eines synthetischen Brückenbauwerkes (OMIDALIZARANDI et al. 2019) und zum Monitoring von Infrastrukturbauwerken (PAFFENHOLZ et al. 2018a, 2018b) eingesetzt. Weiterhin nutzen PAFFENHOLZ et al. (2020) den Lasertracker im Rahmen des hochpräzisen Monitorings eines weltweit einmaligen Gleisverwerfungsversuchs. In den Experimenten wurden kontinuierliche Messungen mit Messraten bis zu 1000 Hz und Messkonfigurationen mit steilen Visuren realisiert. Bei der Auswertung dieser Messergebnisse werden je nach Aufgabe normalverteilte, unkorrelierte zufällige Abweichungen für das stochastische Modell, beispielsweise im Gauß-Markov-Modell, oder Hypothesentests vorausgesetzt. Hieraus haben sich die in diesem Beitrag diskutierten Fragestellungen ergeben: *Wie verhält sich das Messrauschen des Lasertrackers bei unterschiedlichen Messraten? Wie verhält sich das Messrauschen bei unterschiedlichen Messkonfigurationen (steile Visur)? Folgt das Messrauschen der Normalverteilung? Wie verhält sich die Varianz des Messrauschens über die Zeit?* Die Angaben des Herstellers für die Unsicherheit als maximal zulässige Abweichung (maximum permissible error (MPE)) beantworten diese Frage nicht, zumal sich diese Angaben auf Einzelpunktmessungen beziehen. Auch die existierenden Publikationen zur Untersuchung des Unsicherheitsmodells liefern auf diese Fragen keine ausreichende Antwort, vor allem da sich nur wenige Ergebnisse auf das vom GIH eingesetzten Lasertrackermodell beziehen. Zur Beantwortung der Fragestellungen wurden umfangreiche Laboruntersuchungen in Form von wiederholten Beobachtungen statischer Punkte in unterschiedlichen Messkonfigurationen im 3D-Labor des GIH durchgeführt. Die gewonnenen Daten wurden systematisch aufbereitet und einer statistischen Analyse mittels Hypothesentests, wie beispielsweise dem Turning-Point-Test und Jarque-Bera-Test, unterzogen.

2 Erfassung der polaren Messelemente des Lasertrackers zur Untersuchung ihrer stochastischen Eigenschaften

2.1 Eingesetztes Lasertrackermodell

In diesem Beitrag wird der Lasertracker Leica AT960-LR verwendet. Der Lasertracker bestimmt die Polarelemente Distanz, Horizontalrichtung und Vertikalwinkel. Die Distanz wird mit einem Absolutinterferometer (AIFM) bestimmt. Die Winkel werden durch Encoder und einen positionssensitiven Detektor bestimmt, der anhand des zurückreflektierten Laserstrahls vom Reflektor die Winkelmessung von hochfrequenten Bewegungen ermöglicht (HENNES 2017). Durch die so realisierte Winkelablesung und das AIFM kann der AT960-LR 3D-Punkte mit einer Messrate von bis zu 1000 Hz bestimmen; bei einer internen Messfrequenz von 3000 Hz. Der Hersteller gibt für die erweiterte Unsicherheit der x-, y-, z-Koordinate $U_{x,y,z} = \pm 15 \ \mu m + 6 \ \mu m/m$ (MPE nach ISO 10360-10) unter Verwendung eines Leica 1,5" Rotringreflektors (RRR) bei einem maximalen Messvolumen von 160 m an (HEXAGON 2017). Die Unsicherheit des Lasertrackers wird von der Winkelmessung dominiert. Als weiterer Einfluss auf die Unsicherheit sind die atmosphärischen Parameter auf die Streckenmessung zu nennen. Die im AT960-LR integrierte MeteoStation erfasst während der Messung kontinuierlich die Temperatur, den Luftdruck und die Luftfeuchtigkeit am Standpunkt des Lasertrackers. Die Distanzmessung wird automatisch um die gemessenen Atmosphärenparameter von der Instrumentensoftware korrigiert (HEXAGON 2017). Eventuell existierende atmosphärische Unterschiede zwischen Standpunkt und Zielpunkt des Lasertrackers werden in diesem Beitrag bei der Korrektion der Distanzmessung nicht berücksichtigt. Der für das Experiment eingesetzte AT960-LR wurde unmittelbar vor der Durchführung des Experimentes beim Hersteller kalibriert und nach Rückerhalt vom Hersteller, vor der Experimentdurchführung, einem Axis-Check unterzogen. Jeder Messung des Experiments war eine dreistündige Aufwärmphase für das AIFM vorgeschaltet.

2.2 Messkonzept des Experiments

Zur Ableitung des stochastischen Verhaltens der Wiederholungsmessungen des AT960-LR wurden mehrere räumlich verteilte Punkte im 3D-Labor des GIH kontinuierlich von drei verschiedenen Standpunkten beobachtet. Die Lage der beobachteten Punkte im Raum und die Positionen der Standpunkte (SP) des Lasertrackers sind in Abbildung 1 dargestellt. Die gewählte Konfiguration für die SP und Punkte ergab sich aus der Zielsetzung, dass die Abhängigkeit des Messrauschens vom Vertikalwinkel mit untersucht werden soll. Aufgrund der Distanzabhängigkeit des Messrauschens wurde bei der Erstellung der Konfiguration darauf geachtet, dass für jede Messung mit einer steilen Visur auch eine Messung mit horizontaler Visur bei ungefähr derselben Messentfernung existiert. Die gewählte Konfiguration der drei SP des Lasertrackers ermöglicht die Messung von horizontalen (88°) bis steilen (16°) Visuren bei unterschiedlichen Messdistanzen (1,5 m bis 8,5 m). Der Punkt 512 ermöglicht die Messung unterschiedlicher Horizontalrichtungen bei einem Zenitwinkel von ca. 87° auf allen drei SP. Die Beobachtung zweier Ziele mit horizontaler Visur (420 und 512) ermöglicht den Vergleich des Messrauschens der beiden Punkte auf ein identisches Verhalten. Bis auf den Punkt 420 sind alle Punkte unmittelbar an den Wänden bzw. der Decke des 3D-Labors durch permanent installierte Magnetnester signalisiert. Der Punkt 420 wurde mit ca. 30 cm Abstand zur Wand auf einem Schwerlaststativ der Firma Brunson Instrument Co. aufgebaut. Die SP 1 bis SP 3 liegen zusammen mit den Punkten 420, 421, 906 und 231 ungefähr in einem Profil. Das Koordinatensystem des Lasertrackers zeigt mit der y-Achse in Richtung des Punktes 231 und die x-Achse zeigt in die entgegengesetzte Richtung von Punkt 512. Die Punkte wurden während des Experiments mit folgenden Corner Cube Reflektoren (CCR) signalisiert: Punkt 420 mit einem Leica RRR 1,5"; Punkte 421, 512 und 906 mit einem Leica Break Resistant Reflektor 1,5"; Punkt 231 mit einem Kugelprisma 1,5" von Goecke, Schwelm.



Abb. 1: Querschnitt und Dimensionen des 3D-Labors des GIH mit dem Messaufbau des durchgeführten Experiments zur Bestimmung des stochastischen Verhaltens des Messrauschens vom Leica AT960-LR. Gezeigt ist die halbe Breite des 3D-Labors.

Jeder der fünf Punkte wurde auf jedem SP mit den Messraten 1 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 100 Hz und 1000 Hz für jeweils zehn Minuten gemessen. Die Auswahl der Messdauer und Messraten erfolgte in Anlehnung an die bisherigen Einsätze des Lasertrackers am GIH im Zuge von Monitoringaufgaben und Deformationsmessungen, vgl. Kapitel 1. Bei der Messung wurden zuerst alle Punkte nacheinander mit 1 Hz beobachtet. Anschließend wurde die Messung mit der nächst höheren Messrate wiederholt. Die Messung aller Punkte mit allen Messraten dauert ca. 4.2 Stunden und wird in diesem Beitrag als ein Satz bezeichnet. Um in den Messungen systematische Effekte (z. B. Gebäudedeformation durch Temperaturänderung) oder hochfrequente Punktbewegungen (z. B. erzeugte Erschütterungen durch Fahrzeuge auf den Verkehrsflächen vor dem 3D-Labor) vom stochastischen Verhalten der Wiederholungsmessungen trennen zu können, wurden jeweils fünf Sätze auf jedem SP gemessen. Hieraus ergibt sich eine Messdauer von ca. 21 Stunden pro SP. Zur Minimierung unkontrollierbarer Umgebungseinflüsse im Gebäude, die gegebenenfalls zu hochfrequenten Punktbewegungen führen könnten, wurden die Messungen im Zeitraum von Freitagnachmittag, 02.08.2019, bis Montagvormittag, 05.08.2019, durchgeführt. Zur Minimierung eventueller systematischer Effekte durch die Sonneneinstrahlung in das 3D-Labor wurden die Fenster mit Rollos verdunkelt. Der Messablauf wurde über eine eigene C++ Implementierung unter Zuhilfenahme des Leica Metrology Foundation SDK (Version 1.4.0) realisiert. Für die Messelemente wurde eine auf die Herstellerangaben zur Unsicherheit der Messelemente abgestimmte Anzahl von Nachkommastellen gewählt; für die Distanz (d) auf 10⁻¹ µm, die Horizontalrichtung (Hr) auf 10⁻² Milligrad [m°] und die Vertikalwinkel (V) auf 10⁻³ m°. Der Unterschied für Hr und V ergibt sich aus dem verwendeten Datentvp für die Messelemente.

Aufgrund des umfangreich erfassten Datenmaterials (125 zehnminütige Messungen pro SP) wird in diesem Beitrag nur eine repräsentative Auswahl an Messergebnissen im Detail diskutiert. Die Wahl fiel auf die Punkte 420, 421 und 906. Diese enthalten die horizontalen und steilsten Visuren sowie die kürzesten und längsten Messentfernungen des Experiments. Von diesen drei Punkten werden nur die Ergebnisse der Messraten 1 Hz, 10 Hz, 100 Hz und 1000 Hz präsentiert. Die Ergebnisse der 20 Hz Messungen haben vergleichbare Ergebnisse wie die 10 Hz Messungen. Alle erfassten Messdaten des Experiments stehen unter DORNDORF et al. (2019) im Forschungsdaten-Repositorium der Leibniz Universität Hannover zur Verfügung.

2.3 Messergebnisse des Experiments

Die Lufttemperatur im 3D-Labor lag während der Messungen auf den drei Standpunkten zwischen 25,8 °C und 26,7 °C. Innerhalb eines Satzes hat sich die Temperatur maximal um 0,5 °C geändert. Das originäre Messergebnis der drei Punkte ist exemplarisch für Satz 3 auf SP 1 in Abbildung 2 dargestellt. Dieser Satz wurde am 02.08.2019 zwischen 23 Uhr und 4 Uhr nachts gemessen und die Lufttemperatur im 3D-Labor ist während der Messung von 26,4 °C auf 26,2 °C gefallen. Bereits diese geringe Temperaturänderung im 3D-Labor hat einen Einfluss auf die Ergebnisse der Distanzmessung. Während der Distanzunterschied zwischen der ersten (1 Hz) und letzten (1000 Hz) Messung zu Punkt 420 ca. 2 µm beträgt, ist diese Differenz bei Punkt 421 ca. 10 µm und bei Punkt 906 ca. 30 µm groß. Als Ursache hierfür ist die Abkühlung des Gebäudes respektive 3D-Labors über die Messdauer von 4,2 Stunden zu vermuten. Beim Vergleich der Distanzmessungen aller fünf Sätze über die Messdauer von 21 Stunden kann für jeden Punkt ein spezifisches Bewegungsverhalten in den Distanzmessungen beobachtet werden. Dass die Differenz bei Punkt 420 in einem Satz nicht

so signifikant wie bei den beiden anderen Punkten ausfällt, liegt an der kurzen Messdistanz, der horizontalen Visur und dem Aufbau des Punktes auf dem Schwerlaststativ anstelle der Befestigung des Punktes an der Wand des 3D-Labors. In Tabelle 1 sind für die drei Punkte die Standardabweichungen der originären polaren Messelemente für die Messraten 1 Hz und 1000 Hz von Satz 3 angegeben. Die Standardabweichungen der Messraten 10 Hz und 100 Hz sowie der anderen vier Sätze haben vergleichbare Werte wie in Tabelle 1. Nur bei Punkt 906 sind bei vereinzelten Sätzen größere Unterschiede zu den angegebenen Standardabweichungen festzustellen; vgl. Diskussion im Laufe dieses Kapitels. DORNDORF et al. (2019) zeigen die berechneten Standardabweichungen sowie Abbildungen aller zehnminütigen Zeitreihen.



Abb. 2: Darstellung der gemessenen Differenzen zum Median für die Punkte 420, 421 und 906 von Satz 3 auf SP 1. Die 1 Hz Messung der dargestellten Punkte wurde von 23:30 Uhr bis 0:11 Uhr, die 10 Hz von 0:21 Uhr bis 1:02 Uhr, die 100 Hz von 2:03 Uhr bis 2:44 Uhr und die 1000 Hz von 2:54 Uhr bis 3:35 Uhr durchgeführt.

Punkt-Nr. / Messrate	σ_{Hr} [m°]			σ_V [m°]			σ _d [μm]		
	SP1	SP2	SP3	SP1	SP2	SP3	SP1	SP2	SP3
420 / 1	0,04	0,05	0,04	0,07	0,05	0,05	0,00	0,20	0,18
420 / 1000	0,05	0,05	0,04	0,03	0,06	0,07	0,00	0,16	0,17
421 / 1	0,94	0,15	0,06	0,53	0,14	0,08	0,16	0,23	0,50
421 / 1000	0,73	0,16	0,10	0,46	0,13	0,09	0,27	0,35	0,36
906 / 1	0,40	2,56	0,22	0,25	0,63	0,18	0,56	0,58	0,24
906 / 1000	0,38	2,56	0,31	0,30	0,63	0,19	0,45	0,29	0,74

 Tabelle 1:
 Standardabweichung der Wiederholungsmessungen von Satz 3.

Um die Fragestellungen aus Kapitel 1 zum Verhalten des Messrauschens mittels Hypothesentest beantworten zu können, wird vorausgesetzt, dass die beobachteten Punkte und der AT960-LR innerhalb einer zehnminütigen Messung stabil sind. Auf die Stabilität der Messkonfiguration wirken sich a) Temperaturänderungen im Raum, b) zyklische Gebäudedeformationen über den Tagesverlauf und c) hochfrequente Punktbewegungen aus.

- a) Die Temperaturänderung im Raum während der zehnminütigen Messung beträgt maximal 0,2 °C, so dass kein signifikanter Temperaturgradient zwischen Ziel und SP zu erwarten ist.
- b) Der Einfluss einer zyklischen Gebäudedeformation, durch z. B. einseitige Sonnenbestrahlung der Gebäudehülle, zeigt sich innerhalb der vierstündigen Messung eines Satzes, nicht jedoch innerhalb der zehnminütigen Messungen. Die Differenzen zwischen den Distanzmessungen am Anfang und Ende der zehn Minuten sind meistens kleiner als 2 μm. Nur am sonnigen Nachmittag betragen die Differenzen bis zu 8 μm.
- c) Zur Beurteilung hochfrequenter Punktbewegungen werden die Distanzmessungen genauer betrachtet. Für Distanzmessungen ohne signifikante Peaks innerhalb der zehnminütigen Messreihe ist die Existenz einer hochfrequenten Punktbewegung unwahrscheinlich. Die Entscheidung zur Verwendung der Distanz als alleiniges Beurteilungskriterium liegt in dem signifikant unterschiedlichen Verhalten der Winkelmessungen zu den Distanzmessungen begründet (vgl. Abbildung 2). Die Distanzmessungen der Punkte 420 und 421 sind über mehrere Minuten konstant und enthalten unabhängig von der Messrate und Messentfernung nur wenige Peaks kleiner als 1 µm. Im Gegensatz ist bei den Differenzen der Winkelmessungen zum Median ein unterschiedliches Verhalten festzustellen. Bei Punkt 420 betragen die Abweichungen ca. ±0,2 m°, wohingegen bei Punkt 421 die Abweichungen um eine Zehnerpotenz größer sind. Weiterhin sind in den Winkelmessungen zu Punkt 421 häufiger Peaks enthalten als bei Punkt 420. Bei den Peaks handelt es sich nicht um einzelne Ausreißer, wie das detaillierter dargestellte Messergebnis für Punkt 421 in Abbildung 3 zeigt. In den Winkelmessungen treten die Peaks bei einer Messrate von 1 Hz seltener auf als bei den höheren Messraten. Weiterhin ist die Stabilität der Distanzmessung über die Messdauer von 40 Sekunden in Abbildung 3 zu erkennen. Sie resultiert aus der Anzahl der gespeicherten Nachkommastellen der Distanzmessung. Bei der Verwendung von mehr Nachkommastellen als 10⁻¹ µm wird das Messrauschen der Distanzen mit quantifiziert. Allerdings wurde auf die Diskussion so kleiner Abweichungen aus praktischer Sicht und im Kontext der Genauigkeit des AT960-LR in diesem Beitrag verzichtet. Im Gegensatz zu den Punkten 420 und 421 zeigt sich bei Punkt 906 ein anderes Verhalten. Innerhalb der zehnminütigen Distanzmessungen von Punkt 906 sind häufiger Peaks enthalten und sie sind nur über kurze Zeitintervalle konstant. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die Decke des 3D-Labors über eine Holzkonstruktion abgehängt ist und Punkt 906 nicht dieselbe Stabilität aufweist wie die übrigen Punkte an den gemauerten Seitenwänden des 3D-Labors. Diese Tatsache trägt zu den eingangs des Kapitels angesprochenen größeren Unterschieden bei den Standardabweichungen zwischen den verschiedenen Sätzen von Punkt 906 bei. Unter der Annahme, dass eine zehnminütige Distanzmessung mit Peaks kleiner als 1 µm keine hochfrequente Punktbewegung enthält, sind die meisten Messungen zu Punkt 420 und 421 als stabil zu betrachten. Nur

Punkt 906 erfüllt in den meisten zehnminütigen Messreihen diese Stabilitätsannahme nicht. Die nachtsüber erfassten Messreihen der Distanz haben kleinere, im Fall von Punkt 906 sogar weniger Peaks als die Distanzmessungen am Tage.



Abb. 3: Detaildarstellung des Messergebnisses von Punkt 421 für Satz 3 auf SP 1.

3 Analyse des Messrauschens mittels Hypothesentests

3.1 Methodisches Vorgehen

Uber eine Analyse graphischer Darstellungen und beschreibender Statistiken hinaus ist es sinnvoll, die Messreihen mit Hilfe von statistischen Hypothesentests auf signifikante Muster im stochastischen Verhalten zu untersuchen. Hierzu gehen wir unter der Nullhypothese von den oft idealisiert angenommenen Eigenschaften aus, dass die zufälligen Abweichungen der beobachteten Zeitreihen: E1) zufällig, E2) normalverteilt, E3) homoskedastisch und E4) unkorreliert sind. Abweichungen von diesen Eigenschaften müssten bei der Durchführung eines Deformationstests, z. B. bei der Wahl einer in der Teststatistik verwendeten Varianz-Kovarianzmatrix, berücksichtigt werden. Während das erste Moment (Erwartungswert) primärer Untersuchungsgegenstand eines Deformationstests ist, fokussieren die obigen Eigenschaften auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung selbst und deren zweites Moment. Da Wiederholungsmessungen analysiert werden, stellen die durch Abzug des geschätzten Mittelwerts zentrierten Residuen Schätzwerte für die wahren, unbekannten zufälligen Abweichungen dar. Diese werden auf Abweichungen von den obenstehenden Eigenschaften E1-E4 mittels *T1*) *Turning-Point-Test*, *T2*) *Jarque-Bera-Test*, *T3*) *ICSS-Test und T4*) *Autokorrelations-Test* untersucht, wie im Folgenden beschrieben.

Zur Durchführung des von MOORE & WALLIS (1943) vorgeschlagenen *Turning-Point-Tests* auf Zufälligkeit einer Zeitreihe werden die Differenzen zwischen zeitlich benachbarten Werten (Residuen) berechnet und die Vorzeichen dieser Differenzen betrachtet. Jeder Vorzeichenwechsel bedeutet, dass einem Anstieg (\uparrow) ein Abstieg (\downarrow) folgt oder umgekehrt, in welchem Fall ein sogenannter Turning Point ("Wendepunkt") vorliegt. Somit kann für jede Folge von drei aufeinanderfolgenden Werten der Zeitreihe festgestellt werden, ob ein Wendepunkt vorliegt oder nicht. Um den Erwartungswert der Anzahl der Turning Points in einer rein zufälligen Zeitreihe zu bestimmen, bedient man sich der Vorstellung, dass von den drei aufeinanderfolgenden Werten genau einer den kleinsten Wert (Rang = 1) und einer den größten Wert (Rang = 3) hat, und dass der dritte Wert zwischen den beiden Extrema liegt (Rang = 2). Zufälligkeit der Zeitreihe impliziert dann, dass die sechs möglichen Rangfolgen

• 1-2-3 (
$$\uparrow$$
- \uparrow), 1-3-2 (\uparrow - \downarrow), 2-1-3 (\downarrow - \uparrow), 2-3-1 (\uparrow - \downarrow), 3-1-2 (\downarrow - \uparrow), 3-2-
1 (\downarrow - \downarrow) (1)

gleich wahrscheinlich sind. Da in vier von sechs Fällen ein Turning Point realisiert wird und bei einer Zeitreihe mit *n* Werten n - 2 zu untersuchende benachbarte Wertetripel auftreten, ergibt sich der gesuchte Erwartungswert zu $\frac{2}{3}(n-2)$. Weicht die für eine beobachtete Zeitreihe registrierte Anzahl von Turning Points stark von diesem Erwartungswert ab, ist die Nullhypothese der Zufälligkeit zu verwerfen. Da die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Anzahl N_{TP} der Turning Points für $n \to \infty$ gegen eine Normalverteilung mit Varianz $\frac{16n-29}{90}$ strebt, kann eine "starke Abweichung" statistisch definiert werden. Hierzu vergleicht man den Wert der auf die (approximative) Standardnormalverteilung normierten Testgröße

•
$$T_{TP} = \frac{N_{TP} - \frac{2}{3}(n-2)}{\sqrt{\frac{16n-29}{90}}} \sim N(0,1) \mid H_0$$
 (2)

mit dem unteren und dem oberen Quantilwert bei $\alpha/2$ bzw. $1 - \alpha/2$ für ein gewähltes Signifikanzniveau. Für den Standardwert $1 - \alpha = 0.95$ ist die Nullhypothese der Zufälligkeit also zu verwerfen, wenn der Wert von T_{TP} den unteren kritischen Wert -1.96 unterschreitet oder den oberen kritischen Wert 1,96 überschreitet. Der erste Fall tritt offenbar leicht ein, wenn die Zeitreihe einen signifikanten Trend enthält. Im anderen Extremfall springen die Werte stets auf und ab, was ebenfalls eine Art von Systematik darstellt.

Für zufällige Abweichungen geodätischer Messreihen wird üblicherweise eine Normalverteilung angenommen. Hierauf basieren auch die üblichen Testverteilungen (Chi-Quadratund Fisher-Verteilung) für Deformationstests. Ob diese Annahme für eine gegebene Messreihe ausreichend erfüllt ist, kann mit Hilfe des *Jarque-Bera-Tests* (BERA & JARQUE 1982) statistisch getestet werden. Eine normalverteilte Zufallsvariable hat die Schiefe $\gamma_1 = 0$ und die Kurtosis $\beta_2 = 3$, sodass Abweichungen von einer Normalverteilung als Abweichungen der empirischen Schiefe $\hat{\gamma}_1$ und empirischen Kurtosis $\hat{\beta}_2$ von diesen Zahlenwerten quantifiziert werden können. Die Testgröße

•
$$T_{JB} = n\left(\frac{\hat{\gamma}_1}{6} + \frac{(\hat{\beta}_2 - 3)^2}{24}\right) = n\left(\frac{\hat{\mu}_3^2}{6\hat{\mu}_2^3} + \frac{(\hat{\mu}_4/\hat{\mu}_2^2 - 3)^2}{24}\right) \sim \chi_2^2 \mid H_0$$
 (3)

kombiniert diese beiden Abweichungen, wobei die zusätzlichen Faktoren im Rahmen der Konstruktion der approximativ, mit zwei Freiheitsgraden, Chi-Quadrat-verteilten Jarque-Bera-Teststatistik T_{IB} als Rao-Score-Statistik auftreten (für Details siehe KARGOLL 2012).
Hierbei werden im gegebenen Fall der Analyse von Wiederholungsmessungen aus den nach Abspaltung des geschätzten Mittelwerts von den Messwerten erhaltenen Residuen $\hat{u}_1, ..., \hat{u}_n$ die Schätzwerte $\hat{\mu}_j = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \hat{u}_t^j$ für das zweite (j = 2), dritte (j = 3) und vierte (j = 4) Moment berechnet. Entsprechend der Testverteilung ist die Nullhypothese normalverteilter zufälliger Abweichungen also abzulehnen, wenn der Wert von T_{JB} den kritischen Wert 5,99 bei $1 - \alpha = 0,95$ überschreitet. Zur Durchführung dieses Tests wird die in der Statistics and Machine Learning Toolbox (Version 11.1) von MATLAB R2017a zur Verfügung stehende Routine *jbtest.m* verwendet.

Die Präzision der Messungen stellt einen wesentlichen Faktor für die Sensitivität eines Deformationstests dar. Eine übliche Annahme besteht darin, dass die zufälligen Abweichungen homoskedastisch sind. Die resultierende (im Deformationstest verwendete) Varianz-Kovarianzmatrix ist damit durch identische Hauptdiagonalelemente (d. h. Varianzen) gekennzeichnet. Um eine fehlerhafte Verwendung einer solchen Varianz-Kovarianzmatrix zu vermeiden, ist es sinnvoll, die Hypothese der Homoskedastizität zu testen. Da sich Varianzen aus Quadratsummen von Residuen schätzen lassen, können zum Zweck des Testens kumulative Quadratsummen $C_k = \sum_{i=1}^k \hat{u}_t^2$ (cumulative sum of squares) der geschätzten Residuen progressiv (für k = 1, ..., n) ins Verhältnis zur Gesamtquadratsumme C_n gesetzt werden und auf auffällig große oder kleine Zwischenwerte C_k untersucht werden. INCLÁN & TIAO (1994) schlugen zur Detektion aller auffälligen Zwischenwerte, die auf einen Varianzwechsel hindeuten, den Iterated Cumulative Sums of Squares (ICSS) Algorithmus vor. Dieser ICSS-Test gibt einen Vektor mit den Indizes t_1, \dots, t_n aller v gefundenen signifikanten Varianzwechsel im Residuenvektor aus. Das Konzept, die kumulativen Quadratsummen zur Überprüfung der zufälligen Abweichungen auf Homoskedastizität zu verwenden, wird auch in anderen Testverfahren angewendet. Das beispielsweise von BISCHOFF et al. (2005) auf diesem Konzept vorgeschlagene Testverfahren wird zur Überprüfung der Homoskedastizitäts-Hypothese bei GPS-Trägerphasenmessungen verwendet.

Die Hypothese der Unkorreliertheit der zufälligen Abweichungen kann wiederum auf Grundlage geschätzter Residuen mit Hilfe der einseitigen, verzerrten Autokorrelationsfunktion, definiert durch

•
$$\hat{\rho}_k = \frac{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \hat{u}_t \hat{u}_{t+k}}{\hat{\mu}_2}$$
 $(k = 0, ..., n-1),$ (4)

überprüft werden. Da die Werte der empirischen Autokorrelationsfunktionen erheblich streuen können, ist auch eine Abschätzung von deren Signifikanz sinnvoll. Signifikanzgrenzen für ein gewähltes Signifikanzniveau von $1 - \alpha = 0,95$ sind näherungsweise durch $\frac{1}{n} \pm \frac{1.96}{\sqrt{n}}$ gegeben. Falls mehr als $\alpha \cdot n$ der Autokorrelationswerte außerhalb dieses Intervalls liegen, wird die Unkorreliertheits-Hypothese verworfen (siehe SCHLITTGEN & STREITBERG 2013; Abschnitt 5.4). Dieser statistische *Autokorrelations-Test* wurde mit Hilfe der Funktion *xcov.m* der Signal Processing Toolbox (Version 7.4) von MATLAB R2017a umgesetzt.

3.2 Ergebnisse der Hypothesentests

Das stochastische Verhalten der in Kapitel 2.3 präsentierten Wiederholungsmessungen des AT960-LR wurde mit den zuvor beschriebenen vier Hypothesentests auf die idealisiert angenommenen Eigenschaften E1 bis E4 untersucht. Hierfür wurden von jeder zehnminütigen Messung die Mittelwerte geschätzt und anschließend die Residuen zu diesen berechnet. Abbildung 4 zeigt die normierten Histogramme der mit 1000 Hz beobachteten Punkte aus Abbildung 2. Die Histogramme der Residuen wurden mittels ihrer Wahrscheinlichkeitsdichte normiert, um einen optischen Vergleich mit der Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalverteilung zu ermöglichen. Die Normalverteilungen ergeben sich aus den geschätzten Mittelwerten und Varianzen der zehnminütigen Messungen. Aus diesem Grund wird die Normalverteilung bei der Distanzmessung von Punkt 420 als Peak dargestellt, weil alle Messwerte identisch sind. Die Ursache liegt in der im Kapitel 2.3 angesprochenen signifikanten Anzahl der Nachkommastellen der Distanzmessungen. Bei den Distanzen der Punkte 421 und 906 sind Unterschiede zwischen den Histogrammen und Normalverteilungen zu erkennen. Anstelle des Messrauschens zeigen beispielsweise die Messungen der Distanz von Punkt 906 eine Punktbewegung von 2 µm über die zehnminütige Messung. Aus diesem Grund wird auf eine Untersuchung des Messrauschens der Distanzmessungen mit den Hypothesentests verzichtet. Im Folgenden werden die Testergebnisse der Horizontalrichtungen und Vertikalwinkel präsentiert und diskutiert.



Abb. 4: Normierte Histogramme der mit 1000 Hz gemessenen Polarelemente der Punkte 420, 421 und 906 von Satz 3 auf SP 1 mit der Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalverteilung (schwarze Linien).

Für alle Hypothesentests wurde eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ verwendet. Die Testergebnisse sind in den Abbildungen 5 – 8 zusammengefasst. Die berechneten Testgrößen bzw. die Anzahl an gefundenen Varianzwechseln sind auf der x-Achse logarithmiert dargestellt, weil die Ergebnisse bei der Messrate von 1000 Hz überproportional zu den Ergebnissen von 1 Hz ansteigen. Negative Testgröße wurden vor der Transformation mit dem Logarithmus mit -1 multipliziert. Anschließend wurde die transformierte Testgröße wieder mit -1 in einen negativen Wert umgewandelt. Alle Testgrößen die zwischen ±1 liegen wurden gleich Null gesetzt. Im Fall des ICSS-Test wurde ein gefundener Varianzwechsel auf den Wert 0.3 gesetzt und bei null gefundenen Varianzwechseln wurde das Ergebnis nicht transformiert. Insgesamt wurden für jeden Punkt 60 Hypothesentests pro polarem Messelement (3 SP · 5 Sätze · 4 Messraten) durchgeführt. Wie oft der Hypothesentest bestanden bzw. kein Varianzwechsel gefunden wurde, wird in der x-Achsenbeschriftung angegeben. Die Ergebnisse aller vier Tests zeigen, dass die Tests für die 1 Hz Messungen am häufigsten bestanden werden. Beim Jarque-Bera-Test, ICSS-Test und Autokorrelations-Test werden auch wenige Tests für die 10 Hz Messungen bestanden. Bei den 100 Hz Messungen wird nur der Turning-Point-Test einmal bestanden, alle anderen Testergebnisse ergeben die Alternativhypothese. Insgesamt wurde jeder Test 360mal durchgeführt (60 Tests · 3 Punkte · 2 Messelemente). Aufgrund der gewählten Irrtumswahrscheinlichkeit sind auch Fehler 1. Art und 2. Art in den Testergebnissen zu erwarten. Die akzeptierte 100 Hz Messung beim Turning-Point-Test ist somit sehr wahrscheinlich ein Fehler 2. Art. Für die 1000 Hz Messungen wird kein Test bestanden.



Abb. 5: Ergebnis für den Turning-Point-Test. Die Signifikanzgrenzen für den Test sind als gestrichelte Linie dargestellt.



Abb. 6: Ergebnis für den Jarque-Bera-Test. Die Signifikanzgrenze für den Test ist als gestrichelte Linie dargestellt.



Abb. 7: Ergebnis des ICSS-Tests. Auf der x-Achse gibt WPn die Anzahl an gefundenen Varianzwechsel an. Es gibt keine Signifikanzgrenze. Der Test ist bestanden, wenn kein Varianzwechselpunkt gefunden wurde.



Abb. 8: Ergebnis des Tests auf Autokorrelation. Die Signifikanzgrenzen (vertikale Linien) haben bei höheren Messraten größere Werte, weil die Anzahl an Beobachtungen aufgrund der Messrate zunimmt.

4 Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

In Kapitel 3.1 sind die vier Eigenschaften: E1) zufällig, E2) normalverteilt, E3) homoskedastisch und E4) unkorreliert bezüglich der zufälligen Abweichungen der beobachteten Zeitreihen eingeführt worden. Die vier Eigenschaften wurden mit den ebenfalls in Kapitel 3.1 eingeführten Hypothesentests für das erhobene Datenmaterial mit Messraten von 1 Hz, 10 Hz, 100 Hz und 1000 Hz untersucht. Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse zusammenfassend diskutiert und die eingangs in Kapitel 1 formulierten Fragestellungen zur Zielsetzungen des Beitrages beantwortet.

Es kann festgehalten werden, dass lediglich für die 1 Hz Messrate die Hypothesentests zu einer Annahme der Nullhypothese für alle vier Eigenschaften bei den ausgewählten Punkten führen. Somit lässt sich auch ein Einfluss auf Grund der Konfiguration SP und Punkt, die durch unterschiedliche Horizontalrichtungen, Vertikalwinkel und Distanzen definiert ist, feststellen. Erwähnenswert ist, dass Punkt 420 für die 1 Hz Messrate weniger bestandene Hypothesentests aufweist als die übrigen Punkte, obwohl dieser Punkt hinsichtlich der Polarelemente eine optimale Konfiguration im Vergleich zu den übrigen Punkten aufweist. Im Gegensatz hierzu werden der Autokorrelationstest sowie der Turning-Point-Test der 1 Hz Messung am häufigsten für den nicht als ausreichend stabil erachteten Punkt 906 bestanden.

Bei der Betrachtung der Turning-Point-Test-Ergebnisse fällt auf, dass alle Testgrößen negativ sind. Dies ist bei allen Punkten für alle Messraten der Fall und würde für einen Trend in den Messungen sprechen. Besonders gut ist dieser Trend in Abbildung 2 für Punkt 420 in den Horizontalrichtungen und den Vertikalwinkeln zu erkennen. Es kann festgehalten werden, dass jede zehnminütige Messung, deren Messstart sich um je 1 Stunde unterscheidet, in etwa beim gleichen Ausgangswert startet und anschließend über die Zeit in dieselbe Richtung driftet. Bei den Punkten 421 und 906 ist dieses Verhalten aufgrund des erhöhten Messrauschens, bedingt durch die Konfiguration SP und Punkt, optisch nicht zu verifizieren.

Für alle Hypothesentests lässt sich festhalten, dass mit einer Erhöhung der Messrate eine größere Testgröße einhergeht. Das bedeutet: je höher die Messrate, desto stärker wird gegen die Annahme konstanter und unabhängiger, normalverteilter Abweichungen verstoßen.

Die Ergebnisse der Analysen der polaren Messelemente des AT960-LR haben zusammenfassend gezeigt, dass bezüglich des Messrauschens bei unterschiedlichen Messraten ein Unterschied insbesondere für die Horizontalrichtung und den Vertikalwinkel festzustellen ist. Für die Standardabweichungen zeigt sich eine Abhängigkeit von der Messkonfiguration zwischen SP und Punkt, vergleiche Tabelle 1. Weiterhin haben die Hypothesentests gezeigt, dass ab einer Messrate von 10 Hz das Messrauschen nicht mehr der Normalverteilung folgt und auch bereits bei einer Messrate von 1 Hz der Einfluss der Messkonfiguration die Annahme der Normalverteilung verletzen kann. Eine Aussage über die Korrelation des Messrauschens über die Zeit ist auf Basis der durchgeführten Hypothesentests wegen der existierenden Trends nur bedingt möglich.

Aus diesen Ergebnissen folgt, dass die getroffenen Annahmen für die Stabilität des Punktfeldes in Kapitel 2.3 über die zehnminütige Messung nicht ausreichend sind. Vor allem hochfrequente Punktbewegungen mit Amplituden von weniger als 2 μ m sind allein auf Basis der Distanzmessung des AT960-LR je nach Messkonfigurationen nur schwer zu detektieren. Weiterhin sind die Trends von kleiner als 2 μ m in den zehnminütigen Distanzmessungen genauer zu untersuchen, da diese auch durch eventuell existierende Änderungen des Temperaturgradienten im Raum verursacht werden können. Das Experiment soll zukünftig um zusätzliche Sensoren erweitert werden, beispielsweise im Raum verteilte Temperatursensoren und Beschleunigungssensoren an den beobachteten Punkten und SP des Lasertrackers. Auch die Ableitung weiterer stochastischer Eigenschaften des Lasertrackers, wie die Anzielgenauigkeit, soll zukünftig durch Erweiterung des experimentellen Aufbaus realisiert werden.

Danksagung und Hinweis zur Datenverfügbarkeit

Die Ergebnisse dieses Beitrages sind im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projektes "Bayessche adaptive robuste Ausgleichung multivariater geodätischer Messprozesse mit Datenlücken und nichtstationärem farbigem Rauschen" (Projektnummer 386369985) entstanden. Die Autoren danken der DFG für die Förderung. Dem Kollegen Frederic Hake, M. Sc. gilt ein besonderer Dank für die Bereitstellung der C++-Implementierung der individuellen Ansteuerung des Lasertrackers. Der ICSS-Test sowie der Turning-Point-Test sind selbst verfasste MATLAB-Routinen, die auf Wunsch von den Autoren dieses Beitrags zur Verfügung gestellt werden. Alle erfassten Messdaten stehen unter DORNDORF et al. (2019) im Forschungsdaten-Repositorium der Leibniz Universität Hannover zur Verfügung.

Literatur

- BERA, A. K. & JARQUE, C. M. (1982): Model specification tests: A simultaneous approach. Journal of Econometrics 20(1):59-82.
- BISCHOFF, W., HECK, B., HOWIND, J. & TEUSCH, A. (2005): A procedure for testing the assumption of homoscedasticity in least squares residuals: a case study of GPS carrier-phase observations. Journal of Geodesy 78(7-8):397-404.
- DORNDORF, A. KARGOLL, B., ALKHATIB, H. & PAFFENHOLZ, J.-A. (2019): Stochastical analysis of laser tracker data - shown for the Leica AT960-LR. DOI: 10.25835/0070979.
- Gassner, G. & Ruland, R. (2008): Laser Tracker Calibration Testing the Angle Measurement System. In: SLAC-PUB-13476; 2008.
- HENNES, M. (2017): Messmittel der Large Volume Metrology (LVM). In: Willfried Schwarz (Hg.): Ingenieurgeodäsie, Bd. 23. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer Reference Naturwissenschaften), S. 347–370.
- HEXAGON MANUFACTURING INTELLIGENCE (2017): Leica Absolute Tracker AT960 Produktbroschüre. https://www.hexagonmi.com/de-DE/products/laser-tracker-systems/leicaabsolute-tracker-at960 (29.08.2019).
- INCLÁN, C. & TIAO, G. C. (1994): Use of cumulative sums of squares for retrospective detection of changes of variance. Journal of the American Statistical Association 89(427), S. 913-923.
- ISO 10360-10 (2014): Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) - Teil 10: Lasertracker. Deutsche Fassung EN ISO 10360-10:2014-08
- Juretzko, M. (2007): Untersuchungen zur Wiederholgenauigkeit eines geregelten Winkelmesssystems am Beispiel eines Lasertrackers LTD 500. In: Brunner, F.: Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz, 2007. Wichmann, Heidelberg, S. 181– 187.
- KARGOLL, B. (2012): On the theory and application of model misspecification tests in geodesy. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 674.
- MOORE, G. & WALLIS W. (1943): Time series significance tests based on signs of differences. Journal of the American Statistical Association, 38(222), S. 153-164.
- MURALIKRISHNAN, B., PHILLIPS, S. & SAWYER, D. (2016): Laser trackers for large-scale dimensional metrology: A review. In: Precision Engineering 44, S. 13–28. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2015.12.001.
- OMIDALIZARANDI, M., NEUMANN, I., KEMKES, E., KARGOLL, B., DIENER, D., RÜFFER, J. & PAFFENHOLZ, J.-A. (2019): MEMS based bridge monitoring supported by image-assisted total station. Submitted to International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISPRS Archives (SMPR), Karaj.
- PAFFENHOLZ, J.-A., STENZ, U. & NEUMANN, I. (2015): Hochgenaue 3D-Referenzmessungen als ein Beitrag der Geodäsie zur experimentellen Untersuchung des Systemverhaltens neugotischer Gewölbekonstruktionen. In: Manfred Curbach, Heinz Opitz, Silke Scheerer und Torsten Hampel (Hg.): 8. Sympsium Experimentelle Untersuchung von Baukonstruktionen. Dresden, 24.09.2015. Dresden (Konstruktiver Ingenieurbau Dresden, 40), S. 73–80.
- PAFFENHOLZ, J.-A., HUGE, J. & STENZ, U. (2018a): Integration von Lasertracking und Laserscanning zur optimalen Bestimmung von lastinduzierten Gewölbeverformungen. In: avn 125 (4), 73-88.

- PAFFENHOLZ, J.-A., STENZ, U., NEUMANN, I., DIKHOFF, I. & RIEDEL, B. (2018b): Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Lasertracking und GBSAR zur Verformungsmessung. In: Wolfram Jäger (Hg.): Mauerwerk Kalender 2018. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 205-219. DOI: 10.1002/9783433608050.ch9.
- PAFFENHOLZ, J.-A., VON GÖSSELN, I., BUREICK, J., DIENER, D., REIFENHÄUSER, M. & NEUMANN, I. (2020): Hochpräzises und hochfrequentes Monitoring eines weltweit einmaligen Gleisverwerfungsversuches. In: WUNDERLICH, T. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 20. Beiträge zum 19. Internationalen Ingenieurvermessungskurs München, 2020. Wichmann, Berlin/Offenbach.
- SCHLITTGEN, R. & STREITBERG, B. H. J. (2013): Zeitreihenanalyse. 9. Auflage. Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- STENZ, U., PAFFENHOLZ, J.-A., HANSEN, M., PIEHLER, J. & NEUMANN, I. (2015): Interdisziplinäre Beiträge für das Monitoring und die Sicherung von neugotischen Gewölbekonstruktionen. In: Wolfgang Busch und Steffen Knospe (Hg.): Tagungsband GeoMonitoring 2015. GeoMonitoring. Clausthal-Zellerfeld, 5-6 März, S. 207–224.
- Tang, W., Ye, X., & Dong, S. (2014): Research on site measuring uncertainty of the laser tracker. In: Zhang, Y. & Gao W.: 7th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and Equipment, 92821Q (18 September 2014); doi: 10.1117/12.2069999

Optimierung des Ablaufplans und der Durchführung von tachymetrischen Netzmessungen

Ilka VON GÖSSELN, Frederic HAKE, Hannes FAUST und Ingo NEUMANN

Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung durch anonyme Fachkollegen als "peer reviewed paper" angenommen.

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung

Die Ziele einer tachymetrischen Netzmessung sind unter anderem die genaue Bestimmung neuer Festpunkte in einem vorhandenen Festpunktfeld sowie die Überprüfung von vorhandenen Festpunkten auf Punktbewegungen. Während einer Netzmessung werden nach und nach die Netzpunkte mit einem Tachymeter besetzt und Richtungs- und Streckenmessungen zu allen vorgesehenen Netzpunkten in mehreren Vollsätzen durchgeführt. Dafür sind über den anzumessenden Zielpunkten Prismen aufzubauen, die zum aktuellen Tachymeterstandpunkt ausgerichtet werden. Nach der Beendigung eines Standpunktes werden nach und nach die nächsten Netzpunkte mit dem Tachymeter besetzt. Die Prismen auf den Zielpunkten müssen dafür immer wieder zum aktuellen Standpunkt gedreht werden, noch nicht aufgebaute Zielpunkte müssen aufgebaut werden und nicht mehr benötigte Punkte können abgebaut werden. Es handelt sich um einen sehr zeitaufwändigen Messprozess, in dem viele Tätigkeiten aufeinander abgestimmt werden müssen, um wirtschaftlich zu messen.

Zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit der tachymetrischen Netzmessungen wird eine optimierte Anordnung der einzelnen Tätigkeiten (Aufbauen, Umbauen, Ausrichten, Messen und Abbauen) angestrebt. Grundlage für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit ist die Bestimmung der Dauer und der Kosten der Messung. Der Ablauf der Messung wird durch ein Petri-Netz-Modell abgebildet. Über eine computergestützte Simulation der Messung mit dem entwickelten Programm SimPle-Net (Simulation und Planung tachymetrischer Netzmessungen) ist eine Abschätzung der Messdauer und eine Festlegung der Tätigkeitsreihenfolge für alle beteiligten Personen möglich. In einer Optimierung mit genetischen Algorithmen wird der effizienteste Ablaufplan zur Durchführung der Netzmessung gesucht.

Bei der Durchführung der optimierten Netzmessung im Außendienst ist eine vorgabentreue Ausführung der Planung wünschenswert. Zu diesem Zweck werden die Planungsdaten für den Anwender visuell aufbereitet über eine Android-App auf einem Mobilgerät zugänglich gemacht. Die entwickelte App leitet den Nutzer durch den Messablauf und unterstützt ihn bei der Punktsuche sowie bei der Eingabe von Tafel- und Instrumentenhöhen. Über die App werden die Sensoren des Mobilgeräts abgefragt sowie die Steuerung des Tachymeters übernommen. Die Daten werden in Echtzeit in einer cloudbasierten Datenbank abgespeichert. Erste Testmessungen haben gezeigt, dass die App intuitiv nutzbar ist und die Beteiligten kontinuierlich bei der Durchführung der Netzmessung unterstützt.

1.2 Bewertung der Wirtschaftlichkeit von tachymetrischen Netzmessungen

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer Messung ist eine möglichst realistische Abschätzung der Messdauer notwendig, woraus sich im Anschluss die Kosten ableiten lassen. Im Fall der tachymetrischen Netzmessung ist die einfache Abschätzung der Messdauer über eine Funktion mit der Anzahl der Stand- und Zielpunkte als Variablen recht ungenau. Es wird dabei beispielsweise nicht berücksichtigt, dass Arbeiten parallel durchgeführt werden können. In der Geodäsie sind in GRAFAREND et al. (1979) oder STOLIKER & ANDERSON (1982) erste Ansätze zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer Messung zu finden, ab den späten 1990ern wurde das Thema Kostenoptimierung dann verstärkt behandelt (STAUDINGER 1999, DARE & SALEH 2000, SALEH & CHELOUAH 2004). Die bisherigen Ansätze zur Bewertung und Optimierung der Wirtschaftlichkeit von Messprozessen basieren auf mehr oder weniger komplexen Kostenfunktionen. In VON GÖSSELN (2017) wird eine Optimierung des Ablaufplans einer Messung basierend auf einem umfangreichen Prozessmodell vorgestellt.

2 Prozessmodell der tachymetrischen Netzmessung

2.1 Wahl des Prozessmodells

Das Verfahren zur Modellierung von Messprozessen soll verschiedene Anforderungen erfüllen, um eine realitätsnahe Modellierung und Simulation der Messprozesse zu gewährleisten (s. VON GÖSSELN 2017). Für die Modellierung und Simulation von Messprozessen soll ein Modellierungsverfahren gefunden werden, das eine computergestützte Simulationen von Prozessen ermöglicht. Es soll in der Lage sein, verschiedene Prozesszustände anzuzeigen und zu verarbeiten. Aufgrund dieser Forderung kommt nur eine formale Modellierungssprache in Frage bzw. eine semi-formale Modellierungssprache, die sich formalisieren lässt. In diesem Fall werden Petri-Netze zur Modellierung und Simulation genutzt. Die Prozesse einer Messung lassen sich mit einfachen grafischen Mitteln anschaulich darstellen und eine computergestützte Simulation der Messung ist relativ einfach implementierbar.

2.2 Petri-Netze

Bei Petri-Netzen handelt es sich um ein grafisches, formales Modellierungsverfahren, das auf einer strengen mathematischen Syntax beruht. Über computergestützte Simulationen des Prozessablaufs lassen sich die zeitlichen Abläufe bestimmen. Weitere Informationen zum Aufbau und der mathematischen Definition von Petri-Netzen sind zum Beispiel in ABEL (1990), OBERWEIS (1996) oder REISIG (2010) zu finden.

Ein Petri-Netz setzt sich aus vier Komponenten zusammen:

- Stellen modellieren passive Komponenten eines Prozesses. In Stellen können Dinge gelagert oder gespeichert werden oder sie können sich in einem Zustand befinden. Eine Stelle hat eine Kapazität *K*, die angibt, wie viele Token (s.u.) sie aufnehmen kann. Stellen werden in Petri-Netzen als Kreise dargestellt.
- Transitionen modellieren die aktiven Komponenten eines Prozesses. In Transitionen können Dinge erzeugt, verbraucht, transportiert oder verändert werden. Das Ausführen einer Transition wird als "schalten" oder "feuern" bezeichnet. Transitionen werden in Petri-Netzen als Rechteck oder Quadrat dargestellt.

- Token, die häufig auch als Marken bezeichnet werden, sind Objekte der realen Welt, die auf einer Stelle liegen können. Neben realen Objekten können Token auch die Erfüllung von Bedingungen abbilden. Token werden als Punkte oder bei einer großen Anzahl von Token auch als Zahlen dargestellt, die auf Stellen liegen und durch das Schalten von Transitionen durch das Petri-Netz transportiert werden. Je nach Art des Petri-Netzes können einer oder mehrere Token auf einer Stelle Platz finden. Des Weiteren können Token zusätzliche Informationen beinhalten, sie heißen dann farbige Token.
- Die Kanten in einem Petri-Netz modellieren die Beziehungen zwischen den Komponenten, indem sie Stellen mit Transitionen verbinden und umgekehrt. Eine Verbindung gleichartiger Komponenten ist nicht möglich. Kanten können ein Kantengewicht *W* besitzen, das angibt, wie viele Token über die Kante laufen. Bei Netzen mit farbigen Token ist zusätzlich anzugeben, welche Token-Arten über die Kante laufen dürfen.

Petri-Netze können nahezu beliebig komplex aufgebaut werden. Die ursprüngliche und einfachste Art von Petri-Netzen sind Bedingungs-Ereignis-Netze, bei denen die Token auf den Stellen die Erfüllung bestimmter Bedingungen darstellen. Die Transitionen repräsentieren Ereignisse, die bei Erfüllung einer oder mehrerer Bedingungen eintreten können. Weit verbreitet sind Stellen-Transitions-Netze. Hierin können Stellen mehrere Token aufnehmen und Zustände symbolisieren oder Dinge lagern. Damit Transitionen schalten können, müssen sie aktiv sein. Dafür müssen die Bedingungen im Vorbereich einer Transition erfüllt sein (s. Abbildung 1). Die Transition t1 besitzt die drei Stellen p1, p2, p3 als Vorbereich und die beiden Stellen p4 und p5 als Nachbereich. Abbildung 1 (links) zeigt eine aktive Transition t1, die schaltbereit ist. Alle Stellen des Vorbereichs tragen ausreichend Marken und die Kapazitäten der Stellen des Nachbereichs sind ausreichend groß, um weitere Marken dort abzulegen. Abbildung 1 (rechts) zeigt ein Beispiel, in dem t1 nicht aktiv ist. Zum einen reicht die Markierung von Stelle p1 mit einer Marke nicht aus, da das Kantengewicht W(p1,t1) = 2 ist und nur eine Marke auf p1 vorliegt. Außerdem reicht die Kapazität von Stelle K(p5) = 3 nicht aus, um noch zwei weitere Marken aufzunehmen. Bereits einer dieser Gründe ist ausreichend, um eine Aktivierung von t1 zu verhindern.



Abb. 1: Vor- und Nachbereich einer Transition, (links) aktiv und (rechts) nicht aktiv (VON GÖSSELN 2017)

In komplexeren Petri-Netzen, wie den farbigen Petri-Netzen, können die Token zum Beispiel Objekte wie Messinstrumente oder Personen mit ganz bestimmten Eigenschaften verkörpern, die dann durch das Petri-Netz transportiert werden.

Zeitbehaftete Petri-Netze

In zeitbehafteten Petri-Netzen kann außerdem die Dauer des Schaltens jeder Transition bzw. die Dauer der Tätigkeit, die diese Transition repräsentiert, abgespeichert werden. Die Realisierung im Petri-Netz erfolgt dadurch, dass die Marken erst wieder freigegeben werden, wenn die Schaltdauer abgelaufen ist. Am Ende einer Simulation wird dann die Gesamtdauer des Prozesses ausgegeben. Diese Eigenschaft ist besonders bei parallel ablaufenden Prozessen wichtig, da so die Zeiten für die Teilschritte nicht einfach nur addiert werden, sondern direkt in der Simulation aufeinander abgestimmt werden.

2.3 Petri-Netz-Model der tachymetrischen Netzmessung

Die tachymetrische Netzmessung wurde aufgrund ihrer Komplexität als farbiges Petri-Netz modelliert. Das bietet den Vorteil, dass den Marken verschiedene Eigenschaften zugeordnet werden können. Die Transitionen sind zeitbehaftet, so dass am Ende der Simulation die Dauer für die Durchführung der Netzmessung ausgegeben wird. Das Petri-Netz der tachymetrischen Netzmessung ist in Abbildung 2 dargestellt.

Eine detaillierte Erläuterung des vollständigen Petri-Netzes ist in VON GÖSSELN (2017) zu finden. Im Folgenden werden die wichtigsten Elemente erläutert, die zum weiteren Verständnis notwendig sind.

Im Zentrum des Modells befindet sich die Stelle Personal. Hierin werden alle verfügbaren Personen gespeichert. Jede Person wird dabei als farbige Marke mit ihren spezifischen Eigenschaften wie Name, Position, Fortbewegungsmittel oder Stundenlohn abgespeichert. Das Modell ist so ausgelegt, dass die Netzmessung mit einem Beobachter und einem oder zwei Gehilfen durchgeführt wird. Ihnen werden während der Netzmessung unterschiedliche Aufgaben zugewiesen. Der Gehilfe ist für den Auf-, Um- und Abbau der Zielpunkte zuständig. Der Beobachter kann sowohl Punkte auf-/ab- und umbauen als auch den Standpunkt auf- und abbauen und die Messungen durchführen. All diese Tätigkeiten sind als Transitionen im Modell abgebildet. Die graue Schattierung der Transition verdeutlicht, dass es sich um zeitbehaftete Transitionen handelt. Wie lange das Schalten beispielsweise der Transition "Auf-/Ab Gehilfe1" dauert, hängt davon ab, wie viele Punkte auf-/ab- oder umgebaut werden müssen, welche einzelnen Schritte an dem Punkt durchgeführt werden müssen , wo sich der Gehilfe im Messgebiet befindet und wie lange es dauert, die Wege zwischen den Punkten zurückzulegen. Das Laufzeitmodell wurde dafür recht fein aufgeschlüsselt (s. Tabelle 1).

In der Tabelle ist zu erkennen, für welche Transition welche Tätigkeiten in Frage kommen. Die Zeiten, die jeder einzelnen Tätigkeiten zugeordnet sind (vgl. VON GÖSSELN 2017), wurden in der Bachelorarbeit von MAINZ (2018) durch mehrere Testmessungen evaluiert und angepasst.



Abb. 2: Petri-Netz einer tachymetrischen Netzmessung (VON GÖSSELN 2017)

Bevor mit der Simulation der Messung gestartet werden kann, muss festgelegt werden, in welcher Reihenfolge die Standpunkte besetzt werden sollen und wie viele Gehilfen an der Messung teilnehmen. Außerdem sind die Lage der Punkte, die Vermarkungsart und die Fortbewegungsmittel der Personen von Bedeutung. Die Vermarkungsart hat Einfluss darauf, wie lange der Aufbau eines Punktes dauert. Ein Punkt auf einem Pfeiler lässt sich deutlich schneller aufbauen, als ein tief liegender Punkt, der erst freigelegt werden muss. Außerdem entfällt für den Pfeiler die aufwändige Zentrierung des Punktes. Ein begrenzt verfügbares Equipment wurde bisher nicht implementiert, da dies den Lösungsraum der ohnehin komplexen Problemstellung noch vergrößert hätte. Als Ergebnis der Simulation lässt sich aber die Anzahl der benötigten Stative und Reflektoren anzeigen, so dass eine einfache Zusammenstellung des Equipments möglich ist. Die Lage der Punkte ist entscheidend, um die Zeiten für das Zurücklegen der Wege zwischen den Punkten zu ermitteln. Dem entwickelten Programm muss ein Wegenetz übergeben werden, in dem jeder Kante eine Dauer oder eine Geschwindigkeit zugeordnet ist, aus der dann die Dauer abgeleitet werden kann. Dieses Wegenetz ist in einer XML-Datei abgespeichert, in der auch alle anderen Informationen bezüglich des Netzes und der verfügbaren Personen abgespeichert sind. Weitere Informationen zum Aufbau der XML-Datei sind in VON GÖSSELN (2017, S. 72 ff.) zu finden.

Transition	Tätigkeit	T [Sek.]
	Weg	var.
	Punkt freilegen	180
Aut-/Ab Beobachter bzw. Gehilfe	Punkt verdecken	30
(Zieipunkte)	Equipment aufbauen	60
Aufle and Standarson let	Equipment abbauen	60
Autoau Standpunkt	Zentrieren	290
Abbay Tashymatar	Höhe messen	60
Abbau Tachymeter	Reflektor ausrichten (Zielpunkt)	5
	Messinstrument vorbereiten (SP)	100
	Punkt einstellen (von Hand)	25
Messung	Punkt einstellen (automatisch)	5
	Richtungs- und Streckenmessung	5

 Tabelle 1: Laufzeitmodell einer tachymetrischen Netzmessung (vgl. VON GÖSSELN 2017 & MAINZ 2018)

Zum Transport dieser Informationen bezüglich des Messgebiets und des Messablaufs durch das Petri-Netz wurde der Markentyp "Netzinfo" eingeführt. In diesem Markentyp werden der Status der Messung, die Reihenfolge der Standpunkte, die dazugehörigen Zielpunkte, das Wegenetz und die verfügbaren Personen abgespeichert. Außerdem werden alle Punkte des Netzes mit ihrem aktuellen Status (z. B. Zustand des Aufbaus, Ausrichtung) darin verwaltet.

Eine Besonderheit dieses Petri-Netzes ist, dass die Kantengewichte für die Kanten rund um die Transition "Messung" für jeden Standpunkt angepasst werden müssen. Das ist der Fall, da jeder Standpunkt unterschiedlich viele Zielpunkte hat, die vor dem Start der Messung aufgebaut bzw. ausgerichtet werden müssen. Erst wenn alle Zielpunkte und der Standpunkt aufgebaut wurden, kann die Transition "Messung" schalten.

Die Simulation eines Lösungsvorschlags zur Messung des Netzes wird mittels Markendurchlauf durch das Petri-Netz realisiert. Die verfügbaren Personen werden als farbige Marken mit ihren Eigenschaften (Name, Position, Fortbewegungsmittel, Stundenlohn) auf der Stelle Personal abgelegt. Die erste Transition, die schalten muss, ist die Transition "Änderung Gewichte/Messstatus". Darin werden die Kantengewichte (*n* "Punkt"-Token) des Petri-Netzes für den ersten Standpunkt festgelegt. Damit die Transition schalten kann, müssen zu Beginn einige Marken mit Dummy-Eigenschaften auf verschiedenen Stellen erzeugt werden (s. VON GÖSSELN 2017). Dann wird mit dem Aufbau der Punkte für den ersten Standpunkt begonnen. Welche Punkte welche Person aufbaut, wird in der zeitunabhängigen Transition "Zuordnung Punkte" geregelt. Die Transition "Auf/Ab Gehilfe1" schaltet dann beispielsweise so oft, wie es Punkte auf der Stelle "Punkte Gehilfe1" gibt. Wenn alle Punkte aufgebaut wurden, kann die Transition "Messung" schalten. Parallel dazu wird geprüft, welche Punkte schon für den nächsten Standpunkt aufgebaut werden können. Diese Punkte werden wieder den Gehilfen zugeordnet, so dass diese während der Messung weiterarbeiten können. Punkte, die in die aktuelle Messung involviert sind, können nicht umgebaut werden, da sie in der Transition "Messung" gebunden sind und erst nach Beendigung der Messdauer wieder freigegeben werden. Das Petri-Netz ist so lange lebendig (schaltfähig), bis keine Standpunkte mehr zu messen sind und alle Punkte abgebaut wurden. Danach ist keine der Transitionen mehr schaltfähig.

Während der Simulation kann es zu Konflikten beim Schalten von Transitionen kommen, wenn beispielsweise zwei Transitionen auf begrenzt verfügbare Marken einer Stelle zugreifen wollen. Zur Lösung dieses Konflikts wurden Prioritäten festgelegt, welche Transition den Vorrang erhalten soll (s. "Aufbau Standpunkt" und "Auf-/Ab Beobachter" in Abbildung 2).

Als Ergebnis der Simulation wird der zeitliche Ablauf der Messung in einem Ablauf-Diagramm dargestellt, in dem zu erkennen ist, wann welche Person welche Tätigkeit durchführt und wann Wartezeiten für die Person entstehen. Zusätzlich wird für jede beteiligte Person eine csv-Datei angelegt, in der die einzelnen Tätigkeiten aufgeführt sind. (s. Abbildung 6 und 7). Außerdem werden die Gesamtdauer des Prozesses, die zurückgelegte Entfernung aller Personen und die Gesamtkosten ausgegeben.

3 Effizienzoptimierung der tachymetrischen Netzmessung

3.1 Ziele der Effizienzoptimierung

Das Ziel der Effizienzoptimierung ist es, eine möglichst wirtschaftliche Variante der Netzmessung zu finden. Ein Vergleich verschiedener Varianten kann über die Kosten oder die Dauer der Messung vorgenommen werden.

Bei der Optimierung der Netzmessung handelt es sich um ein erweitertes Traveling Salesman Problem (TSP). Bei der reinen Betrachtung der Standpunktreihenfolge hätte man es mit einem klassischen TSP zu tun, bei dem nur die kürzeste Entfernung zwischen den Standpunkten von Interesse wäre. Bei der Netzmessung ist jedoch auch die Dauer, die für den Aufbau, den Umbau, die Messung und den Abbau benötigt wird, von Bedeutung. Diese Tätigkeiten sollen so gut aufeinander abgestimmt sein, dass möglichst wenig Wartezeiten entstehen. Neben den Reihenfolgeproblemen der Standpunktbesetzung und dem Auf-/Ab-/Umbau der Zielpunkte gibt es noch ein Zuordnungsproblem: Welche Punkte soll welche Person auf-/ab-/umbauen? Als dritte Problemklasse kann die Parametervariation identifiziert werden. Im Fall der Netzmessung kann so die Anzahl der Gehilfen optimiert werden.

Um eine optimale Variante der Netzmessung zu finden, werden verschiedene Varianten der Messung mit dem vorgestellten Petri-Netz (Abbildung 2) simuliert und miteinander verglichen. Die einzelnen Varianten unterscheiden sich durch die Anordnung der Standpunkte, die Anzahl der Gehilfen und schließlich auch in der Aufteilung und Aufbaureihenfolge der Zielpunkte. Besonders bei größeren Netzen mit vielen Standpunkten steht man vor einem komplexen kombinatorischen Optimierungsproblem, da es schnell sehr viele Möglichkeiten gibt, in der die Standpunkte angeordnet werden können. Bei sechs Standpunkten ist die Anzahl der Möglichkeiten mit 6! = 720 noch recht klein. Bei zehn Standpunkten hat man bereits 10! = 3 628 800 Möglichkeiten. Als Optimierungsverfahren wird deshalb ein heuristisches

Verfahren angewendet, bei dem nur ein Teil des Lösungsraums ausgewertet wird. In dem vorgestellten Ansatz werden genetische Algorithmen zur Optimierung eingesetzt. In REHR et al. (2011) und VON GÖSSELN (2017) wird ausführlich beschrieben, wie damit die Optimierung des Ablaufplans einer tachymetrischen Netzmessung funktioniert. Im Folgenden wird kurz die Vorgehensweise erläutert.

3.2 Genetische Algorithmen zur Optimierung der Netzmessung

Genetische Algorithmen gehören zur Gruppe der evolutionären Algorithmen, die auf dem Prinzip der biologischen Evolution nach Darwin beruhen. Die stärksten Individuen ("survival of the fittest") pflanzen sich nach seinem Ansatz durch Paarung fort (Rekombination). Die Nachkommen erben die genetischen Informationen ihrer Eltern. Durch Mutationen wird der genetische Code der Nachkommen zudem leicht verändert. Diese Herangehensweise wird in genetischen Algorithmen auf Optimierungsprobleme übertragen. Zu Beginn der Optimierung wird eine Population aus verschiedenen Lösungsvorschlägen generiert, die dann von Generation zu Generation verändert (verbessert) wird. Eine detaillierte Erläuterung des Verfahrens ist zum Beispiel in GOLDBERG (1989), DOMSCHKE & DREXL (2005) oder BOERSCH et al. (2007) zu finden.

In genetischen Algorithmen wird mit mehreren Lösungsvarianten (Individuen) parallel gearbeitet, die zusammen die sogenannte Population (Lösungsmenge) bilden. Im Laufe der Optimierung mit genetischen Algorithmen wird die vorhandene Population durch die Operatoren Selektion, Crossover (Rekombination) und Mutation in Anlehnung an die Evolutionstheorie nach Darwin verändert. Diese Veränderung erfolgt über eine festgelegte Anzahl von Generationen. Die Individuen setzen sich aus verschiedenen Standpunktreihenfolgen und, falls gewünscht, einer zufällig erzeugten Anzahl von Personen (2 oder 3) zur Durchführung der Netzmessung zusammen (s. Abbildung 3). Die Personenanzahl wird als zusätzliches Attribut eingeführt. Die Standpunktreihenfolge mit den tatsächlichen Punktnummern wird im Phänotyp und eine codierte Standpunktreihenfolge im Genotyp gespeichert. Zur Berechnung des Fitnesswertes wird im Fall der Netzmessung eine Petri-Netz-Simulation der Variante durchgeführt. Die Kosten (oder die Dauer) der Messvariante werden als Fitnesswert für die Lösungsvariante abgespeichert. Dieser Fitnesswert dient im Optimierungsablauf zur Bewertung der Güte des Individuums.



Phäno	otyp								
M1	S 4	N4	M3	N1	 S1	M7	S2	N2 M4	Individuum n
Geno	typ								Zus. Attr. Fitness
0	15	11	2	8	 12	6	13	9 3	2 ?

Abb. 3:

Individuen zur Optimierung der Standpunktreihenfolge und der Personenzahl (VON GÖSSELN 2017)



Abb. 4: Ablauf eines simplen genetischen Algorithmus (nach BOERSCH et al., 2007)

Abbildung 4 zeigt den Ablauf der Optimierung mit genetischen Algorithmen. Die Anfangspopulation P wird aus einer festgelegten Anzahl von Individuen zufällig erzeugt. Im nächsten Schritt werden alle Individuen evaluiert. Anhand des Fitnesswertes wird die Güte des Individuums bewertet. Im nächsten Schritt wird geprüft, ob noch weitere Generationen erzeugt werden sollen. Das ist der Fall, solange die maximale Anzahl von Generationen noch nicht erreicht wurde. Im nächsten Schritt wird eine leere Population P'erzeugt, die mit neuen Individuen gefüllt wird. Die guten Individuen werden dafür selektiert und nehmen an der Bildung der nächsten Generation teil, die schlechten Individuen überleben mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit. Mit einer sogenannten Crossoverwahrscheinlichkeit $p_c \in [0,1]$ wird ein Crossover (eine Paarung) von zwei Individuen durchgeführt. Über die Mutation, die mit der Mutationswahrscheinlichkeit $p_m \in [0,1]$ durchgeführt wird, werden geringe Änderungen an dem neuen Individuum vorgenommen. Der Prozess aus Selektion, Crossover und Mutation wird solange fortgeführt, bis die Population P' voll ist. Dann wird P = P' und der Ablauf startet von neuem. Welche Werte für die Größe der Population, die Anzahl der Generationen und die Mutations- und Crossoverwahrscheinlichkeiten zu wählen sind, hängt stark von der Komplexität des Problems ab. Umfangreiche Parameterstudien hierzu wurden in VON GÖSSELN (2017) durchgeführt.

3.3 Ergebnisse der Effizienzoptimierung

Das Endergebnis der Optimierung ist ein Ablaufplan (csv-Datei), in dem für jede beteiligte Person genau aufgelistet wird, welche Punkte wann angefahren, aufgebaut, gedreht, abgebaut oder gemessen werden sollen.

Abbildung 5 zeigt das Beispielnetz für eine tachymetrische Netzmessung. Es befindet sich in der Nordstadt von Hannover in unmittelbarer Nähe zum Geodätischen Institut. Der Ablauf der Messung wurde mit 100 Individuen und 50 Generationen optimiert. Die simulierte Gesamtdauer beträgt 3,97 Stunden, die Gesamtkosten liegen bei 357 Euro und als beste Standpunktanordnung wurde folgende Reihenfolge ermittelt: 1710-1707-1910-1909-P2-1907-1905-1904-1901-1908-1906-1902-1903. Umfangreiche Parameterstudien für die Optimierung verschiedener Netzgrößen und Vergleiche mit intuitiv erstellten Ablaufplänen sind in VON GÖSSELN (2017) zu finden. Hierin ist erkennbar, dass der Zeitvorteil gegenüber der intuitiv erstellten Reihenfolge stark von der Netzgröße abhängt. Für kleinere Netze (Anzahl

der Punkte ≤ 9) mit kurzen Wegen ergibt sich kaum ein zeitlicher Vorteil. Für mittlere bis größere Netze beträgt der Zeitvorteil in der Parameterstudie 30 Minuten und mehr.

Ausschnitte der erzeugten csv-Dateien der besten Lösung sind in Abbildung 6 (Beobachter) und Abbildung 7 (Gehilfe) zu finden.



Abb. 5: Beispielnetz der tachymetrischen Netzmessung mit Anzeige der Position des Beobachters im Messgebiet

Start	Ende	von	nach	Entfernung	Taetigkeit	Ausrichtung	Messpunkte
[Min]	[Min]	Punkt	Punkt	[m]		zu	
0.0	11.8	Aussen	1710	0.0	Aufbau SP		
22.0	24.6	1710	1710	0.0	Messung		1908, 1907
24.6	27.5	1710	1710	0.0	Umbau	1907	
27.5	41.2	1710	1707	163.4	Aufbau SP		
45.7	49.7	1707	1707	0.0	Messung		1906, 1910, 1907
49.7	52.5	1707	1707	0.0	Umbau	1910	
52.5	59.1	1707	1910	138.7	Umbau SP		
59.8	63.8	1910	1910	0.0	Messung		1707, 1909, 1906
63.8	66.7	1910	1910	0.0	Umbau	1909	
		•••					
232.1	233.6	1903	1903	0.0	Abbau		
233.6	236.0	1903	1904	75.8	Abbau		

Abb. 6: Auszug aus der csv-Datei der Tätigkeiten des Beobachters

Start	Ende	von	nach	Entfernung	Taetigkeit	Ausrichtung
[Min]	[Min]	Punkt	Punkt	[m]		zu
0.0	10.2	λussen	1908	0.0	Λuľbau	1710
10.2	22.0	1908	1907	136.6	Aufbau	1710
22.0	33.2	1907	1906	90.5	Aufbau	1707
33.2	44.0	1906	1910	54.5	Aufbau	1707
44.0	45.7	1910	1907	129.0	Drehen	1707
45.7	58.2	1907	1909	200.2	Aufbau	1910
58.2	59.8	1909	1906	125.6	Drehen	1910
59.8	71.7	1906	1903	137.5	Aufbau	1909
71.7	73.4	1903	1906	137.5	Drehen	1909
	•••	•••				
233.6	235.5	1506	1902	33.0	Abbau	
235.5	238.1	1902	1909	93.5	Abbau	

Abb. 7: Auszug aus der csv-Datei der Tätigkeiten des Gehilfen 1

Für jede Tätigkeit wird die Start- und die Endzeit in Minuten angegeben. In der dritten und vierten Spalte ist angegeben, von welchem zu welchem Punkt sich die Person bewegt. *Aussen* bedeutet, dass in diesem Fall keine Basis angeben wurde, von der aus die Messung gestartet wird. Daher ist der erste Punkt, der in die Distanz- und Zeitberechnung einbezogen wird, der erste Aufbaupunkt. Die Entfernung ist entsprechend 0. Als Tätigkeiten gibt es die Optionen Aufbau SP, Aufbau, Messung, Umbau SP, Umbau, Drehen und Abbau. Beim Aufbau eines Anschlusspunktes (Aufbau, Umbau, Drehen) wird der Punkt angegeben zu dem der Punkt auszurichten ist. Für die Tätigkeit Messung wird angegeben, welche Punkte von dem Standpunkt aus angemessen werden sollen. Diese csv-Dateien werden genutzt, um den geplanten Ablauf mit der entwickelten Android-App ARACHNE in den Außendienst zu übertragen.

4 Umsetzung der Optimierungsergebnisse in der Android-App ARACHNE für den Außendienst

4.1 Ziele der App

Neben der optimierten Planung der Messung ist auch eine wirtschaftliche Ausführung der geplanten Messung im Außendienst wichtig. Die Umsetzung der Planung in der Androidbasierten App ARACHNE bietet gleich mehrere Vorteile gegenüber der analogen Ausführung. Als erster Aspekt ist die erleichterte Navigation zu den Punkten zu nennen. Des Weiteren werden die Ziel- und Standpunkthöhen digital erfasst und können direkt weiterverarbeitet werden. Gleiches gilt für die Messwerte, die sofort für eine Auswertung zur Verfügung stehen. Dabei übernimmt die App die gesamte Steuerung des Tachymeters. Sobald die ersten beiden Punkte eines Standpunktes gemessen wurden, werden die weiteren Punkte und Sätze automatisch anhand einer Punktliste angefahren und gemessen. Weitere Daten, die während der Arbeit mit der App erfasst werden, wie die Zeiten, wann welche Aufgabe erledigt wurde oder wie lange eine Person für die Wege von Punkt zu Punkt benötigt, können zur Verbesserung des Laufzeitmodells und des Wegenetzes genutzt werden. Sollte es während der Messung zu Störungen kommen und der geplante Ablauf nicht durchführbar sein, könnte prinzipiell eine neue optimierte Durchführungsvariante unter Berücksichtigung der bereits erledigten Messungen gerechnet werden.



Abb. 8: Aufgabendialoge der App ARACHNE

Anforderungen an die App sind, neben der Führung des Nutzers durch die verschiedenen Aufgaben, die Kommunikation der Nutzer untereinander, die Steuerung des Messgerätes (Kapitel 4.3) sowie die Übertragung des Daten in Echtzeit an eine Datenbank auf einem Server (Kapitel 4.4).

4.2 Aufbau der App

Die App ist dialogbasiert aufgebaut und führt nacheinander durch die zu erledigenden Aufgaben. Eine Aufgabe kann erst abgeschlossen werden, wenn die dafür nötigen Schritte bestätigt wurden. Zur Orientierung und Navigation zu den einzelnen Punkten ist eine Kartenansicht implementiert, die zu jedem beliebigen Zeitpunkt aufgerufen werden kann. In Abbildung 8 sind drei beispielhafte Dialoge für den Aufbau eines Statives und den eines Tachymeters sowie den Abbau eines Punktes dargestellt.

Als Eingabewerte in ARACHNE wird eine xml-Datei verwendet, die die Messpunkte, das Beobachtungsnetz sowie Wegepunkte und das Wegenetz enthält. Diese Datei ist dieselbe, die auch in das Optimierungsprogramm SimPle-Net eingelesen wird. Als weitere Eingabedateien dienen die csv-Dateien mit den Ablaufplänen der Personen (Abbildung 6 und 7).

4.3 Datenübertragung und Verbindungsschnittstellen

Die entwickelte Android-Anwendung beinhaltet verschiedene Schnittstellen zur Kommunikation und Datenübertragung mit dem Messinstrument und zur Übertragung der Daten und Kommunikation mit dem Server. Die Kommunikation zwischen Server und Endgerät verläuft über eine verschlüsselte SSL-Verbindung. Die Datenbank selbst ist gekapselt und nicht direkt von außen erreichbar. So werden die Serveranfragen durch ein PHP-Skript gefiltert, um SQL-Injections zu verhindern und sicherzustellen, dass nur valide Daten in die Datenbank eingetragen werden.

Die Verbindung zum Messgerät erfolgt über Bluetooth. Voraussetzung hierfür ist, dass sowohl das Android-Endgerät als auch das Messgerät die Kommunikation über Bluetooth unterstützen und diese aktiviert ist. Sobald die Bluetoothverbindung besteht, können die Instrumentenfunktionen über Leica GeoCOM-Befehle gesteuert werden. Die Rohmesswerte werden über die GeoCOM-Schnittstelle vom Messgerät an das Android-Endgerät zurückgesendet und dort empfangen und verarbeitet.

Eine direkte Kommunikation der Benutzer untereinander ist in der aktuellen Version nicht möglich. Lediglich der Status der Aufgaben kann von anderen Nutzern über eine Datenbankabfrage eingesehen werden.

4.4 Datenbank

Bei der zugrundeliegenden Datenbank handelt es sich um eine PostgreSQL mit PostGIS-Erweiterung (POSTGRESQL 2019), welche zusammen mit einem Apache-Webserver auf einem Debiansystem läuft. PotsgreSQL bietet den Vorteil, dass es räumliche Datentypen und viele räumliche Operatoren, wie Koordinatentransformationen, Puffer oder räumliche Suchabfragen unterstützt. Des Weiteren verfügt PostgreSQL über eine sehr feingliedrige Benutzerrollenverwaltung, mit der sich die Zugriffsberechtigungen einzelner Tabellen oder Bereiche auf einzelne Operationen beschränken lassen.

Zur Speicherung und Archivierung der relevanten Daten werden drei verschiedene Tabellen angelegt, eine Tabelle für die Nutzerpositionen, eine für die Messwerte und eine Hilfstabelle.

Während der Messung wird die Position der einzelnen Nutzer erfasst und zusammen mit einer NutzerID in die Tabelle für Nutzerpositionen gespeichert. Die NutzerID wird bei jedem neuen Projekt zufällig vergeben und sorgt dafür, die Bewegung eines Nutzers in Form einer Trajektorie zu speichern. Neben den GNSS-Positionen werden auch die zugehörigen Zeitstempel erfasst. Diese Daten können dazu verwendet werden, das Laufzeitmodell für die Netzplanung (vgl. Tabelle 1) zu optimieren und somit genauere Vorhersagen zu Wegezeiten oder Zeiten für einzelne Arbeitsschritte zu treffen.

Die Rohmesswerte des Tachymeters werden in die Messdatentabelle gespeichert. Dabei werden neben der Horizontalrichtung, dem Vertikalwinkel sowie der Distanz (alles in zwei Lagen) auch die Standpunkt- und Zielpunktnummer sowie die Instrumenten- und Zieltafelhöhe gespeichert. Die Zahl der Vollsätze pro Standpunkt kann beliebig angepasst werden. Die zeitnahe Übertragung der Messwerte auf den Server bietet den Vorteil, dass Teilnetzte des Messprojektes zeitnah und automatisiert ausgeglichen werden können. Hierdurch können Problemstellen im Netz frühzeitig erkannt werden und der Messablauf entsprechend angepasst werden. Die automatisierte Ausgleichung auf dem Server kann z. B. mit der Software JAG3D (LÖSLER 2019) durchgeführt werden, mit der eine Steuerung über Kommandozeilenbefehle möglich ist.

Die Hilfstabelle wird dazu verwendet, abgeschlossene Aufgaben zu vermerken, sodass den anderen Nutzern bzw. dem Beobachter der Status der Aufgaben angezeigt werden kann. So

kann dieser benachrichtigt werden, sobald ein Punkt fertig aufgebaut ist und mit der Messung begonnen werden kann.

Sollte die Mobilfunkverbindung eine Kommunikation mit dem Server aufgrund schlechter Netzabdeckung oder vorübergehenden Empfangsverlusts nicht zulassen, werden die Daten lokal auf dem jeweiligen Endgerät gespeichert. Sobald wieder eine Internetverbindung vorhanden ist, werden die lokal zwischengespeicherten Daten an den Server übertragen. Ohne Internetempfang kann aufgrund der fehlenden Serverkommunikation kein Austausch unter den Nutzern sowie keine Benachrichtigung über Statusänderungen von Aufgaben stattfinden.

Serverseitig werden die technischen und organisatorischen Anforderungen im Datenschutz für Schutzstufe C (LFD NIEDERSACHSEN 2018) eingehalten. In einer späteren Version sollen auch verschiedene Benutzerrollen mit eigenen Logins realisiert werden, sodass unterschiedliche Berechtigungen für Beobachter und Gehilfen vergeben werden können.

4.5 Praktische Erprobung der App

Die Funktionalitäten der App wurden in einem Praxistest erprobt. Als Testgebiet wurde das Netz im Prinzengarten (Abbildung 5) verwendet. Zur Erprobung der Funktionalitäten wurden auch ungünstige Standpunkte und nicht vorhandene Sichten gewählt.

Der praktische Test, an dem auch eine Person mitwirkte, die an der Entwicklung der App nicht beteiligt war, hat gezeigt, dass die gewählte Darstellung der Aufgaben intuitiv war, die Anzeige des Fortschritts der Nutzer funktionierte und dass nach einer kurzen Einarbeitungszeit eine Beschleunigung des Messablaufs erreicht werden kann. Die Echtzeitübertragung der Daten an die Datenbank sowie die Steuerung des Tachymeters funktionierten trotz des zwischenzeitlichen Ausfalls eines Mobiltelefons aufgrund eines schwachen Akkus gut.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das entwickelte Verfahren der simulationsbasierten Optimierung mit den Petri-Netzen als Modellierungsverfahren und den genetischen Algorithmen als Optimierungsverfahren ist als Planungswerkzeug für die tachymetrischen Netzmessungen gut geeignet. Die App ARACH-NE überträgt den geplanten Ablauf in den Außendienst und unterstützt die Nutzer (Beobachter und Gehilfen) durch die Kartenkomponente und den dialogbasierten Aufbau bei der Durchführung der Netzmessung. Als vorteilhaft erweist sich die Möglichkeit, dass die Messung bereits vor Ort ausgewertet werden kann, da alle Daten hierfür in einer Datenbank auf dem Webserver gespeichert werden. Mit Hilfe der während der Nutzung der App automatisch erfassten Zeiten und Positionen ist eine stetige Verbesserung des Laufzeitmodells und des Wegenetzes möglich. Dadurch wird ein realistischeres Simulationsergebnis erreicht.

Durch die automatische Erfassung der bereits durchgeführten Tätigkeiten wurde die Grundlage für eine Neuoptimierung der Abläufe während der Messung geschaffen. Eine Neuoptimierung, die notwendig werden könnte aufgrund von Störungen während der Messung, müsste dann nur noch für die verbliebenen Standpunkte auf dem Webserver berechnet werden. Zur Verbesserung der App wurde von den Testern eine Chatfunktion zwischen den Nutzern als hilfreich eingestuft. Insgesamt wurde die App und die Ablaufplanung als sehr übersichtlich und unterstützend empfunden.

Literatur

- ABEL, D. (1990): Petri-Netze für Ingenieure: Modellbildung und Analyse diskret gesteuerter Systeme. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag
- BOERSCH, I., HEINSON, J.& SOCHER, R. (2007): Wissensverarbeitung: Eine Einführung in die künstliche Intelligenz für Informatiker und Ingenieure. 2. Auflage. München: ELSEVIER Spektrum Akademischer Verlag, 2007. –ISBN 978-3-8274-1844-9
- DARE, P. & SALEH, H. (2000): GPS network design: logistics solution using optimal an nearoptimal methods. In: Journal of Geodesy, Nr. 74/2000, 467-478
- DOMSCHKE, W. & DREXL, A. (2005): Einführung in Operations Research. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin and Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2005 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 978-3540234319
- FAUST, H. (2019): Weiterentwicklung des elektronischen Feldbuchs SPIDER zur Unterstützung bei tachymetrischen Netzmessungen. Bachelorarbeit am Geodätischen Institut, unveröffentlicht
- GOLDBERG, D. E. (1989): Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Boston : Addison-Wesley, 1989. – ISBN 9780201157673
- VON GÖSSELN, I. (2017): Simulationsbasierte Effizienzoptimierung von Messprozessen am Beispiel der tachymetrischen Netzmessung, Dissertation. München: DGK, Reihe C, Nr. 800.
- GRAFAREND, E. W., HEISTER, H., KELM, R., KROPFF, H. & SCHAFFRIN, B. (1979): Neue Folge, Buchreihe. Bd. 11: Optimierung geodätischer Meßoperationen. Karlsruhe: Wichmann Verlag, 1979. – ISBN 3-87907-052-0
- LFD Niedersachsen (2019): Die Landesbeauftragte für den Datenschutz Niedersachsen, Schutzstufenkonzept der LfD Niedersachsen
- LÖSLER, M. (2019): JAG3D (Java Applied Geodesy 3D), software.applied-geodesy.org/de/ (26.08.2019)
- MAINZ, J. (2018): Evaluation und Verbesserung des Laufzeitmodells zur automatisierten Planung tachymetrischer Netzmessungen. Bachelorarbeit am Geodätischen Institut, unveröffentlicht
- OBERWEIS, A. (1996): Modellierung und Ausführung von Workflows mit Petri-Netzen. Stuttgart, Leipzig: Teubner Verlag (Teubner-Reihe Wirtschaftsinformatik)
- POSTGRESQL (2019): PostgreSQL, www.postgresql.org/ (04.11.2019)
- REHR, I., RINKE, N., KUTTERER, H. & BERKHAHN, V. (2011): Maßnahmen zur Effizienzsteigerung bei der Durchführung tachymetrischer Netzmessungen. In: AVN (Allgemeine Vermessungs-Nachrichten), Nr. 1/2011, 2–13
- REISIG, W. (2010): Petrinetze: Modellierungstechnik, Analysemethoden, Fallstudien. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag (Leitfäden der Informatik)
- SALEH, H. A. & CHELOUAH, R. (2004): The design of the global navigation satellite system surveying networks using genetic algorithms. In: Engineering Applications of Artificial Intelligence, Nr. 17/2004, 111–122. – dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2003.11.001

- STAUDINGER, M. (1999): A Cost Orientated Approach to Geodetic Network Optimisation. Vienna, University of Technology, Dissertation, 1999
- STOLIKER, P. C. & ANDERSON, E. G. (1982): Optimization of observing logistics in geodetic networks. In: Proceedings of the International Symposium on Geodetic Networks and Computations of the International Association of Geodesy. Munich, August 31 to September 5, 1981. München: DGK, Reihe B, Nr. 258, 1982, 22–29

Position und Orientierung von schwimmenden Messplattformen mit Low-Cost IMUs und Laser-Punktwolken

Harry WIRTH

1 Motivation und Zusammenfassung

Zur Erfassung des von Wasser bedeckten Teils der Oberfläche der Erde werden sogenannte hydrographische Vermessungssysteme eingesetzt. Die Positionierung der schwimmenden oder tauchfähigen Messplattformen erfolgt mit GNSS und Inertial Measurement Units (IMU). Besonders im Binnenbereich werden die GNSS-Signale oder der Korrekturdatenempfang häufig unterbrochen. Der Markt bietet eine Fülle von integrierten Positionierungssystemen an, die die Messergebnisse von GNSS und IMUs kombinieren. Solch ein integriertes System kann je nach Genauigkeitsanspruch relativ kleine GNSS-Empfangslücken (zwischen wenigen Sekunden bis zu einer Minute) kompensieren. Bei hohen Genauigkeitsansprüchen sind die Investitionskosten jedoch beträchtlich (> 100 000 \in). Im Projekt wurde daher untersucht, inwiefern kostengünstige Smartphone-Sensoren ebenfalls geeignet sind.

Um die trockenfallenden angrenzenden Uferbereiche (z. B. in Seehäfen) vom Wasser aus flächendeckend zu erfassen, werden zunehmend Laserscanner in die Vermessungssysteme integriert. Im Rahmen des Projekts wurde eine Methode zur gleichzeitigen Objektraumaufnahme und Bestimmung der Position und Orientierung der Messplattform aus Laserpunktwolken entwickelt. In GNSS-Empfangslücken kann die Drift der Inertial-Sensoren durch diese SLAM-Technik (Simultaneous Location and Mapping) kompensiert werden.

2 Einleitung

Ein hydrographisches Vermessungssystem besteht selbst in der einfachsten Form aus einer Fülle von Sensoren, die von verschiedenen Herstellern stammen können. In diesem Beitrag soll die Bestimmung von Position und Orientierung der Messplattform im Raum unabhängig von der Tiefenmessung betrachtet werden, die meist mit elektroakustischen Methoden, z. B. Multibeam-Echosounder, erfolgt. Der Systemaufbau ist prinzipiell dem für Airborne Laserscanning üblichen Aufbau sehr ähnlich. Mit GNSS wird die Position der Antenne ermittelt und mit einer IMU die Orientierung im Raum, wobei diese Sensoren zunehmend als integrierte tightly coupled Systeme ausgeführt werden, siehe z. B. Produkte der Firma Applanix, (z. B. POS MV).

In vielen marktgängigen hydrographischen Systemen werden die Messwerte der Sensoren wie heterogene Sensoren, also komplementär, fusioniert, ohne durch intelligente Verknüpfung der Daten eine Genauigkeitssteigerung oder einen Informationsgewinn zu erzielen. In zwei Projekten wurde daher versucht, die Anzahl der Sensoren kostengünstig zu erhöhen und deren Messwerte für eine kooperative Fusion, d. h. zumindest zur Steigerung der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit zu verwenden.

Besonders im Bereich der Inertialnavigation haben die kostengünstigen MEMS eine große Fülle von Anwendungen ermöglicht; zu nennen sind Unmanned Aerial Vehicles (UAV) oder Lagereferenzsysteme (Attitude Heading Reference Systems, AHRS). Die einfachsten und kostengünstigsten Inertialsensoren werden im Consumer-Bereich verbaut, z. B. in Smartphones. Bei diesen Sensoren ist davon auszugehen, dass aufgrund der geringen benötigten Genauigkeit eine Kalibration fehlt und die Genauigkeit von der Systemdynamik, d. h. der Art und Intensität der Bewegung, sowie der Temperatur abhängt. Im Folgenden werden ein neues Feld-Kalibrierverfahren und eine Methode zur Schätzung der veränderlichen Anteile der Parameter während der Messung vorgestellt.

Die Daten aller Sensoren werden im Allgemeinen mithilfe eines erweiterten Kalman-Filters (EKF, z. B. in GELB (1974)) oder eines Partikelfilters fusioniert.

Die durch die Integration der Inertialen Sensoren auftretende Drift wird im Landbereich häufig durch Methoden wie (Zero-)Velocity-Updates (ZUPT) oder Coordinate-Updates (CUPT) und Odometer (Wegmesser) reduziert. Auf dem Wasser stehen diese Informationen nicht zur Verfügung. In dieser Arbeit sollen die Fehler der mittels Kalman-Filter geschätzten Pose (Position und Orientierung) in vorgebbaren Zeitabständen durch die simultane Aufnahme der Uferbereiche mit Laserscannern ermittelt und im EKF berücksichtigt werden. Im Bereich der Robotic werden solche Ansätze als SLAM-Verfahren (Simultaneous Location and Mapping) bezeichnet.

3 Fehlermodelle für die Low-Cost Inertialsensoren

Die inertialen Messwerte, d. h. Beschleunigungen, Drehraten sowie die magnetischen Feldstärken, sind mit systematischen Fehlern behaftet. Die Low-Cost Sensoren werden werkseitig in der Regel aus Kostengründen nicht kalibriert. Die Strategie zur Nutzung dieser Sensoren in einem Positionierungssystem sieht daher ein zweistufiges Vorgehen vor:

- 1. sensorspezifisches Fehlermodell definieren und die konstanten Parameter ermitteln,
- 2. Modellieren der Drift der Nullablagen der Sensoren separat im EKF.

3.1 Fehlermodell für Beschleunigungsmesser

Bei Beschleunigungsmessern werden die Sensorfehler mit 9 Parametern modelliert – drei Maßstabsfaktoren, drei Nicht-Orthogonalitätsparametern und drei Nullpunktabweichungen. Im Rahmen der Untersuchungen wurden die ersten sechs Parameter als konstant angesehen, wohingegen die Nullablagen aufgrund der Messbedingungen einer Drift unterliegen können. Daher wird für die Sensorkalibrierung folgender funktionaler Zusammenhang angenommen, siehe SIPOS et al. (2012), wobei das orthogonale Koordinatensystem S_S im Sensor selbst liegt:

$$g^{S} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{S} \cdot \begin{pmatrix} a_{gemessen}^{S} - bias^{S} \end{pmatrix} = M^{-1} \cdot \begin{pmatrix} a_{gemessen}^{S} - bias^{S} \end{pmatrix}$$
$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \epsilon_{1} & 1 & 0 \\ \epsilon_{2} & \epsilon_{3} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_{x} & 0 & 0 \\ 0 & S_{y} & 0 \\ 0 & 0 & S_{z} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_{x}^{S} & bias_{x}^{S} \\ a_{y}^{S} - bias_{y}^{S} \\ a_{z}^{S} & bias_{z}^{S} \end{pmatrix}$$
(1)

 g^{S} ist der fehlerfreie Schwerevektor, wenn sich das Plattform-System in Ruhe befindet; D ist die Matrix, die durch Multiplikation die Nicht-Orthogonalität der Achsen korrigiert; S korrigiert die Offsets der Achsen; $a_{gemessen}^{S}$ bezeichnet die gemessenen Beschleunigungen.

In Gleichung (1) sind feste Parameter und Beobachtungen in einem nichtlinearen Zusammenhang miteinander verbunden. Die Parameter werden bei hochwertigen IMUs herstellerseitig durch relativ aufwändige Laborversuche ermittelt, wobei die Messwerte der IMUs in besonders ausgewählten Positionen erfasst werden, bei denen die Richtung der Schwerebeschleunigung als bekannt vorausgesetzt wird. Da dies nur mit hohem Geräteaufwand möglich ist, werden daher im Folgenden "Feld"-Verfahren betrachtet. Stellt man Gleichung (1) um und berechnet die Norm $|g^{S}|$ des Schwerevektors, so lässt sich die Information über den Betrag der Schwere am Ort der Messung richtungsunabhängig nutzen:

$$G(\hat{x},\hat{l}) = g_x^2 + g_y^2 + g_z^2 - |g^S|^2 = 0$$
⁽²⁾

In dem Vektor \hat{x} werden die Schätzwerte der unbekannten Parameter aufgelistet und im Vektor \hat{l} die ausgeglichenen Beobachtungen. WENDEL (2011) und WILLEMSEN (2016) treffen zur Lösung des Problems vereinfachende Annahmen, z. B. werden nur die Skalierungsparameter geschätzt, sodass das einfache Gauß-Markov-Modell angewendet werden kann. Das Ergebnis ist dann ein partiell kalibriertes Gerät, dessen Datenqualität nicht optimal ist und daher allenfalls für einfache navigatorische Anwendungen geeignet ist. SIPOS et al. (2012) minimieren die Residuenquadratsumme mithilfe eines vergleichsweise aufwändigen Levenberg-Marquart-Algorithmus für nichtlineare Optimierungsprobleme mit einem ebenfalls relativ geringen Genauigkeitsgewinn.

Eine vollständige Optimierung wird erreicht, wenn die gesuchten Parameter iterativ nach der Methode Total Least Squares (TLS), wie von z. B. REINKING (2008) beschrieben, geschätzt werden. Den Sollschwerewert entnimmt man einem geeigneten Schweremodell. In Abbildung 1 wird das Ergebnis der Kalibrierung eines Samsung S4 gezeigt. Die Signifikanz aller Parameter konnte mit t-Tests bestätigt werden. Die Standardabweichung für die Bias ist durchschnittlich kleiner als 0,001 m/s². Dies ergibt bei 10 Sekunden Integrationsintervall theoretisch eine Positionsdrift von maximal 5 cm.

Während des Kalibriervorgangs wird wiederholt mit dem ruhenden Smartphone für wenige Sekunden gemessen. Nach jeder Ruhephase wird das Gerät langsam um kleine Beträge um eine horizontal ausgerichtete Achse gedreht und nach ca. einer 10°-Rotation eine neue Ruhelage eingenommen, bis ein Vollkreis beschrieben wird. Der Vorgang wird für alle Achsen mit einer um 180° geänderten Ausrichtung wiederholt. Die in Abbildung 1 sichtbaren Ausreißer sind während der Drehungen von einer Ruhelage zur nachfolgenden Ruhelage entstanden. Diese verfälschten Messwerte werden in der Auswertung durch Korrelation mit den Drehraten erkannt und vorab gefiltert. Um die Ruhelage sicherzustellen, kann das Smartphone entweder auf einem Drehtisch montiert werden, oder man verwendet einfacherweise eine Holzkiste mit nahezu orthogonalen Seitenwänden, längs derer das Smartphone geführt werden kann.



Abb. 1: Vergleich von gemessenem Betrag der Beschleunigungen (ausschwingende Kurve) mit korrigiertem Betrag der Beschleunigungen (Kurve etwa bei 9,78 m/s²) eines Samsung S4.

Mit einem kalibrierten Smartphone können die Rollwinkel φ und Pitchwinkel θ nach folgenden Gleichungen aus dem ungestörten Schwerevektor berechnet werden, siehe auch WENDEL (2011):

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\tilde{a}_y^B}{\tilde{a}_z^B} \right) \tag{3}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\tilde{a}_x^B}{(\sin(\varphi) \, \tilde{a}_y^B + \cos(\varphi) \, \tilde{a}_z^B)} \right) \tag{4}$$

Der Vektor \tilde{a}^B bezeichnet die Beschleunigungen, die eine fehlerfreie IMU im körperfesten ruhenden System S_B messen würde. Bei Versuchen mit diversen Smartphones wurden Vergleichsstandardabweichungen von besser als 0,2° erreicht.

3.2 Fehlermodell für Magnetometer

Das vollständige Fehlermodell für Magnetometer umfasst neben den im letzten Kapitel für Beschleunigungsmesser genannten Parametern noch Störungen des Magnetfeldes aufgrund der konstruktiven Ausführung der Messplattform und des Messumfeldes. Diese Fehler werden in zwei verschiedene Fehlertypen (RENAUDIN 2010) unterschieden:

- Soft Iron Fehler werden von ferromagnetischen Materialien im Umfeld des Sensors auch von außerhalb der Messplattform erzeugt. Diese Materialien erzeugen nicht notwendigerweise ein eigenes Magnetfeld, aber sie beeinflussen das Erdmagnetfeld. Ihre Wirkung hängt von der Orientierung der Messplattform ab.
- Hard Iron Fehler werden durch Magnetfeldquellen mit einem permanenten Feld auf der Messplattform selbst erzeugt. Diese Magnetfelder erzeugen eine konstante Nullablage,

die additiv das Erdmagnetfeld verfälscht. Ihre Wirkung unterscheidet sich nicht von dem Bias des Sensors.

Bei einer Kalibration können die lokalen Effekte der Soft Iron Fehler ermittelt werden. An einer anderen Lokation wirken jedoch wieder andere Fehler. Daher wurde in den weiteren Untersuchungen für die Vorkalibration der Magnetometer das gleiche Fehlermodell wie für Beschleunigungsmesser angewendet. Den Sollwert der Erdmagnetfeldstärke entnimmt man einfacherweise dem World Magnetic Model (WMM 2019) der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Nach dem Einbau der Smartphones in eine Messplattform wirken andere Soft und Hard Iron Fehler, so dass eine zweite Kalibration der Parameter erforderlich wird, siehe Kapitel 4.4.

Mit einem kalibrierten Smartphone kann aus Magnetfeldmessungen nach Berücksichtigung der Deklination δ und Deviation *Abl* der Headingwinkel ψ folgendermaßen berechnet werden, siehe auch WENDEL (2011):

$$\psi = \psi' + \delta + Abl = \tan^{-1} \left(\frac{\widetilde{m}_{y}^{LL*}}{\widetilde{m}_{\chi}^{LL*}} \right) + \delta + Abl.$$

$$= \tan^{-1} \left(\frac{c(\varphi)\widetilde{m}_{y}^{B} - s(\varphi)\widetilde{m}_{z}^{B}}{c(\theta)\widetilde{m}_{\chi}^{B} - s(\theta)s(\varphi)\widetilde{m}_{y}^{B} - s(\theta)c(\varphi)\widetilde{m}_{z}^{B}} \right) + \delta$$

$$+ Abl.$$
 (5)

Der Vektor \tilde{m}^B bezeichnet die Magnetfeldstärken, die ein fehlerfreies Magnetometer im körperfesten ruhenden System S_B messen würde. Der Vektor \tilde{m}^{LL*} bezeichnet die Magnetfeldstärken, die sich bei der Projektion der Feldstärke auf die Achsen eines horizontierten, aber nicht nordorientierten Horizontsystems S_{LL}* ergeben würden. Die Parameter Deklination und Deviation sind nicht trennbar und nur beobachtbar, wenn das System in Bewegung ist und eine unabhängige Beobachtung für die Bewegungsrichtung aus GNSS vorliegt. Sie werden daher zusammengefasst und in Form der Zustandsgröße δ' modelliert. In der Praxis sind von guten Magnetkompassen im ungestörten Erdmagnetfeld typischerweise Unsicherheiten zwischen 0,5° und 3° zu erwarten. Wenn keine Störungen durch Soft Iron Effekte vorliegen, kann mit Magnetfeldsensoren im EKF die Drift der aus Drehratensensoren integrierten Orientierungswinkel wirksam begrenzt werden.

4 Sensorfusion im EKF

Die Zustandsschätzung für das realisierte hydrographische Vermessungssystem erfolgt durch ein diskretes Extended Kalman Filter. Das EKF fusioniert folgende Sensordaten:

- zwei GNSS-RTK-Empfänger;
- ein AHRS mit einer Winkelmessunsicherheit von 0,2°;
- mindestens zwei Smartphones;
- einen terrestrischen Laserscanner.

Es handelt sich um einen rekursiven Auswertealgorithmus, der sich aus zwei Bestandteilen, der System- und der Messgleichung, zusammensetzt. Die Ergebnisgrößen der Schätzverfahren beschreiben unmittelbar den Systemzustand (GELB 1974).

4.1 Zeitzuordnung der Beobachtungsgrößen

Alle Messwerte des AHRS (Ellipse der Fa. SBG) werden mit UTC-Zeitmarken versehen, indem ein GNSS-RTK-Empfänger unmittelbar per Kabel damit verbunden wird und mit 5 Hz UTC-Zeit, Position, Geschwindigkeit, Speed Over Ground (SOG) und Course Over Ground (COG) im NMEA-Format zugeführt werden. Die Genauigkeit der UTC-Zeitzuordnung setzt sich aus der Ablage zwischen interner Uhr und UTC sowie der Verzögerung im Sensor zwischen Messwertermittlung und -bereitstellung (Totzeit) zusammen. Die Genauigkeit der UTC-Zeitzuordnung gelingt nach BREITENFELD et al. (2015, S. 159 f.) bei Berücksichtigung der Übertragungsdauer mit einer Genauigkeit besser als 3 Millisekunden. Im Projekt HyDROS (siehe BREITENFELD et al. 2015, S. 160) wurde die Auswirkung der ungenauen UTC-Zeitzuordnung auf die Zielgrößen bei einem Schiff untersucht. Für die Orientierungswinkel ergab sich eine zusätzliche Unsicherheit von 0,04° und bei der Geschwindigkeitsschätzung eine Verschlechterung der Standardabweichung von 1 cm/s, was bei den meisten Anwendungen vernachlässigbar ist.

Die Smartphones liefern Rohdaten der Beschleunigungsmesser, der Drehratensensoren sowie magnetische Feldstärke, Luftdruck und GNSS-Daten. Die Messwerte werden zunächst durch eine Android-App mit der Smartphone-Uhrzeit versehen und erfasst. Nach der Datenübertragung zum Auswerterechner wird die Differenz zwischen der in den GNSS-Daten im NMEA-Format enthaltenen UTC-Zeit und der internen Uhrzeit berechnet und mit dem ausgleichenden Polynom durch diese Zeitreihe die Messwerte des Smartphones auf UTC-Zeit bezogen, siehe Abbildung 2.



Abb. 2: Synchronisation der Smartphone-Uhr mit UTC durch ausgleichendes Polynom.

Die Zeitdifferenzen zwischen GNSS-Daten und interner Uhr haben – wahrscheinlich aufgrund der begrenzten Rechenleistung des Smartphones – eine Schwankungsbreite von durchschnittlich ca. 4/100 Sekunden. Die Genauigkeit der UTC-Zeitzuordnung wird mithilfe der Zeitreihendarstellung bei dem getesteten Smartphone mit besser als 3 Millisekunden abgeschätzt. In dieser Zeit würde ein mit maximal 10 Knoten fahrendes Schiff 1,5 cm zurücklegen, was im Rahmen der zu erwartenden Messgenauigkeit des Gesamtsystems vernachlässigt werden kann.

Die Messwerte des in das Gesamtsystem integrierten Laserscanners von Z&F werden mithilfe eines vom Hersteller optional erhältlichen ublox-GNSS-Empfängers nach dem gleichen Prinzip wie bei dem AHRS auf UTC bezogen, so dass von der gleichen Genauigkeit wie bei den AHRS-Daten ausgegangen werden kann.

4.2 Genauigkeit und Frequenz der Beobachtungsgrößen

Das AHRS liefert nach Voreinstellung die Orientierungswinkel Roll, Pitch und ein Magnetkompass-Heading mit 50 Hz.

Die von den Smartphones gemessenen GNSS-Positionen haben eine sehr geringe Genauigkeit ($\sigma = 5 - 20$ m), jedoch liefern die GNSS-Sensoren aus der Beobachtungsgröße "Doppler-Geschwindigkeitsmessung" außerdem die Geschwindigkeit ($\sigma = 0,2$ m/s) und den Kurs ($\sigma = 15^{\circ}$) über Grund mit etwa 1 - 2 Hz. Diese Beobachtungen verringern zumindest die Drift der Lagekoordinaten bei Ausfall von GNSS-RTK.

Aus den Luftdruckmessungen wird bezogen auf die erste mit GNSS-RTK gemessene Höhe jeweils die absolute Höhe berechnet. Die relative Standardabweichung der barometrischen Höhenmessungen kann mit $\sigma = 0,3$ m bewertet werden. Diese unabhängige absolute Höhenmessung mit ca. 1 - 2 Hz begrenzt bei Ausfall von GNSS-RTK wirksam die Drift.

Die inertialen Messwerte der Beschleunigungen und Drehraten werden in den Smartphones mit 50 Hz erfasst.

Der Laserscanner wurde in den Profilmodus versetzt und die Geschwindigkeit des Rotationsprismas auf 50 Hz vorgegeben. Mit der eingestellten Laser-Qualität ergeben sich in der Praxis bis zu 500.000 Messwerte/Sekunde.

4.3 Definition der Zustandsgrößen

Das Systemverhalten des Sensorträgers wird mit Zustandsgrößen beschrieben. In erster Linie ist die dreidimensionale Position im globalen Bezugssystem S_E mit p_k^E (L^E , B^E , h^E) und die Orientierung $\Phi_k^{B.LL}$ ($\varphi^{B,LL}$, $\theta^{B,LL}$, $\psi^{B,LL}$) des Sensorträgers relativ zum lokalen Horizontsystem S_{LL} (LL= Local Level) zu bestimmen. Darüber hinaus werden weitere Zustandsgrößen eingeführt, die die dynamischen Zustände des Systems repräsentieren. Die Sensoren liefern Messgrößen, die mit systematischen Abweichungen behaftet sind. Die veränderlichen Anteile der Sensorfehler vervollständigen den Zustandsvektor:

• Geschwindigkeiten und Beschleunigungen im nordorientierten Horizontsystem $S_{LL}: (v_x^{LL}, v_y^{LL}, v_z^{LL}), (a_x^{LL}, a_y^{LL}, a_z^{LL}),$

- die Drehraten und Drehbeschleunigungen im fahrzeugfesten System S_B: (ω^B_x, ω^B_y, ω^B_z),
 bzw. (ώ^B_x, ώ^B_y, ώ^B_z),
- die Nullablagen der Inertialsensoren im System der IMU: $(b_{a,x}^{IMU}, b_{a,y}^{IMU}, b_{a,z}^{IMU})$ und $(b_{\omega,x}^{IMU}, b_{\omega,y}^{IMU}, b_{\omega,z}^{IMU})$ jeweils für jeden Sensor,
- bei Bedarf die Deklination und Deviation δ' für jedes Magnetometer,
- bei Bedarf die Einbauwinkel der Inertialsensoren relativ zur Bezugs-IMU im fahrzeugfesten System $\Gamma_k^{IMU,B}(\alpha, \beta, \gamma)$,
- bei Bedarf die Kalibrierparameter M und b_m^{B} der Magnetometer.

Somit ergibt sich bei einer IMU der vollständige Zustandsvektor \mathbf{x}_k in der Epoche k zu:

$$\mathbf{x}_{k} = \begin{bmatrix} a_{k}^{LL} & v_{k}^{LL} & p_{k}^{E} & \dot{\omega}_{k}^{B} & \omega_{k}^{B} & \Phi_{k}^{B.LL} & b_{a}^{IMU} & b_{\omega}^{IMU} & \delta' & M & b_{m}^{B} \end{bmatrix}^{I}$$
(6)

Aus Effizienzgründen werden möglichst einfache dynamische Modelle verwendet. Beispielsweise wird oft auf die Modellierung der Drehratenbeschleunigung und auch auf die translatorische Beschleunigung verzichtet. Ob dies sinnvoll ist, richtet sich nach dem Bewegungsverhalten der Plattform. Ein Landfahrzeug beispielsweise führt im Gegensatz zu einem Schiff quasi keine periodischen Bewegungen (Rollen, Stampfen) aus. BREITENFELD et al. (2015) haben mithilfe einer Spektralanalyse nachgewiesen, dass die Residuen der Roll-, Stampf- und Headingwinkel eine deutliche Energiespitze bei der Roll- und Stampffrequenz des Schiffes aufweisen, wenn die Drehratenbeschleunigung nicht modelliert wurde. Aus diesem Grund wird nicht von einer gleichförmigen Drehrate ausgegangen.

Bei nur einer IMU werden die Einbauwinkel (α, β, γ) und die Position des Sensors im fahrzeugfesten System vorab durch Einmessung und Kalibration bestimmt und fortan als feste Werte betrachtet. Das Alignement jeder weiteren IMU relativ zur ersten IMU kann beispielsweise bei einer ersten Kalibrierfahrt im Filter für die drei Winkel (α, β, γ) geschätzt werden. Die Methode, inertiale Navigationssysteme auf einer Plattform relativ zu einem Host oder einer Master-IMU zu initialisieren und zu kalibrieren, wird in der Literatur (WENDEL 2011) als Transfer Alignement bezeichnet. Die resultierende Genauigkeit ist von der Genauigkeit der UTC-Zeitzuordnung, der Genauigkeit der messtechnischen Bestimmung der relativen Lage im fahrzeugfesten System, der Stabilität der Plattform und nicht zuletzt von der Genauigkeit der Beobachtungsgrößen abhängig. Da diese Einflussfaktoren in gleicher Weise auch bei der Einzelkalibration auftreten, ist davon auszugehen, dass bei dem Transfer Alignement die gleiche Genauigkeit erreicht wird.

Auch die Kalibrierparameter der Magnetometer werden in einer Kalibrierfahrt ermittelt und bei Folgemessungen als konstant angenommen.

Die Nullablagen b_a^{IMU} und b_{ω}^{IMU} sind sensorspezifische Größen, die die temperatur- und dynamikbedingten Veränderungen der Parameter der Inertialsensoren auffangen sollen. Sie werden permanent mitgeschätzt. NASSAR & EL-SHEIMY (2005) haben mit zwei relativ hochwertigen IMUs mithilfe von Autokorrelationssequenzen untersucht, ob die Sensorfehlerdrift im Prozessrauschen als weißes Rauschen, Random Constant, Random Walk, Gauß-Markov-Prozess oder Autoregressionsprozess modelliert werden sollte. Bei der hochwertigen IMU lieferte der Autoregressionsprozess die besten Ergebnisse. Bei der untersuchten, etwas schlechteren IMU HG 1700 ergaben sich mit allen Ansätzen zwischen Random Constant bis Gauß-Markov-Prozess erster Ordnung gleich gute Ergebnisse. Das Rauschverhalten der Smartphones wurde daher zur Bestimmung der Güte der Sensoren mithilfe der simpelsten

Methode, der Allan-Varianz analysiert. Die Analyse zeigte, dass der Random Walk der Messgrößen den größten Einfluss hat:

Sensor	Angular Random Walk [deg/√h]	Bias Instability [deg/h]
Gyro X	$42,5 \pm 0,0824$	$13,0 \pm 1,31$
Sensor	Velocity Random Walk [m/s/√h]	Bias Instability [m/s/h]
Acceleration X	8,44 ± 0,0637	$3,64 \pm 0,984$

 Tabelle 1:
 identifizierte Haupt-Fehlerkoeffizienten eines Smartphones

Die Güte der Smartphone-Sensoren ist vergleichsweise gering, sodass eine Modellierung des Sensorbias als Random Walk-Prozess ausreichend erscheint. Aus dem gleichen Grund erübrigt sich die Kalibration zur Ermittlung von temperaturabhängigen Parametern.

4.4 Kalibration der Magnetometer im EKF

Nach dem Einbau der Magnetometer in die Messplattform kann die Gleichung (5) nicht unmittelbar verwendet werden. Zuvor ist eine erneute Kalibration erforderlich. Ein Schiff oder auch ein Landfahrzeug kann jedoch nicht mehr frei um alle Achsen bewegt werden. Daher wird ein Ansatz entwickelt, mit der die aus der Vorkalibration stammenden Parameter iterativ verbessert werden können.

Bei dem Verfahren wird vorausgesetzt, dass durch die Sensorkombination die Orientierungswinkel mit hoher Genauigkeit geschätzt werden können; insbesondere geben die zwei GNSS-RTK-Antennen das Heading vor. Die Sollwerte \tilde{m}^{LL} der magnetischen Feldstärke in einem lokalen nordorientierten Koordinatensystem S_{LL} können dem World Magnetic Model der NOAA entnommen werden. Damit ergibt sich folgende Messgleichung:

$$m^{B} = \mathbf{M} \cdot \widetilde{m}^{B} + bias_{m}^{B} = \mathbf{M} \cdot R_{B}^{LL,T} \widetilde{m}^{LL} + bias_{m}^{B}.$$
(7)

Die Drehmatrix $R_B^{LL,T}$ transformiert den magnetischen Feldvektor aus dem Horizontsystem in das fahrzeugfeste System S_B.

Die Horizontalkomponenten des Magnetfeldvektors beschreiben bei einem nicht kalibrierten, aber horizontierten Magnetometer eine Ellipse, die aufgrund der Hard Iron Effekte gegenüber dem Sollwert verschoben ist, siehe Abbildung 3. Die Kalibration beseitigt die Verzerrungen und die Translation, sodass sich ein zentrierter Vollkreis ergibt.

In Abbildung 3 ist gut zu erkennen, dass auch nach der Kalibration Abweichungen von ca. 2 bis 3 μ Tesla vom Sollwert auftreten, was bedeutet, dass in der Praxis die Standardabweichung eines Headings aus Magnetometerdaten etwa 5 – 9° beträgt.



Magnetische Feldstärke Rohmesswerte Smartphone 1



4.5 Die EKF-Architektur

Die Anzahl der Filterdurchläufe pro Sekunde richtet sich nach der Messfrequenz der Sensoren. In jeder Messepoche wird die Verträglichkeit zwischen den prädizierten Zuständen und den aktuellen Beobachtungen getestet (BREITENFELD et al. 2015, HEUNECKE 2013). Sollte dieser sogenannte Globaltest abgelehnt werden, wird iterativ nach Ausreißern gesucht und deren Einfluss durch Herabgewichtung fast vollständig beseitigt.

Das EKF liefert nur dann optimale Schätzwerte, wenn das Systemrauschen und das Messrauschen der Realität entsprechen. Bei den Berechnungen bestätigte sich die Vermutung, dass das dynamische Modell zutreffend formuliert wurde und daher eine adaptive Anpassung des Störrauschens an die Messplattformdynamik nicht erforderlich ist. Im Gegensatz dazu wird das Sensorrauschen bei den inertialen Smartphone-Sensoren stark von der Systemdynamik beeinflusst, d. h. es ist nicht konstant. Im Filter werden daher aus den Residuen der aktuellen und der Vorgängerepochen, analog des in BREITENFELD et al. (2015, S. 138 f.) beschriebenen Verfahrens, Varianzfaktoren berechnet und das Messrauschen adaptiv angepasst. Das Verfahren berechnet innerhalb eines vorgebbaren Korrelationszeitraums exponentiell abfallende Gewichte, so dass die unmittelbaren Vorgängerepochen stärker berücksichtigt werden als zeitlich weiter zurückliegende Epochen.

Das EKF liefert mit einer Rate von 50 Hz nicht nur Zustandsgrößen wie Position etc., sondern schätzt ebenfalls die Fehler und Alignementwinkel der inertialen Sensoren (Abbildung 4).

Das Filterergebnis soll durch kooperative Integration gestützt und verbessert werden, d. h. das EKF wird so erweitert, dass die Laserscannerdaten integriert werden können (WIRTH et al. 2019). Die mit dem Laserscanner innerhalb eines vorgegebenen Zeitraums gesammelten Daten werden mit einem Iterative Closest Point Verfahren (ICP) auf die bereits qualitätsgesichert in den Vorgängerepochen aufgenommenen Daten transformiert. Da die aktuellen Zustandsgrößen als Näherungswerte verwendet werden, ergeben sich durch das ICP-Verfahren Positions- und Orientierungsfehler der aktuellen Epoche inklusive stochastischer Vorinformation, die als Beobachtungen im EKF berücksichtigt werden. Das Verhältnis von 1:1 zwischen Erfassungsdauer und Rechendauer wird mit der prototypischen Matlab-Software eingehalten, wenn die Laserscannerdaten nicht häufiger als mit 2 Hz zugeführt werden. Das Verfahren ist echtzeittauglich.



Abb. 4: Struktur des EKF mit Integration eines Laserscanners.

5 Ergebnisse

Eine erste Untersuchung mit Naturdaten wurde auf dem Campus der Jade Hochschule durchgeführt (Abbildung 5 linkes Bild). Die Referenzpunktwolke wurde auf herkömmliche Weise mit terrestrischen Laserscannern und Passpunkten registriert und ins ETRS89 transformiert.



Abb. 5: Testgebiet Parkplatz auf dem Campus der Jade Hochschule; Messplattform.



Abb. 6: Trajektorien ohne und mit Unterstützung durch ICP-Ergebnisse.

Die Sensoren wurden auf dem in Abbildung 5 im rechten Bild gezeigten Wagen installiert und der Parkplatz kinematisch gescannt. Im rechten Teil des Parkplatzes (Abbildung 6) treten wegen des Bewuchses und der Garagenbebauung bis zu 30 s lange GNSS-RTK-Ausfälle auf.

Die rote (dunklere) Spur in Abbildung 6 zeigt das Filterergebnis ohne Unterstützung durch ICP-Beobachtungen. Am Ende der GNSS-RTK-Lücke ist die Spur um ca. 0,5 m versetzt und verläuft durch das Gebäude. Die beobachteten Abweichungen sind in Anbetracht der geringen Genauigkeit der Smartphone-Inertialsensoren und der vollzogenen Richtungsänderung von ca. 180° sehr gering. Es konnte signifikant nachgewiesen werden, dass mit steigender Anzahl von Smartphones die Genauigkeit besser bzw. zuverlässiger erreicht wird.

Im nicht abgeschatteten Bereich (Abbildung 6 links unten) fiel ein GNSS-RTK-Empfänger aus, so dass hier das Heading nur mit den ungenauen Magnetfeldsensoren durch Integration der Drehraten und der Beobachtungsgröße COG (Course Over Ground) aus GNSS gestützt wurde. Die Abweichungen sind mit ca. 2 cm in etwa in der Größenordnung des Messrauschens der Positionierung.

Die weiße (helle) Spur zeigt im Vergleich dazu das mit kooperativer Integration der ICP-Beobachtungen ermittelte Ergebnis. Ein Wegdriften der Positionen in nennenswerter Größenordnung ist nicht mehr zu beobachten. Insgesamt sind die Positionsabweichungen sehr gering (weniger als 3 cm), der Trajektorienverlauf erscheint schlüssig.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Verlauf des Projekts wurde eine Software entwickelt, mit der verschiedenste Sensoren zu einem Multisensor-Positionierungssystem integriert werden können. Basis des Integrationsansatzes bildet ein erweitertes Kalman-Filter. Im Projekt wurden als Ergänzung zur GNSS-Positionierung weitere kostengünstige Sensoren – nicht zuletzt Smartphones – untersucht, die Signalausfälle und Empfangsstörungen der GNSS-Receiver überbrücken sollten. Die Beschleunigungsmesser und Magnetometer wurden mit selbst entwickelten Methoden sowohl vor der Integration als auch während der Integration kalibriert. Diese Strategie ist erforderlich, um die ansonsten zu geringe Genauigkeit der auf MEMS-Technik basierenden Sensoren
so zu verbessern, dass das integrierte System die gewünschte Genauigkeit für topographische Vermessungen liefern kann. Es zeigte sich, dass sich mit mehreren Smartphones die Gesamtgenauigkeit signifikant steigern lässt.

Die Verfügbarkeit der Positionierung kann durch die entwickelten Algorithmen grundsätzlich gesteigert werden. Die für topographische Vermessungen erforderliche Genauigkeit ist mit Smartphone-Sensoren insgesamt auch in Kombination nicht zuverlässig erreichbar. Zukünftig sollen höherwertige Low Cost MEMs-Sensoren (ca. 100 – 200 €) verwendet werden.

Darüber hinaus wurde ein Laserscanner integriert, der sowohl zur Objektaufnahme als auch zur Positionierung diente. Die bei GNSS-Ausfall typische Drift der IMUs konnte wirkungsvoll kompensiert und eine dreidimensionale Messunsicherheit von 10 cm mit einem Grad des Vertrauens von 95 % in Echtzeit eingehalten werden.

Da in der Praxis keine vorab bestimmte Referenzpunktwolke zur Verfügung steht, muss das hydrographische Messsystem an Bord des Schiffes mit einem zweiten Laserscanner ausgestattet werden, um stets eine ausreichende Überlappung der Punktwolken zu gewährleisten.

Weiterhin ist das System modular angelegt, d. h. es können weitere Sensoren wie Kameras oder die unter Wasser mit einem Fächerlot generierte Punktwolke, in die Berechnungen integriert werden.

Literatur

- BREITENFELD, M., WIRTH, H., SCHEIDER, A., BRÜGGEMANN, TH. & SCHWIEGER, V. (2015): Entwicklung von Echtzeit- und Postprocessingverfahren zur Verbesserung der bisherigen Ortung mit Global Navigation Satellite Systems (GNSS) durch Kombination mit weiteren Sensoren sowie hydrologischen Daten, BfG-Bericht 1856, DOI: 10.5675/BfG-1856, URL: http://doi.bafg.de/BfG/2015/BfG-1856.pdf.
- BESL, P. J. & MCKAY, N. D, (1992): A Method for registration of 3-d shapes, IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol. 14, No.2, February 1992.
- GELB, A. (1974): Applied Optimal Estimation. Cambridge, Massachusetts, London: The M.I.T. Press, Massachusetts Institute of Technology.
- HEUNECKE, O., KUHLMANN, H., WELSCH, W., EICHHORN, A. & NEUNER, H. (2013): Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen, Handbuch Ingenieurgeodäsie, Wichmann Verlag.
- NASSAR, S. & EL-SHEIMY N. (2005): Accuracy Improvement of Stochstic Modeling of Inertial Sensor Errors, Zeitschrift für Vermessungswesen 5/2005 S. 146–155.
- POMERLEAU, F., COLAS, F. & SIEGWART R. (2015): A Review of Point Cloud Registration Algorithms for Mobile Robotics, Foundations and Trends in Robotics, Now Publishers, 2015, 4 (1), pp.1–104. <10.1561/2300000035>. HAL Id: hal-01178661, <u>https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01178661.</u>
- SIPOS, M., PACES, P., ROHAC, J. & NOVACEK, P. (2012): Analyses of Triaxial Accelerometer Calibration Algorithms, IEEE Sensors Journal, Vol. 12, NO.5, May 2012.
- RENAUDIN, V., AFZAL, M. & LACHAPELLE, G. (2010): Complete Triaxis Magnetometer Calibration in the Magnetic Domain, Journal of Sensors Vol. 2010, Article iD 967245, doi: 101155/2010/967245.

- REINKING, J. (2008): Total Least Squares, Zeitschrift für Vermessungswesen 6/2008 S. 384-389.
- WENDEL, J. (2011): Integrierte Navigationssysteme, 2. Auflage, ISBN 987-3-486-70439-6, Oldenbourg Verlag.
- WILLEMSEN, T. (2016): Fusionsalgorithmus zur autonomen Positionsschätzung im Gebäude, basierend auf MEMS-Inertialsensoren im Smartphone, Dissertation Geomatik Hafen City Universität Hamburg.
- WIRTH, H. & BRUMMEL, F. (2019): Bestimmung von Position und Orientierung hydrographischer Messplattformen mithilfe von Punktwolken. In: LUHMANN, T. & SCHUMACHER, Ch. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Oldenburger 3D-Tage 2019, Wichmann Verlag.
- WMM (2019): world magnetic model, Homepage <u>https://www.ngdc.noaa.gov/ge-omag/WMM/</u> (09.12.2019).

Monitoring

Untertägige Überwachung des geomechanischen Gebirgsverhaltens mittels bildbasierter Zielzeichendetektion

Andreas BECKER, Rainer WEIßMANN, Franziska HERKLOTZ, Focke JARECKI, Christopher NAGEL und Jens-André PAFFENHOLZ

1 Motivation

Das frühere Eisenerzbergwerk Konrad (1965 bis 1976) im niedersächsischen Salzgitter wird seit dem Jahr 2009 zu einem Endlager für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung umgerüstet. Hier steht die Auffahrung eines Infrastruktur-Raumes mit einer Länge von 75 m und einem Durchmesser von 10,44 m in -763 m NHN bzw. einer Teufe von 853 m von 2016 bis 2018 im Fokus. Die bergmännischen Arbeiten erfolgten im gebirgsschonenden Teilausbruch mit schneidender Gewinnung. Im Zuge der Vortriebsarbeiten wurde fortlaufend eine Systemankerung aus einem 8 m langen vollverklebten Stahlanker pro m² in das Gebirge eingebracht und durch eine bewehrte, 7 cm starke geschlitzte Spritzbetonschale ergänzt. Durch die Installation hochduktiler Anker wird den hohen prognostizierten Gebirgsverformungen von > 10 cm Rechnung getragen. Die Dimensionierung dieses Ausbaukonzepts basiert auf den unter Verwendung eines numerischen Gebirgsmodells a priori bestimmten Verformungsbeträgen.

Unter Beachtung der Regelungen des Eurocode 7 wird der schwierigen Vorhersage des geotechnischen Verhaltens Rechnung getragen, um das Verhalten des Bauwerks im Rahmen der Beobachtungsmethode während der Bauausführung zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen (DIN 2011). Ergänzend zu relativen Messungen mit Extensometer- und Konvergenzmesssystemen wird eine repräsentative Anzahl diskreter Ankerköpfe und Konvergenzpunkte, insbesondere in hochbeanspruchten Gebirgsbereichen, tachymetrisch überwacht. Darüber hinaus finden regelmäßige visuelle Inspektionen der konstruktiven Spritzbetonschale statt, welche als Indikator unverträglicher Gebirgsverformungen fungieren.

Mit Hilfe der eingesetzten Sensorik sollen die Wirksamkeit des installierten Ankersystems und die Tragfähigkeit des einzelnen Ankers jederzeit nachweisbar gehalten werden. Weiterhin werden die Messergebnisse einer iterativen Anpassung der a priori vorliegenden geomechanischen Modellschätzung zugeführt, um im Rahmen einer Parameterkalibrierung die numerische Modellierung iterativ zu verbessern.

2 Sensorik

Die messtechnische Beobachtung aller diskreten Überwachungspunkte erfolgt mit zwei Videotachymetern des Typs Leica Nova TM50 im automatisierten Einsatz unter Verwendung der GeoCOM-Schnittstelle.

2.1 Videotachymeter Leica Nova TM50

Das EDM-System der Leica Nova TM50 weist eine Streckenmessgenauigkeit von 0,6 mm + 1 ppm unter Verwendung entsprechender Prismen bzw. 2 mm + 2 ppm bei reflektorlosem Betrieb auf beliebige Oberflächen auf. Die Winkelmessgenauigkeit ist mit 0,15 mgon spezifiziert. Zur Zieleinstellung verfügt das Instrument über Automatic Target Recognition (ATR). Außerdem können die Bilddaten einer integrierten Kamera im Sinne einer Image Assisted Total Station (IATS) genutzt werden. Dazu steht, neben einer Weitwinkelkamera mit großem Sichtfeld, insbesondere das Bild einer koaxial mit der optischen Achse des Teleskops ausgerichteten Teleskopkamera zur Verfügung (LEICA 2019).

Die beiden eingesetzten Videotachymeter wurden auf Konsolen an dem nördlichen und westlichen Stoß des zu überwachenden Grubenraumes installiert, um möglichst alle erforderlichen Überwachungspunkte messtechnisch zu erfassen. Zur Vermeidung steiler Visuren, Sichtbehinderungen im Zuge des Baufortschritts und Beschädigungen infolge der eingesetzten Maschinentechnik erfolgte der Anbau ca. 4 m oberhalb der Auffahrungssohle. Weiterhin wurden Kunststoffschutzhauben mit ausreichend dimensionierten Visurbohrungen verwendet, um die Instrumente vor übermäßiger Verschmutzung zu schützen. Insbesondere die Staubentwicklung während des Einbringens der Spritzbetonschale gefährdete die Funktionsfähigkeit der Tachymeter. Daher wurde das Innere der Schutzhauben zeitweise mit Druckluft beaufschlagt, um kontinuierliche Staubablagerungen nicht zuletzt durch die zahlreichen Visurbohrungen auf ein Minimum zu reduzieren.

2.2 Punktvermarkung

Die Vermarkung der Ausbauanker und Konvergenzpunkte erfolgte sukzessive mit der fortschreitenden Auffahrung. Innerhalb eines Ankerquerschnitts mit einem Umfang von ca. 33 m wurden etwa 50 Anker installiert, von denen zunächst jeder zweite Ankerkopf signalisiert wurde. Die Ankerquerschnitte sind über die gesamte Länge des Grubenraumes in einem Abstand von 0,7 m angeordnet. Es wurde jeder zweite Ankerquerschnitt bestückt. Daraus resultierten schließlich mehr als 2.500 messtechnisch zu überwachende Objektpunkte (vgl. Abbildung 1).

Um der limitierten Trennschärfe bei Verwendung der ATR und der damit einhergehenden Punktverwechslungsgefahr Rechnung zu tragen, wurden sämtliche Datums- und Objektpunktsignalisierungen mittels kosteneffizienter passiver Videozielzeichen realisiert. Unter der Maßgabe, eine hohe Robustheit, insbesondere gegenüber temporären Verdeckungen des Zielzeichens, bei gleichbleibender Zuverlässigkeit und variierenden Zielweiten bis 50 m zu gewährleisten, wurde ein geeignetes Zielzeichen am Geodätischen Institut Hannover (GIH) entwickelt (OMIDALIZARANDI et al. 2018). Diese Signalisierung basiert auf einem Standard-Kipphalter mit einer runden Zieltafel von 60 mm Durchmesser. Das eigentliche optische Zielzeichen ist in acht symmetrische Teilbereiche gruppiert. Die vier teilenden Geraden separieren die gelb und schwarz eingefärbten Bereiche voneinander. Das Zielzeichenzentrum wird durch den Schnittpunkt aller Geraden repräsentiert.

Die Bestimmung der polaren Messelemente (Horizontalrichtung (Hz), Vertikalwinkel (V) und Schrägstrecke (SD)) erfolgt programmgestützt mittels bildbasierter Zielzeichenerkennung (OMIDALIZARANDI et al. 2018). Hierbei wird der Geradenschnittpunkt im Zentrum des Zielzeichens detektiert und für die Nachführung der Teilkreise verwendet.



Abb. 12: Blick von Norden in Richtung des südlichen Überwachungsbereiches (A). Blick entlang der östlichen Stoßseite in Richtung der südlichsten Querschnitte (B). Die Videozielzeichen vermarken die Köpfe der Ausbauanker.

2.3 Steuereinheit und Datenkommunikation

Die programmgestützte und automatisierte Messung wird von jeweils in unmittelbarer Nähe der Tachymeterstandorte befindlichen Steuerungs- und Anschlusskästen gesteuert. Die erforderliche Spannungs- und Kommunikationsverbindung erfolgt kabelgebunden. Kurzzeitigen Spannungsunterbrechungen wird mit Hilfe einer unterbrechungsfreien Stromversorgung vorgebeugt. Die hierzu erforderliche Batterie ist ebenso Bestandteil des Steuerungs- und Anschlusskastens wie ein robuster Industrierechner (ARM-Prozessor). Auf diesem ist ein individuelles Steuerungs- und Messdatenerfassungsprogramm installiert, das das Messprogramm abwickelt und die automatische Zielzeichendetektion im übertragenen Teleskopkamerabild durchführt. Die tachymetrischen Messergebnisse werden in einer lokalen Messwertdatenbank gehalten. Diese Daten werden wiederum epochenweise abgefragt, aufbereitet und an einen übertägigen Datensammelrechner transferiert. Hier schließt sich die eigentliche Auswertung mit epochenweisen Deformationsanalysen (PELZER 1988) an.

Zur Realisierung der Datenverbindung für Upload und Fernwartung sind die beiden Steuerungs- und Anschlusskästen per Ethernetkabel an einen Kommunikationsknoten an der Grenze des Baubereichs angeschlossen. Dieser ist wiederum über Lichtwellenleiterkabel an das innerbetriebliche Rechnernetz (Intranet) angeschlossen. Über TCP/IP kann jederzeit eine Verbindung hergestellt werden; auf der Grundlage wird das Messprogramm unter einer webbasierten GUI administriert, direkter Zugriff auf die Rechner kann über ssh erfolgen und der Datentransfer mittels sftp.

3 Netzgeometrie

Im Vorfeld der automatisiert durchzuführenden Überwachungsmessungen erfolgte eine Simulation des geodätischen Netzes unter Verwendung der Software PANDA (Programmsystem zur Ausgleichung von geodätischen Netzen und zur DeformationsAnalyse) der GEOTEC GmbH. Aus hinreichend genauen Näherungskoordinaten sowie den modellierten Unsicherheiten der polaren Messelemente konnten die zu erwartenden Unsicherheiten der 3D-Koordinaten des individuellen Überwachungspunktes abgeschätzt und der geodätische Netzentwurf im Vorfeld optimiert werden.

3.1 Bestimmung der Messunsicherheit unter Laborbedingungen

Für die quantitative Ermittlung der Messunsicherheit wurden ergänzend zu den Gerätespezifikationen (vgl. Kapitel 2.1) wiederholte Messungen unter Laborbedingungen am GIH durchgeführt. Die Bestimmung dieses stochastischen Unsicherheitsanteils erfolgte in Abhängigkeit der Entfernung vom Instrument und der Ausrichtung des Videozielzeichens. So soll eine Qualitätsaussage zur bildbasierten Zielzeichendetektion abgeleitet werden.



Abb. 13: Gemittelte Horizontalrichtungsmessungen (links) und Zenitwinkelmessungen (rechts) in Abhängigkeit der Zielzeichenausrichtung bei einer Entfernung von 2 m.

Das Videozielzeichen wurde in unterschiedlichen Entfernungen (2 m, 10 m, 20 m, 35 m und 50 m) vom Instrumentenstandpunkt aufgestellt. Ausgehend von einer Ausrichtung orthogonal zum Zielstrahl (Referenzmessung) erfolgte eine schrittweise Rotation und Neigung des Zielzeichens mit einem Winkelinkrement von $\pm 15^{\circ}$. Die Maximalauslenkung bezüglich Stehund Kippachse betrug $\pm 45^{\circ}$. Für jedes Winkelinkrement wurden jeweils fünf Wiederholungsmessungen in beiden Fernrohrlagen durchgeführt. Es resultierten schließlich 650 Einzelmessungen mit einer Bildauflösung von 640 x 480 Pixeln (2 m, 10 m und 20 m) bzw. 1600 x 1200 Pixeln (35 m und 50 m).

Unabhängig von der Messkonstellation ergab sich für die bildbasierte Richtungs- und Zenitwinkelmessung jeweils eine Standardabweichung der Wiederholungsmessung von ca. $\pm 0,3$ mgon. Die reflektorlosen Entfernungsmessungen konnten mit einer Präzision von ca. $\pm 0,1$ mm realisiert werden.

Für die Horizontalrichtungsmessung konnte eine Abhängigkeit von der Rotation des Zielzeichens festgestellt werden (vgl. Abbildung 2 links). Entfernungsunabhängig ergaben sich maximale Abweichungen von ca. $\pm 1,3$ mm bei einer Verdrehung um $\pm 45^{\circ}$. Die Vertikalwinkelmessungen erwiesen sich hingegen als rotationsunabhängig (vgl. Abbildung 2 rechts). Allerdings werden diese maßgeblich von der Neigung des Zielzeichens beeinflusst. Die detektier-

ten maximalen Abweichungen von ca. ± 0.5 mm erweisen sich ebenfalls als entfernungsunabhängig. Eine Beeinflussung der Horizontalrichtungsmessung infolge variierender Neigungen konnte nicht nachgewiesen werden.

Insgesamt kann eine Sensitivität der bildbasierten Zielzeichenerkennung bezüglich der Rotation und Neigung des Videozielzeichens postuliert werden. Der zentrumsdefinierende Geradenschnittpunkt scheint sich im Falle nicht zum Zielstrahl ausgerichteter Zielzeichen in Richtung des abgewandten (d. h. weiter entfernten) Zielzeichenbereichs zu verschieben. Dies bestätigen auch die Ergebnisse der Distanzmessung nach der Nachführung der Teilkreise, welche bezogen auf die Referenzmessung systematisch zu lang sind. Bei Zielweiten von 50 m ergeben sich maximale Abweichungen von ca. 10 mm (vgl. Abbildung 3).



Abb. 14: Gemittelte reflektorlose Schrägstreckenmessung in Abhängigkeit der Zielzeichenausrichtung bei einer Entfernung von 35 m.

Insofern die Ausrichtung des Videozielzeichens zum Zielstrahl bekannt ist, könnten diese systematischen Messabweichungen korrigiert werden. Entsprechende Korrekturfunktionen können mit Hilfe empirischer Labormessungen bestimmt werden.

3.2 Simulierte Netzausgleichung

Für die Abschätzung der zu erwartenden 3D-Punktunsicherheiten ausgewählter Objektpunkte wurde eine vorbereitende Simulation der freien Netzausgleichung mit grafisch bestimmten Näherungskoordinaten durchgeführt.

Der Punktverband des Überwachungsnetzes wird hierbei auf acht (vermeintlich) langzeitstabile Punkte im nördlichen Bereich gelagert, deren Näherungskoordinaten das geodätische Datum definieren (NIEMEIER 2008). Die Datumspunktvermarkung sollte mittels Wandbolzen und einfacher Videozielzeichen realisiert werden (vgl. Kapitel 2.2). Entsprechend wurde eine Unsicherheit der Signalisierung von $\pm 3,0$ mm angenommen. Die Auffahrung findet im südlichen Bereich des Überwachungsnetzes statt. Auf den in diesem Bereich fortlaufend einzubringenden Stahlankern sind die repräsentativen Objektpunkte mittels Gewindeadapter und Videozielzeichen vermarkt (vgl. Kapitel 2.2). Die zugehörige Zentrierunsicherheit aller Objektpunkte wurde ebenfalls mit ±3,0 mm abgeschätzt.



Abb. 15: Simulierte Netzausgleichung im lokalen geodätischen System. Die Datumspunkte sind mit Sternen gekennzeichnet. Die Objektpunkte sind durch Kreise visualisiert. Es sind 95%-Konfidenzellipsen im Maßstab 1:0,8 abgebildet. Die vertikalen Balken repräsentieren die Unsicherheiten der Höhenkomponente. Die Sichten zwischen den Stand- und Überwachungspunkten sind mit Linien dargestellt.

Die beiden Tachymeter sind auf stabilen Wandkonsolen installiert. Die Unsicherheit in der Zentrierung der Instrumente wurde pessimistisch mit ± 1 mm überschlagen. Die Signalisierung der südlichen Verknüpfungspunkte wurde aufgrund der großen Zielweiten (> 50 m) mittels Monitoring-Prismen realisiert, auf die mit ATR gemessen wird. Um eine Sichtbarkeit von beiden Standpunkten zu gewährleisten, erfolgte die Signalisierung zum Teil mit

360°-Prismen (Leica GRZ101). Diese Signalisierung und die Leistungsfähigkeit des Verknüpfungskonzepts wurden im Vorfeld untersucht (NAGEL 2008). Alle übrigen Punkte, insbesondere die Objektpunkte, wurden mit kostengünstigen Videozielzeichen vermarkt.

Als a-priori-Standardabweichung für die Richtungs- und Winkelmessung wurde die kombinierte Standardunsicherheit herangezogen (vgl. Tabelle 3). Diese ergibt sich als Quadratwurzel aus den Varianzen der empirischen Labormessungen (vgl. Kapitel 3.2) und den Herstellerangaben (vgl. Kapitel 2.1).

Tabelle 3: Kombinierte Standardunsicherheiten für die polaren Messelemente

Horizontalrichtung (Hz)	Vertikalwinkel (V)	Schrägstrecke (SD)
0,3 mgon	0,3 mgon	2 mm + 2 ppm

Aufgrund der Verteilung der Datumspunkte im nördlichen Bereich des Überwachungsnetzes nehmen die Unsicherheiten mit fortschreitendem Gebirgsausbruch in südliche Richtung zu. Werden für die nördlichsten Überwachungspunkte (208362 und 208371) Punktunsicherheiten von ca. ±5 mm erreicht, liegen diese bei dem südlichsten Querschnitt (254530 und 254535) in einer Entfernung von ca. 75 m bereits bei ca. ±6 mm. Die Koordinaten der Datumspunkte konnten hingegen mit Punktunsicherheiten von ca. ±4 mm simuliert werden. Anhand der Konfidenzellipsen lässt sich eine größere relative Unsicherheit der Richtungsmessung im Vergleich zur Streckenmessung nachweisen. Signifikante Verschiebungen entlang der Hohlraumachse können folglich einfacher detektiert werden als die interessierenden Verschiebungen in Querrichtung.

4 Messungsdurchführung

Die bildbasierten Überwachungsmessungen der nördlichen Überwachungspunkte im simulierten Netzdesign mit einem Tachymeter starteten bereits im April 2017. Im Zuge der nach Süden fortschreitenden Auffahrung erhöhte sich die Anzahl messtechnisch zu überwachender Objektpunkte kontinuierlich. Damit einher ging auch eine Steigerung der Zielweiten. Um auch eine zuverlässige Überwachung der südlichsten Querschnitte zu gewährleisten, wurde im April 2018 das zweite Instrument am westlichen Stoß des neu aufgefahrenen Grubenraums installiert. Auch hier dient eine Wandkonsole in ca. 4 m Höhe als Aufstellungsort. Der endgültige Auffahrungsstand ist schließlich im August 2018 erreicht worden.

4.1 Messintervall

Die Erfassung der polaren Messelemente erfolgt von beiden Monitoringstationen in mindestens drei Vollsätzen für die Datumspunkte und zwei Vollsätzen für die Objektpunkte. Unter Beachtung der prognostizierten Gesamtverformungen (vgl. Kapitel 1) wurden die Messungen zunächst einmal täglich durchgeführt. Im Zuge einer Umstellung des etablierten Ankersystems erhöhte sich das Messintervall auf bis zu viermal täglich, um die Wirksamkeit der abweichenden Systemankerung nachzuweisen.

4.2 Bildbasierte Zielzeichendetektion

Ausgehend von im Messprogramm hinterlegten Anfahrwerten für die Tachymeter werden die Videozielzeichen der Überwachungspunkte mit der Koaxialkamera aufgenommen (vgl. Abbildung 5 A). Hierbei wird bereits eine erste reflektorlose Entfernungsmessung durchgeführt, um die Koaxialkamera optimal zu fokussieren. Wie in OMIDALIZARANDI et al. (2018, S. 5 ff.) ausführlich beschrieben, wird das Bild zentrisch um die verwendete Anfahrposition zugeschnitten, in ein Grauwertbild konvertiert und vorverarbeitet (vgl. Abbildung 5 B). Auf diese Weise wird das enthaltene Bildrauschen unter Wahrung definierter Kantenstrukturen minimiert. Es schließt sich der Line Segment Detektor (LSD) Algorithmus an, mit welchem benachbarte und parallelverlaufende Kanten separiert (vgl. Abbildung 5 C) und zu zusammenhängenden Linien verbunden werden (vgl. Abbildung 5 D). Das relevante Zielzeichenzentrum wird wiederum aus dem Geradenschnitt aller detektierten Linien berechnet (vgl. Abbildung 5 E und F). Hierbei werden sämtliche Schnittpunkte innerhalb eines zentrischen Bereiches um die Anfahrposition für die Berechnung herangezogen.



Abb. 16: Ablauf der bildbasierten Zielzeichendetektion. Die Anfahrposition ist in Abbildung F weiß dargestellt. Das relevante Zielzeichenzentrum ist schwarz visualisiert.

Die detektierten Pixelkoordinaten des Zielzeichenzentrums liegen zunächst innerhalb des Bildkoordinatensystems vor. Unter Nutzung bekannter Kalibrierparameter ist eine Überführung in das Instrumentenkoordinatensystem möglich. Mit den so bestimmten Winkelinkrementen werden die Teilkreise nachgeführt. Daran schließt sich eine weitere berührungslose Entfernungsmessung an, in deren Rahmen die polaren Messgrößen bestimmt werden.

4.3 Freie Netzausgleichung und Deformationsanalyse

Die initiale Lagerung des Netzes erfolgt zunächst auf den nördlichen Datumspunkten im Sinne einer freien Netzausgleichung mit Teilspurminimierung. Die sich daran anschließende zweistufige Deformationsanalyse deklariert wiederum die tatsächlich stabilen Datumspunkte der Nullepoche und aktuellen Folgeepoche. Auf diesem statistisch stabilen Punktverband werden die beiden Epochen übereinstimmend gelagert, um mögliche Objektpunktverschiebungen zwischen diesen beiden Messungen statistisch gesichert zu extrahieren. Beide Berechnungsschritte werden aus der Messdatenverwaltung teilautomatisiert angestoßen und mit dem JAG3D-Rechenkern ausgeführt (LÖSLER et. al. 2018). Wie die Einzelepochenausgleichung zeigt, werden Punktunsicherheiten zwischen ca. ±2 mm für die nördlichsten bzw. ca. ±8 mm für die südlichsten Überwachungspunkte erreicht. Die Koordinatendifferenzen inklusive der Hauptdiagonalelemente der vollbesetzen Varianz-Kovarianz-Matrix werden epochenweise innerhalb der Messergebnis-Datenbank (vgl. Kapitel 2.3) gespeichert und für die weitere Auswertung zur Verfügung gestellt. Die Qualitätssicherung der verwalteten Koordinatentripel erfolgt in einem zweistufigen Freigabeverfahren hinsichtlich messtechnischer Störungen und geomechanischer Plausibilität.

5 Untertägige Überwachung eines Grubenraums und Validierung der geomechanischen Modellannahmen

Durch Störungen verfälschte Messwerte führen zu entsprechenden Strukturbrüchen innerhalb der Zeitreihe und sind zwingend von den weiterführenden Analysen auszuschließen. Ebenso weist die Videotachymetrie eine Abhängigkeit von den untertägigen Bedingungen während der Messungsdurchführung auf. Ergänzend zur Konfiguration zwischen Tachymeter und Videozielzeichen (vgl. Kapitel 3.1) wird das Ergebnis der bildbasierten Zielzeichendetektion insbesondere von den folgenden Einflüssen bestimmt:

- Verschmutzung des Videozielzeichens
- Temporäre Sichtbehinderung in der Visur
- Unzureichende indirekte Beleuchtung
- Überstrahlung des Videozielzeichens infolge direkter Beleuchtung
- Strahldivergenz der Messsysteme im Tachymeterteleskop

Die relevante langfristige Verschiebung der Objektpunkte ist von weiteren Störeffekten und insbesondere einem breiten Rauschband überlagert. Bei der weiterführenden Analyse der Koordinatendifferenzen fällt ins Auge, dass die zufälligen Messabweichungen des Hochwertes zwei- bis dreimal kleiner sind als die des Rechtswertes und der Höhe (vgl. Abbildung 6).

5.1 Analyse ausgewählter Zeitreihen

Die Trendkomponente wird als Zielparameter der Untersuchung mit Hilfe weiterführender Zeitreihenanalysen bestmöglich aus dem verrauschten Datenbestand extrahiert und mit den Modellannahmen abgeglichen. Gleichfalls werden etwaige Strukturbrüche (Sprünge und Ausreißer) im Zuge der Trendschätzung detektiert und bestmöglich berücksichtigt.



Abb. 17: Koordinatendifferenzen zur Nullepoche eines Objektpunktes, Messstrecke 35,5 m

Beispielhaft sind die Koordinatendifferenzen eines südlichen Überwachungspunktes in 35,5 m Entfernung dargestellt. Die Auffahrung dieses Bereiches erfolgte im Zeitraum zwischen dem 23.1.2018 und 25.1.2018. Zunächst wurden ausgehend von der Nullepoche am 25.1.2018 tägliche Messungen durchgeführt. Seit 24.7.2018 werden täglich vier Messungen realisiert. Die Analyse der mehr als 1.000 Messungen erfolgt weitestgehend automatisiert.

Wie in Abbildung 6 zu erkennen, wird die Trendfunktion in allen drei Koordinatenkomponenten von Strukturbrüchen und variierendem Rauschen überlagert. Daher wird im Zuge der Zeitreihenanalyse zunächst eine vorläufige Trendschätzung durchgeführt. Mit den vorliegenden geomechanischen Modellannahmen kann insbesondere das kontinuierliche Verformungsverhalten des Rechtswertes durch folgende Funktionsgleichung beschrieben werden:

$$y = a + b \cdot \ln(x) \tag{1}$$

Mit dem Parameter a wird die Verschiebung entlang der Abszisse beschrieben, wohingegen der Parameter b die Steigung der Logarithmusfunktion bestimmt. Für den Hochwert und die Höhe ist wegen der Orientierung des Grubenraums auch ein lineares Trendmodell denkbar. Die Parameterschätzung erfolgt im Sinne einer Ausgleichung nach dem Prinzip der vermittelnden Beobachtungen (NIEMEIER 2008). Zur Verwendung im stochastischen Modell liegt die vollbesetzte Varianz-Kovarianz-Matrix vor, in der ersten Untersuchungsphase wurde bis zur Einheitsmatrix vereinfacht.

Unter Wahrung der Mittelwertstationarität werden die abgeleiteten Koordinatendifferenzen einer entsprechenden Klasse mit charakteristischen Merkmalen zugewiesen (RESNIK 2018). Hierzu werden Fenster mit einer Breite von 30 Tagen entlang der Zeitreihe verschoben und miteinander verglichen. Eine Überlappung der Fenster findet jedoch nicht statt, um Korrelationen zu vermeiden. Der Freiheitsgrad bei der Bestimmung der gesuchten Parameter wird maßgeblich von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Messwerte beeinflusst. Bei vier täglichen Messungen sind maximal 120 Messwerte innerhalb eines Fensters enthalten. Wegen der zuvor genannten vielfältigen Einflussfaktoren kann es teilweise zu deutlichen Abweichungen von der Maximalanzahl kommen. Die Wahl der Fensterbreite erfolgt empirisch und ist der zu untersuchenden Zeitreihe individuell anzupassen. Die Breite des Analysefensters sollte zudem einen Kompromiss zwischen Lokalisierungszeitpunkt und Lokalisierungsqualität darstellen.

Weiterhin sind sprunghafte Verformungsänderungen nicht zu erwarten. Diese treten lediglich infolge eines variierenden geodätischen Datums und/oder Änderungen an der individuellen Punktvermarkung auf. Folglich sind die enthaltenen Ausreißer zuverlässig aus den trendbereinigten Zeitreihen zu entfernen. Hierzu wird ein wiederholter Einzelpunkttest innerhalb des entsprechenden Fensters durchgeführt. Die Detektion etwaiger Streuungsvariationen erfolgt unter Verwendung der empirischen Varianz s_i^2 des entsprechenden Fensters. Signifikante Unterschiede zwischen benachbarten Fenstern werden schließlich über den F-Test mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % detektiert. In Abbildung 7 sind in der untersten Darstellung die beiden Fenster visualisiert, zwischen denen eine signifikante Rauschvariation detektiert werden konnte.

Eine weiterführende Analyse ergab eine unsichere bildbasierte Zielzeichendetektion seit Februar 2019 aufgrund verrauschter Bilder (vgl. Abbildung 8).



Abb. 18: Schritte der automatisierten Zeitreihenanalyse zur Detektion signifikanter Ausreißer (Kreise oben) und Rauschänderung (Fenster in der untersten Darstellung).

Unter Ausschluss sämtlicher Ausreißer erfolgte eine erneute logarithmische Modellschätzung für die Koordinatendifferenzen des Rechtswertes. Im Vergleich zu der ausreißerbehafteten Parameterschätzung (a = 1,2 und b = -3,5) verläuft die bereinigte Modellfunktion etwas steiler (a = -2,4 und b = -2,9) und stärker degressiv.



Abb. 19: Messbilder eines Ankerkopfs. Die Aufnahme von Dezember 2018 (A) ist weniger verrauscht und kontrastreicher als die aus Februar (B) und April 2019 (C).



Abb. 20: Erweiterte Messdatenreihe eines Konvergenzquerschnitts (Stationierung im neu aufgefahrenen Grubenraum: 38,7 m) mit Vorlast- und Prognoseanteil.

5.2 Vergleich mit den Modellannahmen

Die aus den Messungen ermittelten Zielwerte, unter Nutzung der logarithmischen Modellfunktion, werden mit den a priori vorliegenden Prognosedaten des numerischen Gebirgsmodells verglichen. Letzteres basiert auf einem elasto-plastischen Stoffmodell mit einer Festigkeitsanisotropie zur Berücksichtigung von Bereichen variierender Schichtung und Entfestigung des Gebirges (ITASCA 2009). Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Ziel- und Prognosewerten herzustellen ist es erforderlich, die vor dem Zeitpunkt der Nullmessung stattfindenden Gebirgsverformungen bestmöglich zu berücksichtigen. Hierzu wird die empirische Modellschätzung um eine entsprechende Vorlast sowie erforderlichenfalls um einen Prognoseanteil erweitert und in den numerischen Gleichgewichtszustand gerechnet.

Aus den Messergebnissen eines unmittelbar benachbarten Konvergenzquerschnitts (Stationierung: 38,7 m) konnte ein Konvergenzbetrag von 89,8 mm abgeleitet werden. Dieser wird durch die Summe aus Vorlast, tatsächlichen Messungen und Prognose bis zum 31.3.2021 repräsentiert (vgl. Abbildung 9). Die numerische Modellierung wies zunächst eine konservative Konvergenz von 211,4 mm für die beiden gegenüberliegenden Überwachungspunkte aus. Eine Modellanpassung unter Nutzung der empirischen Überwachungsmessungen mündete a posteriori in einer zutreffenderen Parameterschätzung mit einer Gesamtkonvergenz von 91,0 mm. Die erweiterte logarithmische Anpassung des in Abschnitt 5.1 beschriebenen Ankerpunktes wies eine diskrete Verformung von 28,9 mm in Richtung Streckenachse auf. Unter Beachtung eines asymmetrischen Verhaltens wegen einfallender Schichtung kann eine gute Übereinstimmung im Zuge der Parameternachkalibrierung nachgewiesen werden.

Literatur

- DIN (2011): Handbuch Eurocode 7 Geotechnische Bemessung Band 1: Allgemeine Regeln. In: DIN e.V. (Hrsg.): Vom DIN autorisierte konsolidierte Fassung, 1. Auflage, Beuth, 2011.
- ITASCA (2009): ITASCA Consulting Group. FLAC3D Manuals Version 4.0., Minnesota, USA, 2009.
- LEICA (2019): Leica Nova TM50 Datenblatt. https://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/tps/nova_tm50/brochures-datasheet/leica_nova_tm50_dat_us.pdf (02.10.2019).
- LÖSLER, M., ESCHELBACH, C. & JARECKI, F. (2018): Auswerte- und Analysestrategie für automatisierte untertägige Überwachungsmessungen. In: BENNDORF, J. (Hrsg.): 19. Geokinematischer Tag. Schriftenreihe des Instituts für Markscheidewesen und Geodäsie der TU Freiberg, Heft 2018-1.
- NAGEL, C. (2019): Optimale Verknüpfung von automatisierten untertägigen tachymetrischen Überwachungsnetzmessungen. In: VDVmagazin 3/19, S. 190–195.
- NIEMEIER, W. (2008): Ausgleichungsrechnung. Statistische Auswertemethoden. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Walter de Gruyter GmbH & Co. KG., Berlin.
- OMIDALIZARANDI, M., PAFFENHOLZ, J. A. & NEUMANN, I. (2018): Automatic and accurate passive target centroid detection for applications in engineering geodesy. In: Survey Review 51, S. 1–16.

- PELZER, H. (1988): Deformationsmessungen. In: PELZER, H. (Hrsg.): Ingenieurvermessung.
 2. durchgesehene und verbesserte Auflage, Konrad Wittwer, Stuttgart, S. 37-81.
- RESNIK, B. (2018): Mustererkennung beim geodätischen Monitoring im Rahmen eines Frühwarnsystems. In: avn Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 118 (3), S. 63–69.

i²MON – Integriertes Monitoring von Oberflächenund Untergrundbewegungen verursacht durch den Kohlebergbau

Daniel SCHRÖDER und Jörg KLONOWSKI

1 Vorbemerkungen

i²MON – Integrated Impact MONitoring for the detection of ground and surface displacements caused by coal mining – ist ein im Rahmen von HORIZON 2020 über den RFCS (Research Fund for Coal and Steel) gefördertes Forschungsprojekt mit einer Laufzeit von 4 Jahren (bis Juni 2022). Der RFCS wird von der Europäischen Kommission verwaltet und unterstützt Forschungs- und Innovationsprojekte im Kohle- und Stahlsektor. Das hier vorgestellte Projekt wird in Kooperation von mehreren anerkannten europäischen Institutionen durchgeführt, u. a. der DMT GmbH & Co. KG und der Hochschule Mainz.

2 Einleitung

Ziel von i²MON ist es, einen integrierten Überwachungsdienst zur Identifizierung und Beurteilung von durch Kohlebergbau verursachten Boden- und Hangbewegungen zu entwickeln. Um die physikalischen Bewegungsprozesse zu verstehen und Auswirkungen des Bergbaus auf diese Prozesse zu minimieren, werden umfangreiche prädiktive Modellierungen direkt in die Überwachungsinformationen integriert. Aufgabe der DMT und der Hochschule Mainz ist es, bestehende punktbezogene Sensorinformationen (z. B. kostengünstige GNSS-Sensoren) um flächenhaft messende Sensoren zu erweitern. Der Fokus liegt hierbei auf dem Einsatz von terrestrischen Long Range Laserscannern. Die Entwicklung geeigneter Datenverarbeitungsverfahren ist neben der Integration der Scannerdaten in ein Sensornetzwerk ein wesentlicher Meilenstein des Projektes. Hierzu gehören die Implementierung von 3D-Analysemethoden mit entsprechender Georeferenzierung des gesamten Sensornetzwerks und eine stochastische Fehlermodellierung unter Berücksichtigung relevanter Messeinflüsse und der Minimierung von Fehlalarmen. Zusätzlich zu den geometrischen Kenngrößen sind Parameter für eine geeignete Simulation der Hangstabilität zu integrieren; so werden nicht nur dreidimensionale, sondern multidimensionale Informationen pro Beobachtungspunkt erzeugt.

Die Definition des Monitorings ist in der Literatur weit verbreitet und wird von verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen unterschiedlich interpretiert. Im hier vorliegenden Kontext bedeutet Monitoring das Erkennen aller Arten systematischer Veränderungen an einem zu beobachtenden Objekt (HEUNECKE et al. 2013). Um geometrische Veränderungen an einem Objekt signifikant erkennen zu können, muss ein Messkonzept individuell an dieses angepasst werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Objekt entsprechend den zu erwartenden Verschiebungen räumlich diskretisiert wird. Zusätzlich ist die zeitliche Diskretisierung von entsprechender Bedeutung. Während einer Messepoche dürfen signifikante Verschiebungen nicht unbeobachtet bleiben. Durch die zunehmende Auswahl an Sensoren können diese Nachteile reduziert werden (SCHRÖDER 2018). Nach HEUNECKE et al. (2013) können die Faktoren der räumlichen und zeitlichen Diskretisierung als Integritätsmerkmale eines qualitativen Monitorings klassifiziert werden. Für eine effiziente Überwachung sind zwei weitere Merkmale hinzuzufügen – einerseits die Genauigkeitsparameter, sodass mit Hilfe der installierten Sensoren signifikante Verschiebungen detektiert werden können, andererseits die Zuverlässigkeitsparameter. Hiermit stehen dann die notwendigen Informationen zum gewünschten Zeitpunkt zur Verfügung und zeitkritische Maßnahmenempfehlungen für ein unmittelbares Handeln werden ermöglicht.



Abb. 1: Qualitätsmerkmale für Informationen (HEUNECKE et al. 2013).

Mit zunehmend kostengünstigerer Sensorik können mehr Messpunkte installiert werden und der Fokus der Kostenminimierung verliert an Priorität. Durch flächenbasierte Messsysteme wie dem Laserscanner können Objekte in einem dichten, regelmäßigen Raster erfasst werden, was die Konfiguration hinsichtlich der räumlichen Diskretisierung optimiert. Die fortschreitende Entwicklung im Bereich der Datenkommunikation und des Datenmanagements ermöglicht heutzutage einen hohen Automatisierungsgrad, sodass kontinuierliche Messreihen möglich sind. Aus diesem Grund ist die zeitliche Diskretisierung eines Überwachungskonzeptes ebenfalls als weniger kritisch zu betrachten. Aktuelle Entwicklungen führen zu einer Optimierung hinsichtlich der Einhaltung aller notwendigen Kriterien für die Informationsverarbeitung innerhalb eines Überwachungssystems.

3 Überwachung von Hangrutschungen mit Laserscannern

3.1 Allgemeines

Mit terrestrischem Laserscanning ist es möglich, ein Objekt berührungslos und mit einer hohen Punktdichte zu erfassen. Für die Vermessung im Tagebau bietet u. a. die Firma RIEGL aus Österreich Messsysteme an, die speziell für den Einsatz über große Distanzen konzipiert sind. Beispielhaft sei hier das Messsystem VZ-2000i genannt, das auch in der praktischen Umsetzung des i²MON-Projekts zum Einsatz kommt. Dieser Laserscanner bietet eine Hardware, die in Bezug auf Genauigkeit, Integrität und Zuverlässigkeit optimiert ist und sich daher gut für den Einsatz in einem integrierten Überwachungssystem eignet. Ziel von i²MON ist die Detektion geometrischer Veränderungen (Bewegungen), die durch bergbauliche Aktivitäten unter Tage hervorgerufen werden oder mit dem Betrieb im Tagebau zusammenhängen. Verschiedene Sensoren sind für unterschiedliche Umgebungen sowie Aufgabenstellungen geeignet. Der Laserscanner ist für Anwendungen vorgesehen, bei denen Neigungen und Böschungen über Tage zu beobachten sind. Großflächige Infrastrukturanlagen, wie z. B. Dämme, wurden bisher klassisch hauptsächlich mit Hilfe der Tachymetrie beobachtet. Hierzu wurde das Objekt mit Reflektoren (Glasprismen) ausgestattet und damit räumlich diskretisiert. Vektoren etwaiger Bewegungen lassen sich dann nur von diesen einzelnen Messpunkten ableiten und relevante Informationen zwischen diesen Punkten werden interpoliert. Um die Prismen effektiv einsetzen zu können, muss vorhandenes Wissen über die möglichen Verschiebungen in die Messkonzeption integriert werden. Für die Verformungsanalyse des in Abbildung 2 dargestellten Damms werden beispielsweise 40 Einzelpunkte herangezogen.



Abb. 2: Räumliche Diskretisierung eines Damms mit Glasprismen für die Tachymetrie (MÜLLER et al. 2016).

Aus sicherheitstechnischer und logistischer Sicht sind Böschungen schwierig zu erreichen. Die berührungslose Messtechnik hat den Vorteil, dass das zu beobachtende Objekt nicht direkt betreten werden muss und keine Installationen durchgeführt werden müssen. Die Messtechnik eines Laserscanners ist hier besonders geeignet. Darüber hinaus wird ein Objekt flächendeckend in einem gleichmäßigen Raster mittels eines Laserscans erfasst und die Frage der räumlichen Diskretisierung spielt eine untergeordnete Rolle. Für den Aufbau eines solchen Überwachungssystems sind keine Vorkenntnisse über die zu erwartenden Bewegungen erforderlich. In Abbildung 3 ist die Punktwolke eines Damms wiedergegeben, die mit Hilfe eines Laserscanners aufgenommen wurde und die flächenhafte Abdeckung mit Messpunkten verdeutlicht.



Abb. 3: Punktwolke eines Damms mit den Intensitäten der reflektierten Laserstrahlen (MÜLLER et al. 2016) Die meisten handelsüblichen Laserscanner kommen über eine Reichweite von wenigen hundert Metern nicht hinaus. Mit dem VZ-2000i steht ein Messsystem mit einer Reichweite von bis zu 2.500 m zur Verfügung. Hierdurch ist eine Installation der Sensorik außerhalb des Risikobereiches möglich und großräumige Tagebaugebiete lassen sich von wenigen ausgewählten Standpunkten dreidimensional erfassen. Der in diesem Projekt verwendete Laserscanner steht hier exemplarisch für alle weiteren terrestrischen Long Range Scanner mit ähnlicher technischer Ausstattung. In den folgenden Unterkapiteln wird dieser Scannertyp entsprechend der Abbildung 1 klassifiziert und seine Eignung für dieses Projekt nachgewiesen.

3.2 Systemimplementierung

Genauigkeit und Integrität

Der VZ-2000i ist in der Lage, Objekte mit einer sehr hohen Genauigkeit (6 mm @ 100 m) bis zu einer Reichweite von 2 500 m berührungslos zu messen. Reflektierte Echosignale werden digitalisiert und anschließend einer Wellenformanalyse unterzogen. Die Laserdistanzmessung erfolgt durch hochpräzise Pulszeitmessung. Die Auswertung mit Hilfe der Wellenformanalyse unterliegt dem Patentschutz der Firma RIEGL. Keine spezielle Anforderung an eine geodätische Überwachung, aber wichtig für den Einsatz im öffentlichen Raum, ist die Tatsache, dass der Laser nach Klasse 1 spezifiziert und somit augensicher ist. Neben den Messergebnissen aus der Online-Analyse der Wellenformen können die Zielechos digital erfasst und ausgegeben werden. Insbesondere für Forschungsprojekte bieten diese digital erfassten Daten komplexer Mehrziel-Situationen eine hervorragende Grundlage für die wissenschaftliche Analyse und Ableitung zusätzlicher Attribute. Eine weitere Funktion unterstützt die Zuverlässigkeit sowie die Genauigkeit und Integrität eines Überwachungssystems. Um Ziele auf große Entfernungen bei hohen Laserpulsraten bis 1 200 kHz erfassen zu können und damit die zeitliche Diskretisierung bei der Beobachtung eines Objekts optimal an das Verhalten des Objekts anzupassen, nutzt das Gerät die aus der Radartechnik bekannte sogenannte Multiple-Time-Around Processing (MTA) -Technologie. Dies ermöglicht präzise und klare Abstandsmessungen mit der Pulslaufzeitmessung, auch wenn mehrere emittierte Laserpulse mit mehreren reflektierten Zielechos der Laserpulse gleichzeitig "in der Luft" sind. Mit Hilfe einer speziell für diesen Zweck entwickelten Software, RiMTA TLS, werden die spezifisch modulierten Laserpulse automatisch den richtigen Zielechos zugeordnet.

Zuverlässigkeit

Neben dem oben beschriebenen Verfahren zur Verbesserung der zeitlichen Diskretisierung verfügt das VZ-2000i über viele weitere Merkmale, die die Zuverlässigkeit erhöhen. Für die Integration in ein Überwachungssystem werden Schnittstellen über RiVLIB angeboten, die es ermöglichen, den Scanner über eine externe Software sowie über die Programmiersprache Python zu steuern und zu integrieren. Die Funktionalität des Scanners kann so erheblich erweitert werden. Der Scanner kann über die Cloud-Konnektivität ferngesteuert werden und ermöglicht einen kontinuierlichen Datenstrom. Messwerte lassen sich hiermit über eine selbst entwickelte Software (z. B. DMT SAFEGUARD) auswerten und visualisieren. Die kompakte und robuste Bauweise in einem staub- und spritzwassergeschützten Gehäuse (IP64) unterstützt die Zuverlässigkeit des Systems nachhaltig.

Die genannten Eigenschaften des Messsystems deuten darauf hin, dass hiermit das i²MON-Projektziel erreichbar ist.

Datenvisualisierung

Neben den Vorgaben an die Sensortechnik selbst müssen die Rahmenbedingungen für die Datenintegration, Datenspeicherung und Visualisierung erfüllt sein. Die System- und Datenintegration ist eine Herausforderung im Zuge der Digitalisierung und steht speziell im Zusammenhang mit "Industrie 4.0" als Sammelbegriff für eine Reihe von Automatisierungsprozessen (ZIMMERMANN et al. 2019).

In diesem Projekt wird das von DMT entwickelte webbasierte Monitoringsystem DMT SAFEGAURD eingesetzt und gezielt weiterentwickelt. Die Software vereint alle Anforderungen an ein Überwachungssystem, wie es in Kapitel 1 erläutert wird. Die Möglichkeit, große Datenmengen zentral zu speichern und dem Nutzer zur Verfügung zu stellen, ist ein wesentliches Merkmal des webbasierten Dienstes. Hiermit ist es jedem Anwender möglich, seine Projektplattform unabhängig vom Arbeitsort zu bedienen. Der hier vorgestellte Monitoringdienst ist damit eine moderne, umfassende, datenbankgestützte Softwarelösung für Überwachungsaufgaben in der Geotechnik, Geodäsie, Hydrogeologie und Geophysik.

Die Software verarbeitet über das Laserscanning hinaus eine Vielzahl von Sensordaten in einem einzigen Überwachungssystem und ermöglicht so die permanente Überwachung eines Objektes im Rahmen eines professionellen Risikomanagements. Ein intelligentes Frühwarn-, Alarm- und Berichtssystem ermöglicht effektive Reaktionen, während die Langzeitüberwachung die frühzeitige Erkennung potenziell gefährlicher Trends zur gezielten Gefahrenabwehr ermöglicht. Die Besonderheit dieser Lösung liegt in der herstellerunabhängigen Hardwareanbindung von "langsamen" geotechnischen Messreihen bis hin zu hochfrequenten Messreihen.

Ebenfalls integriert sind ein Dokumentenmanagementsystem und ein Journal zur Beweissicherung aller Maßnahmen und Vorfälle. Je nach Ausbaustufe werden alle Messdaten und Dokumente durchgängig auf Basis der Datenbank mittels Reporting und GIS-Anwendung bereitgestellt.



Abb. 4: DMT SAFEGUARD Service-Infrastruktur.

4 Ableitung von geometrischen Parametern

4.1 Reduzierung systematischer Effekte

Neben der Entwicklung eines integrierten Monitoringsystems und der allgemeinen Systembeschreibung sind forschungsrelevante Themen von Bedeutung. Themenschwerpunkte sind dabei die Minimierung systematischer Fehlereinflüsse, die Ableitung von Bewegungsvektoren innerhalb einer multitemporalen Punktwolkenerfassung sowie die Implementierung einer geeigneten stochastischen Modellierung.

Laserscanner, die in einem Messbereich von mehreren hundert Metern bis zu einigen Kilometern arbeiten, werden zunehmend zur Überwachung von Böschungen eingesetzt. Es wird oft angenommen, dass die aus einem Scanprojekt resultierende Punktwolke eine Genauigkeit von wenigen Millimetern aufweist. Dies funktioniert jedoch nur, wenn Messungen unter Laborbedingungen durchgeführt werden und ein einzelner Scan von einer einzigen Scanposition aus betrachtet wird (WUJANZ 2019). Sobald Messungen im "realen Leben", d. h. unter dem Einfluss von Wind, Sonne, Feuchtigkeit und Temperaturschwankungen, durchgeführt werden, müssen Genauigkeitsverluste in Kauf genommen werden. Einflüsse auf die Laufzeit des Laserstrahls können zwar modelliert werden, jedoch ist das i. d. R. nur unvollständig möglich und sie basieren auf Messwerten an der Scanposition selbst oder teilweise noch am Objekt. Zwischen Scanposition und Objekt müssen Modellannahmen getroffen werden, die möglicherweise von der Realität abweichen. Bei einem multitemporalen Vergleich verschiedener Scans ist zusätzlich die Georeferenzierung zu berücksichtigen. Sowohl Georeferenzierung als auch atmosphärische Einflüsse sind zeitabhängige Variablen und werden derzeit in der Wissenschaft diskutiert. Im Falle der Georeferenzierung sind diese Probleme jedoch gelöst (FRIEDLI et al. 2019).

Bei einem automatisierten Überwachungssystem sind die zuvor genannten Umstände auf jeden Fall zu berücksichtigen. Die Sensitivität als auch das Signifikanzniveau einer Deformationsanalyse wird von beiden Faktoren beeinflusst. In einer experimentellen Studie von FRIEDLI et al. (2019) kann festgestellt werden, dass die vertikale Refraktion über den Tageszyklus variiert und Unterschiede im vertikalen Winkel von bis zu 10 mgon auftreten können. Die Maxima werden mittags erreicht und die Minima nachts.



Abb. 5: Variation der gemessenen Vertikalwinkel über die Zeit (FRIEDLI et al. 2019).



Abb. 6: C2M-Vergleich (Kapitel 3.2 Systemimplementierung, Datenvisualisierung) zweier Scans, die zur Mittagszeit aufgenommen wurden (FRIEDLI et al. 2019)

Diese systematischen Abweichungen führen laut FRIEDLI et al. (2019) zu Höhendifferenzen von bis zu 30 cm bei einer Entfernung von 2 km. Abhängig von der Neigung einer Böschung können Streckenfehler von bis zu 43 cm erkannt werden. Derzeit wird davon ausgegangen, dass die vertikale Brechung den größten Einfluss auf die Messergebnisse hat. Eine Korrektur der kompletten Wegstrecke eines Laserstrahls mit Hilfe atmosphärischer Daten an der Scanposition ist derzeit nicht möglich. Atmosphärische Einflüsse sind nicht linear und können nicht extrapoliert werden. Insbesondere über weite Strecken können Wasserflächen, Vegetation oder offenes Gestein zu einem nichtlinearen Gradienten führen. Derzeit wird empfohlen, Verformungsmessungen zu Tageszeiten durchzuführen, in denen der Temperaturgradient gering ist. Dies ist vor allem in den Abend- und Nachtstunden der Fall. Dies spricht nach dem derzeitigen Stand der Wissenschaft gegen eine hohe zeitliche Diskretisierung einer Überwachungsmessreihe. Die ETH Zürich wird sich in Zukunft auf die Entwicklung eines datenbasierten Korrekturmodells konzentrieren, das die Idee der lokalen Skalenparameter aufgreift.

Auch das Projektkonsortium innerhalb von i²MON arbeitet an diesem Thema und es wurden bereits Messreihen durchgeführt. Die detaillierte Auswertung dieser Daten steht zum Zeitpunkt der Einreichung dieses Beitrags noch aus. Es wurden verschiedene Testszenarien entwickelt und eine Reihe von Messungen durchgeführt, zum Beispiel über ein Flusstal auf eine Felswand. Hier sind die Effekte der atmosphärischen Refraktion besonders auffällig. Darüber hinaus werden derzeit drei weitere Testszenarien entwickelt, in denen eine Referenzgeometrie hochpräzise eingemessen und die Effekte über eine lange Messreihe bewertet werden können.



Abb. 7: i2MON-Testszenario an einem Flusstal – Punktwolke und Bild des Messaufbaus.

Die Probleme und Herausforderungen bei der Verwendung von 3D-Punktwolken aus TLS-Messungen zur Verformungsanalyse werden in diesem Artikel nicht weiter untersucht und sind in WUNDERLICH et al. (2016) übersichtlich zusammengefasst. Verschiedene Methoden für eine geeignete Deformationsanalyse mit Hilfe von TLS-Beobachtungen stammen aus diesen Artikeln und wurden an der Hochschule Mainz hinsichtlich der praktischen Anwendung weiter untersucht.

Trotz zunehmender Nachfrage und Anwendung von TLS für die flächenhafte Deformationsanalyse sind unterschiedliche Auswerteverfahren noch in der Entwicklung und in den meisten Fällen fehlen statistische Tests zur Evaluierung der Messergebnisse. Aus diesem Grund basieren Ergebnisse oft nur auf visuellen Darstellungen (z. B. Heatmaps) und somit dem einfachen Vergleich von Verformungen mit vorgegebenen Schwellenwerten. Darüber hinaus geben einige Strategien rein eindimensionale Verformungen aus den 3D-Punktwolken zweier Epochen wieder.

Der Hauptgrund für die Mängel liegt in dem grundlegenden Problem, wie man zwei Punktwolken vergleicht. Im Gegensatz zur eindeutigen Untersuchung der 3D-Koordinatenänderung eines definierten Punktes zwischen zwei Epochen sind für Oberflächen verschiedene Ansätze mit unterschiedlichen Voraussetzungen und Algorithmen möglich. MUKUPA et al. (2016) und MILL (2016) unterscheiden drei Methoden: Punkt-zu-Punkt, Punkt-zu-Oberfläche und Oberfläche-zu-Oberfläche. OHLMANN-LAUBER et al. (2011) schlagen eine Differenzierung in fünf Kategorien vor, welche im Folgenden kurz dargestellt wird.

Punktbasierte Strategien

Nur sehr wenige punktbasierte Strategien haben in der wissenschaftlichen Gemeinschaft Anerkennung gefunden. Eine der wenigen Publikationen zu diesem Thema wurde von LITTLE (2016) vorgelegt. In seiner Publikation werden Koordinaten bzw. Entfernungen mittels wiederholten Beobachtungen verglichen. Dieser Ansatz ist daher ein vektorieller Vergleich in Bezug auf das Koordinatensystem des Scanners. Der Grund, warum diese Strategie nicht weit verbreitet ist, liegt darin, dass sie nur anwendbar ist, wenn der Blickwinkel des Scanners konstant bleibt. Lässt sich diese Voraussetzung nicht begründen, unterscheidet sich die Punktabtastung im Objektraum erheblich, so dass es nicht möglich ist, einzelne Punkte, die in einer früheren Epoche erfasst wurden, wiederholt zu beobachten.

Punktwolkenbasierte Modelle

In punktwolkenbasierten Modellen werden Beziehungen zwischen Punktwolken durch Koordinatentransformationen hergestellt. Der häufigste Algorithmus dieser Art ist der Iterative-Closest-Point-Algorithmus (ICP). GIRARDEAU-MONTAUT et al. (2005) präsentieren drei Ansätze zur Deformationsüberwachung. Die Schlüsselkomponente aller Methoden ist eine Octree-Struktur (SAMET 2006), bei der eine Punktwolke in mehrere gleich große Würfel unterteilt ist. Die Operationen werden in allen Zellen durchgeführt, was in Bezug auf den Rechenbedarf sehr effizient ist. Voraussetzung dafür ist, dass beide Punktwolken bereits registriert sind, so dass entsprechende Zellen Daten desselben Bereichs enthalten.

Oberflächenbasierte Ansätze

Eines der ersten Deformationsmodelle für oberflächenbasierte Punktwolkenvergleiche wurde in CIGNONI et al. (1998) vorgeschlagen. Deren Algorithmus führt einen Vergleich zweiter Messungen durch, die heutzutage als Cloud-to-Mesh (C2M) oder Cloud-to-Model bezeichnet werden. Zuerst wird eine Referenzpunktwolke trianguliert und anschließend werden die Punkte einer weiteren Messung den Dreiecken zugeordnet. Auf Basis dieser Zuordnung werden Differenzen berechnet. In einem weiteren, finalen Schritt kann die Farbgebung der Punkte entsprechend ihrem Abstand zur Referenzfläche erfolgen. Dieses Verfahren ist eine verbreite Methode, um farbkodierte Darstellungen zu erzeugen, und wird daher in nahezu allen gängigen Softwareprodukten eingesetzt. Eine weitere Methode zur Deformationsüberwachung in den Geowissenschaften wurde in LANE et al. (2003) vorgeschlagen. Hier werden zwei Punktwolken in Rasterdigitalhöhenmodelle (DEM) umgewandelt und es wird ein punktueller Vergleich durchgeführt. SCHÄFER et al. (2004) haben beispielsweise einen Laserscanner an einem Wasserkraftwerk eingesetzt, bei dem eine Schleusenkammer bei verschiedenen Wasserständen vermessen wurde. In allen Epochen wurden Daten aus nur einer Perspektive erfasst, und geometrische Änderungen wurden als Unterschiede zwischen interpolierten Gittern abgeleitet.

Geometriebasierte Methoden

Geometriebasierte Verfahren zeichnen sich durch die Approximation von analytischen oder Freiformflächen an eine gemessene Punktwolke aus. Auf diese Weise werden flächenhafte Verformungen sichtbar. Oftmals werden diese Oberflächen auf Grundlage von geometrischen Primitiven gebildet. IOANNIDIS et al. (2006) haben zwei Approximationen einer Punktwolke eines Kühlturms verglichen. Zum einen mittels eines Hyperboloids und zum anderen mit Hilfe eines B-Splines (NURBS). PESCI et al. (2015) parametrisieren die vier Wände eines historischen Turms als Ebenen und bestimmen die vertikale Verschiebung durch Analyse der Neigungen der Ebenen. Obwohl die Untersuchungen von ELING (2009) bei der Überwachung eines Staudamms bereits als punktwolkenbasiert eingestuft werden kann, ist diese Methode ebenfalls als geometriebasiertes Modell beschreibbar: Die Punktwolke eines Damms wird durch eine Ebenenanpassung auf reproduzierbare Punkte reduziert.

Parameterbasierte Verfahren

Parameterbasierte Verfahren zur Deformationsüberwachung, wie sie in der Definition von OHLMANN-LAUBER et al. (2016) beschrieben sind, sind ein Sonderfall geometriebasierter Verfahren: Hier ist nicht die angenäherte analytische Oberfläche selbst von Interesse. Stattdessen bestimmen die entsprechenden geschätzten Parameter die zu analysierende Verformung. In einigen Fällen wird die Signifikanz dieser Parameter ähnlich wie bei herkömmlichen punktbasierten Verformungsanalysen getestet. HOLST (2015) montierte ein TLS an einem Reflektor eines 100-Meter-Radioteleskops, um die durch die Schwerkraft hervorgerufenen Variationen seiner Brennweite aufzuzeigen. Die erfassten Punktwolken wurden mit einem Rotationsparaboloid parametrisiert; die geschätzte Brennweite bestimmt die flächenhafte Verformung. SCHNEIDER (2006) setzte einen Long Range Laserscanner ein, um die Biegelinie eines Fernsehturms zu überwachen. Daher wurde die Punktwolke segmentiert, indem mehrere Schichten des konischen Turms erzeugt wurden. Jede Scheibe wurde durch einen Kreis angenähert, wobei der Mittelpunkt über die Zeit überwacht wurde.

5 Numerische Modellierung innerhalb des Überwachungssystems

Heutzutage wird die Baugrundkontrolle während der Bergbauprozesse meist durch numerische Modellierung unterstützt. Vor den Bergbauarbeiten basiert das numerische Modell auf verfügbaren Bodeninformationen und idealisierten Bodenverhältnissen. Zu Beginn einer jeden Belagskonstruktion wird akzeptiert, dass die Angaben über die Bodenverhältnisse Lücken enthalten. Darüber hinaus erhöht die Vereinfachung einiger Annahmen die Unsicherheit der Modellierung. Ein gemeinsamer Ansatz für den Umgang mit potenziellem Risiko besteht darin, eine Sensitivitätsanalyse und Risikobewertung ausgewählter Parameter durchzuführen und schließlich die wahrscheinlichsten Bodenverhältnisse anzunehmen, angepasst an verschiedene Sicherheitsfaktoren. Ein solcher Ansatz führt in den meisten Fällen zu einer konservativen Konstruktion. Zwei Aspekte bleiben jedoch in der Regel unzureichend behandelt: das Restrisiko und das Potenzial der Designoptimierung. Daher ist es wichtig, Werkzeuge zur Minimierung des Risikos einzusetzen und eine angemessene Überwachung in jeden Planungsprozess einzubeziehen, die es ermöglicht, alle wichtigen Phänomene nicht nur während des Bergbaubetriebs, sondern auch während der Lebensdauer der Mine zu kontrollieren.

Im Rahmen eines integrativen Monitorings sollen nicht nur die dreidimensionalen Informationen einer Hangbewegung abgeleitet, sondern auch Rückschlüsse auf die Ursache sowie das zukünftige Verhalten gezogen werden. Um die richtigen Schlüsse ziehen zu können, ist es notwendig, Artefakte durch systematische Fehlereinflüsse beim Laserscanning zu minimieren. Für eine erste Machbarkeitsstudie werden hier die Daten aus den Testmessungen über den Fluss genutzt. In diesem Fall haben wir eine Prozesskette simuliert, in der ein neuer Tunnel unter dem gemessenen Gestein aufgefahren wurde.

Wenn das On-Site Mapping Anlass zur Änderung des Konstruktionsmodells gibt, werden die überarbeiteten Datensätze zur Integration in die numerische Modellierung über eine Softwareroutine generiert. Darüber hinaus kann die Geometrie des Modells nach jedem Vermessungszyklus halbautomatisch aktualisiert werden, um den Einfluss der in-situ-Bedingungen auf die Stabilität der Belagskonstruktion und die Optimierungsmöglichkeiten zu analysieren. Die aktuelle Entwicklung zielt auf die Vollautomatisierung solcher Updates, wie in Abbildung 8 dargestellt, wobei z. B. die Änderungen in der angenommenen und bestehenden Lage der Sandsteinschicht in das Modell eingebracht wurden.



Abb. 8: Automatisierung der geologischen Modellierung im Falle eines Tunnelvortriebs nahe der Oberfläche. a) Berechnetes Modell, b) Mittels TLS-Vermessung ermittelte geometrische Veränderungen und Update des Modells.

Die kontinuierliche Erfassung neuer Daten ermöglicht es, ein idealisiertes numerisches Modell um wichtige Informationen wie den vorhandenen Overbreak und andere As-Built-Details zu erweitern (Abbildung 9). Auf diese Weise wird die Zuverlässigkeit der Simulationen erhöht und die Auswirkungen des Bergbaubetriebs können besser bewertet werden. In diesem speziellen Beispiel konnten Risikobereiche an der Oberfläche identifiziert werden, bei denen die Überwachungsmessungen für ein bestimmtes Aushub- und Ausbauszenario intensiviert werden sollten (Abbildung 10).



Abb. 9: Beispiel für eine automatisierte Korrektur des Modells beim Tunnelvortrieb a) Übersicht über den Tunnel mit der Lage der eingebauten Ankerbolzen b) As-Built-Liner nach automatisierter Geometriekorrektur auf Basis von Messungen.



Abb. 10: Identifizierte Risikogebiete an der Oberfläche basierend auf den berechneten Bodenbewegungen für ein bestimmtes Aushub- und Ausbauszenario.

6 Fazit

Das i²MON-Projekt startete im Jahr 2018. Erste Untersuchungen sowie Tests haben ein hohes Potenzial für den Einsatz eines Laserscanners in einem räumlich und zeitlich kontinuierlichen Überwachungssystem gezeigt. Den Rahmen für die Entwicklung eines integrierten Überwachungssystems bildet die Verfügbarkeit von Hardware wie dem RIEGL VZ-2000i oder einer Softwarearchitektur innerhalb von DMT SAFEGUARD.

Der Laserscanner wird in ein automatisiertes System integriert, sodass Forschungsthemen zur Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Integrität von 3D-Punktwolken bearbeitet werden können. Aus diesem Grund müssen im Rahmen dieses Projektes neben der Implementierung eines integrierten Systems auch weitere grundlegende Forschungsthemen geklärt werden. Die aktuelle Entwicklung konzentriert sich auf die Umsetzung der Ergebnisse von Messungen in numerische Modelle. Aufgrund der großen Datenmengen aus Messepochen ist es notwendig, den Prozess der Datenintegration zu automatisieren. Die aktuellen Ergebnisse zeigen eine Verbesserung der Zuverlässigkeit numerischer Modelle und stellen einen Fortschritt in der Automatisierung der Überwachung dar. Während die erforderlichen Hardwarekomponenten sowie die geomechanische Modellierungssoftware jederzeit verfügbar sind, befindet sich das integrierte Monitoringsystem in der Entwicklung.

Im Mittelpunkt der Forschungsarbeiten stehen Fragen von systematischen Einflüssen auf die Messung, des multitemporalen Vergleichs von Punktwolken und der Aktualisierung numerischer Modelle insbesondere in Tagebauen.

Danksagung

Diese Arbeit wird vom Forschungsfonds der Europäischen Union für Kohle und Stahl [RFCS-Projektnummer 800689 (2018)] unterstützt.

Darüber hinaus danken wir der RIEGL Laser Measurement Systems GmbH für den fachlichen Austausch und die Unterstützung im Rahmen unserer Forschungsaktivitäten.

Des Weiteren danken wir Denise Becker, Lukas Hart, Nils Kummert, Silke Sommer und Lea Vogel für ihre praktischen Untersuchungen zum Einsatz des RIEGL VZ-2000i und die Punktwolkenverarbeitung im beschriebenen Kontext während ihres Bachelor- bzw. Masterstudiums an der Hochschule Mainz.

Literatur

- CIGNONI, P., ROCCHINI, C. & SCOPIGNO, R. (1998): Metro: Measuring Error on Simplifed Surfaces. In: Computer Graphics Forum, 17(1998)2, pp 167–174.
- ELING, D. (2009): Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung (Dissertation). Online. https://www.dgk.badw.de/fileadmin/user_upload/Files/DGK/docs/c-641.pdf (26.03.2019).
- FRIEDLI, E., PRESL, R. & WIESER, A. (2019): Influence of atmospheric refraction on terrestrial laser scanning at long range. In: Proceedings of the 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM) May 15–17 2019, Athens.
- GIRARDEAU-MONTAUT, D., ROUX, M., MARC, R. & THIBAULT, G. (2005): Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36(2005) Part 3/W19, S. 30–35.
- HEUNECKE, O., KUHLMANN, H., WELSCH, W., EICHHORN, A. & NEUNER, H. (2013): Handbuch Ingenieurgeodäsie – Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen, 2. Auflage (2013), Wichmann Berlin Offenbach, S. 1–48.
- HOLST, C. (2015): Analyse der Konfiguration bei der Approximation ungleichmäßig abgetasteter Oberflächen auf Basis von Nivellements und terrestrischen Laserscans (Dissertation). Online. https://dgk.badw.de/fileadmin/user_upload/Files/DGK/docs/c-760.pdf (26.03.2019).

- IOANNIDIS, C., VALANI, A., GEORGOPOULOS, A. & TSILIGIRIS, E. (2006): 3D model Generation for Deformation Analysis using Laser Scanning data of a Cooling Tower. In: Proceedings of the 3rd IAG/12th FIG Symposium, May 2 –24, 2006, Baden, Austria.
- LANE, S. N., WESTAWAY, R. M. & MURRAY HICKS, D. (2003): Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing. In: Earth Surface Processes and Landforms, 28(2003)3, S. 249–271.
- LITTLE, M. J. (2006): Slope monitoring strategy at PPRust open pit operation. In: Proceedings of the International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering, Cape Town, South Africa, S. 221–230.
- MILL, T. (2016): Simulation of terrestrial laser scanning errors occurring during deformation monitoring. In: Proceedings of the 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), March 30–April 01, 2016, Vienna, Austria. CD-ROM.
- MUKUPA, W., ROBERTS, G.W., HANCOCK, C.M. & AL-MANASIR, K. (2016): A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. In: Survey Review, 48(2016), S 1–18.
- MÜLLER, M., SCHMENGER, F., SCHRÖDER, D. & ZSCHIESCHE, K. (2016): Evaluierung eines modernen Messverfahrens zur Deformationsanalyse flächenhafter Ingenieurbauwerke am Beispiel der Ennepetalsperre. In: Scientific Reports der Hochschule Mittweida ,Messtechnische Überwachung von Stauanlagen, Nr. 2, 2016, ISSN 1437-7624, S. 27–35.
- OHLMANN-LAUBER, J. & SCHÄFER, T. (2011): Ansätze zur Ableitung von Deformationen aus TLS-Daten. In: 106. DVW Seminar Terrestrisches Laserscanning – TLS 2011, Wißner, Augsburg, S. 161–180.
- PESCI, A., TEZA, G. & BOSCHI, E. (2015): Laser scanning-based detection of morphological changes of a historical building occurred during a seismic sequence: Method and case study. In: International Journal of Geomatics and Geosciences, 5(2015)3, S. 427–447.
- SAMET, H. (2006): Foundations of Multidimensional and Metric Data Structures. Kaufmann, San Francisco, CA.
- SCHÄFER, T., WEBER, T., KYRINOVIC, P. & ZÁME^{*}CNIKOVÁ, M. (2004): Deformation measurement using terrestrial laser scanning at the hydropower station of Gabcíkovo. In: INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, November 11–13, 2004, Bratislava, Slovakia. CD-ROM.
- SCHNEIDER, D. (2006): Terrestrial laser scanning for area based deformation analysis of towers and water dams. In: Proceedings of the 3rd IAG/12th FIG Symposium, May 22–24, 2006, Baden, Austria.
- SCHRÖDER, D. (2018): Der Paradigmenwechsel in der Ingenieurgeodäsie Zeit- und raumkontinuierliche Messwerterfassung an Ingenieurbauwerken. In: Scientific Reports der Hochschule Mittweida, Messtechnische Überwachung von Stauanlagen, Nr. 1, 2018, ISSN 1437-7624, S. 84–91.
- WUNDERLICH, T., NIEMEIER, W., WUJANZ, D., HOLST, C., NEITZEL, F. & KUHLMANN, H. (2016): Areal Deformation Analysis from TLS Point Clouds – The Challenge. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (avn), 123 (2016) 11–12, S. 340–350.
- ZIMMERMANN, K., SCHRÖDER, D., FINGERHUTH, S. & GESCHE, R. (2019): Integrated Monitoring of Tailings: EIT STINGS. In Proceedings of Tailings 2019 July 10–12 2019, Santiago de Chile.

Drohnenbasiertes Monitoring von Oberflächenveränderungen an Felswänden

Klaus CHMELINA, Andreas GAICH und Robert DELLESKE

1 Einleitung

Flugdrohnen (UAV, UAS) werden heute bereits in zahlreichen Anwendungsfeldern der Ingenieurgeodäsie erfolgreich für Messaufgaben genutzt. Zu den bislang häufigsten Aufgabengebieten zählen Bestands- und Zustandsdokumentation sowie Inspektion. Beflogen werden Objekte unterschiedlichster Art, darunter Fassaden, Dächer, Türme, Brücken, Tunnel, Schächte, Steinbrüche, Tagebaue, Staumauern, Erddämme, Kirchen, Windturbinen, Industrieanlagen, Kraftwerke, Deponien, Stützmauern, Baugruben, aber auch Gletscher, Seen, Felswände, Berghänge, Wälder, Felder u. v. m.

Die mehrheitlich zum Einsatz kommenden Aufnahmesensoren bilden digitale Kameras (fallweise auch Multispektral- und Thermalkameras) und (noch etwas seltener) Laserscanner. Neuere Entwicklungen speziell für Flugdrohnen eröffnen innovative Anwendungsmöglichkeiten und erhöhen deren Flexibilität und Funktionalität. Ultraschall- und Radarsensorik, lange Flugzeiten, RTK-Positionierung, automatische Start- und Landesysteme, Schwarmbetrieb, Beleuchtungsvorrichtungen, Schutzumhüllungen etc. ermöglichen Spezialanwendungen selbst unter schwierigen Bedingungen. Drohnen sind auf dem Weg, ein vielseitig nutzbares und sogar automatisierbares Vermessungswerkzeug zu werden.

Die standardmäßig erzeugten Auswerteergebnisse bilden hochauflösende Luftbilder, georeferenzierte, texturierte 3D-Punktwolken und Orthofotos, digitale Höhen-, Gelände- und Oberflächenmodelle (DHM, DGM, DOM), Volumenmodelle zur Massenermittlung bis hin zu Modellen für VR-Visualisierungen, GIS und neuerdings auch BIM. Für die Datenauswertung stehen etablierte SW-Werkzeuge am Markt zur Verfügung.

Neben den genannten Aufgaben werden Drohnen mittlerweile vermehrt auch für das Geomonitoring und zur Bauwerksüberwachung eingesetzt. Aufgrund verschiedener Ursachen (Klimawandel, Intensivierung von Besiedelung und Nutzung) ist speziell im alpinen Raum eine Zunahme von zu überwachenden Hangrutschungen, Vermurungen und Berg- und Felsstürzen zu verzeichnen, für deren Messung Drohnen ausgezeichnet geeignet erscheinen.

Im Rahmen des EUREKA-Forschungsprojektes DefDrone_3D (2017-2019) haben die Partner Geodata, 3GSM und Georesearch die Nutzung von Drohnen speziell für das bildbasierte Monitoring von 3D-Verschiebungen an Felswänden und Erddämmen näher untersucht. Ziel waren Entwicklung und Test eines kostengünstigen, rasch, einfach und flexibel einsetzbaren, drohnenbasierten Monitoringsystems.

Im vorliegenden Beitrag werden die Komponenten des Messsystems, die Flugplanung, die durchgeführten Untersuchungen und Messkampagnen beim Tunnelprojekt Zentrum am Berg in Österreich, die Auswertemethodik und die erzielten Messresultate vorgestellt.

2 Das Messgebiet Zentrum am Berg (ZAB)

Das "Zentrum am Berg" (ZAB) ist ein Tunnelprojekt zur Errichtung eines untertägigen Forschungs-, Ausbildungs- und Trainingszentrums der Montanuniversität Leoben. Es befindet sich am steirischen Erzberg (Abbildung 1 links), dem größten mitteleuropäischen Eisenerztagebau am Rande der Stadt Eisenerz. Das Tunnelprojekt besteht aus zwei Eisenbahn- und zwei Straßentunneln (Abbildung 1 rechts), welche konventionell nach der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise aufgefahren werden. Die Portale der Straßentunnel liegen in nicht mehr für den Abbau genutzten Bergbaubereichen. Die Vortriebsarbeiten erfolgten von Juni bis November 2018. Anfang 2020 ist der Vollbetrieb des Zentrums geplant.



Abb. 1: Steirischer Erzberg (links) und Tunnelprojekt "Zentrum am Berg" (rechts).

Über, unter und neben den beiden Portalen der Straßentunnel erstrecken sich zahlreiche ungesicherte, schwer einsichtige und zum Großteil unbegehbare Abfolgen von Felsterrassen und steil stehenden Felswänden aus früheren Abbauaktivitäten. Die Felsstrukturen sind stark zerklüftet und es ereignen sich häufig Steinschläge bis hin zu kleineren Felsstürzen, insb. in den Wintermonaten. Eine Überwachung des Gesamtareals auf Veränderungen und Verformungen kann mit klassischen Methoden (TPS, Laserscanner, geotechnische Instrumentierung) nur eingeschränkt erfolgen. Fehlende Sichtbarkeiten und Betretungsrisiko verhindern sowohl eine umfassende geotechnische Instrumentierung als auch eine berührungslose terrestrische Überwachung des Messgebiets.



Abb. 2: Felswand im Portalbereich.

Alternativ wurde daher die Möglichkeit der Überwachung der Felsareale mittels Drohne(n) überlegt und im genannten Forschungsprojekt DefDrone_3D untersucht. Abbildung 3 zeigt das ausgewählte Überwachungsgebiet rund um die beiden Tunnelportale. Seine Höhenausdehnung reicht über mehrere ehemalige Tagebauterrassen (ca. 100 Höhenmeter), bei einer Lageerstreckung von ca. 150 m x 150 m.



Abb. 3: Überwachungsgebiet im Bereich der Straßentunnelportale.

3 Das Messsystem

3.1 Drohnen und Kameras

Im Projekt wurden verschiedene Multikopterdrohnen und Digitalkameras im Rahmen eines Systemvergleichs untersucht (Abbildung 4).



Abb. 4: Drohnen, Kameras und Piloten beim Systemvergleich im Messgebiet (links), letztlich ausgewählte Drohne DJI Phantom 4 pro (rechts).

Getestet wurden die folgenden Systeme, darunter sowohl kleinere Drohnen mit integrierten Kameras als auch etwas größere Modelle mit externen Kameras:

- DJI Phantom 4 Pro mit integrierter Kamera (1" CMOS, 20 MP, 24 mm)
- DJI Mavic Pro mit integrierter Kamera (12 MP, 24mm) im Schwarm mit fünf Drohnen
- DJI S1000 mit externer Kamera (Sony A7R, 36 MP, 35 mm)
- DJI M600 mit externer Kamera (Phase One iXM-100, 100 MP, 80 mm)
- DJI M600 mit externer Kamera (Phase One iXU-1000, 100 MP, 55 mm)
- DJI M600 mit externer Kamera (Hasselblad A6d, 100 MP, 55 mm)
- DJI M210rtk mit externer Kamera (Zenmuse X5S, 20.8 MP, 30 mm)

Die Vergleiche erlaubten Rückschlüsse auf qualitative Eigenschaften wie Benutzerfreundlichkeit, Einfachheit von Transport, Aufbau und Bedienung, Zeit und Aufwand für Herstellung der Flugbereitschaft, Flugverhalten (Stabilität, Windeinfluss, Manövrierfähigkeit), Lärmemissionen, verfügbare Funktionen (Automatikflug, RTK) u. s. w. Die genannten Eigenschaften variieren naturgemäß systemabhängig, ebenso die quantitativen Parameter Größe, Eigengewicht, Traglast, Reichweite, Fluggeschwindigkeit, -dauer und -höhe, Betriebstemperatur, Sichtfeld, Messfrequenz u. s. w. Sinngemäße Vergleiche erfolgten für die Eigenschaften und Parameter der getesteten Kameras.

Die Wahl der Drohne-Kamera-Kombination ist letztlich ein Kompromiss. Aufgrund der Absicht zur Entwicklung eines kostengünstigen und rasch, einfach und flexibel einsetzbaren Messsystems erfolgten die weiteren Untersuchungen und die Durchführung des Messprojekts mit der Drohne DJI Phantom 4 Pro mit integrierter Kamera (Abbildung 4 rechts). Das System erwies sich als hinreichend robust und performant, stellt vergleichsweise geringe Anforderungen an den Piloten und die Zulassung, und konnte in weiterer Folge auch die Qualitätserwartungen an die erfassten Bilddaten zufrieden stellen.

3.2 Georeferenzierung mittels Ground Control Points

Ziel war die Bestimmung von 3D-Verschiebungen in einem absoluten Koordinatenrahmen. Zur Georeferenzierung wurden, einem klassischen Ansatz folgend, festvermarkte Referenzpunkte (Ground Control Points) eingesetzt, für welche ein neuartiger Targettyp entwickelt wurde. Das Target kann sowohl terrestrisch mittels TPS als auch von der Drohne erfasst werden. Hierzu besteht es je nach Variante aus einer kardanisch gelagerten Reflexfolie (Abbildung 5 links) oder einem Miniprisma (Abbildung 5 rechts) im Zentrum einer Zielscheibe aus Metallblech mit aufgeklebter wasserfester Farbfolie. Zielscheibe und Reflexfolie bzw. Miniprisma können getrennt voneinander in verschiedene Richtungen unter Wahrung der räumlichen Lage des Punktzentrums verschwenkt werden. Das Target kann mittels Standardvermarkungstechnik (z. B. mittels Sollbruchstelle auf KV-Bolzen) sowohl an horizontalen als auch vertikalen Flächen verankert werden. Bei Beschädigung ist ein zwangszentrierter Tausch möglich.

Auf eine individuelle Codierung der Targets, zwecks automatischer Punkterkennung im Auswerteprozess, wurde für das vorliegende Messprojekt verzichtet, da die Punktzuordnung ab der 1. Folgemessung bereits über die bekannten Koordinaten erfolgen kann. Eine solche Codierung wäre für eine vollständige Automatisierung der Auswertung und insb. aufgrund der


häufig nötigen Neuvermarkungen und Lageveränderungen der Punkte zwischen den Messepochen aber (nachträglich betrachtet) durchaus vorteilhaft gewesen.

Abb. 5: Entwickeltes GCP-Target zur gleichzeitigen Messung mittels TPS und Drohne, links: GCP-Reflexfolientarget, rechts: GCP-Miniprismentarget.

Das Messkonzept sieht somit vor, dass Referenzpunkte in ausreichender Zahl und günstiger Verteilung im Messgebiet/am Messobjekt vermarkt werden können. Dies hat für das vorliegende Tagebaugebiet die Nachteile, dass Gefahrenbereiche zur Installation der Targets betreten werden müssen und deren terrestrische Messung vor jeder Befliegung erfolgen muss. Für das Ziel der Erfassung absoluter 3D-Verschiebungen möglichst hoher Genauigkeit wurde das Konzept aber als alternativlos gesehen. Es bietet zumindest den Vorteil, dass die photogrammetrischen Messergebnisse im Umfeld der Referenzpunkte mit den terrestrischen abgeglichen werden können; somit eine Kontrolle an Einzelpunkten möglich ist.



Abb. 6: Anordnung von Referenzpunkten im Überwachungsgebiet.

Im vorliegenden Projekt wurden Messepochen über einen Zeitraum von zwei Jahren in unregelmäßigen Zeitabständen ausgeführt. Da das Überwachungsgebiet weiträumig als instabil anzusehen war, wurden die 3D-Koordinaten der Referenzpunkte regelmäßig durch eine Netzmessung mit einer Genauigkeit von +/- 3 mm neu bestimmt. Vereinzelt gingen Punkte aufgrund von Steinschlägen und auch Bautätigkeit verloren und mussten ersetzt werden. Durchschnittlich waren bei jeder Messepoche 16 Referenzpunkte nutzbar (Abbildung 6).

3.3 3D-Flugplanung

Für eine möglichst lückenlose und mit konstanter Kamera-Objekt-Distanz ausgeführte Erfassung geometrisch komplexer, natürlicher Oberflächen ist eine an die Topographie angepasste Flugplanung erforderlich. Da diese für das Überwachungsgebiet vorab nicht bekannt war, wurde eine Überblicksbefliegung zur Erstellung eines 1 m-aufgelösten 3D-Modells ausgeführt. Als Folge der im Zuge des Tunnelprojekts durchgeführten Geländeaufschüttungen und -abtragungen wurde dieses Modell mehrmals aktualisiert und für eine 3D-Flugplanung in die Software UgCS Mission Planning (UGCS 2019) importiert. Die SW ermöglicht den Import eines DGM inkl. Orthofotos und, darauf basierend, die abschnittsweise Planung einer rasterförmigen Gesamtflugroute (Abbildung 7). Für jeden Flugabschnitt vorzugeben sind Kamerarichtungs- und -neigungswinkel, der Pixelabstand am Objekt (Ground Sampling Distance) sowie die gewünschte Bildüberdeckung in Vorwärts- und Seitwärtsflugrichtung. Die Fluggeschwindigkeit und letztlich die Gesamtflugdauer der Mission ergeben sich aus der vom Datenerfassungssystem benötigten Zeit für Bildauslösung und -speicherung (z. B. 4 s bei der genutzten Drohne DJI Phantom 4 Pro bei Speicherung der Bilder im RAW-Format). Entsprechend der Gesamtflugdauer sind Batteriewechselstopps einzuplanen.



Abb. 7: links: 3D-Flugplan des Messgebiets, basierend auf einem 1 m-DGM für einen Schwarm, bestehend aus fünf Drohnen, rechts: 3D-Flugplan für eine Einzeldrohne.

Die so geplante Flugmission wird simuliert und evtl. vorhandene Lückenbereiche am DGM können visualisiert und dadurch vermieden werden. Zudem ermöglicht die Software die Planung von Schwarmmissionen, welche zur Reduktion der Messzeiten erheblich beitragen können. Der so erzeugte Flugplan dient in weiterer Folge der Drohne als Steuerdatensatz für den Automatikflug. Im Projekt wurden zur lückenlosen Erfassung der horizontalen Terrassen und in verschiedene Himmelsrichtungen weisenden, vertikalen Felswände sowohl Nadiraufnahmen als auch Aufnahmen mit Kameraneigungen von 30° und 60° durchgeführt. Die gewählte Bildüberdeckung betrug 80 %, der Pixelabstand am Objekt 1 cm. Im Schnitt dauerte ein Automatikflug über das Überwachungsgebiet bei Verwendung von nur einer Drohne rund 40 Minuten. Die Gesamtzeit für Aufbau, Messung, zwei Batteriewechsel und Abbau betrug im Schnitt 1 h

3.4 Auswertekonzept, Deformationsanalyse

Ausgangsdaten für die Auswertung bilden die terrestrisch bestimmten 3D-Koordinaten der Referenzpunkte und der aufgenommene Bildverband aus der Befliegung. Aus den beiden Datensätzen wird in einem ersten Schritt ein georeferenziertes, hochauflösendes 3D-Modell (Punktwolke) unter Verwendung eines Structure-from-Motion Algorithmus (SNAVELY 2008) mit der 3GSM-Software ShapeMetriX (3GSM 2019) berechnet. Dieser Schritt erfolgt analog für die nachfolgende Messepoche (Auswertekonzept siehe Abbildung 8).



Abb. 8: Auswertekonzept zur Deformationsanalyse.

Aus den beiden 3D-Modellen wird in einem zweiten Schritt ein Differenzmodell erzeugt, um etwaige im Zeitraum zwischen den Messepochen aufgetretene, übergroße Modelländerungen, die keine Deformationen im eigentlichen Sinn darstellen, zu identifizieren (Change Detection, Abbildung 8). Dies ermöglicht die Erkennung von z. B. Erdbaumaßnahmen und zwischenzeitlich abgelagerten Baumaterialien, Baumaschinen und auch Personen und die Entfernung dieser Bereiche aus den Modellen. Danach erfolgt die Verrechnung der vorgefilterten 3D-Modelle für den Zweck der Deformationsanalyse.

Für die Deformationsanalyse, ausgehend von zwei Punktwolken, existieren verschiedene Verfahren, welche auch in Standardsoftware implementiert sind (HOLST et al. 2016) und sich in unterschiedlicher Weise zur Aufdeckung von Deformationen eignen. Im vorliegenden Fall kann von 3D-Oberflächen ausgegangen werden, d. h. zusätzlich zu den Punktwolken gibt es eine Beschreibung, wie diese Punkte miteinander verbunden sind und die Zusatzinformation der Bilddaten. Es wurden daher mehrere Methoden implementiert und untersucht, die diese Tatsache berücksichtigen. Diese sind:

1. Verschiebung entlang einer beliebigen Richtung (Achse)

Bei dieser Methode wird die Verschiebung entlang einer benutzerdefinierten Achse berechnet. Um die Verschiebung für einen Punkt im Ausgangsmodell aufzufinden, wird ein Strahl erzeugt, der von diesem Punkt aus in Richtung der gewählten Achse zeigt. Dieser Strahl wird mit einer lokalen Oberfläche des zweiten Modells geschnitten. Der Vektor zwischen dem Ausgangs- und Schnittpunkt wird als Deformationsvektor definiert. Vorteil dieser Methode ist die Anwendbarkeit auf alle 3D-Modelle und die spezifische Suche nach Deformationen bestimmter Richtung. Nachteilig ist, dass Verschiebungen eben genau nur in der gewählten Richtung bestimmt werden und keine Bildinformationen mitgenutzt werden.

2. Verschiebung entlang von Normalvektoren

Das Verfahren ist ähnlich dem o. a. Verfahren mit dem Unterschied, dass die Richtung für jeden Punkt lokal berechnet wird. Dafür wird die Oberflächennormale für jeden Punkt auf Grund seiner lokalen Umgebung errechnet, und in diese Richtung der Schnittpunkt mit dem zweiten Modell berechnet. Der Vorteil dieser Methode ist, wie oben, die Anwendbarkeit auf alle 3D-Modelle ohne jedoch die Richtung des Vergleichs vorgeben zu müssen. Das Verfahren entspricht genähert dem als Cloud-to-Cloud-Vergleich (C2C) mit lokaler Modellierung bezeichneten Verfahren (HOLST et al. 2016) und ist ebenso ein rein geometrisches Verfahren ohne Nutzung von Informationen in den Bildern.

3. 2D-Bildmatching

Bei dieser Methode wird die Bildinformation aus den digitalen Luftbildern mitbenutzt. Es wird ein 2D-Bild in beiden Aufnahmeepochen erstellt. In diesen Bildern werden korrespondierende Bildpunkte mittels PatchMatch Algorithmus (BLEYER 2011) prozessiert. Aus diesen 2D-Korrespondenzen werden anschließend 3D-Verschiebungsvektoren rückberechnet. Der Vorteil dieser Methode ist, dass auch Verschiebungen entlang der Oberfläche erkannt werden können. Der Nachteil ist, dass diese Methode nur angewendet werden kann, wenn es signifikante Strukturen (Textur) in den zu vergleichenden Bildern gibt und sich diese über die Zeit zwischen den Aufnahmen nicht zu stark geändert haben.

4. 3D-Deskriptor-Matching

Bei dieser Methode werden lokale Deskriptoren aus den Punktwolken der beiden 3D-Modelle errechnet. Durch einen Vergleichsalgorithmus werden hernach korrespondierende Punkte in beiden Modellen gesucht. Es wurden mehrere Deskriptoren miteinander verglichen: (i) Color SHOT (TOMBARI 2011), (ii) RIFT (LAZEBNIK 2005) und (iii) PFHRGB (RUSU 2008). Der grundlegende Vorteil dieses Ansatzes ist die Erkennung von Verschiebungen entlang der 3D-Oberfläche, auch wenn es wenig Oberflächentextur gibt. Die Methode liefert aber wenig Ergebnisse in glatten Bereichen.

4 Untersuchungen und Ergebnisse

4.1 Vergleichsuntersuchungen an einer Felswand

Zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit von Messsystem und Auswertemethoden wurde ein steil stehender Felswandabschnitt (Abbildung 9) mit einer Länge von 20 m und einer Höhe von 10 m mit vorgelagertem Geröll-Schuttkegel und davor befindlicher horizontaler Schotterstraße ausgewählt und unabhängig und zeitgleich sowohl beflogen als auch mit einem 3D-Laserscanner vom Typ Faro Focus 3D in höchster Auflösung gescannt.



Abb. 9: Felswand mit Lage der drei künstlichen Platten (Kreise).



Abb. 10: Punkt-zu-Punkt-Abstände zweier Laserscan-Punktwolken (links) und zweier Drohnen-Punktwolken (rechts) aus aufeinanderfolgenden Aufnahmen der Felswand.

Die Punktwolken wurden über Referenztargets in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert. Es erfolgten Aufnahmen jeweils vor und nach der Durchführung künstlicher Veränderungen im Gelände. Diese bestanden aus Verlagerungen einzelner Gesteinsbrocken und kleinerer Bodenbereiche bis hin zu Verschiebungen, Verkippungen und Verdrehungen dreier rechteckiger Platten, an denen Reflektoren montiert waren, sodass deren räumliche Verschiebungen mittel TPS nachvollzogen werden konnten.

Zur Abschätzung der Datenqualität zeigt Abbildung 10 die absoluten Häufigkeiten der Punkt-zu-Punkt-Abstände aus dem Punktwolkenvergleich, links für zwei Messepochen des Laserscanners und rechts für zwei Epochen der Drohne. Die Ergebnisse zeigen, dass der Laserscanner die Szene mit einer Wiederholgenauigkeit kleiner ± 1 cm erfassen kann, während je zwei Drohnenpunktwolken eine etwas geringere Übereinstimmung im Bereich weniger cm aufweisen. Abbildung 11 zeigt die Punkt-zu-Punkt-Abstände zwischen Laserscan als Soll-Referenz und Drohnenpunktwolke. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass Deformationen in der Größenordnung ab ± 3 cm aus wiederholten Drohnenmessungen durchaus erfassbar sind.

Die Auswertung der jeweiligen Differenzmodelle (nachher-vorher) aus Laserscan und Drohnenaufnahme (Abbildung 12) ergab, dass die künstlich erfolgten Veränderungen des Geländes vom Drohnenmesssystem nach Anzahl und Lage korrekt erkannt wurden.



Abb. 11:

Punkt-zu-Punkt-Abstände von Laserscan und Drohnenpunktwolke.



Abb. 12: Detektierte Geländeveränderungen im Nachher-Vorher-Differenzmodell aus den beiden Laserscans (links) und den beiden Drohnenbefliegungen (rechts).



Abb. 13: 3D-Modellauschnitte mit Gesteinsbrocken vor (links) und nach künstlich erzeugter Abrutschung (Mitte); 3D-Vektoren aus der Deformationsanalyse (rechts).



Abb. 14: 3D-Modellauschnitt mit Platte vor (links) und nach (Mitte) einer künstlichen Verschiebung von rechts oben nach links unten; 3D-Vektoren aus der Deformationsanalyse inkl. echte Plattenlage aus der TPS-Auswertung, zu sehen als Rechtecke (rechts) und Pfeile (Mitte).



Abb. 15: 3D-Modellauschnitte mit Platte vor (links) und nach (Mitte) einer künstlichen Rotation nach links; 3D-Vektoren aus der Deformationsanalyse inkl. echte Plattenlage aus der TPS-Auswertung, zu sehen als Rechtecke (rechts) und Pfeile (Mitte).



Abb. 16:

Modellauschnitt mit Platte und farbcodierter Visualisierung der Deformationsbeträge. An den Ecken zu sehen die Messreflektoren.

Die durchgeführten Auswertungen von Felswand und Platten (Abbildungen 12–16) und der Vergleich der Ergebnisse mit TPS und Laserscanner bestätigten, dass das Drohnenmesssystem in Kombination mit den verwendeten Auswertemethoden Oberflächenveränderungen in der Größenordnung weniger cm leisten kann.



Abb. 17: links: Darstellung bauseits verursachter Geländeveränderungen zwischen erster und letzter Messepoche (= Ergebnis der Change Detection). rechts: Ergebnis der Deformationsauswertung für das Gesamtgebiet als Farbvisualisierung von 3D-Deformationsvektoren.

4.2 Auswertung Gesamtmessgebiet

Die aus den Messungen erzeugten 3D-Modelle für das gesamte Überwachungsgebiet umfassten je ca. 35 Millionen Punkte bei einem durchschnittlichen Punktabstand von 2,7 cm. Die Georeferenzierung der einzelnen Epochen gelang im Schnitt mit einer Genauigkeit von 2,4 cm. Abbildung 17 links zeigt die zwischen erster und letzter Messepoche aufgetretenen Geländebewegungen zufolge von Baumaßnahmen (Erdbewegungen), welche im Zuge der Auswertungen vorab eliminiert wurden. Abbildung 17 rechts stellt die Restdeformationen im gesamten Überwachungsgebiet und über den gesamten Beobachtungszeitraum dar.

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Mit dem Messsystem und der entwickelten Auswertesoftware ist es möglich, drohnenbasierte Deformationsmessungen von nur einer Person nach einem einmal vordefinierten Ablaufschema und Flugplan ausführen und auswerten zu lassen. Für das beschriebene Messgebiet wurde hierfür eine Gesamtmesszeit von ca. 3 h (2 h für die terrestrischen Messungen + 1 h für den Automatikflug) benötigt. Die Auswertezeit betrug ca. 5 h bei Verwendung eines PCs (Win10 64 Bit, i7, 2,6 GHz, 16 GB RAM), wovon ca. 0,5 h für die Auswertung der terrestrischen Netzmessungen und 4,5 h an Rechenzeit für die 3D-Modellerstellung aus den insgesamt 750 Luftbildern gebraucht wurde. Die Berechnung der Differenzmodelle und Verformungsvektoren aus je zwei 3D-Modellen erforderte dann nur mehr 5–10 min pro Vergleichsmethode (Kapitel 3.4). Aus den Zeiten kann gefolgert werden, dass eine einmal tägliche Messung bereits im Bereich des Möglichen liegt, beispielsweise Messung vormittags und Auswertung nachmittags. Die Nutzung von Drohnen für ein kontinuierliches Monitoring, so z. B. baubegleitend bei Tunnelprojekten wie im vorliegenden Projekt, rückt somit in greifbare Nähe.

Es ist davon auszugehen, dass in Zukunft Drohnen für vollautomatische Überwachungsmessungen eingesetzt werden. Hierfür müssen die Rechenzeiten noch weiter verringert werden, Drohnen automatisch starten, landen und ihre Akkus tauschen und laden können und die Georeferenzierung entweder automatisiert oder anders gelöst werden.

Danksagung

Die Durchführung des Projekts erfolgte unter freundlicher Genehmigung des Bauherren Montanuniversität Leoben und der Baufirma Swietelsky Tunnelbau GmbH. Es wurde im Rahmen des EUREKA-Forschungsprojektes DefDrone_3D aus nationalen und europäischen Mitteln gefördert.

Literatur

- 3GSM, ShapeMetriX UAV (2019): <u>https://3gsm.at/produkte/shape-metrix-uav/</u>(16.11.2019).
- BLEYER, M., RHEMANN, C. & ROTHER, C. (2011): PatchMatch Stereo Stereo Matching with Slanted Support Windows. In: HOEY, J., MCKENNA, S. & TRUCCO, E.: Proceedings of the British Machine Vision Conference, S. 14.1–14.11, BMVA Press.
- GAICH, A., PÖTSCH, M. & SCHUBERT, W. (2017): Digital rock mass characterization 2017. Where are we now? – What comes next? Geomechanics and Tunnelling 10, No. 5, S. 561–567.
- HIRSCHMÜLLER, H. (2008): Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, S. 328–341.
- HOLST, C., KUHLMANN, H. & SCHMITZ, B. (2016): TLS-basierte Deformationsanalyse unter Nutzung von Standardsoftware. In: DVW-Schriftenreihe, Band 85/2016, S. 39–58, Wißner-Verlag.
- LAZEBNIK, S., SCHMID, C. & PONCE, J. (2005): A sparse texture representation using local affine regions. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 27 (8), S. 1265–1278.
- NEUNER, H., HOLST, C. & KUHLMANN, H. (2016): Overview on current modelling strategies of point clouds for deformation analysis. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 11/2016, Wichmann Verlag, Berlin.
- RUSU, R. B., BLODOW, N., MARTON, Z. C. & BEETZ, M. (2008). Aligning point cloud views using persistent feature histograms. In: Beiträge zur IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (S. 3384–3391).
- SCHÖNEBERGER, J. L. & FRAHM, J. M. (2016): Structure-from-Motion Revisited. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).
- SNAVELY, N., SEITZ, S. M. & SZELISKI, R. (2008): Modeling the World from Internet Photo Collections. In: International Journal of Computer Vision, Issue 2, S. 189–210.
- TOMBARI, F., SALTI, S. & DI STEFANO, L. (2011): A combined texture-shape descriptor for enhanced 3D feature matching. In: Beiträge zur 18th IEEE International Conference on Image Processing, S. 809–812.
- UGCS (2019): User Manual. <u>https://www.ugcs.com/files/manuals/mc.v.2.18/ugcs-for-dji-user-manual-2.18.pdf</u> (16.11.2019).

Ein raum-zeitliches Deformationsmodell für Laserscanning-Punktwolken

Corinna HARMENING und Hans NEUNER

1 Einleitung

Die Etablierung von terrestrischen Laserscannern in der Ingenieurgeodäsie hat die Herangehensweise bei der Auswertung ingenieurgeodätischer Probleme stark verändert: Immer mehr werden punktbasierte von flächenhaften Ansätzen abgelöst. In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl flächenhafter Ansätze entwickelt, die auf eine laserscannerbasierte Zustandsbeschreibung abzielen. Die flächenhafte Deformationsanalyse stellt jedoch noch immer eine Herausforderung dar (z. B. WUNDERLICH et al. 2016, MUKUPA et al. 2016, HOLST & KUHLMANN 2016). Insbesondere die Nichtreproduzierbarkeit von Messpunkten in unterschiedlichen Messepochen und die daraus entstehende Frage nach einer geeigneten Metrik für den Vergleich zweier Punktwolken sind die größten Schwierigkeiten.

Ein erster Schritt im Hinblick auf eine flächenhafte Deformationsanalyse ist die Definition dreier Möglichkeiten des Punktwolkenvergleichs (MUKUPA et al. 2016): Beim Punkt-zu-Punkt-Vergleich wird entweder die Existenz identischer Punkte angenommen oder es werden erweiterte Verfahren zur Definition von Punktkorrespondenzen verwendet, die das anschließende Bilden von Differenzen erlauben (z. B. LITTLE 2006 oder PAFFENHOLZ et al. 2017). Die zweite Möglichkeit, der Punkt-zu-Fläche-Vergleich, zieht Distanzen zwischen einer Punktwolke und einem Modell der jeweils anderen Punktwolke (ein Mesh oder eine analytische Fläche) als Deformationsmaß heran (z. B. HOLST et al. 2015). Beim Fläche-zu-Fläche-Vergleich wird nach der Modellierung beider Punktwolken die Veränderung der geschätzten Parameter als Deformationsmaß verwendet (z. B. LINDENBERGH & PFEIFER 2005, HARMENING & NEUNER 2016b oder HOLST et al. 2015).

In diesem Beitrag wird ein raum-zeitliches Deformationsmodell vorgestellt, welches die Schätzung von B-Spline-Flächen mit der stochastischen Modellierung von Deformationen kombiniert. Die Grundidee ist die Modellierung der erfassten Objektänderung mit Hilfe von drei Anteilen, analog einer Kollokation nach kleinsten Quadraten: ein deterministischer Trend, der das nicht-deformierte Objekt repräsentiert; ein stochastisches Signal, das einen lokal homogenen Deformationsprozess beschreibt sowie das Messrauschen, welches die durch den Messprozess verursachten Unsicherheiten berücksichtigt.

Aufgrund der stochastischen Modellierung der Deformationen in Form von distanzabhängigen Variogrammen (siehe Kapitel 4.4) ist es nicht notwendig, identische Punkte in unterschiedlichen Messepochen zu definieren. Auf Basis des geodätischen Datums, welches durch die Flächenparameter der Trendfläche definiert wird, sind ein Punkt-zu-Fläche- und ein Punkt-zu-Punkt-Vergleich der erfassten Datensätze möglich. Die resultierenden Deformationsmetriken sind interpretierbar und anschaulich. In Analogie zur Kollokation nach kleinsten Quadraten erlaubt das vorgestellte Modell somit eine zeitbezogene raumkontinuierliche Beschreibung sowie eine raum- und zeitkontinuierliche Prädiktion der Deformation. In diesem Beitrag wird lediglich auf den ersten Aspekt eingegangen, während die Prädiktion zukünftigen Arbeiten vorbehalten bleibt.

Das Paper gliedert sich wie folgt: In Kapitel 2 werden die methodischen Grundlagen, die für den entwickelten Ansatz benötigt werden, vorgestellt. Anhand eines vereinfachten Beispiels wird in Kapitel 3 das Grundprinzip der stochastisch modellierten Deformation demonstriert, welches den in Kapitel 4 vorgestellten raum-zeitlichen Ansatz zur Modellierung von Deformationen motiviert. Die Ergebnisse der Anwendung dieses Ansatzes auf einen simulierten Datensatz fasst Kapitel 5 zusammen. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

2 Methodische Grundlagen

2.1 Schätzung von B-Spline-Flächen

Eine B-Spline-Fläche vom Grad p und q ist definiert durch

$$\widehat{\boldsymbol{S}}(u,v) = \sum_{i=0}^{n_{\boldsymbol{P}}} \sum_{j=0}^{m_{\boldsymbol{P}}} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \boldsymbol{P}_{i,j}.$$
(1)

Ein Flächenpunkt $\hat{S}(u, v)$ berechnet sich als das gewichtete Mittel der $(n_P + 1) \cdot (m_P + 1)$ Kontrollpunkte $P_{i,j}$ (PIEGL & TILLER 1995). Die jeweiligen Gewichte sind die Werte der B-Spline-Basisfunktionen $N_{i,p}(u)$ bzw. $N_{j,q}(v)$, die sich rekursiv berechnen lassen (Cox 1972, DE BOOR 1972). Zwei Knotenvektoren U und V in Richtung der Flächenparameter u und vunterteilen den Definitionsbereich einer B-Spline-Fläche in Knotenspannen und führen zur Eigenschaft der "Lokalität": Das Verschieben eines Kontrollpunktes verändert die Fläche nur lokal.

Um die bestanpassende B-Spline-Fläche zu bestimmen, werden üblicherweise nur die Positionen der Kontrollpunkte koordinatenweise geschätzt, da diese Vorgehensweise zu einem linearen Zusammenhang zwischen den Beobachtungen und den Unbekannten führt (PIEGL & TILLER 1995). Alle verbleibenden Parametergruppen werden unabhängig von der Ausgleichung bestimmt. Im Folgenden werden ausschließlich kubische B-Splines (p = q = 3) verwendet, die aufgrund ihrer C^2 -Stetigkeit die geometrischen Eigenschaften typischer ingenieurgeodätischer Überwachungsobjekte widerspiegeln. Methoden für die Bestimmung geeigneter Knotenvektoren finden sich u. a. in BUREICK et al. (2016). Die Wahl der optimalen Anzahl von Kontrollpunkten kann entweder mit klassischen Informationskriterien oder mit Hilfe der strukturellen Risikominimierung gelöst werden (HARMENING & NEUNER 2016a, 2017). In HARMENING & NEUNER (2015) wird ein Ansatz vorgestellt, der den Beobachtungen geeignete Flächenparameter u und v zuweist.

2.2 Kollokation nach kleinsten Quadraten

Für die Kollokation nach kleinsten Quadraten wird das funktionale Modell der klassischen vermittelnden Ausgleichung erweitert (HEUNECKE et al. 2013):

$$l = Ax + s + \varepsilon. \tag{2}$$

Das beobachtete Phänomen wird somit als die Summe eines deterministischen Trends Ax, welcher durch den zu schätzenden Vektor der Unbekannten x charakterisiert wird, und die stochastische Signalkomponente s beschrieben, die Informationen über das Phänomen in Form von stochastischen Zusammenhängen enthält. Das Signal wird als normalverteilt angenommen: $s \sim N(0, \Sigma_{ss})$ mit $\Sigma_{ss} = \sigma_0^2 \mathbf{Q}_{ss}$.

Die Abweichung zwischen den Messungen l und dem Phänomen werden mit Hilfe des stochastischen Messrauschens ε beschrieben, das ebenfalls als normalverteilt angenommen wird: $\varepsilon \sim N(\mathbf{0}, \Sigma_{\varepsilon\varepsilon})$ mit $\Sigma_{\varepsilon\varepsilon} = \sigma_0^2 \mathbf{Q}_{\varepsilon\varepsilon}$. Gleichzeitig werden Korrelationen zwischen Signal und Rauschen ausgeschlossen: $\Sigma_{s\varepsilon} = \Sigma_{\varepsilon s} = \mathbf{0}$. Die Lösung der Kollokation nach kleinsten Quadraten erfolgt im Gauß-Helmert-Modell (z. B. HEUNECKE et al. 2013).

2.3 Raum-zeitliche stochastische Prozesse

Ein raum-zeitlicher stochastischer Prozess Z(t, x) wird in Bezug auf die Zeit als stationär und in Bezug auf den Raum als homogen bezeichnet, wenn seine statistischen Momente unabhängig von der Zeit t bzw. von der räumlichen Position x sind und die gemeinsamen stochastischen Momente nur von der zeitlichen Distanz τ bzw. von der räumlichen Distanz d zwischen zwei Beobachtungen abhängen (SCHLITTGEN & STREITBERG 2013, CRESSIE & WIKLE 2015). Zeitliche Zusammenhänge von stationären stochastischen Prozessen werden üblicherweise mit Hilfe von Kovarianzfunktionen modelliert (SCHLITTGEN & STREITBERG 2013), wohingegen Variogramme das geostatistische Standardwerkzeug für die Modellierung räumlicher Zusammenhänge sind (CRESSIE & WIKLE 2015):

$$\hat{\gamma}(\bar{d}_k) = \frac{1}{2|N_k|} \sum_{(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{x}_j)} (z(\boldsymbol{x}_i) - z(\boldsymbol{x}_j))^2.$$
(3)

Für die Berechnung eines Variogramms nach (3) werden die quadrierten Differenzen aller Realisierungen des Prozesses, deren räumliche Distanzen $d_{ij} = ||\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j||$ innerhalb des Intervalls N_k ($k = 1, ..., n_N$) liegen, gemittelt. Die Unterteilung der Distanzen d_{ij} in n_N konsekutive Intervalle ist notwendig, da im räumlichen Bereich eine äquidistante Datenerfassung nicht vorausgesetzt werden kann. Das Variogramm ist somit eine Funktion der mittleren Distanz \bar{d}_k . Die Schätzung von Variogrammen ist üblicherweise stabiler als die Schätzung von Kovariogrammen (dem räumlichen Pendant der zeitlichen Kovarianzfunktion), die ggf. anschließend unter Verwendung der geschätzten Varianz σ^2 des Prozesses berechnet werden können (SMITH 2016):

$$\hat{C}_s(\bar{d}_k) = \sigma^2 - \hat{\gamma}(\bar{d}_k). \tag{4}$$

Durch Normierung des Autokorrelogramms mit der geschätzten Varianz des Datensatzes $\sigma^2 = \hat{C}_s(0)$ kann das Korrelogramm geschätzt werden (CRESSIE & WIKLE 2015):

$$\hat{\rho}_s(\bar{d}_k) = \frac{\hat{C}_s(\bar{d}_k)}{\hat{C}_s(0)}.$$
(5)

Sowohl das Variogramm als auch das Kovariogramm können zu Kreuz(ko)variogrammen generalisiert werden, um die Ähnlichkeiten zwischen zwei unterschiedlichen Realisierungen eines Prozesses zu beschreiben:

$$\hat{\gamma}_{z_1 z_2}(\bar{d}_k) = \frac{1}{2|N_k|} \sum_{(x_i, x_j)} (z_1(x_i) - z_2(x_j))^2, \tag{6}$$

$$\hat{C}_{z_1 z_2 s}(\bar{d}_k) = \sigma_{z_1 z_2} - \hat{\gamma}_{z_1 z_2}(\bar{d}_k).$$
(7)

Die entsprechende Standardisierung erfolgt dann zu Kreuzkorrelogrammen:

$$\hat{\rho}_{z_1 z_2 s}(\bar{d}_k) = \frac{\hat{\mathcal{C}}_{z_1 z_2 s}(\bar{d}_k)}{\sqrt{\hat{\mathcal{C}}_{z_1 s}(0)\hat{\mathcal{C}}_{z_2 s}(0)}}.$$
(8)

Die Stationaritäts- (für zeitliche Prozesse) bzw. Homogenitätsannahme (für räumliche Prozesse) wird in der Regel getroffen, um Standardverfahren zur Bestimmung stochastischer Abhängigkeiten anwenden zu können. In der Realität ist diese Annahme jedoch häufig nicht gegeben. Unter der Vielzahl nicht-stationärer Prozesse existiert der Spezialfall der lokalen stationären (homogenen) Prozesse, bei denen das Kovariogramm in ein Produkt aus einem stationären (homogenen) Korrelogramm und einem sich langsam ändernden Skalierungsfaktor umgeformt werden kann (SILVERMAN 1957, BENDAT & PIERSOL 2015). Diese lokal stationären Prozesse stellen in vielen Fällen eine geeignete Möglichkeit dar, nicht-stationäre Prozesse zu approximieren und werden im Folgenden für die Modellierung von Deformationen verwendet.

3 Stochastisch modellierte Deformationen

Der in Abschnitt 4 vorgestellte Ansatz zur Deformationsanalyse modelliert den Deformationsprozess als einen raum-zeitlichen stochastischen Prozess. Die Grundidee wird im Folgenden an dem vereinfachenden Beispiel einer eindimensionalen Zeitreihe von normalverteilten und unkorrelierten Zufallsvariablen präsentiert (graue Punkte in Abbildung 2). Diese Zeitreihe wird mit Hilfe dreier exponentieller Korrelationsfunktionen mit unterschiedlichen Korrelationslängen (Abbildung 1) verrauscht. Die resultierenden korrelierten Zeitreihen sind ebenfalls in Abbildung 2 zu sehen (schwarze Punkte). Je stärker die Korrelation, umso weniger ausgeprägt ist das stochastische Verhalten innerhalb der Zeitreihen und umso langsa-



Abb. 1:

Exponentielle Korrelationsfunktionen mit unterschiedlichen Korrelationslängen.

mer schwankt die entsprechende Zeitreihe um den Erwartungswert von Null. Wird ein Ausschnitt einer korrelierten Zeitreihe beobachtet, der deutlich kleiner als die Korrelationslänge ist, können starke Korrelationen zu einer Situation führen, in der die Zeitreihe gegenüber dem Erwartungswert verschoben scheint (Abbildung 2 (unten) bei Beobachtung des Zeitintervalls [200 s, 350 s]). Um diese reine Verschiebung in eine allgemeinere Form der Deformation zu überführen, wird das Prinzip der lokalen Stationarität genutzt und jedem Wert der Zeitreihe eine zeitabhängige Varianz zugewiesen, während die Korrelationsstrukturen aus Abbildung 1 erhalten bleiben. Die entstehenden Zeitreihen für den Ausschnitt [200 s, 350 s] sind in Abbildung 3 zu sehen. Für den Großteil der Zeitreihe wurde ein Varianzlevel von einem Zehntel der ursprünglichen Varianz gewählt. In diesem Bereich streuen die schwarzen Punkte minimal um den Erwartungswert von Null. Im Intervall [240 s, 260 s] wurde das Varianzlevel zunächst linear erhöht und nach Erreichen des maximalen Wertes bei 250 s wieder linear auf den Wert der minimalen Varianz gesenkt. Dieser Abschnitt ist in allen drei Zeitreihen deutlich erkennbar, aber nur die Kombination von einer sehr starken Korrelation und dem sich ändernden Varianzlevel (Abbildung 3 unten) führt zu einem typischen Deformationsmuster (z. B. die Durchbiegung eines Brückentragwerks unter Verkehrslast).



Abb. 2:

Unkorrelierte (grau) und auf Basis der Funktionen in Abbildung 1 korrelierte Zeitreihen (schwarz). Von oben nach unten: zunehmende Korrelationslänge.



Abb. 3:

Unkorrelierte Zeitreihe mit konstanter Varianz (grau) und korrelierte lokal stationäre Zeitreihen (schwarz). Von oben nach unten: zunehmende Korrelationslänge.

4 Entwicklung eines raum-zeitlichen Deformationsmodells

Das Deformationsmodell wird unter der Annahme entwickelt, dass mögliche Starrkörperbewegungen vorab detektiert und eliminiert wurden (bspw. durch den in HARMENING & NEUNER (2016b) vorgestellten B-Spline-basierten Ansatz). Das untersuchte Objekt unterliegt dementsprechend ausschließlich Verformungen, die als C⁰-stetig angenommen werden. Diskontinuitäten wie Kanten und Brüche werden ausgeschlossen.

4.1 Datensätze

Die Datengrundlage für die Anwendung des unten vorgestellten Ansatzes bilden simulierte Datensätze, da sie den Vergleich mit nominellen Flächen erlauben und den Einfluss eines fehlenden oder falschen Fehlermodells des Scanprozesses ausschließen. Obwohl die Deformation in diesem Ansatz als Realisierung eines stochastischen Prozesses modelliert wird, handelt es sich üblicherweise um deterministische Prozesse. Aus diesem Grund und um die Anwendbarkeit des stochastischen Modells auf funktional hervorgerufene Deformationen zu demonstrieren, werden in dieser Studie die Deformationen funktional simuliert. Grundlage für die Datensimulation bildet eine B-Spline-Fläche mit den Abmessungen 40 x 40 x 18 cm³ (Abbildung 4). Durch die monotone Verschiebung eines einzelnen Kontrollpunktes wird eine lokale Verformung dieser Fläche hervorgerufen. Diese Fläche wird zu fünf unterschiedlichen Zeitpunkten von einem Laserscanner erfasst, simuliert durch ein Sampling dieser Flächen und ein anschließendes Verrauschen (weißes Rauschen, $\sigma_{\varepsilon} = 1$ mm). Diese vereinfachende Annahme bzgl. des Messrauschens ist als ein erster Schritt für eine raum-zeitliche Deformationsanalyse zu sehen und wird in weitergehenden Untersuchungen an die Realität angepasst. Es resultieren fünf Punktwolken ($PC^{(1)} - PC^{(5)}$), von denen die erste Epoche das nichtdeformierte Objekt repräsentiert, während die anderen vier maximale Deformationen von 1,4-2,2 cm aufweisen.





B-Spline-Fläche und ihre Kontrollpunkte (schwarze Punkte), die die Grundlage für die Datensimulation bildet. Durch Verschieben eines Kontrollpunktes (Kreuz) wird die Fläche lokal deformiert.

4.2 Ein raum-zeitliches Deformationsmodell

Ausgangspunkt für die Entwicklung des Deformationsmodells ist das funktionale Modell der Kollokation nach kleinsten Quadraten (Gleichung (2)), das um k Epochen (hier k = 5) erweitert wird:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{l}^{(1)} \\ \vdots \\ \boldsymbol{l}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}^{(1)} & \cdots & \boldsymbol{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{0} & \cdots & \boldsymbol{A}^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}^{(1)} \\ \vdots \\ \boldsymbol{x}^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{s}^{(1)} \\ \vdots \\ \boldsymbol{s}^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}^{(1)} \\ \vdots \\ \boldsymbol{\varepsilon}^{(k)} \end{bmatrix}.$$
(9)

Die Grundidee des entwickelten Modells ist, dass die Trendfläche die initiale und nicht-deformierte Geometrie des Objektes beschreibt, die innerhalb der ersten Messepoche erfasst wird und die über die nachfolgenden Messepochen unverändert bleibt. Diese Trendfläche wird einmalig geschätzt und anschließend aus dem funktionalen Modell ausgeschlossen:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{l}^{(1)} \\ \vdots \\ \boldsymbol{l}^{(k)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}^{(1)} & \cdots & \boldsymbol{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{0} & \cdots & \boldsymbol{A}^{(k)} \end{bmatrix} \widehat{\boldsymbol{x}}^{(1)} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{s}^{(1)} \\ \vdots \\ \boldsymbol{s}^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}^{(1)} \\ \vdots \\ \boldsymbol{\varepsilon}^{(k)} \end{bmatrix}.$$
(10)

Als eigentliche Beobachtungen e gehen in dieses neu entwickelte Modell die Residuen zur geschätzten Trendfläche ein:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{e}^{(1)} \\ \vdots \\ \boldsymbol{e}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{s}^{(1)} \\ \vdots \\ \boldsymbol{s}^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\epsilon}^{(1)} \\ \vdots \\ \boldsymbol{\epsilon}^{(k)} \end{bmatrix} \quad bzw. \quad \bar{\boldsymbol{e}} = \bar{\boldsymbol{s}} + \bar{\boldsymbol{\epsilon}}, \tag{11}$$

die sich aus einem Signal- und einem Rauschanteil zusammensetzen. Die Deformation im Sinne der Verformung wird durch das Signal \bar{s} modelliert. Nach Erweiterung um prädizierte Signalwerte \bar{s}' ergibt sich die kompakte Schreibweise des funktionalen Modells zu

$$\bar{\boldsymbol{e}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{s}} \\ \bar{\boldsymbol{s}}' \\ \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} \end{bmatrix} = \bar{\boldsymbol{B}}^T \bar{\boldsymbol{v}}.$$
(12)

Dieses bedingte Modell ist ein Spezialfall des Gauß-Helmert-Modells und liefert die folgenden Formeln für das geschätzte Signal und das geschätzte Rauschen:

$$\begin{bmatrix} \widehat{\hat{s}} \\ \widehat{\hat{s}}' \\ \widehat{\hat{\varepsilon}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma_{\overline{s}\overline{s}} \\ \Sigma_{\overline{s}'\overline{s}} \\ \Sigma_{\overline{\varepsilon}\overline{\varepsilon}} \end{bmatrix} \widehat{\hat{k}}, \quad mit \quad \widehat{\hat{k}} = (\Sigma_{\overline{\varepsilon}\overline{\varepsilon}} + \Sigma_{\overline{s}\overline{s}})^{-1}\overline{e}.$$
(13)

Die Anwendung dieses Ansatzes auf ein konkretes Problem besteht somit aus drei Schritten: der Modellierung des Trends, der Modellierung des Signals ausgehend von der Kovarianzmatrix $\Sigma_{\bar{s}\bar{s}}$ sowie der Modellierung des Rauschens mit Hilfe der Kovarianzmatrix $\Sigma_{\bar{\epsilon}\bar{\epsilon}}$.

4.3 Modellierung des Trends

Auf Basis der Grundlagen aus Abschnitt 2.1 wird die Punktwolke der ersten Messepoche mit einer B-Spline-Fläche approximiert. Aus Gründen der Einfachheit werden in dieser Studie mit Ausnahme der Kontrollpunkte alle Parametergruppen der B-Spline-Fläche auf die nominellen Werte gesetzt, die aus dem Simulationsprozess bekannt sind. Mit (1) resultieren unter Verwendung der Einheitsmatrix als stochastischem Modell die geschätzten Kontrollpunkte $\hat{P}^{(1)}$. Sie werden im nächsten Schritt dazu verwendet, die Trend-Beobachtungen aller verbleibenden Epochen zu schätzen:

$$\hat{l}^{(i)} = A^{(i)} \hat{P}^{(1)}, \quad mit \ i = 1, ..., k.$$
 (14)

Die für die Besetzung der Designmatrizen benötigten Flächenparameter *u* und *v* aller Epochen werden durch Projektion auf die Trendfläche bestimmt. Die Residuen der Trendschätzung bilden die Grundlage für die Modellierung des Signals:

$$e^{(i)} = l^{(i)} - \hat{l}^{(i)}.$$
(15)

4.4 Modellierung des Signals

Detektion von deformierten Regionen

Da das Signal ausschließlich in deformierten Regionen auftritt, erfordert seine Modellierung eine Unterscheidung zwischen deformierten und nicht-deformierten Regionen. Aus Konsistenzgründen zur B-Spline-Schätzung erfolgt diese Detektion koordinatenweise und basiert auf dem Wissen, dass keine Deformationen in der ersten Messepoche auftreten. Unter der Annahme, dass Regionen, in denen die Abweichungen zwischen Beobachtungen und geschätztem Trend um einen bestimmten Betrag größer sind als das aus der ersten Epoche bestimmte Messrauschen $\sigma_0^{(1)}$, wird jede Koordinate, deren Abweichung zum Trend die Bedingung

$$|e_{z,j}^{(i)}| > 1,5 \ \sigma_{z,0}^{(1)}, \quad i = 2, \dots, k; j = 1, \dots, n_l^{(i)}$$
(16)

erfüllt, dem deformierten Bereich zugeordnet (Bedingung (16) ist hier beispielsweise aufgeführt für die *z*-Koordinate). Diese heuristische Schranke wurde gewählt, um den Fehler 2. Art gering zu halten und bedarf eines Post-Processing-Schritts, in dem einzelne Punkte in nichtdeformierten Regionen detektiert und dem stabilen Bereich zugeordnet werden.

Erzeugung lokal homogener Regionen

Analog zum eindimensionalen Beispiel im 3. Kapitel wird der Deformationsprozess als Mittelwert-homogener stochastischer Prozess mit Erwartungswert E(s) = 0 interpretiert. Dementsprechend wird die Deformation ausschließlich durch die (Ko-)Varianzen des Prozesses charakterisiert. Insbesondere die Varianzen können sowohl innerhalb als auch zwischen den jeweiligen Messepochen stark variieren, sodass die Annahme der strengen Homogenität zu restriktiv ist. Kapitel 3 folgend wird aus diesem Grund das Prinzip der lokalen Homogenität verwendet. Lokale Varianzen als eine sich langsam ändernde Funktion von Ort und Zeit berücksichtigen die sich ändernde Größenordnung der Residuen $e^{(i)}$. Die homogene Korrelationsstruktur erlaubt weiterhin eine Schätzung der benötigten Korrelogramme auf Basis einer einzelnen Realisierung des stochastischen Prozesses. Hierfür werden die deformierten Regionen mit Hilfe einer k-Means-Clusterung (LLOYD 1982) in Bereiche unterteilt, in denen das Signal als näherungsweise homogen angenommen wird. Für jedes dieser $n_c^{(i)}$ Cluster c_j kann eine Standardabweichung

$$\sigma_j^{(i)} = \frac{1}{3} \max(|\boldsymbol{e}_j^{(i)}|) \quad i = 2, \dots, k; \ j = 1, \dots, n_c^{(i)}; \ \boldsymbol{e}_j^{(i)} \in c_j, \tag{17}$$

geschätzt werden. Anschließend werden die Residuen mit Hilfe dieser Standardabweichungen normiert:

$$\tilde{\boldsymbol{e}}_{j}^{(i)} = \frac{\boldsymbol{e}_{j}^{(i)}}{\sigma_{j}^{(i)}}.$$
(18)

Auf Basis dieser normierten Residuen können empirische (Kreuz-)Korrelogramme geschätzt werden (Gleichungen (3) - (8)). In die Modellierung der Korrelationen, sowohl innerhalb einer Messepoche als auch zwischen zwei Epochen, fließt ausschließlich die euklidische Distanz ein, sodass die Unterscheidung zwischen räumlichen und zeitlichen Korrelationen durch

die Schätzung verschiedener empirischer Korrelogramme realisiert wird. Diese Vorgehensweise erlaubt eine stabile Schätzung der Korrelogramme auch in Fällen mit sehr wenigen Messepochen und benötigt keine identischen Punkte in den Messepochen.

Aufstellen des stochastischen Modells des Signals

Nach Schätzung der empirischen Korrelogramme werden sie mit Hilfe analytischer positiv definiter Funktionen approximiert (Abbildung 5). Bei der Schätzung dieser analytischen Korrelogramme ist zu beachten, dass die empirischen Korrelogramme durch die Überlagerung zweier stochastischer Prozesse entstehen: dem weißen Messrauschen sowie dem korrelierten Signal, welches die Deformation repräsentiert. Durch den Ausschluss von $\hat{\rho}(0)$ bei der Schätzung der analytischen Korrelogramme können diese beiden Prozesse voneinander getrennt werden: Das Verhältnis zwischen empirischer Korrelation $\hat{\rho}(0)$ und analytischer Korrelation $\rho(0)$ wird dazu verwendet, die Gesamtvarianz jedes Clusters in die Varianz des Rauschens und die Varianz des Signals zu trennen (SMITH 2016), siehe Abbildung 6:

$$\frac{\hat{\rho}(0)}{\rho(0)} = \frac{\sigma_s^2 + \sigma_\epsilon^2}{\sigma_s^2}.$$
(19)

Die analytischen Funktionen bilden die Basis, um die Korrelationsmatrix zu besetzen, die aus $k \ge k$ Submatrizen besteht:

$$R_{\bar{s}\bar{s}} = \begin{bmatrix} R_{\bar{s}\bar{s}}^{(1)(1)} & \cdots & R_{\bar{s}\bar{s}}^{(1)(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{\bar{s}\bar{s}}^{(k)(1)} & \cdots & R_{\bar{s}\bar{s}}^{(k)(k)} \end{bmatrix}.$$
 (20)







Empirische (Kreuze) und analytische (durchgezogene Linien) Korrelogramme der fünften Messepoche.

Abb. 6:

Empirisches Kovariogramm von weißem Rauschen (oben links), von korrelierten Zufallsvariablen (unten links) und ein kombinierter Prozess (rechts).





Abb. 7:

Residuen der Filterung in Richtung der z-Koordinate für die letzte Messepoche.

Abb. 8: Abweichungen zur Sollfläche in Richtung der *z*-Koordinate für die letzte Messepoche.

Die Submatrizen auf der Hauptdiagonale modellieren die Korrelationen innerhalb einer Messepoche, während die Matrizen auf den Nebendiagonalen die Korrelationen zwischen zwei Epochen widerspiegeln. Im letzten Schritt wird diese Korrelationsmatrix durch Berücksichtigung der lokal homogenen Varianzen σ_s^2 in die Kovarianzmatrix des Signals $\Sigma_{\bar{s}\bar{s}}$ umgerechnet.

4.5 Modellierung des Rauschens

Aufgrund des Vorwissens aus dem Simulationsprozess wird in dieser Studie das Rauschen als nichtkorrelierend modelliert. Die Kovarianzmatrix des Rauschens $\Sigma_{\overline{\epsilon}\overline{\epsilon}}$ ist somit eine Diagonalmatrix, deren Hauptdiagonale mit denen aus Gleichung (19) bestimmten Varianzen des Signals besetzt wird. Obwohl die vereinfachende Annahme des nichtkorrelierenden Rauschens für gemessene Datensätze nichtzutreffend ist, wird sie an dieser Stelle als ein erster Schritt in Richtung einer flächenhaften Deformationsanalyse als zulässig angesehen.

5 Ergebnisse der Filterung

Mit den aufgestellten Kovarianzmatrizen $\Sigma_{\bar{s}\bar{s}}$ und $\Sigma_{\bar{e}\bar{e}}$ können die simulierten Punktwolken mit den in Kapitel 4.1 hergeleiteten Formeln gefiltert werden. Die Residuen dieser Filterung in Richtung der *z*-Koordinate $\hat{\epsilon}_z$ sind beispielhaft für die letzte Messepoche in Abbildung 7 zu sehen. Damit wird hier der ungünstigste Fall mit den größten Deformationen betrachtet. Die Residuen streuen zufällig über die gesamte Fläche, wobei die Residuen des deformierten Bereiches etwas kleiner sind als die des stabilen Bereiches. In der Graustufenabbildung ist schwer zu erkennen, dass sich in dem Übergangsbereich zwischen stabiler und deformierter Region betragsmäßig große Residuen (±3 mm) häufen. Für eine bessere Modellierung dieses Bereiches ist eine Weiterentwicklung des Verfahrens zur Unterscheidung von deformierten und stabilen Bereichen notwendig. Über die ganze Fläche gesehen existieren nur einige wenige Ausreißer, die außerhalb des Intervalls liegen, das durch die dreifache Standardabweichung des Messrauschens definiert wird.

	PC ⁽¹⁾	PC ⁽²⁾	PC ⁽³⁾	PC ⁽⁴⁾	PC ⁽⁵⁾
$\operatorname{mean}(\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{z}) [\operatorname{mm}]$	8e-14	0,1	0,09	0,09	0,1
$\operatorname{std}(\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{z})$ [mm]	0,98	0,82	0,87	0,85	0,80
skewness($\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{z}$) [mm]	0,01	0,04	0,06	0,11	0,17
kurtosis($\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{z}$) [mm]	2,9	3,5	3,6	3,4	3,7

Tabelle 1: Statistische Parameter der Residuen der Filterung in z-Richtung

In Tabelle 1 sind die Residuen in z-Richtung aller Messepochen in Form von statistischen Parametern zusammengefasst. Die Verteilung der Residuen der ersten Messepoche folgt sehr gut der Normalverteilung des Rauschens. Die reine Trendschätzung liefert somit zufriedenstellende Ergebnisse. Für die Messepochen 2–5 zeigen die Residuen in *z*-Richtung eine etwas stärkere Abweichung von der Normalverteilung des simulierten Rauschens: Die Standardabweichungen sind kleiner Eins und die Kurtosis deutet auf leicht leptokurtische Verteilungen hin. Durch die Überlagerung von Signal und Rauschen stellt die Filterung des Rauschens eine größere Herausforderung dar als in der ersten Messepoche. Nichtsdestotrotz sind die Abweichungen zur Soll-Verteilung gering. Hinzu kommt, dass es keinen sichtbaren Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der Deformation, die mit der Epochenanzahl zunimmt, und der Qualität der Filterung gibt.

Die statistischen Parameter der *x*- und *y*-Koordinaten (aus Platzgründen an dieser Stelle nicht aufgeführt) zeigen dagegen starke Abweichungen zur Sollverteilung. Diese Abweichungen sind durch das Zusammenspiel zwischen der Sensitivität des Messverfahrens quer zur Hauptaufnahmerichtung und der Definition des Koordinatensystems (Abbildung 4) begründet. Die Messdaten sind sehr insensitiv gegenüber Deformationen in der *xy*-Ebene. Ein weiterer Grund ist die koordinatenweise Behandlung der Beobachtungen.

Die Verwendung simulierter Daten ermöglicht auch einen Vergleich der gefilterten Daten mit der Sollfläche. Abbildung 8 zeigt die räumliche Verteilung dieser Abweichungen für die *z*-Koordinate der letzten Messepoche. Obwohl in der Graustufendarstellung nur schwer zu erkennen, erlaubt die Größenordnung dieser Abweichungen eine Unterscheidung zwischen dem deformierten und dem nicht-deformierten Bereich: Die reine Trendschätzung erhöht die Präzision und führt zu Abweichungen von ± 1 mm im nicht-deformierten Bereich. Die Abweichungen im deformierten Bereich sind zwar größer, liegen aber mit wenigen Ausnahmen innerhalb der dreifachen Standardabweichung des Messrauschens. Diese Ausnahmen liegen entweder im bereits genannten kritischen Übergangsbereich oder in Bereichen, in denen die größten Deformationen (Verformungen von mehr als 1,5 cm) auftreten. Mit Ausnahme dieser Auffälligkeiten variiert die Größenordnung der Abweichungen zufällig über die gesamte Fläche, sodass die Deformation durch das stochastische Signal erfasst werden kann. Die Präzision des Messprozesses wird während des Auswerteprozesses erhöht (in den stabilen Bereichen) bzw. bleibt erhalten (in den deformierten Bereichen).

Die Eigenschaften der Abweichungen in *z*-Richtung werden in Tabelle 2 für alle fünf Epochen zusammengefasst. Die Nähe der gemittelten Abweichungen zu Null sowie die kleine Schiefe deuten auf eine unverzerrte Filterung hin.

	PC ⁽¹⁾	PC ⁽²⁾	PC ⁽³⁾	PC ⁽⁴⁾	PC ⁽⁵⁾
$mean(d_z) [mm]$	0,02	0,11	0,08	0,08	0,08
$\max(d_z)$ [mm]	1,08	4,33	4,24	3,50	4,11
$\min(d_z)$ [mm]	-0,87	-3,17	-3,45	-2,72	-4,39
skewness(d_z) [mm]	-0,42	0,49	0,05	0,25	0,22
kurtosis(d_z) [mm]	5,6	6,0	5,4	4,7	7,2

Tabelle 2: Statistische Parameter der Abweichungen zur Sollfläche in z-Richtung

Obwohl die maximalen/minimalen Abweichungen größer als die dreifache Standardabweichung des Rauschens sind, zeigen die großen Werte der Kurtosis eine Akkumulation der Abweichungen mit Werten nahe Null und unterstützen die Qualität des entwickelten Deformationsmodells.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Ansatz für ein raum-zeitliches Deformationsmodell vorgestellt und auf simulierte Datensätze angewandt. Das Deformationsmodell basiert auf einer B-Spline-Fläche, die das nicht-deformierte Objekt repräsentiert sowie auf einem lokal stationären stochastischen Prozess, der den Deformationsprozess beschreibt. Die Modellierung der Deformation beinhaltet die Unterscheidung zwischen deformierten und stabilen Bereichen, die Bestimmung lokaler Varianzen sowie die Schätzung homogener Korrelationsstrukturen.

Die Anwendung des Modells auf simulierte Datensätze zeigt vielversprechende Ergebnisse: Selbst bei großen Deformationen im Verhältnis zur Objektgröße kann die Deformation mit einer Genauigkeit in der Größenordnung des Messrauschens beschrieben werden.

Zukünftige Untersuchungen beschäftigen sich mit einer verbesserten Trennung von deformierten und stabilen Bereichen, um die aktuell vorhandenen Auffälligkeiten in den Residuen zu reduzieren. Weiterhin wird das bislang sehr einfache Modell des weißen Messrauschens durch realistischere Rauschmodelle ersetzt, was tiefergehende Untersuchungen in Richtung der Trennbarkeit von korreliertem Signal und korreliertem Rauschen nach sich ziehen wird. Dieser Schritt ist unabdingbar, bevor eine Anwendung des Modells auf gemessene Daten erfolgen kann.

Danksagung

Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse wurden innerhalb des vom FWF geförderten Forschungsprojektes "Integrierte raum-zeitliche Modellierung unter Nutzung korrelierter

Messgrößen zur Ableitung von Aufnahmekonfigurationen und Beschreibung von Deformationsvorgängen" (IMKAD)(1706-N29) erzielt.

Literatur

- BENDAT, J. & PIERSOL, A. (2015): Random data: Analysis and measurement procedures. Wiley series in probability and statistics, 4. Auflage.
- BUREICK, J., ALKHATIB, H. & NEUMANN, I. (2016): Robust Spatial Approximation of Laser Scanner Point Clouds by Means of Free-form Curve Approaches in Deformation Analysis. In: Journal of Applied Geodesy 10 (1), S. 27–35.
- Cox, M. (1972): The Numerical Evaluation of B-Splines. In: IMA Journal of Applied Mathematics 10(2), S. 134–149.
- CRESSIE, N. & WIKLE, C. (2015): Statistics for spatio-temporal data. Wiley classics library. New York, überarbeitete Auflage.
- DE BOOR, C. (1972): On calculating with B-splines. In: Journal of Approximation Theory. 6(1), S. 50–62.
- HARMENING, C. & NEUNER, H. (2015): A constraint-based parameterization technique for Bspline surfaces. In: Journal of Applied Geodesy 9 (3), S. 143–161.
- HARMENING, C. & NEUNER, H. (2016a): Choosing the Optimal Number of B-spline Control points (Part 1: Methodology and Approximation of Curves). In: Journal of Applied Geodesy 10 (3), S. 139–157.
- HARMENING, C. & NEUNER, H. (2016b): Detecting rigid body movements from TLS-based areal deformation measurements. In: Proceedings of the 78th FIG Working Week 2016.
- HARMENING, C. & NEUNER, H. (2017): Choosing the Optimal Number of B-spline Control points (Part 2: Approximation of Surfaces and applications). In: Journal of Applied Geodesy 11 (1), S. 43–52.
- HEUNECKE, O., KUHLMANN, H., WELSCH, W., EICHHORN, A. & NEUNER, H. (2013): Handbuch Ingenieurgeodäsie. Wichmann, Berlin. Zweite verbesserte und überarbeitete Auflage.
- HOLST, C., NOTHNAGEL, A., BLOME, M., BECKER, P., EICHBORN, M. & KUHLMANN, H. (2015): Improved area-based deformation analysis of a radio telescope's main reflector based on terrestrial laser scanning. In: Journal of Applied Geodesy 9 (1), S. 1–14.
- HOLST, C. & KUHLMANN, H. (2016): Challenges and Present Field of Action at Laser Scanner Based Deformation Analyses. In: Journal of Applied Geodesy 10 (1), S. 17–25.
- LINDENBERGH, R. & PFEIFER, N. (2005): A statistical deformation analysis of two epochs of terrestrial laser data of a lock. In: Proceedings of Optimal 3D measurement techniques VII.
- LITTLE, M. (2006): Slope Monitoring Strategy at PPRust Open Pit Operation. In: Proceedings of the International Symposium in Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering.
- LLOYD, S. (1982): Least squares quantization in PCM. In: IEEE Transactions on Information Theory 28 (2), S. 129–137.
- MUKUPA, W., ROBERTS, G., HANCOCK, C. & AL-MANASIR, K. (2016): A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. In: Survey Review 36 (5), S. 1–18.

- PAFFENHOLZ, J.-A., STENZ, U., WUJANZ, D., NEITZEL, F. & NEUMANN, I. (2017): 3D-Punktwolken-basiertes Monitoring von Infrastrukturbauwerken am Beispiel einer historischen Gewölbebrücke. In: Terrestrisches Laserscanning 2017, S. 115–127.
- PIEGL, L. & TILLER, W. (1995): The NURBS Book. Monographs in Visual Communications. Springer Berlin Heidelberg.
- SCHLITTGEN, R. & STREITBERG, B. (2013): Zeitreihenanalyse. Lehr- und Handbücher der Statistik. Oldenbourg, München, 9. Überarbeitete Auflage.
- SILVERMAN, R. (1957): Locally stationary random processes. In: IEEE Transactions on Information Theory, 3 (3), S. 182–187.
- SMITH, T. (2016): Notebook on Spatial Data Analysis (http://www.seas.upenn.edu/~ese502/ #notebook).
- WUNDERLICH, T., NIEMEIER, W., WUJANZ, D., HOLST, C., NEITZEL, F. & KUHLMANN, H. (2016): Areal deformation analysis from TLS point clouds – the challenge. In: avn - Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 123 (11–12), S. 340–351.

Geodätische Herausforderungen beim Brückenmonitoring am Berliner Gleisdreieck

Norbert SCHIEFELBEIN und Werner STEMPFHUBER

Einleitung

Geodätische Monitoringsysteme zur Automatisierung von Überwachungsmessungen an technischen Objekten werden verstärkt seit den 90iger Jahren in den verschiedensten Bereichen der geodätischen Mess- und Auswertetechnik eingesetzt. Neben den bewährten Gesamtsystemen geodätischer Hard- und Softwarehersteller und weiteren kommerziellen Softwarelösungen erfordern moderne Bau- und Sanierungsarbeiten individuelle Lösungsansätze (STEMPFHUBER 2009). Diese können sich zusätzlich während des Echtzeiteinsatzes entsprechend der Begebenheiten ändern. Hinzu kommt die Verfügbarkeit von vielen Sensoren aus der allgemeinen Mess- und der Geotechnik. Durch die rasante Verbreitung von effizienten und kostengünstigen Minicomputern (z.B. dem Raspberry Pi oder Banana Pi) ergeben sich neuartige Lösungsstrategien durch ein konfigurierbares Geosensornetzwerk (HEUNECKE 2012). Viele Systemkomponenten können dabei aus dem Low-cost-Bereich verwendet werden (STEMPFHUBER 2019). Die weite Verbreitung von OpenSource Programmen (Scriptingsprachen mit Bibliotheken und Betriebssystemen) ergänzt diesen Ansatz zusätzlich.

Ein solches System ist u. a. beim Neubauprojekt "Wohnpanorama am Park" an der U-Bahnlinie U1 Gleisdreieck in Berlin (Dennewitzstraße) entwickelt und installiert worden. Zur Realisierung eines größeren Wohnkomplexes und eines Hotels direkt neben der Brücke sowie einer Tiefgarage unterhalb der U-Bahnbrücke müssen die Objekte kontinuierlich mit einem automatisierten Monitoringsystem überwacht werden. Bei der Erstellung der Baugrube kann unter Umständen ein massiver Einfluss auf einen Brückenpfeiler und auf eine Pendelstütze auftreten. Die Bauelemente der U-Bahn sind bereits vor der Baumaßnahme statisch ausgelastet. Eine zusätzliche Belastung ist somit auszuschließen. Bautechnische Maßnahmen wie z. B. die Ertüchtigung des Fundaments der Pendelstütze werden durch ein Düsenstrahlverfahren realisiert. Die Arbeiten sind bei laufendem U-Bahnbetrieb durchzuführen. Zur Sicherung der Brücke wurde eine Stützkonstruktion (vgl. Abbildung 4) für die Pendelstütze hergestellt. Mit hydraulischen Pressen können so Veränderungen an der Pendelstütze in Echtzeit ausgeglichen werden. Das geodätische Monitoringsystem stellt die Informationen der 3D-Koordinatendifferenzen in Echtzeit bereit und ist die Grundlage für die Pressarbeiten am Fundament.

Von den verantwortlichen Sachverständigen wurden sehr enge Grenzwerte festgelegt. Bei Überschreitung etwa von wenigen Millimetern muss der Bahnverkehr der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) unverzügliche eingestellt werden. Alarmierungen sind schon bei Veränderungen von 2 mm auszuführen. Die 3D-Deformationen für die Bauarbeiten an der Pressensteuerung müssen kontinuierlich und in Echtzeit vorliegen. Für das gesamte Überwachungsprojekt werden folgende Messsensoren eingesetzt:

- 4 Präzisionstachymeter (1 Tachymeter mit Trackingfunktion),
- 10 Präzisionsdistanzsensoren,
- 6 Zweiachs-Neigungssensoren mit integrierten Beschleunigungssensoren und
- diverse Temperatursensoren.

	••				
Taballa 1.	Liborciaht	dan N	1 amitamin	ammaialita	dan aim
rapene r:	UDErsicht	der N	ποπιοιτη	2Droiekte	der ginn
				01	8

Projekt	eingesetzte Technik
Landeszentralbank Berlin, tiefe Baugrube zwi- schen vorhandener Bebauung an drei Seiten der Baugrube	Tachymeter und 16 Zweiachsneigungssensoren
Hauptbahnhof Berlin, Anheben von Brücken zum Austausch von Lagern, 3D-Überwachung d. Brücke und Ausdehnung von Stahlspanngliedern	Tachymeter, Digitalnivellier, 12 Extensometer und Temperatursensoren
U-Bahnhof U55 Brandenburger Tor, Realisie- rung des U-Bahnhofes direkt neben dem vorhan- denen S-Bahnhof	Schlauchwagensystem mit 18 Sensoren, 10 zwei- achsige Neigungssensoren, 8 Fünffachextenso- meter, Temperatursensoren
U-Bahnhof U55 Brandenburger Tor, Überwa- chung Tunnelröhre im bergmännischen Vortrieb im vereisten Untergrund	Tachymeter, Konvergenzmessung mit Tachyme- ter, Vortriebssteuerung mit Tachymeter
Arbeitsamt in Berlin/Kreuzberg neben einer Bau- grube, 3D-Überwachung mit Alarmsystem für alle Etagen des Arbeitsamtes wegen vorhandener Rissbildung	Tachymeter, 16 Zweiachsneigungssensoren, 8 Fissurometer mit 2 Achsen, Alarmanlage akus- tisch für die Alarmierung der Mitarbeiter im Amt in allen Etagen
Berlin/Leipziger Platz U-Bahn U2, Baugruben beidseitig des Tunnels, 3D einschließlich Was- serdetektion Im Auftrag und Zusammenarbeit mit dem Büro Zech und Ruth	5 Tachymeter, ein Tachymeter mit Real-Time- Überwachung unmittelbar nach Havarie, Senso- ren zur Detektion von Grundwassereintritt im Gleisbett und an den Wänden
Kaimauer im Hamburger Hafen bei Aushub landseitig und im Hafenbecken	Tachymeter
U-Bahnhof Mendelssohn-Bartholdy Park oberir- disch Brückenbauwerk mit Baugruben beidseitig des Bahnhofs mit Verschubvorrichtung für Brü- ckenbauwerk bei Deformationen Im Auftrag und Zusammenarbeit mit dem Büro Zech und Buth	3 Tachymeter, zeitweise zusätzliches Tachymeter für Realtime-Überwachung
Widerlager Autobahnbrücke A4 in Dresden bei Injektionsarbeiten zur Ertüchtigung der Brücken- widerlager	Tachymeter, Rotationslaser mit 4 Meteorsenso- ren für Realtime-Überwachung
U-Bahntunnel U2 nahe dem Berliner Alexander- platz mit Baugrubenmaßnahmen beidseitig des Tunnels	3 Tachymeter und zeitweise zusätzliches Tachy- meter für Realtime-Überwachung
Im Auftrag und Zusammenarbeit mit dem Büro Zech und Ruth	

Die Klarbau GmbH & Co Berlin KG als Bauherr beauftragte zur Realisierung und den Betrieb des Monitoringsystems "Wohnpanorama am Park" an der U-Bahn U1 nahe Gleisdreieck das ÖbVI-Büro Zech Ruth Blasius aus Berlin (ZECH RUTH BLASIUS 2019) und diese als Nachunternehmer die Ingenieurgesellschaft Stabi Alert B.V. aus den Niederlanden (STABIALERT 2019) und die gim Gesellschaft für Informations-Management mbH aus Berlin (GIM 2019).

Das Ingenieurbüro gim führt hierbei die Arbeiten im Auftrag von Zech-Ruth-Blasius federführend durch. Die gim kann auf über 20 Jahre Monitoringerfahrung zurückgreifen. Die in Tabelle 1 angegebenen Projekte wurden dabei bereits erfolgreich abgeschlossen. Das gim Ingenieurbüro realisierte vorrangig Monitoringprojekte mit automatisierten Tachymetern der Firmen Zeiss, Topcon, Sokkia und Leica. Weitere Messsensoren, wie z.B. Schlauchwaagenund Extensometersysteme, wurden ergänzend in die Gesamtsysteme integriert. Zusatzsensoren wie Fissurometer in 1-, 2-, und 3D, Neigungssensoren, Distanzsensoren, Dehnmesstreifen und Temperatursensoren waren je nach Notwendigkeit in den Monitoringsystemen eingebunden.

Grundlagen geodätischer Monitoringsysteme

Die Basiskomponenten moderner Monitoringsystemene sind neben der allgemeinen und der geodätischen Messsensorik die Auswertealgorithmen, die Rechnersysteme mit stabilen Kommunikationsmodulen für das Geosensornetzwerk, die Alarmierungsmodule und die Stromversorgung (STEMPFHUBER 2009). Offene Systeme ermöglichen die Integration von Sonderfunktionen und Zusatzkomponenten. In der Regel werden für Bauwerksüberwachungen moderne Tachymeter mit automatisierter Zielerkennung und einer offenen API (application programming interface) eingesetzt. GNSS-Systeme ergänzen die geodätischen Messsysteme ideal. Das Herzstück solcher offenen Systeme bildet die Vernetzung und Intelligenz des Systems. Eine Realisierung mit Einplatinencomputern ist dabei eine gute Lösung. Das Client-Server-Konzept kann in Abhängigkeit der Anforderungen in unterschiedlicher Form angewendet werden (ENGEL 2015).





Client-Server-Architekturkonzept eines Monitoringsystems mit dem Einplatinencomputer Raspberry Pi und verschiedenen Geosensoren Zusatzsensoren und Funktionen sind effizient integrierbar. Diese Vorgehensweise wurde auch bei dem Überwachungsprojekt "Wohnpanorama am Park" angewendet. Individuelle Projektanforderungen des Auftraggebers erforderten eine permanente Implementierung neuer Funktionen.

Grundsätzlich sind die Anforderungen an ein Monitoringsystem vom geodätischen Messverfahren abhängig. In der Regel sind dies terrestrisch messende Tachymeter mit automatischer Zielerkennung und GNSS-Verfahren. Die folgenden Anforderungen an geodätische Monitoringsysteme müssen bei Echtzeitsystemen als Standardfunktionsumfang gegeben sein:

- Automatisierung der Messfunktion (Messung der Monitoring- und Referenzpunkte),
- Dauereinsatz mit robuster Hard- und Software, (meist als 24/7 mit definierter Messrate),
- effiziente Datenhaltung,
- autonome Stromversorgung,
- automatisierte Auswerteverfahren,
- Alarm- und Benachrichtigungssystem und
- Verwendung von Zusatzsensoren (z.B. Temperatur- und Luftdrucksensoren).

Folgende Spezialfunktionen sind am beschriebenen Messprojekt erforderlich:

- Integration von hochgenauen Neigungssensoren,
- Integration von hochgenauen Streckenmessungen,
- Erfassung des Bahnverkehrs,
- Durchführung von hochfrequenten Trackingmessungen,
- gesamtheitliche Ausgleichung aller Beobachtungen und
- intelligente Messfunktionalität (Erkennen von Systemeigenschaften, automatisierte Anpassung und Änderung der Messfunktionen).

Ausgehend von den Anforderungen der im Projekt eingebundenen Bausachverständigen wurde das entsprechende Monitoringsystem geplant und konzipiert. Dabei sind maßgeblich die Angaben zur Aufgabenbeschreibung der DIN 18710 Teil 4, Abschnitt 4.2 (DIN 2019) zu berücksichtigen. Folgende Punkte müssen detailliert spezifiziert werden:

- Beschreibung der Messobjekte, Angaben zu Objektgrößen und Definition der Beobachtungsdimensionen,
- Einflussgrößen des Überwachungsobjekts (Niederschrift der möglichen Ursachen von geometrischen Veränderungen, inkl. Restriktionen oder Reduktionen der Vermessungsarbeiten)
- Definition der Zielgrößen und Setzungsdimension
- Definition der Messfrequenz und
- Definition der Auswertestrategien.

Modelle für geometrische Veränderungen von Objekten werden im Regelfall von Prüfingenieuren für Statik oder Sachverständigen für Geotechnik erarbeitet. Aus diesen Angaben werden von der gim technische Lösungen für ein Monitoringsystem entwickelt. Dazu zählen die Lösungen für

- die Auswahl der Sensorik mit einem Konzept zur Anordnung der Sensorik mit Adaption am Objekt,
- die Auswertestrategie (Messwerte der Sensormessdaten für die Zielgrößen der Gutachter),
- Konzepte der Datenverarbeitung und -verwaltung,
- Konzepte der Softwarekomponenten,
- Konzepte zur Realisierung an den Messobjekten und
- Systemtests.

Nach der Realisierung werden die Systeme hinsichtlich des sicheren Betriebes überwacht und ggf. an Schwachstellen nachgebessert. Die Entwicklung der gim-Software wurde ursprünglich auf Windows PC-Systemen mit Microsoft Betriebssystemen in der Umgebung Visual Studio durchgeführt. Dabei wurden komfortable Anwendungen erstellt. Hierfür hat die gim im Laufe der Jahre ein modulares System entwickelt. Die wesentlichen Module sind:

- Baustellenkomponenten,
 - o automatisiere Steuerung der Messsensorik
 - Vorverarbeitungsarbeiten auf der Baustelle (Installation, manuelle Vermessungsarbeiten)
 - Modifizierung der Messungen als Ergebnis der Vorverarbeitung bzw. Anforderungen aus manuellen Anforderungen der Systemüberwachung
- Cloud,
 - Datentransfer und -haltung (Bindeglied zwischen Baustelle und Büro)
- Bürokomponenten,
 - o abschließende Auswertung aller Messdaten
 - Dokumentation entsprechend den Anforderungen und Archivierung insbesondere unter dem Gesichtspunkt der Beweissicherung
 - o Aufbereitung der Ergebnisse zur Präsentation in einem Projekt-Web
- Projekt-Web
 - Bereitstellung der Internetseiten in einem Projekt-Web.

Die Module sind seit etwa 20 Jahren im Einsatz und werden unter dem Begriff BISY (**B**austellen**i**nformations**sy**stem) geführt. In den letzten Jahren ist die gim dazu übergegangen, die Sensoren durch einheitliche Interfaces zu standardisieren. Diese intelligenten Interfaces (IIF) auf der Basis von Microprozessoren (Raspberry Pi) können als Messsensoren mit der entsprechenden onboard-Software als Geosensorknoten eingebunden werden.

Projektbeschreibung und Herausforderungen

Bei dem Projekt "Wohnpanorama am Park" in Berlin Kreuzberg werden seitlich und unterhalb der U-Bahnbrücke (BVG-Linie U1) der neue Wohnkomplex, ein Hotel und eine Tiefgarage entstehen. Dabei müssen verschiedene Elemente der Brücke inkl. der Fundamente und Pfeiler kontinuierlich überwacht werden.

Die U-Bahn der Linie U1 verläuft direkt durch das Baugrundstück. Von Westen kommend taucht die U-Bahn aus dem Tunnel auf. Dabei verläuft sie zuerst durch ein Wohnhaus und anschließend über eine die Dennewitzstraße überspannende eingehauste Brücke. Diese Brü-

cke ist im Westen im Gebäude gelagert und im Osten auf einen massiven Pfeiler (sog. Dennewitzpfeiler) gestützt. Die geplante Baugrube wird direkt östlich des Pfeilers hergestellt. Aufgrund des jetzt schon statisch ausgelasteten Pfeilers müssen Maßnahmen zu dessen Stützung und Sicherung ergriffen werden. Es wurden auf der östlichen Seite Pfähle eingebaut, die schräg zum Pfeiler angeordnet sind. Zwischen den Pfählen und dem Pfeiler wurden Pressen angeordnet. Damit kann bei Setzungen und Verschiebungen am Pfeiler ein Gegendruck erzeugt werden. Auf der östlichen Seite der Baugrube liegt die Brücke auf einer Pendelstütze. Diese Pendelstütze wurde im Rahmen der Baumaßnahme durch Herstellung von Pfählen unter dem Fundament im Düsenstrahlverfahren ertüchtigt. Die Brücke über der Dennewitzstraße, der Pfeiler und die Pendelstütze werden durch das geodätische Monitoringsystem in Echtzeit überwacht. Dazu ist im Innenraum der Brücke ein Tachymeter (Ta01) auf dem Dennewitzpfeiler installiert. Der Lage- und Höhenbezug wird über Punkte im Tunnel und über die Referenz aus den Messungen außerhalb des Tunnels hergestellt. Zusätzlich sind am Dennewitzpfeiler auf der östlichen Seite zwei Präzisionsneigungssensoren einschließlich Beschleunigungssensoren installiert. Mit diesen Sensoren können aufgrund ihrer hohen Echtzeit-Messgenauigkeit die Veränderungen am Pfeiler erfasst werden. Der Dennewitzpfeiler wird mit zwei Tachymetern (Ta04 und Ta05) überwacht. Diese Instrumente sind direkt am Pfeiler montiert. Für die Lage werden Referenzpunkte außerhalb der Baustelle benutzt. Abbildung 3 zeigt die Anordnung des gesamten Monitoringsystems.



Abb. 2: Neubauprojekt "Wohnpanorama am Park" an der U-Bahn U1 nahe Gleisdreieck Dennewitzstraße, 2019

Beim Einbau der Fundamentstabilisierungen wurden zusätzlich Prismenpunkte in Echtzeit mit der Trackingfunktion mit ca. 15Hz aufgenommen und visualisiert. Dies war für die Modellrechnung der Prüfstatik eine wichtige Zusatzinformation. Weiterhin muss die Pendelstütze durch Präzisionsdistanzmessungen und Zweiachsneigungssensoren hochfrequent erfasst und ausgewertet werden.



Abb. 3: Anordnung der Messsensorik inkl. der Referenz- und Monitoringpunkte



Abb. 4: Messkonzept an der Pendelstütze

Das gesamte Messprogramm wird stufenweise installiert und ist zum Zeitpunkt der Drucklegung noch nicht abgeschlossen. Die Auswertung aller Beobachtungen erfolgt gegenwärtig noch in einzelnen Gruppen. In der weiteren Ausbaustufe werden durch eine gesamte Ausgleichung in Echtzeit die globalen Bauwerksdeformationen bestimmt. Dieses dynamische Verfahren muss fehlende Beobachtungen bei der Ausgleichung berücksichtigen.

Messsensorik und Installation

Konzept

Für die Überwachung der Brücke über die Dennewitzstraße wird der Tachymeter Ta01 eingesetzt. Vom Tachymeter werden Punkte als Referenz im Tunnel westlich der Brücke (Objektpunkte auf der Brücke an den Fugen zwischen dem Gebäude und der Brücke, an der Mittelfuge, am Pfeiler und der Brücke) gemessen. Als weitere Informationen werden die Veränderungen in Brückenmitte, die von außen gemessen werden, in die Auswertung einbezogen. Die Auswertung mit allen ermittelten Informationen ergibt die Veränderungen der Fugenbreiten und -längen bzgl. der Brücke. In der Brücke wurden an maßgeblichen Stellen Temperatursensoren (Raspberry Pi gesteuerte DS18B20 Temperatursensoren) eingebaut. Die Ergebnisse der Messungen werden im Projekt-Web der Fa. StabiAlert dargestellt (vgl. Abbildung 5). Die Überwachung des Dennewitzpfeilers erfolgt mit den beiden Tachymetern Ta04 und Ta05. Diese sind fest am Pfeiler montiert. Der Tachymeter am nördlichen Ende des Pfeilers misst die Punkte auf der Straßenseite des Pfeilers und die Referenzpunkte auf der anderen Straßenseite ab. Der Tachymeter auf der südöstlichen Seite des Pfeilers deckt die Punkte auf der Baugrubenseite ab. Von beiden Instrumenten werden Netzpunkte (gemeinsame Punkte für beide Instrumente) auf der Straße und im Baugrubenbereich angemessen. Über diese Netzpunkte werden die Messdaten für eine Netzausgleichung zusammengestellt. Die Ausgleichung der gemessenen Epoche ergibt die Deformationen. Es werden für die Gutachterdokumentation die Ergebnisse der Lageänderung oben und unten am Pfeiler rechtwinklig zur Längsachse des Pfeilers und in Richtung der Längsachse im Projekt-Web von StabiAlert visualisiert. Die von den Neigungssensoren ermittelten Werte werden unmittelbar in Echtzeit dargestellt. Für die Überwachung der Pendelstütze wurde ein spezielles System bestehend aus Tachymeter, Neigungs- und Distanzsensoren verwendet. Für den Nachweis der Veränderungen an der Pendelstütze wurden hohe Genauigkeitsanforderungen gestellt. Aus diesem Grund musste das entsprechende Gesamtsystem entwickelt werden.

Virtuelle Ebene an der Pendelstütze

Das Modell für die Überwachung wird wesentlich durch eine virtuelle Ebene definiert. Diese liegt vertikal und parallel zur Pendelstütze. Sie ist örtlich durch vier Tafeln, die im Bereich der Lager oben an der Brücke und den Lagern unten angeordnet sind, repräsentiert. Die Mittelpunkte der Tafeln repräsentieren die Messpunkte, an denen Veränderungen der Pendelstütze ermittelt werden (vgl. TF1 bis TF4 in Abbildung 4). Auf den Tafeln sind hochgenaue Distanzsensoren bzw. Zieltafeln montiert. Mit den Distanzsensoren werden die horizontalen Strecken oben und unten zwischen den Lagerpunkten ermittelt. Mit senkrecht angeordneten Distanzsensoren werden die vertikalen Strecken zwischen den Lagern ermittelt. Mit zwei

weiteren Sensoren werden die Diagonalstrecken im Viereck bestimmt. Es geht in dem Subsystem um die Streckendifferenzen zwischen den Tafeln in der Ebene. Bei den Veränderungen treten wenige Millimeter auf. Im Viereck liegt mit den sechs Strecken eine Überbestimmung vor. Die Veränderungen werden auf die idealen Strecken zwischen den Tafeln angebracht. Mit diesen Werten wird je Messpoche eine Ausgleichung berechnet. Als Ergebnis liegen dann für die Tafelpunkte rechtwinklige 2D-Koordinaten in der virtuellen Ebene vor. Auf der Pendelstütze sind im Norden, in der Mitte und im Süden Neigungssensoren angeordnet. Mit den Messwerten dieser Sensoren können die Veränderungen in der Kippung der virtuellen Ebene quer zur Trasse und in Trassenrichtung ermittelt werden. Die Distanzen und Neigungen werden hochfrequent ermittelt. Ein Mittel der Werte für jeweils 15 Sekunden ergibt eine Epoche, die zur Beurteilung der Situation berechnet wird.

Zusätzlich sind auf den Tafeln Prismen angeordnet. Mit einem Tachymeter werden Referenzpunkte im Park, am nächsten Brückenpfeiler, an den Objektpunkten, an den Tafeln und am Fundament der Stütze gemessen. Die gesamte Messung der Punkte benötigt ca. 8 bis 10 Minuten (Mehrfachanzielungen bei evtl. Verdeckung im Baustellenbereich sind darin berücksichtigt). Die Punkte der virtuellen Ebene aus den Distanzen unter Berücksichtigung der Neigungen können über die unteren Punkte transformiert werden und ergeben damit die Koordinaten der Tafeln mit absolutem Bezug. Da die Punkte unten am Fundament hinsichtlich von Veränderungen träge sind, kann die niedrige Taktrate der tachymetrischen Messungen hingenommen werden. Die Aussagen zu Veränderungen an den oberen Punkten (insbesondere als relative Änderung zwischen den Punkten) kann in der Taktung von 15 Sekunden angenommen werden.

Für spezielle Fallgestaltungen (z. B. beim Anheben der Brücke) kann ein Punkt in der virtuellen Ebene vom Tachymeter mit dem Echtzeittrackingverfahren beobachtet werden. Dadurch können die Veränderungen an der Tafel mit tachymetrischer Beobachtung und die der drei weiteren Tafeln der virtuellen Ebene in allen drei Dimensionen im 15-Sekundentakt dargestellt werden. Die Ergebnisse der Distanz- und Neigungsmessungen werden unmittelbar im 15-Sekundentakt im Projekt-Web dargestellt.

Gesamtsystem zur Echtzeitüberwachung

Aus den Erfahrungen bisheriger Projekte wurde das Gesamtsystem mit den angepassten Anforderungen konzipiert. Die wesentlichen Module wurden dabei aus den bestehenden Windowskomponenten mit den Linux-basierten Geosensorknoten verbunden. Über die Verwendung des Samba-Servers auf dem Raspberry Pi (via Server-Message-Block-Protokoll) erfolgt die Datenkommunikation zwischen den verschiedenen Betriebssystemen. Die windowsbasierte Steuerung definiert mit einem intelligenten Algorithmus die unterschiedlichen Aufträge für das Tachymetermessprogramm (Auswahl an Referenz- und Monitoringpunkten, Messfrequenz und die Konfiguration der Netzausgleichung). Gesendete Steuerbefehle an das Linuxterminal starten den definierten Messauftrag.

Vernetzung und Systemkommunikation

Die Messungsabläufe werden auf der Baustelle von Softwaremodulen eines Industrie-PCs (IPC) gesteuert. Es ist jeweils ein IPC auf der Brücke, am Dennewitzpfeiler und an der Pendelstütze installiert. Ein IPC ist als Server für die Neigungssensoren am Pfeiler und ein weiterer an der Pendelstütze für die Distanz- und die Neigungssensoren vorhanden. Der Server an der Pendelstütze wird als Web-Server für die Arbeiten an der Pendelstütze genutzt. Alle IPCs haben eigene Mobilfunkverbindungen zur Anbindung ans Internet. Die Daten der Distanz- und Neigungssensoren werden direkt an den Server der Fa. StabiAlert übermittelt.

Die Tachymeter werden durch einzelne IIFs gesteuert. Die Interfaces der Tachymetrie und der Temperatursensoren sind in dem Netzwerk des jeweiligen IPCs eingebunden. Die Vorverarbeitung der Aufträge erfolgt auf dem IPC. Von dort werden die Daten in die Cloud übermittelt. Für die Aufbereitung aller Messdaten werden Beobachtungen der Distanz- und Neigungssensoren in die Cloud übermittelt. Damit die Serverdaten von StabiAlert übernommen werden können, sind die Netzwerke an der Pendelstütze, Neigungen und Distanzen sowie der tachymetrischen Messungen mit einem Dual-LAN-Shield auf dem Raspberry Pi physikalisch verbunden.

Realisierung der einzelnen Teilschritte

Baustellenkomponenten

Für jedes Tachymeter gibt es ein separates IIF-Steuerungsmodul. Mit dem Modul werden die Messungen angestoßen. Wenn als Ergebnis eine neue Epochendatei vorliegt, wird eine Vorauswertung durchgeführt und es wird eine Sicherungskopie der Messdaten abgelegt. Eine automatische Beurteilung der Ergebnisse als Vorauswertung erfolgt aus der Höhen- und Lageausgleichung. Bei Bedarf wird die Festlegung der Datumspunkte angepasst und eine erneute Berechnung durchgeführt. Für dieses Vorgehen gibt es definierte Tabellen.

Ein Modul übernimmt den Datentransfer der Messdaten und der vorverarbeiteten Daten in die Cloud. Ein zusätzliches Modul überwacht, ob alle Module bzw. die Interfaces fehlerfrei arbeiten. Eine entsprechende Statusdarstellung wird in der Cloud abgelegt. In Abhängigkeit von den Statusangaben können Alarmmeldungen (z. B. wenn Störungen auftreten) ausgelöst werden. Im System an der Pendelstütze ist ein Modul vorhanden, dass die Daten der Distanzund Neigungssensoren vom Server von StabiAlert sammelt. Ein weiteres Modul überträgt diese Daten in die Cloud zur weiteren Verarbeitung im Büro der gim.

Bürokomponenten

Für jedes Messsystem werden von der Baustelle Daten in der Cloud gespeichert. Entsprechend gibt es für jedes dieser Systeme ein Modul zum Datentransfer von der Cloud in die Systeme der gim. Je nach Anwendung gibt es weiterführende Auswertungen. So werden z. B. die Daten der Distanz- und Neigungssensoren an der Pendelstütze zusammen mit den Daten der tachymetrischen Messungen ausgewertet. Für den Dennewitzpfeiler werden die Tachymeterdaten am Pfeiler in einer Netzausgleichung ausgewertet. Die Ergebnisse der Objektpunkte werden für die Präsentation aufbereitet. Eine weitere Präsentation erfolgt als Aufbereitung für die Dokumentation als Beweissicherung. Ein wichtiges Modul überwacht die Cloud-Übertragung der benötigten Daten. Dieses Modul läuft auf zwei verschiedenen Rechnern. Dabei ist ein Modul auf dem Auswertungsrechner über eine LAN-Verbindung gekoppelt. Das zweite Überwachungsmodul läuft auf einem unabhängigen Rechner, der über Mobilfunk im Internet ist. Damit sind unabhängige Redundanzkontrollen vorhanden.

Stabilität des Gesamtsystems

Die hohen Anforderungen an den Permanenteinsatz erfordern eine stabile Software mit automatisierten Kontrollalgorithmen, stabile Datenleitungen, entsprechende Webdienste und fehlerfrei messende Sensoren. Eine Fernwartungsoption ermöglicht die schnelle Reaktion bei auftretenden Schwierigkeiten. Debugger-Funktionen zur Analyse von Fehlfunktionen wurden implementiert und angewendet.

Datenhaltung

Grundsätzlich entstehen bei solchen Monitoringanwendungen sehr viele Datensätze. Im beschriebenen Projekt sind dies mehrere Temperatursensorwerte mit einer Messrate von 5 Minuten, Rohmessdaten von 4 Tachymetern mit einer Messrate von ca. 10 Minuten mit jeweils ca. 10-15 Prismenpunkten, 6 Distanzwerte und mehrere Neigungswerte plus Logfile, die aufgezeichnet werden. Zusätzlich werden diese Messwerte in einer gesamten Auswerteprozedur prozessiert und die Abweichungswerte sekündlich aktualisiert. Darüber hinaus existieren noch manuelle Tachymeter- und Nivellementmessdaten.

Die Datenverwaltung in einem Datenbankmanagementsystem ist hierfür zwingend erforderlich. Auf einem Raspberry Pi können verschiedenen Datenbanken als OpenSource-Komponenten implementiert werden. Das Datenbankmanagementsystem MariaDB als Nachfolgesystem der mySQL-Datenbank ist für einen solchen Einsatz gut geeignet. Die Messfiles können aus den Prozessen automatisiert in das System eingespielt werden.

Ergebnisdarstellung auf Webserver

Grundsätzlich sollten die Ergebnisse des gesamten Messprojekts für alle Projektbeteiligten als Webdienst einsehbar sein. Dies ist beispielsweise auf verschiedenen Webplattformen möglich. Das Betreiben der gesamten Technik auf dem Raspberry Pi hat dabei viele Vorteile. Nach der Installation und Konfiguration des Webservers und der Datenbank können die Ergebnisse automatisiert dargestellt werden. Entsprechende Pythonskripte können die Rohmessungen und die Ergebnisse der Auswertung in verschiedenen Tabelle anlegen, verwalten, erweitern und analysieren. Mit entsprechenden SQL-Clients wie phpMyAdmin, pgAdmin oder HeidiSQL könnten die Datenbanken manuell bearbeitet werden. Es bietet sich jedoch auch eine automatisierte Implementierung mit Pythonskripten an. Die Kombination von php-, Java- und HTML-Skripten ermöglicht die Visualisierung mit z. B. der Google Chart Technologie.

Die gesamten Komponenten arbeiten in diesem Ansatz fehlerfrei zusammen und liefern die erforderlichen Informationen zur Beurteilung der gesamten Bauwerksdeformationen.



Abb. 5: Ergebnisdarstellung unterschiedlicher Teilabschnitte

Zusammenfassung und Fazit

In diesem Beitrag werden die grundsätzlichen Anforderungen an ein modulares Monitoringsystem für geodätische Anwendungen dargestellt und mit dem Beispiel an einem Projekt "Wohnpanorama am Park" an der U-Bahn U1 nahe U-Bhf. Gleisdreieck in Berlin hinterlegt. Komplexe Monitoringsysteme beinhalten in der Regel eine Vielzahl von Sensoren mit ihren unterschiedlichen Anforderungen. Neue Hard- und Softwareentwicklungen wurden aufgegriffen und als Module im System als Geosensornetzwerk eingebunden. Das Monitoringsystem besteht aus mehreren Teilsystemen mit den entsprechenden Auswertungsmodulen und schlussendlich der Präsentation der Ergebnisse im Projekt-Web. Besondere Anforderungen bestehen im Projekt hinsichtlich der Genauigkeitsanforderungen. Für den sicheren Bahnverkehr auf der U-Bahnlinie wurden Alarmwerte bei 2 mm definiert. Um dieser Anforderung zu entsprechen, wurde ein kombiniertes System aus Tachymetern, hochpräzisen Distanz- und Neigungssensoren für die 3D-Überwachung realisiert. Die Echtzeit-Überwachung ist damit realisiert. Das Konzept, auf die Kombination bewährter Sensortechnik und neuen Modulen basierend auf Einplatinencomputern mit entsprechenden Pythonskripten zu setzen, hat sich als gute Wahl erwiesen. Mit der Modultechnik besteht die Möglichkeit, das ganze System auf veränderte Situationen bzw. Anforderungen anzupassen.

Literatur

DIN (2019): DIN 18710, Teil 4, <u>https://www.din.de/</u> (05.12.2019).

GIM (2019): Homepage der Fa. Gim Vermessung, https://www.gim-vermessung.com/ 05.12.2019.
- NEUBAU DENEWITZSTR. (2019): Homepage des Bauprojekts, http://panorama-am-park.berlin (05.12.2019).
- STABI ALERT (2019): Homepage der Fa. Stabi Alert, https://www.stabialert.nl/de/ (05.12.2019).
- ZECH RUTH BLASIUS (2019): Homepage der Fa. Zech, Ruth und Blasius, https://zrb-vermessung.de/ (05.12.2019).
- ENGEL. P. et. al.: DABAMOS freie Software f
 ür das automatische Deformationsmonitoring, Beitrag zum Tagungsband Geomonitoring 2015, Clausthal-Zellerfeld, 5.-6. M
 ärz 2015.
- HEUNECKE, O. et. al: Handbuch Ingenieurgeodäsie, Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen, 2. neubearbeitete und erweiterte Auflage, Wichmann-Verlag Berlin, 2013.
- HEUNECKE, O.: Anwendungen von Geosensornetzwerken in der Ingenieurgeodäsie, Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen – Weimar 2012, DVW-Schriftenreihe Band 68., Wichmann Verlag, 2012.
- STEMPFHUBER, W.: Geodätische Monitoringsysteme Stand der Technik und Abgrenzung der gegenwärtigen Systeme, DVW Schriftenreihe 59/2009, Zeitabhängige Messgrößen -Verborgene Schätze in unseren Daten, Beiträge zum 85. DVW-Seminar am 7. und 8. September 2009.
- STEMPFHUBER, W.: Geodätisches und Geotechnisches Monitoring mit Low-Cost-Komponenten, Geomonitoring 2019 Hannover, Tagungsband, 2019.

Danksagung

Wir bedanken uns bei Herrn Dr. Patrick Arnold von GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH für die Unterstützung zu der Beschreibung der Bauwerksanforderungen.

Monitoring and evaluation of railway infrastructure

Christopher SANDNER, Burchard RIPKE und Thomas WUNDERLICH

Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung durch anonyme Fachkollegen als "peer reviewed paper" angenommen.

1 Summary

By means of modern measuring technologies and calculation methods, a new tool to predict defects in railway tracks shall be developed. The method is based on information from the acceleration sensors which are located on the axle boxes of a train bogie. Based on the amplitudes and frequencies of the measured accelerations, the track defects can be detected. The measured data will be matched to a specific excitation by using a wavelet transformation. By equipping in-service trains with a monitoring system, a fast and effective assessment of track defects is possible regardless to the regular inspection. By analysing the data, certain reactions from the train are examined and broken down into failure groups by using their frequency ranges. One aim of this monitoring is an early detection of defects to support an economic removal of the defects by condition or root cause-based maintenance.

2 Introduction

Since the middle of the 20th century, special measuring trains are measuring the track geometry as a part of the regular inspection. The origin of this measurement technology is built in the DB track recording cars "Gleis-Mess-Trieb-Züge (GMTZ)", which are equipped with a mechanical chord. This measurement system works according to the Nalenz-Höfer method (LICHTBERGER 2010) and delivers a chord-based track geometry measurement signal. The evaluation criteria and reaction thresholds from DB guideline 821.2001, which are still in use today, have been developed and verified for this type of signals. Nowadays modern measurement systems are using an inertial measurement platform to detected track geometry errors which are evaluated according to SR-threshold values form chord-based measurement signals (NICKLISCH 2013). The advantage of comparability over years and decades faces the disadvantage that only track quality assessment can be derived from chord-based measurement signals but not the real track geometry. In order to assess the track geometry defects not only by evaluating the track quality (SR method), the presented method uses axle box accelerations to assign defects and their specific root causes.

The measured values are used to characterise the track defect by means of typical reactions between train and track. This is done by a wavelet transformation which converts the accelerations in their frequency domain. Due to the frequency range a feature vector can be build and the defect can be assigned to a specific type of error. In this process not only the condition of the track will be considered, but also data from the rail surface is collected and evaluated (LI 2015). These measurements are done by in-service trains and the inspection train

RAILab III ("Rollendes Analyse und Inspektions-Labor") which are equipped with accelerometers at the axle boxes of the bogie (AUTOMAIN 2014, SHIFT2RAIL 2017). By using these sensors, conspicuous defects in the longitudinal level are detected and assigned to individual error groups (ANGEHRN 2016, KIPPER 2013 and RAPP 2018). An important role is noted by the comparison and interpretation of the chord-based measurement and frequency domain. The main difference is shown by the resolution of the analysed wavelength range. Due to the reduced chord-based measured signals of 70 m wavelength, only the track geometry condition can be considered. By using the wavelet analysis of the acceleration sampled at 25 kHz much more information about the track defect can be determined and the root cause identified more effectively and faster.

3 Monitoring system

The monitoring system which is mentioned in the introduction consists of six piezo electrical (IEPE) accelerometers. These are mounted at the axle boxes of two wheelsets of the train. The system measures the accelerations in y-direction (2 kHz) and z-direction (2 kHz and 25 kHz) for lateral alignment and longitudinal level. Mainly the vertical accelerations are evaluated, because the changes in the longitudinal level are visible faster. The setup of the monitoring system is shown in Figure 1.



Fig. 1: Components of the RAILab III monitoring system.

Comparable chord-based measuring signals can be achieved from the accelerations by a double integration, bandpass filtering and subsequent chord-based filter like in the inspection system. The comparison of the inspection and monitoring data, which are plotted in Figure 2



Fig. 2, shows a good agreement of the chord-based measurement signals between the inspection car RAILab III and the monitoring system.

The sampling rates of the sensors f_A are 2 kHz and 25 kHz. Due to the high sampling rate, defects with short wavelengths can be detected. The relation between the wavelength of the defect L_F , the speed of the train v and the sampling frequency f_A is given in Equation (1).

Fig. 2: Chord-based measurements, calculated from inspection and monitoring data.

$$L_F = \frac{v}{f_A} \tag{1}$$

Table 1 shows the evaluable wavelength ranges of both measurement systems. In this case, a speed of 200 km/h is assumed for the monitoring system. The values in the table consider the real wavelength range though the Shannon sampling theorem. The high wavelength limit L_0 of the monitoring system is determined by the necessary hardware high-pass filter of 0,5 Hz.

Measurement system	Wavelength threshold low L_u	Wavelength threshold high L_o	
Inspection	3 m	70 m	
Monitoring	2 kHz Sensor: 0,17 m	111 m	
	25 kHz Sensor: 0,014 m		

Table 1: Resolution of the measuring system at 200 km/h

Due to the much greater details in the 25 kHz measurement signals, the monitoring data is not only used to measure the track geometry defects. As the axle box accelerations correlate more or less with the wheel-rail forces, the monitoring system provides significant information about the actual condition of the railway infrastructure such as its components.

3.1 Localisation of the measurements

The exact localisation of the measured values is an essential part of the measurement. By using the measurement data of the individual measuring systems, different methods for positioning can be used. Depending on the measurement system, the GNSS coordinates, curvature or known patterns in the acceleration data (e.g. from frog of a switch) can be used for a good positioning of the measurement system.

Additionally, the travelled distance of the train can be calculated by the recorded speed or the counts of an odometer. In connection with the GNSS position, the measurement system can be located by track kilometre. The measured GNSS position must be transformed from WGS84 to the DB-Ref coordinate system. The transformation of the coordinates is necessary, since the tracks are defined in the DB-Ref coordinate system. After the transformation, the DB-Ref coordinate is plumbed to the track axis and aligned to the track kilometric line. The result of this method is a position, which refers to the kilometre of the track (SHIFT2RAIL 2017). An evaluated example is shown in Figure 3 left, part I.

The accuracy of the track kilometre is based on the accuracy of the GNSS position. To check the exactness of the GNSS method and to increases the accuracy by a post processing step, the reference (planned) curvature and measured curvature of the track axis can be used. Figure 3 part II shows the differences between the measured curvatures (monitoring system and inspection system) in respect to the reference system (DB-Ref system). In the selected track section, the track geometry is defined by a left and right curve, which is represented by positive and negative values of the curvature. This geometric constellation of track geometry elements shows the best fitting of the measured values to the reference track.



Fig. 3: Positioning by GPS coordinate in DB-Ref system (left) and curvature system by the travelled distance (right).



The inspection and monitoring system show offsets in Figure 3

Fig. 3 part II to the reference system. These offsets depend on the starting position, which is derived by the GNSS position or other mentioned positioning methods from the kilometre value.

As reference information, the track network data of the DB Netz AG are used. The designed track geometry (alignment) defines the radius of the respective track axes. To determine the position of the measurement systems, the radius of the track axis is converted to the curvature. The curvature of the track can be determined with sufficient accuracy by deriving the differences of the direction angle (yaw angle) from the inertial measurement unit. Through the positioning over the curvature, the covered distance of the train run can be assigned to the track kilometre. The travelled distance of the measurement system is a value that contains no further track information.

3.2 Description of the analytical method

The method to detect and characterize specific defects in the track geometry results from the determination of frequencies from the measured accelerations. Compared to the chord-based measurement signal, the accelerations are analysed directly. The differences arise from the construction of the filter method. Affected is the input signal by the limitation of the wavelength or frequency range and the transfer function. Depending on the wavelength, the filter may have dampening or amplifying effects (WOLTER 2012).

With the calculation of chord-based measurement signals the division of the chord is on focus. To represent properties of this signal shape, the absolute values of the transfer function can be used. The evaluation of absolute values H_{RI} for the longitudinal level is based on the division from chord part a = 2.6 m and chord part b = 6.0 m which is show on the example from the GMTZ 726-005 on Figure 4**Fig. 4**.



Fig. 4: Chord-based measurement system GMTZ with chord parts for evaluation the longitudinal level and lateral alignment.



Fig. 5: Determination of chord-based measurement signals

To clarify the chord parts, Figure 5 shows the determination of the chord-based measurement signal. The calculation is based on the measured distances from the chord points c + a, c and c - b to the track.

The output signal can theoretically not only be described via the real part, signal distortion and phase shifts can be assigned to the imaginary part. Related is the result to parameters from the wavelength x. The determination of values from the real part H_R , imaginary part H_I and absolute value H_{RI} is based on the Equations (2) – (4) (WOLTER 2012).

Real part:
$$H_R = 1 - \frac{a}{a+b} \cos\left(\frac{2\pi}{x}a\right) - \frac{b}{a+b} \cos\left(\frac{2\pi}{x}b\right)$$
(2)

Imaginary part:
$$H_{I} = \frac{a}{a+b} \sin\left(\frac{2\pi}{x}b\right) - \frac{b}{a+b} \sin\left(\frac{2\pi}{x}a\right)$$
(3)

Absolute value:

$$|H_{RI}| = \sqrt{H_R^2 + H_I^2}$$
(4)

Figure 6 shows the effects of the calculated H_{RI} values for wavelengths up to 70 m. It turns out, that wavelengths of 1.7 m are amplifying by a factor of two and thus almost doubled. At wavelengths over 15.2 m, the transfer function affects the output signal by a damping effect.



Fig. 5: Influences of the transfer function by using absolute values H_{RI} for evaluate chordbased measured signal of the longitudinal level.

In conjunction with a wavelet transformation, the accelerations can be used directly to analyse and identify specific properties in the signal shapes. Results are values which are quantified by coefficients (BÄNI 2002). The advantage over a Fast Fourier Transformation (FFT) is the detection of similarities between the pattern wavelet and the input signal. By adapting the parameter, certain signal shapes can be aligned with a defect based on its frequency range.

For application of a continuous wavelet transformation (CWT), the signal must have a section which shape is comparable to a wavelet. If this section has been identified as a class or object, the wavelet type must be determined, which covers the greatest possible information of the input signal (LOUIS 1998).

One output of the monitoring system are vertical accelerations, which are sampled at 25 kHz. These accelerations are characterized by means of a Morlet wavelet. This wavelet is described in its normal shape by 5 maxima and thus allows the recognition of distinct signal structures. The mathematical basic of the Morlet wavelet is defined by the scaling parameter k and the sampling time. In the given example from Figure 7, the analysed ranges are determined by the respective sampling windows from *Morlet I, II* and *III*. The parameter j describes in this context the temporal position of the wavelet with respect to the sampling windows. Equation (5) shows the calculation of the reaction ψ from the base of the Morlet wavelet shape and not the evaluated and quantified coefficients of the wavelet transformation.

$$\psi(t) = \exp\left(\frac{-\left(\frac{j}{k}\right)^2}{2}\right) \cos\left(5\frac{j}{k}\right)$$
(5)

In application of this method, the Morlet shape does not identify the absolute signal, but rather the amplitude curve, which is similar to the wavelet. Figure 7 describes an example of the typical properties from a Morlet wavelet.



Fig. 6: Application of the Morlet wavelet.

For application of a wavelet, the parameters k (scaling) and j (time shift) must be assigned. The relationship of these two parameters determines the basis of the later coefficient matrix. To show the parameter behaviour of the Morlet wavelet, parameters of Table 2 are assigned to the example from Figure 7.

Wavelet type	k (scaling)	j (time shift)
Morlet I	27	140
Morlet II	37	595
Morlet III	50	995

Table 2: Assignment of parameters

The results of the wavelet transformation are coefficients with high values in sections with equal shapes of amplitudes between wavelet and input signal. In this step, the method is similar to a cross-correlation (BÄNI 2002, LOUIS 1998). Based on the shape of the Morlet wavelet, the fundamental frequency F_c and the scaling parameter k can be converted by using Equation (6) into a pseudo frequency F_k .

$$F_{k,i} = \frac{F_c}{k_i} \tag{6}$$

To evaluate the result of the wavelet analysis, the analysed data is subdivided into different classes. In range of 1 Hz to 50 Hz, the immediate reactions of the train to the local track situation are recognised. The frequency range from 50 Hz to 400 Hz can be assigned to unround wheels and the track dynamics as well as associated vehicle-track interactions. Already at this point, the elastic properties and natural frequencies of the wheel sets have an impact. Excitations above 400 Hz can often be attributed to geometric defects in the rail and the tread of the wheels (RIPKE 1994).

These frequency ranges are influenced by the speed of the train and excitations between the wheel and the rail. As the measured axle box accelerations are proportional to the force, the

main causes can be assigned to the different frequency ranges now. Due to the already mentioned context $f_A = \frac{v}{L_F}$, the frequency range depends on speed v and the wavelength L_F . By standardising the data (scaling), the influences of the speed can almost be eliminated.

4 Evaluation of results

In order to assign the measured accelerations of the longitudinal level to specific classes or frequencies, the following evaluation points out the relationship between the derived frequencies from the wavelet coefficients, the chord-based measurements and parameters of the measured and reference track geometry.

Figure 8 shows the results of a track section from the rail freight corridor Rotterdam – Genoa (RFC 1). It shows different images and information of the track. Part (1) describes the results of the wavelet transformation and relates to the standardised coefficients of the Morlet wavelet to their logarithmic frequency bands. The method is based on finding certain signal shapes or proportions that allow conclusions on the actual frequency ranges. Low frequencies are resolved in more detail and higher frequencies are coarser. Part (2) shows the chord-based track geometry derived from the inspection and monitoring data. The main difference is found in the evaluation of the wavelength ranges which is already mentioned in the description of the analytical method. To identify a switch or influences of the track geometry, part (3) shows the measured gauge, speed and reference track layout (curvature and gradient).

Based on the intensity of the wavelet coefficients from Figure 8,**Fig. 7** part (1), frequencies lower than 20 Hz are highlighted in the sections of switch 216, switch 215 and bridge 19,776 km. This result can also be verified by the evaluation of the chord-based measurement signal or the measured gauge from the inspection measurement system. To establish a relationship between the registered track defect and the local position of this error, Figure 9 highlights the defects based on the engineering survey site plan. This plan describes railway specific objects such as the track axis, signals, bridges and constructions as well as the administrative and property lines of the DB. It serves as a basic plan for scales and subject-specific representations. For analysing the mentioned track section from kilometre 19,600 km to 19,900 km, Figure 9 serves the interpretation of results.



Fig. 7: Analysis tool for verification of wavelet transformation data (1), chord-based measurement signals (2) and track geometry data (3).



Fig. 8: IVL-plan position 19,600 km to 19,900 km; travel direction from left to right, track one.

Switch frogs leave a conspicuous frequency with a height coincidence of the wavelet coefficients. In general, Figure 8**Fig. 7** marks reactions from 40 Hz to 50 Hz which are only registered by directly crossing a switch. For example, the reactions are shown between the left axle box sensor and the switch frog. The first switch is located on 19,698 km. On this position, switch number 216 is inspected by a facing direction. The switch is of type EW 60-760-1:14/1:15 and has a construction length of more than 46 m (switch blade to switch frog). On focus are frequencies of both named switch points, which reaction can also be seen at the measured inspection gauge. Contrary to the wavelet coefficients, the chord-based measurement signal shows a greater reaction on the switch blade tip as on the switch frog point. Based on the described reaction classes, frequencies lower than 20 Hz can be assigned in this area to the actual track situation, which can be interpreted as regular wear on track or non-compacted ballast under the sleeper.



Fig. 9: Raw data processing of the monitoring data between section 19,670 km to 19,730 km, acceleration signal (a), signal accurate to shape (b) high pass filtered signal (c), chord-based measured signal (d).

To show the available and finally used wavelength ranges between accelerations as well as chord-based measured signals, Figure 10 (a to d) shows the evaluation process of the measured acceleration data. By using the speed of the train, the time signal can be interpolated to the kilometre of the track axis which is shown in part a. Part b shows the 0.16 m interpolated values of the acceleration sensor which are evaluated by a double integration. Over a bandpass filter, the integrated values are limited to 70 m in part c. Finally, the chord-based measured signal is evaluated in part d, which is subject from properties of the transfer function.

Based on the measured accelerations and chord-based measured signal, the ten years old switch 216 (installed in 2009), mounted on concrete sleepers, shows a good track geometry condition. Ultimately, frequencies above 1 kHz are highlighted in Figure 8, which can be related to the wear of the tread profile on the tongue rail. By interpretation of short wavelength ranges (high frequency range), the type of the rail defect can also be assigned to track dynamics. Local increase of the wheel-rail forces could ultimately affect the amplitude curve in the chord-based measurement signal.

The second switch is detected at position 18,829 km. In this area, the switch 215 is inspected by passing the turnout trailing. In contrast to switch 216, the inspection starts at the switch frog point and ends at the rail tongue. The distance between these two components is given by the switch type EW 60-300-1:9. Due to a different type and smaller radius, switch 215 is constructed over 29 m between these two points. Like the first switch inspection, the wavelet coefficients show a high match on 40 Hz. But the main difference is detecting on the intensity of the wavelet coefficients. On focus are frequencies of 40 Hz. In this context Figure 11 shows the evaluation of 40 Hz wavelet coefficients in this section. For a better interpretation and to clarify the position of the wavelet analysis, the monitoring data and Morlet wavelet are shown in the space domain (kilometre). For analysing the 25 kHz data, the accelerations are evaluated in the time domain, because the extension of the wavelet is distorted on the kilometre. The difference is presented by discretization of the data.



Fig. 10: Morlet wavelet plotted over kilometer, analysing 25 kHz monitoring data for 40 Hz frequency range.

The twenty years old switch (installation in 1999) shows more intensive values, which might be due to the wear on the frog. In addition to these typical frequency ranges found at switches,

dominant frequencies around 100 Hz, 400 Hz and between 1.3 kHz to 1.9 kHz are recognised. The result of the wavelet transformation from switch 215 is confirmed by results of the Fast Fourier Transformation (FFT) in Figure 12.



Fig. 11: Analysis of switch number 215, FFT of the 25 kHz monitoring data with regard to a wavelet analysis of 40 Hz at track position 19,829 km.

Another conspicuous spot is registered at the track position 19,858 km. At this point the tip of the switch blade is inspected. In addition to frequencies below 20 Hz, which can be also assigned to the local track situation like non-compacted ballast under the sleeper (hanging sleeper), frequency ranges of 80 Hz are highlighted. This reaction could be assigned to the switch blade lock. Overall, switch 215 shows no deviations of the regular wear, which is also confirmed by the chord-based measurement signal.

Additional to the analysed switches another defect can be assigned to the railway bridge on track position 19,776 km. This area is highlighted by a frequency below 20 Hz, which also fits to the chord-based measurement signal. The relationship between the existing wavelength ranges from cord-based measurement and acceleration signal are particularly evident. Due to the bandpass filter, the inspection signal is limited to a wavelength range between 3 m to 70 m, which is also influenced by the mentioned transfer function. This is also shown in the frequency ranges of the wavelet analysis under 50 Hz from Figure 8.

Due to an improper working drainage of the bridge, the upcoming surface water has a negative influence on the track geometry. This issue can affect the degradation of the track and can lead to high amplitudes which are visible in the chord-based measurement signals. The area behind the bridge in ascending kilometre is defined by a slope shoring. As a result of load to the soil body, different pressure conditions can arise and influence the track. This can especially occur in changes between bridge and embankment.

As a final result, it should be noted that the chord-based measurement signals provide an optimal solution (across the whole railway network with different conditions) for evaluating the track geometry due to their wavelength range. But filtering (limiting the wavelength range) the real inspection signal, much information is lost. Based on that background it will be difficult or even impossible to detect the root causes of defects from chord-based measurement signals. As a result, defects of switches, track geometry and errors on bridges cannot be clearly distinguished. In conjunction with the results of the wavelet transformation, certain amplitudes from the chord-based measurement signal can be assigned to specific frequency range and thus to the root cause of the defect.

5 Conclusion

The currently used inspection system is based on an inertial measurement unit (IMU) and optical measurement method (laser measurement system) which directly measures the differences between the rails (left and right) and the track recording car. That records all required parameters of the track geometry with high quality and accuracy. Based on this, the system fulfils optimal the requirements of the track geometry evaluation. In addition to the existing measuring systems, alternative methods based on accelerometers allow further evaluations. Besides assessing the longitudinal level, such systems can be used for root cause analyses and the evaluation of vehicle-track interactions. The comparison with the inspection system shows the high quality of the monitoring system.

According to the described method, more detailed information about the actual condition of the railway track can be obtained. Based on the recorded frequencies, root causes can be identified. A major benefit in the assessment of track defects could be the assessment of the degradation and the time to failure of the track components. This information can be used for derived optimal measures, planning and implementing for more cost-effective projects.

With the presented method, not only the evaluation of the chord-based measured signal can be obtained. Further statements about short wavelengths of less than 3 m length can be determined over the analysis by using the acceleration values from the monitoring system. Depending on the speed, wavelengths greater than 70 m can also be determined. Based on this system it is possible to detect geometrical rail defects such as groove or slip waves which lead to high excitation frequencies. The use of data analytical methods like machine learning or deep learning will further enhance the possibilities of the monitoring system and sustainably improve the availability of tracks and the efficiency of the maintenance measures. The background of these approaches is based on the amount of measured data every day. By using machine learning methods, the measured data should be evaluated even faster by artificial intelligence. This allows a better and more effective representation of relationships between infrastructure data and the measured data. For a high availability of the track, this information can be identified by special algorithms, physical characteristics and patterns. Deep learning should be used to better distinguish and to evaluate already recognized structures. Due to the great amount of data, the use of this method promotes a higher recognition of certain events and their improvements.

References

- ANGEHRN, F., BRAESS, H. P. & WEIDMANN, U. (2016): Frequenzanalyse von Achslagerbeschleunigungsmessungen, Eisenbahntechnische Rundschau
- AUTOMAIN (2014): Augmented Usage of Track by Optimization of Maintenance, Allocation and Inspection of Railway Networks
- BÄNI, W. (2002): Wavelets: eine Einführung für Ingenieure, Oldenbourg Verlag 1. Auflage

- KIPPER, R.; GERBER, U. & SCHMEISTER J. (2013): Bestimmung langwelliger Gleisverformungen und deren Bewertung, Eisenbahningenieur
- HEUNECKE, O., KUHLMANN, H., WELSCH, W., EICHHORN, A. & NEUNER, H. (2013): Handbuch Ingenieurgeodäsie: Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen, Wichmann Verlag 2. Neu bearbeitete und erweiterte Auflage,
- LICHTBERGER, B. (2010): Handbuch Gleis, Eurailpress 3. Auflage
- LOUIS, A. K., MAAB, P. & RIEDER, A. (1998): Wavelets: Theorie und Anwendung, Teubner Studienbücher 2.überarbeiteteund erweiterte Auflage
- LI, Z., MOLODOVA, M., NÚÑEZ, A SENIOR MEMBER, IEEE & DOLLEVOET, R. (2015): Improvements in Axle Box Acceleration Measurements for the Detection of Light Squats in Railway Infrastructure, IEEE Transactions on Industrial Electronics
- NICKLISCH, D. (2013): Oberbau inspizieren: Prüfung der Gleisgeometrie mit Gleisfahrzeugen Ril 821.2001, Aktualisierung 19
- RAPP, S., ULLRICH, M., STRÄHLE, M. & SCHEFFBUCH, M. (2018): Track-vehicle scale model for evaluation local track defects detection, Elsevier
- RIPKE, B. (1994): Hochfrequente Gleismodellierung und Simulation der Fahrzeug-Gleis Dynamik unter Verwendung einer nichtlinearen Kontaktmechanik, Dissertation
- SHIFT2RAIL (2017): Report on track/switch parameters and problem zones, IN2SMART Deliverable 4.1.
- WOLTER, U., W. (2012): Rekonstruktion der originalen Gleislageabweichung aus 3-Punkt-Signalen (Wandersehnenmessverfahren) und Beurteilung hinsichtlich Amplitude, Fehlerwellenlänge sowie Fehlerform, Dissertation

Hochpräzises und hochfrequentes Monitoring eines weltweit einmaligen Gleisverwerfungsversuches

Jens-André PAFFENHOLZ, Ilka VON GÖSSELN, Johannes BUREICK, Dmitri DIENER, Michael REIFENHÄUSER, Ingo NEUMANN

Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung durch anonyme Fachkollegen als "peer reviewed paper" angenommen.

1 Motivation und Zielsetzung

Starke Hitzewellen wie im Sommer 2018 haben großen Einfluss auf den Zustand unserer Verkehrsinfrastruktur. Auch auf Bahnstrecken wirkt sich die Hitze aus. Die Schienen dehnen sich durch die hohen Temperaturen aus. Im schlimmsten Fall kommt es zu sogenannten Gleisverdrückungen oder -verwerfungen, also zu einer starken Verformung des Gleises. In diesem Fall sind Streckensperrungen aus Sicherheitsgründen unumgänglich. Es ist also wichtig, die Grenzen der Gleislagestabilität zu kennen.

Im Eisenbahnverkehr erfolgt die Führung der Fahrzeuge durch die Gleise. Von besonderer Bedeutung ist die sogenannte "äußere Geometrie", welche die absolute Lage der Trasse im Raum beschreibt. Dadurch wird sichergestellt, dass die freigegebenen geometrischen Trassierungselemente örtlich realisiert sind und somit die Gleise den fahrdynamischen Anforderungen genügen. Weiterhin ist die äußere Geometrie so gewählt, dass bei der Vorbeifahrt an ortsfesten Anlagen (z. B. Widerlager von Brücken oder Bahnsteige) der für die Zugfahrt erforderliche Lichtraum frei von Einragungen ist.

Geodätische Absteckungen und Abnahmen stellen sicher, dass die äußere Geometrie der Gleise und Weichen nach Neubau, Umbau und maschineller Durcharbeitung örtlich realisiert ist. Aufgabe der Oberbaukomponenten ist es, das Gleis unter den Einwirkungen von Bahnbetrieb und Witterung in seiner Position zu halten. Die erforderlichen Längs- und Querverschiebewiderstände werden durch den verdichteten Schotter, durch Schwellen und Schienenbefestigungen erreicht. Waren früher die Schienen entsprechend ihrer Fertigungslängen mit Laschen verbunden, bietet das heute gebräuchliche lückenlos verschweißte Gleis Vorteile in der Unterhaltung und im Fahrkomfort. Eine Kompensation temperaturbedingter Längenausdehnungen im Bereich der Laschen entfällt und folglich erhöhen sich die Anforderungen an die Stabilität des Oberbaus.

Welche Temperaturbereiche sind für welche Art von Gleis kritisch? Wie schnell dürfen Züge bei diesen kritischen Temperaturen noch fahren? Um Antworten auf diese Fragen liefern zu können und eine Parameterstudie für Geschwindigkeitstabellen durchzuführen, wurde ein weltweit einmaliger Großversuch auf der ICE-Schnellfahrstrecke Hannover-Göttingen von der Deutschen Bahn (DB) Netz AG durchgeführt.

1.1 Einordnung der eingesetzten Sensoren im Kontext des Monitorings

Die dreidimensionalen (3D)- Messverfahren "Lasertracking" und "Laserscanning" bieten dem Geodäten ausgezeichnete Möglichkeiten zur Bestimmung von Objektveränderungen im unteren Millimeterbereich bis hin zum Sub-Millimeterbereich. Der Lasertracker zeichnet sich durch seine hochfrequente, punktuelle Absolutdistanzmessung auf diskret signalisierte Corner Cube Reflektoren (CCR) aus. Der Laserscanner hingegen ermöglicht die unmittelbare flächenhafte Erfassung von Oberflächen in Form einer 3D-Punktwolke. Beide Sensoren ermöglichen eine Referenzierung ihrer Daten gegenüber einem übergeordneten, sensor-unabhängigen Koordinatensystem.

Die Nutzung des terrestrischen Laserscannings (TLS) im Bereich des geodätischen Monitorings und der bisher traditionell durchgeführten punktbasierten Deformationsanalyse hin zu einer TLS-basierten Deformationsanalyse ist ein hochaktuelles Forschungsfeld mit gelösten Fragestellungen und neuen Herausforderungen, die sich insbesondere aus der flächenhaften Datenerfassung und der damit verbundenen hohen Punktdichte ergeben. Die klassischen Auswerteansätze lassen sich nicht ohne Weiteres auf 3D-Punktwolken anwenden, so dass entsprechende Auswerteansätze zur Berücksichtigung der Charakteristiken von Profilen und 3D-Punktwolken notwendig sind. Einen Überblick über Modellierungsstrategien von 3D-Punktwolken für die TLS-basierte Deformationsanalyse geben NEUNER et al. (2016). HOLST (2019) gibt einen Überblick über verschiedene Szenarien des TLS und die Nutzung der gewonnen 3D-Punktwolken. Der Einsatz des Lasertrackers im Bereich der Deformationsanalyse und des allgemeinen Monitorings ist bisher weniger verbreitet. Durch die hochgenaue und hochfrequente, punktuelle Absolutdistanzmessung basierend auf einem Interferometer bieten sich interessante Möglichkeiten von der Nutzung als Referenz-/Validierungssensor bis hin zur Kalibrierung numerischer Simulationsmodelle. Im Rahmen des Monitorings von Infrastrukturbauwerken zeigen beispielsweise PAFFENHOLZ et al. (2018) den Einsatz des Laserscanners und Lasertrackers bei der Bestimmung von lastinduzierten Verformungen an einer historischen Gewölbebrücke.

1.2 Zielsetzung des Versuchs

Die Aufgabe des Geodätischen Instituts Hannover (GIH) der Leibniz Universität Hannover (LUH) beim Gleisverwerfungsversuch war die messtechnische Beobachtung bzw. das Monitoring der durch elektrische Erhitzung induzierten Gleisverwerfung. Hierbei galt es, die 3D-Verformung der Schienen und der Schwellen für den nur ca. eine Sekunde dauernden Moment der Gleisverwerfung mit einer Genauigkeit im Bereich von 1/10 mm zu erfassen. Der Gleisverwerfungsversuch fand in der Nähe des Überholbahnhofs Orxhausen, Strecke 1733 km 62.0, auf einem 120 m langen Versuchsabschnitt des geraden Gleises 503 am 26. Juni 2017 statt. Die Schienen des Gleises 503 wurden an den Enden des Versuchsabschnittes durchtrennt und mit isolierten Laschen fixiert, sodass eine physikalische, elektrische und signaltechnische Trennung gegeben war. Vor und hinter dem Versuchsabschnitt wurden Loks mit jeweils sieben beladenen Schotterwagen als "Widerlager" positioniert. Mittig im Versuchsbereich wurde eine Gleisfehllage in Form eines Sinusbogens mit einer Länge von 9 m und einer Amplitude von ca. 20 mm eingebaut. Diese Schwachform diente der Vordefinition der Örtlichkeit, an welcher die Gleisverwerfung eintreten sollte. Der Beitrag stellt die Versuchsplanung, Durchführung und Datenauswertung vor. Durch den Versuch war es erstmalig möglich, das Verhalten des Gleiskörpers bei einem derartigen Verwerfungsversuch hochdynamisch zu erfassen. Das Monitoringkonzept setzt auf eine redundante Erfassung dieses Ereignisses, da eine Wiederholung, wie gegebenenfalls bei einem Belastungsversuch, hier nicht möglich ist. Ein vergleichbarer Versuch hat letztmalig im Jahr 1987 stattgefunden (EISENMANN 1987). Die Ergebnisse der Messungen fließen aktuell in die Berechnungen für neue Geschwindigkeitstabellen der Deutschen Bahn ein.

2 Monitoringkonzept

Das Monitoringkonzept des GIH sieht den Einsatz eines Lasertrackers, eines Präzisionstachymeters und fünf terrestrischer Laserscanner im Profil- bzw. 3D-Modus vor. Der Lasertracker sowie das Präzisionstachymeter hatten die Aufgabe des *punktuellen Monitorings ausgewählter Schienen- und Schwellenbereiche* sowie der Überprüfung der Stabilität der Laserscanner im Profilmodus in einem lokalen Referenzrahmen während des Gleisverwerfungsversuchs. Vier Laserscanner im Profilmodus dienten der hochfrequenten linienhaften Erfassung der Schienen mit 50 Profilen pro Sekunde im Verwerfungsbereich. Ein weiterer Laserscanner wurde zur flächenhaften Erfassung von 3D-Punktwolken des gesamten Gleisbereiches zu diskreten Zeitpunkten eingesetzt.



Abb. 1: Aufbau der Sensoren im Gleis: Im Vordergrund von links: Lasertracker Leica AT960-LR und Präzisionstachymeter Leica TS30; Mittig: Höhentafeln auf den Schwellen zur Bestimmung von deren 3D-Bewegung; Im Hintergrund von links: Laserscanner Z+F IMAGER 5010X und Laserscanner Z+F IMAGER 5006.

Einen Überblick der eingesetzten Sensoren gibt Abbildung 1. Eine schematische Darstellung des Messaufbaus mit den Positionen der Sensoren zeigt Abbildung 2.

Das Auswertekonzept sieht eine Beschreibung der 3D-Verformungen über die Zeit des Versuches an den punktuellen Messstellen sowie eine kontinuierliche Beschreibung durch stückweise polynomiale Funktion (B-Splines) vor.

2.1 Festlegung des Referenz-Koordinatensystems

Zur Festlegung des Referenz-Koordinatensystems (vgl. Abbildung 2) und zur Überprüfung der Stabilität der Sensoren über die Zeit wurden Messungen mit dem Präzisionstachymeter Leica TS30 (mit $\sigma_r = 0,15$ mgon und $\sigma_D = 1$ mm + 1 ppm, Standardabweichung ISO 17123-3, vgl. Datenblatt des Herstellers) auf diskrete, durch Prismen signalisierte Punkte durchgeführt. Die Festlegung des Referenz-Koordinatensystems erfolgte näherungsweise entlang der Schienenachse des Gleises 503, wobei die x-Achse in Gleisrichtung verläuft (positiv Richtung Göttingen), die y-Achse quer zum Gleis (positiv Richtung ICE-Schnellfahrstrecke) liegt und die x-y-Ebene horizontiert ist, mit der positiven z-Achse nach oben.



Abb. 2: Schematische (nicht maßstabsgerechte) Darstellung des Verwerfungsbereichs für Gleis 503; mittig in grau. Weiterhin gezeigt sind die Deformationspunkte auf den Schwellen, auf den Schienen und die Höhentafeln. Die Messquerschnitte MQ1 – MQ17 sind in hellgrau durchnummeriert. Die Referenzpunkte zur Festlegung des Referenz-Koordinatensystems sind mit Dreiecken sowie die GVPs mit grauen Kreisen signalisiert. Die Sensorstandpunkte sind spezifisch beschriftet.

Die Schienenachse wurde aus der statischen 3D-Punktwolke vor dem Versuch abgeleitet. Hierzu wurde im Bereich der Messquerschnitte (MQ2 und MQ16) je eine Sollgeometrie (CAD-Modell der Schienenform S54) mit einer Länge von 10 cm in Richtung der Schienenachse in die 3D-Punktwolke bestanpassend geschätzt. Diese bestanpassende Schätzung wurde analog wie in KANG et al. (2019) mit Hilfe der Software SpatialAnalyzer, New River Kinematics, durchgeführt. Aus dieser geschätzten Sollgeometrie resultieren die Start- und Endpunkte der Schienenachse (Mittelpunkte auf dem Schienenkopf). Die Verbindungslinie zwischen den Mittelpunkten auf dem Schienenkopf in MQ2 und MQ16 legen die Richtung der x-Achse des Referenz-Koordinatensystems fest.

Die Koordinatengenauigkeit der Referenzpunkte wurde vorab mit < 0,5 mm (MPE³) spezifiziert und wurde mit dem Präzisionstachymeter für die meisten Punkte in der Lage erreicht. Die Referenzpunkte 102 und 103, die nicht für die Transformation genutzt wurden, haben bei der Bestimmung mit dem Präzisionstachymeter leicht größere MPE-Werte als die obige Spezifikation. Da diese tachymetrischen Messungen nicht in die weitere Auswertung eingeflossen sind, ergeben sich keine Auswirkungen auf die Ergebnisse. Für die z-Komponente der Koordinaten wurden MPE-Werte zwischen 0,3 mm und 0,6 mm erreicht. Lediglich der Gleisvermarkungspunkt (GVP) 622 hat einen etwas höheren MPE-Wert von 1 mm. Während des Versuchs war das Referenz-Koordinatensystem temporär durch vier Stative mit einer Kombination aus CCRs und künstlichen Zielzeichen für das statische Laserscanning und zusätzlich durch zwei GVP markiert.

2.2 Synchronisation der Sensoren

Die gemeinsame Auswertung aller erfassten Daten setzte eine Synchronisation der unterschiedlichen Sensoren voraus. Dabei wurden unterschiedliche Anforderungen an die Synchronisation der Sensoren gestellt. Das Tachymeter und der Lasertracker haben ihre Daten sequentiell erfasst, sodass hier eine Synchronisation im Bereich von Sekunden ausreichte. Diese wurde durch eine Abstimmung der PC-Zeiten der zur Datenerfassung eingesetzten PCs realisiert. Die vier terrestrischen Laserscanner zur Profilmessung haben aufgrund ihrer Datenerfassungsrate von 50 Hz eine sehr hohe Anforderung an die Synchronisation. Diese wurde durch den Einsatz von je einem GNSS-Empfänger pro Laserscanner gelöst, der Rechteckpulse für jeden Spiegelumlauf des Rotationspiegels des Laserscanners registriert hat. Hieraus resultiert ein Zeitstempel in der UTC-Zeitskala für jedes gemessene Profil. Die statischen 3D-Punktwolken wurden zu definierten Zeiten erfasst, sodass hier keine besonderen Anforderungen an die Synchronisation gestellt wurden.

Die DB Systemtechnik (Minden) hat u. a. Gleistemperaturen sowie Längs- und Querverschiebewiderstände erfasst. Der Vergleich mit den vom GIH erfassten Daten erforderte aufgrund der hohen Datenrate ebenfalls eine Synchronisation, die über einen GNSS-Empfänger gelöst wurde. Hierzu wurde ein Rechtecksignal (PPS-Puls des GPS) von variierender Länge vom GNSS-Empfänger erzeugt und sowohl durch das GIH als auch durch die DB Systemtechnik registriert. Dies ermöglicht die Angabe aller Messungen in einer einheitlichen Zeitskala, hier MESZ.

³ MPE: maximal zulässige Abweichung (Maximum Permissible Error). Der MPE lässt sich aus einer Standardabweichung σ genähert nach der Formel: MPE=3·σ mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,3 % berechnen.

3 Punktuelles Monitoring ausgewählter Schienen- und Schwellenbereiche durch einen Lasertracker

Der Lasertracker bestimmt die Polarelemente Distanz, Horizontalrichtung und Vertikalwinkel. Die Distanz wird mit einem Absolutinterferometer (AIFM) bestimmt, vgl. HENNES (2017) für Details. Der Hersteller gibt für den Lasertracker Leica AT960-LR die erweiterte Unsicherheit der x-, y-, z-Koordinate (MPE) unter Verwendung eines Leica 1,5" Rotringreflektors (RRR) an (HEXAGON 2017). Die Unsicherheit des Lasertrackers wird von der Winkelmessung dominiert. Als weitere Effekte sind die atmosphärischen Parameter und deren Einfluss auf die interferometrische Streckenmessung zu nennen, denen insbesondere beim Einsatz des Lasertrackers im Außenbereich eine besondere Bedeutung zukommt. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass der Leica AT960-LR (Stand der Messung im Juni 2017) über keinen Kompensator vergleichbar dem eines Tachymeters verfügt, sodass etwaige Restabweichungen nach einer initialen Horizontierung nicht unmittelbar an die Richtungsmessung angebracht werden. Eine Berücksichtigung ist nur über ein zuvor unabhängig am Lot orientiertes Referenzpunktnetz möglich.

3.1 Vorbereitung und Durchführung

Mit dem Lasertracker Leica AT960-LR wurde eine sequentielle Erfassung diskret durch CCRs signalisierter Punkte durchgeführt, vgl. Abbildung 2 für die Lage der Messpunkte. Diese verteilen sich im 9 m Verwerfungsbereich auf den Schwellen und in den übrigen MQ auf den Schwellen und an den Schienen.

Der Referenzpunkt 104 konnte aufgrund der Kombination aus einer großen Entfernung (ca. 60 m) zum Lasertracker (vgl. Abbildung 2) und reflektierenden Gegenständen im Gleis (Schilder, Warnwesten) nicht verlässlich angemessen werden. Die Entfernung alleine stellte kein Problem dar. Somit wurde der Referenzpunkt 104 in der Auswertung nicht berücksichtigt. Statt der angestrebten 4-6 Referenzpunkte konnten nur drei Punkte als Referenz über die komplette Messzeit verwendet werden.

Die am weitesten vom Lasertracker entfernt liegenden Messpunkte im MQ1 und MQ17 konnten, aus den gleichen Gründen wie bei Referenzpunkt 104, nur in den ersten Epochen gemessen werden. Diese Punkte werden daher nicht weiter ausgewertet. Außerdem gab es aufgrund der hohen Punktdichte im Verwerfungsbereich und teils ungünstiger Visuren zwischen Lasertracker und Messpunkt Punktverwechslungen, sodass bis zu fünf Messpunkte nicht ausgewertet werden können. Die ungünstigen Visuren und Punktverwechslungen resultierten aus der vorgegebenen, linienhaften Anordnung der CCRs und dem aufgrund des zeitlichen Ablaufs des Experiments automatisierten Messablauf des Lasertrackers.

Zu Beginn der Auswertung wurde die Stabilität der Lasertracker-Messungen über die Zeit geprüft. Hierfür wurden die Referenzpunkte 101 und 102 sowie der GVP 624 untersucht (vgl. Abbildung 2). Es wurde eine 3D-Helmert-Transformation der Einzelepochen auf die Nullepoche durchgeführt, da beim Lasertracker nur von einem grob horizontierten System ausgegangen werden kann. Die Ergebnisse der Stabilitätsprüfung zeigen, dass die Koordinaten der Referenzpunkte 101 und 102 und des GVPs 624 als konstant ermittelt werden können.

Zur Transformation der lokalen Lasertracker-Koordinaten in das festgelegte Referenz-Koordinatensystem der Tachymetermessungen wurde eine 3D-Helmert-Transformation der Lasertracker-Epochen in das Referenz-Koordinatensystem durchgeführt. Als identische Punkte für die Transformation dienten die Referenzpunkte 101 und 102 und der GVP 624. Aufgrund der größeren Entfernung mit ca. 60 m Abstand zum Lasertracker erhielt der Punkt 101 ein geringeres Gewicht (Varianzfaktor: 10) als die näher gelegenen Punkte 102 und 624 mit Abständen von ca. 20 m (Varianzfaktor: 1).

3.2 Zeitreihenplots der Messpunkte

Als Nullepoche zum Zeitpunkt t_0 wurde die Messepoche definiert, deren Messung um 12:01:52 Uhr begann. Zu diesem Zeitpunkt hatte noch kein elektrisches Aufheizen der Schienen stattgefunden. Die Differenzen der einzelnen Punktkomponenten Δx , Δy und Δz zum Epochenzeitpunkt t_i berechnen sich wie folgt:

$$\Delta \{xyz\}_{ti} = \{xyz\}_{ti} - \{xyz\}_{t0}.$$
(1)

In Abbildung 3 ist ein Beispiel für einen Plot der Koordinatendifferenzen für Punkt 10 im MQ4 (Schiene) außerhalb des 9 m Verwerfungsbereichs über die Zeit dargestellt. Es zeigen sich nach Eintritt der Verwerfung Lageveränderungen in Längs- (X) und Querrichtung (Y) von ca. 24 mm und ca. 30 mm sowie Bewegungen in der Höhe (Z) von ca. 7 mm.



Abb. 3: Darstellung der Δx -, Δy -, Δz -Koordinatendifferenzen des Punktes 10 im MQ4 auf der Schiene signalisiert durch einen CCR über die Zeit. Die vertikale, gestrichelte Linie markiert den Zeitpunkt des Eintrittes der Verwerfung.

4 Hochfrequente, linienhafte Erfassung der Schienen durch Laserscanner im Profilmodus

Für die hochfrequente, linienhafte Erfassung der Schienen wurden vier Laserscanner vom Typ Zoller und Fröhlich (Z+F) IMAGER 5006 und Z+F IMAGER 5010X mit einer Messfrequenz von 50 Hz eingesetzt. Für die technischen Spezifikationen der eingesetzten Laserscanner wird auf die jeweiligen Datenblätter des Herstellers verwiesen. Alle Laserscanner arbeiteten im Profilmodus, was bedeutet, dass nur der Rotationspiegel des Laserscanners zur Strahlablenkung um die Kippachse genutzt wurde; Details siehe z. B. KUTTERER et al. (2009).

4.1 Referenzierung der Laserscanner im Referenz-Koordinatensystem

Für die vier verwendeten Laserscanner wurde jeweils eine Halterung gefertigt, durch die die Laserscanner stabil seitlich gelagert werden konnten (Abbildung 4). Eine Bewegung um die ungefähr waagerecht liegende Stehachse wurde somit software- und hardwaretechnisch verhindert.

An den gefertigten Halterungen sind jeweils drei Zapfen zur Aufnahme von Leica Rundprismen bzw. Präzisionsprismen eingelassen. Diese drei Zapfen definieren das jeweilige Plattform-Koordinatensystem. Als Ursprung des Plattform-Koordinatensystems wird der untere Zapfen am Laserscannerfuß definiert (Abbildung 4). Die Achsen des Plattform-Koordinatensystems laufen nicht durch die anderen Zapfen. So lange die Koordinaten der Zapfen im Plattform-Koordinatensystem bekannt sind, beeinträchtigt dies nicht den weiteren Auswerteprozess. Durch die tachymetrische Bestimmung der Polarelemente (Horizontalrichtung, Vertikalwinkel und Raumstrecke) der drei Zapfen können die Punkte vom Plattform-Koordinatensystem in das Referenz-Koordinatensystem transformiert werden. Hierzu wird eine 3D-Helmert-Transformation durchgeführt.



Abb. 4:

Zusammenhang zwischen dem Plattform-Koordinatensystem und dem Sensor- Koordinatensystem am Beispiel eines Laserscanners Z+F IMAGER 5010X. Weiterhin dargestellt sind die 6 Transformationsparameter (drei Translationen: Tx, Ty, Tz; drei Rotationen: ω , φ , κ) zwischen den beiden Koordinatensystemen. Die Abkürzung KS in der Abbildung 4 steht für Koordinatensystem. Die Kalibrierung, die die Bestimmung der Position und Orientierung des Laserscanner-Nullpunkts im jeweiligen Plattform-Koordinatensystem beinhaltet, wurde mit Hilfe des Verfahrens nach STRÜBING & NEUMANN (2013) vor dem Versuch im 3D-Labor des GIH realisiert. Dazu wurden in die 2D-Profilmessungen (Scanebene) des Laserscanners insgesamt fünf Referenzgeometrien (hier Ebenen) gestellt. Diese wurden in unterschiedlichen Höhen und Entfernungen platziert sowie räumlich unterschiedlich ausgerichtet. Nur dadurch können alle sechs Transformationsparameter signifikant bestimmt werden. Die Referenzgeometrien wurden nun einerseits vom Laserscanner und andererseits von der scannenden Totalstation Leica MS50 erfasst. Mit der Leica MS50 wurden zudem die drei Punkte an der Halterung der Laserscanner, die das Plattform-Koordinatensystem definieren, angemessen. Mithilfe eines Gauß-Helmert-Modells konnten die sechs Transformationsparameter ermittelt werden, indem die Abstände zwischen der mit der Leica MS50 und dem Laserscanner gemessenen Referenzgeometrien minimiert wurden.

4.2 Durchführung

Während des Versuchs wurde eine kontinuierliche Erfassung von 2D-Profilen der Schienen und der Höhentafeln auf den Schwellen realisiert. Die Erfassung erfolgte für jede Schiene des Gleisabschnittes mit einem Laserscanner sowie je einem redundanten Laserscanner, vgl. Abbildung 2 für eine Übersicht der Standpunkte der eingesetzten Laserscanner.

Die Schiene auf der Seite zu Gleis 505 wurde mit dem Laserscanner 3326 (Z+F IMAGER 5010X) optimal erfasst, deswegen wurde der redundante Laserscanner 1261 (Z+F IMAGER 5006h), ein älteres Modell mit höherem Messrauschen, nicht ausgewertet. Die Schiene auf der Seite der ICE-Schnellfahrstrecke wurde mit dem Laserscanner 3290 (Z+F IMAGER 5010X) nicht optimal erfasst. Der Laserscanner war trotz sorgfältiger Einrichtung leicht verkippt, weshalb ein großer Teil der Schiene nicht im Blickfeld des Laserscanners lag. Hier wurde der redundante Laserscanner 637 (Z+F IMAGER 5006) ausgewertet. Mit diesem Laserscanner wurde die Schiene gut erfasst, allerdings ist hier aufgrund des älteren Modells mit einem leicht höheren Messrauschen zu rechnen, was die Genauigkeit der erzielten Ergebnisse hinsichtlich der gesetzten Anforderungen jedoch nicht beeinträchtigt. Dies zeigt sich bei der Betrachtung der mittleren, absoluten Abweichungen der Einzelpunkte zur approximierten B-Spline-Kurve. Für das Modell Z+F IMAGER 5010X (3326) konnte ein Wert von 0,3 mm erreicht werden, wohingegen sich für das Modell Z+F IMAGER 5006 (637) eine mittlere absolute Abweichung von 1,3 mm ergeben hat.

Für die weitere Auswertung der erfassten 2D-Profilmessungen wurden die Daten manuell von groben Ausreißern und Fehlmessungen bereinigt. Anschließend erfolgte eine Aufteilung der 2D-Profilmessungen in den Bereich der Schienen (Kapitel 4.3) für die Bestimmung von dessen Lageveränderung und in den Bereich der Höhentafeln auf den Schwellen (Kapitel 4.4) für die Bestimmung von deren Höhenveränderung.

4.3 Auswertung der 2D-Profilmessung der Schienen

Die Punkte auf der Schiene wurden anhand der in Kapitel 4.1 beschriebenen Referenzierung und anhand der Tachymetermessungen in das Referenz-Koordinatensystem transformiert.

Anschließend wurden mehrere Messungen zu einer Epoche zusammengefasst und diese Epoche mit einer Median Filterung automatisch von weiteren Ausreißern bereinigt.

In den Zeiten, in denen nur langsame Bewegungen stattfanden, d. h. vor 13:12:10,70 Uhr und nach 13:12:25,13 Uhr, wurden 50 Profile zu einer Epoche zusammengefasst. In der Zeit kurz vor der Verwerfung (13:12:10,70 Uhr bis 13:12:24,16 Uhr) wurden fünf Profile zu einer Epoche zusammengefasst. In der Zeit der eine Sekunde dauernden Verwerfung (13:12:24,16 Uhr) bis 13:12:25,13 Uhr) bestehen die Epochen nur aus einem Profil.



Abb. 5: Zeitreihe der hochfrequent erfassten Verwerfung der rechten Schiene (Seite Gleis 505, Laserscanner 3326) zu Versuchsbeginn (hellgraue Linie, 12:49:31,37 Uhr) sowie in dem Bruchteil einer Sekunde vom Eintritt der Verwerfung (gestrichelte Linie) bei einer Schienentemperatur von 91,7°C bis zur maximalen Verformung.

Die Median-gefilterten Daten wurden in jeder Epoche durch eine B-Spline-Kurve approximiert. Für Details zur B-Spline-Kurven-Approximation wird auf BUREICK et al. (2016) und PIEGL & TILLER (1995) verwiesen. Für die Approximation der Schienen wurde als Grad der Basisfunktion 2 und eine Anzahl von 51 Kontrollpunkten gewählt. Als mittlere, absolute Abweichungen der Einzelpunkte zur B-Spline-Kurve konnten für den Laserscanner 3326 0,3 mm und für den Laserscanner 637 1,3 mm erzielt werden. Aus den geschätzten B-Spline-Kurven wurden in einem festen Abstand von 5 cm ausgeglichene Punkte ausgegeben. Zusätzlich wurden an den im Profil befindlichen Positionen der MQ5 – MQ14 für Laserscanner 3326 und MQ4 – MQ13 für Laserscanner 637 ausgeglichene Punkte ausgegeben. Abbildung 5 zeigt das Ergebnis als Zeitreihe der hochfrequent erfassten Verwerfung der rechten Schiene (Seite Gleis 505) zu Versuchsbeginn sowie in dem Bruchteil einer Sekunde vom Eintritt der Verwerfung um 13:12:24,34 Uhr bei einer Schienentemperatur von 91,7°C bis zur maximalen Verformung von ca. 255 mm bzw. ca. 290 mm. Die maximalen Amplituden der Verwerfung bauen sich innerhalb einer halben Sekunde von ca. 26 mm, ca. 43 mm, ca. 145 mm und ca. 235 mm zuw zuvor genannten maximalen Wert auf. Die Darstellungen der 2D-Profile der einzelnen Zeitpunkte wurden wie bereits beschrieben durch die Approximation der jeweils aktuellen Epoche abgeleitet.

4.4 Auswertung der Höhentafeln auf den Schwellen

Die an den Schwellen befestigten Höhentafeln (vgl. Abbildung 1) waren dazu bestimmt, die horizontale und insbesondere vertikale Bewegung der Schwellen zu detektieren. In allen Profilen wurden die jeweils neun sichtbaren Höhentafeln segmentiert. Zwischen den zwei verkippten Ebenen der Höhentafel (vgl. Abbildung 6) wurde anschließend der Abstand d berechnet. Dazu wurde jeweils der Schnittpunkt zwischen Ebene 1 und dem Träger der Ebenen, sowie Ebene 2 und dem Träger der Ebenen berechnet. Der Abstand zwischen den beiden Schnittpunkten entspricht d.





Das Mittel dieser beiden Schnittpunkte dient als Lagebezugspunkt der Höhentafel. Der Lagebezugspunkt wurde anschließend in das Referenz-Koordinatensystem transformiert. Eine Änderung des Abstands Δd im Verlaufe des Gleisverwerfungsversuchs kann dabei a) durch eine Vertikalbewegung der Höhentafel oder b) durch eine Horizontalbewegung der Höhentafel hervorgerufen werden. (Die Abstandsänderung aufgrund der Horizontalbewegung resultiert aus der Tatsache, dass der Laserscanner nicht genau horizontal ausgerichtet ist, sondern um einen bekannten Winkel α geneigt ist).

Höhen- tafel	Höhenänderung [mm] zur Nullepoche (12:49:41 Uhr) vor Versuchsbeginn				
	2 s vor Verwerfung	Verwerfung	1 h nach Verwerfung	Rauschen (+/-)	
1	-0,3 mm	3,0 mm	2,0 mm	0,2 mm	
2	0,1 mm	4,0 mm	3,6 mm	0,2 mm	
3	0,3 mm	3,3 mm	3,0 mm	0,1 mm	
4	0,2 mm	5,6 mm	4,3 mm	0,1 mm	
5	-0,2 mm	6,8 mm	4,9 mm	0,2 mm	
6	-0,2 mm	6,0 mm	3,6 mm	0,2 mm	
7	-0,2 mm	6,1 mm	4,0 mm	0,2 mm	

 Tabelle 1:
 Höhenänderung der Höhentafeln für Laserscanner 3326 (Z+F IMAGER 5010X).

In Tabelle 1 sind die detektierten Höhenänderungen an den Höhentafeln für den Laserscanner 3326 angegeben. Bei allen sieben auswertbaren Höhentafeln sind bis zur Verwerfung (Tabelle 1, Spalte 2) keine signifikanten Vertikalbewegungen feststellbar. Im Zuge der Verwerfung (Tabelle 1, Spalte 3) heben sich die Höhentafeln um 3 mm bis 6,8 mm. In Abbildung 7 sind die bestimmten Höhenänderung Δ_H (blau) und Querverschiebung Δ_Q (braun) zu vier diskreten Zeitpunkten für die rechte Schiene (Seite Gleis 505) graphisch dargestellt. Im Verwerfungsbereich zwischen MQ10 und MQ11 zeigen sich zum Zeitpunkt der Verwerfung maximale Querverschiebungen von ca. 270 mm, die nach einer Stunde auf ca. 200 mm zurückgehen. Die maximale Höhenänderung ist zwischen MQ8 und MQ9 mit ca. 7,5 mm zu verzeichnen, die nach einer Stunde auf ca. 3,5 mm zurückgehen.



Abb. 7: Mittels 2D-Profilmessungen des Laserscanners 3326 aus den Höhentafeln auf den Schwellen bestimmte Höhenänderung Δ_H (linke Skala) und Querverschiebung Δ_Q (rechte Skala) zu vier diskreten Zeitpunkten: (1) durchgezogene Linie vor Versuchsbeginn; (2) gestrichelte Linie kurz vor der Verwerfung; (3) gepunktete Linie zur Verwerfung; (4) Strichpunktlinie eine Stunde nach der Verwerfung.

5 Erfassung statischer 3D-Punktwolken durch einen Laserscanner zu diskreten Zeitpunkten

Die Schienengeometrie wurde vor Versuchsbeginn, kurz nach der Verwerfung und längere Zeit nach dem Versuch mit dem terrestrischen Laserscanner Z+F IMAGER 5010X als 3D-Punktwolke von mehreren Standpunkten aus erfasst.



Abb. 8: Links: Gleis nach der Verwerfung mit dem Laserscanner Z+F IMAGER 5010X im Vordergrund, den Höhentafeln links und rechts auf den Schwellen sowie der Lok als "Widerlager" im Hintergrund. Rechts: Ausschnitt der 3D-Punktwolke vom Verwerfungsbereich - oben: vor Versuchsbeginn (~9:00 Uhr), Mitte: nach der Verwerfung (~13:30 Uhr), unten: abgekühlt (~17:00 Uhr)

5.1 Vorbereitung und Durchführung

Vor Versuchsbeginn (08:52 Uhr – 09:50 Uhr), unmittelbar nach der Verwerfung (13:24 Uhr – 14:06 Uhr) und ca. 3 Stunden nach der Verwerfung (17:06 Uhr – 17:36 Uhr) wurden für das Gleis 503 im 9 m Verwerfungsbereich mit dem Laserscanner Z+F IMAGER 5010X 3D-Punktwolken erfasst (vgl. Abbildung 8 rechts). Die resultierende statische 3D-Punktwolke wurde von drei bis vier Standpunkten mit den Parametern "high resolution, low noise" und einer Erfassungsdauer von ca. 7 min gescannt. Dies schließt auch die Erstellung von digitalen Fotos ein, die im Postprocessing zur Einfärbung der 3D-Punktwolke genutzt werden. Zur Geo-Referenzierung der 3D-Punktwolken je Standpunkt im Referenz-Koordinatensystem des Versuchs dienen künstliche Zielzeichen im Überlappungsbereich der 3D-Punktwolken von unterschiedlichen Standpunkten sowie die bereits in Kapitel 2.1 eingeführten künstlichen Zielzeichen auf den Stativen zur temporären Realisierung des Referenz-Koordinatensystems.

Die Geo-Referenzierung der statischen 3D-Punktwolken erfolgte mit der Software Z+F LaserControl Version 8.9 und dem Modul Scantra 2.0.1.20. Zur Geo-Referenzierung wurden zwischen 11 und 17 künstliche Zielzeichen für die drei Zeitpunkte vor Versuch, nach Verwerfung und nach Abkühlung verwendet. Die durchschnittliche Abweichung in den künstlichen Zielzeichen beträgt 2 - 3 mm.

5.2 Ableitung von Verformungen aus der statischen 3D-Punktwolke

Für die Auswertung der 3D-Punktwolke "Vor Versuch" zur Identifikation des eingebrachten Gleislagefehlers wurde auf die 3D-Punktwolke eines Standpunktes zurückgegriffen, die den Verwerfungsbereich optimal erfasst hat. Somit liegt die Unsicherheit der 3D-Punktwolke,

ohne Berücksichtigung von Unsicherheiten aus der Geo-Referenzierung, hier im Bereich von ca. 0,5 mm – 1 mm. Abbildung 9 zeigt exemplarisch die Verformung respektive den eingebrachten Gleislagefehler vor Versuchsbeginn. Die Auswertung erfolgte analog zur Bestimmung der Schienenachse, wie in Kapitel 2.1 beschrieben. Im Einzelnen wurden die Abstände zur Sollgeometrie (CAD-Modell der Schienenform S54) mit einer Länge von 10 cm in Richtung der Schienenachse bezüglich der 3D-Punktwolke minimiert. Für die Sollgeometrien, die ca. alle 60 cm in die 3D-Punktwolke der Schiene bestanpassend geschätzt wurden, sind die jeweiligen Mittelpunkte auf dem Schienenachse von MQ2 zu MQ16 definierten Geraden (Richtung der x-Achse des Referenz-Koordinatensystems) geben den eingebrachten sinusförmigen Gleislagefehler mit einer Amplitude von ca. 20 mm an, vgl. Abbildung 9.



Abb. 9: Verformung des Gleises 503 oben für die linke Schiene (Seite der ICE-Schnellfahrstrecke) und unten für die rechte Schiene (Seite Gleis 505) jeweils quer zur Gleisachse mit MQs in mm. Die Verformung wurde aus der statischen 3D-Punktwolke vor Versuchsbeginn abgeleitet und entspricht somit dem eingebrachten Gleislagefehler.

6 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

Das GIH hat diesen einmaligen Versuch mit vier hochgenau synchronisierten Laserscannern vom Typ Z+F IMAGER 5010X/5006, einem Tachymeter Leica TS30 und einem Lasertracker Leica AT960-LR begleitet. Die messtechnische Durchführung war sowohl von den zeitlichen (ca. 50 Hz) und räumlichen (120 m Versuchsbereich mit 9 m Detailbereich der Verwerfung) Anforderungen als auch von den geforderten Genauigkeiten (bis zu 1/10 mm) eine große Herausforderung an die Sensorik und die Datenauswertung. Das Messkonzept erforderte eine zuverlässige, nahezu ausfallsichere Datenerfassung mit den geodätischen Sensoren, da eine Wiederholung des Versuchs nicht möglich war, sodass durch zusätzliche Sensoren eine Redundanz geschaffen wurde. Aufgrund der vorab unbekannten Schienentemperatur, zu der die Gleisverwerfung eintreten wird, musste eine kontinuierliche Datenerfassung mit dem Beginn der Aufwärmphase bis zum eine Sekunde dauernden Ereignis der Verwerfung und schlussendlich in die Abkühlungsphase hinein realisiert werden. Alle Sensoren mussten vollautomatisiert und ferngesteuert betrieben werden, da während der gesamten Versuchsdurchführung das Gleis und somit der unmittelbare Zugang zu den Sensoren gesperrt war.

Der relevante Versuchsbereich des Gleises 503 wurde über zwei Stunden redundant mit den vier Laserscannern bei einer Messrate von 50 Hz im 2D-Profilmodus überwacht. Im Rahmen der Auswertung erfolgte eine raum-zeitliche Modellierung der beiden Schienen mit Hilfe von B-Splines zur Beschreibung des Verformungsverhaltens. So konnten die seitlichen Verschiebungen des Gleises von ca. 20cm auf weniger als einen Millimeter genau erfasst und modelliert werden.

Der Lasertracker hat sequentiell durch CCRs signalisierte Punkte am Gleis außerhalb des 9 m Verwerfungsbereichs sowie an den Schwellen im gesamten Versuchsbereich von ca. 120 m mit Genauigkeiten im 1/10 mm Bereich überwacht. Für die diskreten 3D-Punkte wurden Zeitreihen für die zweistündige Dauer des Versuchs abgeleitet. Diese 3D-Positionen ermöglichen u. a. Rückschlüsse auf die Quer- und Längsverschiebungswiderstände des Gleises.

Nicht unerwähnt bleiben soll an dieser Stelle, dass der Einsatz des Lasertrackers im Außenbereich in diesem Szenario sehr herausfordern war. Als problematisch erwiesen hat sich u. a. die aus dem vorgegebenen Versuchsaufbau resultierende Anordnung der CCRs in einer Linie (vgl. Abbildung 2) und die geringe Freiheit bei der Positionierung des Lasertrackers in Bezug auf die CCRs. Dies führte bei der automatischen Anzielung der CCRs insbesondere bei längeren Messentfernungen von mehr als 30 m zu Punktverwechslungen, so dass diese im Zuge der Auswertung gesondert behandelt werden mussten. Zum anderen führten reflektierende Objekte wie Warnwesten und Leuchtsignale im Gleisbereich zu Verzögerungen bei der Anzielung bis hin zu nicht anzielbaren CCRs bei Messentfernungen von ca. 60 m. Abschließend muss beachtet werden, dass der eingesetzte Lasertracker Leica AT960-LR (Juni 2017) nach der initialen Horizontierung keine fortlaufende Bestimmung bzw. Korrektur möglicher Restabweichungen vom Lot durchgeführt hat. Der Übergang in ein horizontiertes System war somit nur über die zuvor mit dem Tachymeter bestimmten Referenzpunkte möglich. Dennoch hat sich der Einsatz des Lasertrackers hinsichtlich der erzielten Ergebnisse als erfolgreich erwiesen.

Die messtechnische Durchführung samt erfasster und ausgewerteter Daten zeigt das Potential der geodätischen Sensoren in diesem herausfordernden Einsatzszenario. Es ist gelungen, in diesem einmaligen Versuch hochpräzise und hochfrequent Lage- und Höhenveränderung für die relevanten Versuchsbereiche zu erfassen. Die Ergebnisse der punktuellen, linienhaften und flächenhaften Erfassung mit dem Lasertracker und den Laserscannern haben untereinander eine hervorragende Übereinstimmung. Durch die kontinuierliche Datenerfassung konnte der nur eine Sekunde dauernde Moment der Gleisverwerfung detailliert erfasst werden. Die Daten der Aufwärmphase haben gezeigt, dass das Ereignis der Verwerfung ohne deutliche Vorankündigung in einem sehr kurzen Moment von wenigen Sekunden eingetreten ist. Die Daten der Abkühlungsphase zeigen das langsame Abklingen und teilweise Zurückbilden der Gleisverwerfung. Derzeit finden die aus den Ergebnissen des Gleisverwerfungsversuchs gewonnenen Erkenntnisse Einzug in die technischen Regelwerke der DB Netz AG.

Literatur

- BUREICK, J., NEUNER, H., HARMENING, C. & NEUMANN, I. (2016): Curve and surface approximation of 3D point clouds. In: AVN 123(11-12), S. 315–327.
- EISENMANN, J. (1987): Gleisverwerfungsversuch an einem nicht stabilisierten geraden Gleis der Neubaustrecke Würzburg Hannover (BZA München). Forschungsbericht Nr. 1216, Prüfamt für Bau von Landverkehrswegen, Technische Universität München.
- HENNES, M. (2017): Messmittel der Large Volume Metrology (LVM). In: Willfried Schwarz (Hg.): Ingenieurgeodäsie, Bd. 23. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer Reference Naturwissenschaften), S. 347–370.
- HEXAGON MANUFACTURING INTELLIGENCE (2017): LEICA ABSOLUTE TRACKER AT960 Produktbroschüre. https://www.hexagonmi.com/de-DE/products/laser-trackersystems/leica-absolute-tracker-at960 (29.08.2019).
- HOLST, C. (2019): Terrestrisches Laserscanning 2019: Von großen Chancen, großen Herausforderungen und großen Radioteleskopen. In: zfv 144 (2), S. 94–108. DOI: 10.12902/zfv-0256-2019.
- KANG, C., BODE, M., WENNER, M. & MARX, S. (2019): Experimental and numerical investigations of rail behaviour under compressive force on ballastless track systems. In: Engineering Structures 197, S. 109413. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109413.
- KUTTERER, H., PAFFENHOLZ, J.-A. & VENNEGEERTS, H. (2009): Kinematisches terrestrisches Laserscanning. In: zfv 134(2), 79–87.
- NEUNER, H., HOLST, C. & KUHLMANN, H. (2016): Overview on current modelling strategies of point clouds for deformation analysis. In: avn 123 (11-12), S. 328–339.
- PAFFENHOLZ, J.-A., HUGE, J. & STENZ, U. (2018): Integration von Lasertracking und Laserscanning zur optimalen Bestimmung von lastinduzierten Gewölbeverformungen. In: avn 125 (4), 73-88.
- PIEGL, L. & TILLER, W. (1997): The NURBS Book. Second Edition. Berlin, Heidelberg: Springer (Monographs in Visual Communication).
- STRÜBING, T. & NEUMANN, I. (2013): Positions- und Orientierungsschätzung von LIDAR-Sensoren auf Multisensorplattformen. In: zfv 138 (3), 210-221.

Analyse geodätischer Überwachungsmessungen im statischen Auswertemodell am Beispiel eines einfachen Tragwerks

Anna SVIRIDOVA und Andreas EICHHORN

1 Einleitung

Zu überwachende Deformationsprozesse werden oft als dynamische Prozesse betrachtet und die Modellbildung im systemtheoretischen Zusammenhang gesehen. Bei der Analyse im statischen Auswertemodell (als Sonderfall der dynamischen Modellierung) werden prädizierte Zustandsgrößen (wie z. B. Koordinaten oder auch Materialparameter) mit gemessenen bzw. aus den Messungen abgeleiteten Größen verglichen, um den Zustand des Objektes oder die Qualität des theoretischen Strukturmodells zu beurteilen.

Zur mathematischen Formulierung dieser Analyse wird Bayes-Schätzung eingesetzt, bei der der prädizierte Zustand als Vorwissen eingeführt wird und die aktuellen Messungen auf Verträglichkeit mit der Prädiktion verglichen werden. Die für die praktische Anwendung notwendige algorithmische Implementierung der Analyse kann über eine adaptive Kalman-Filterung erfolgen.

Wird dabei der funktionale (deterministische) Teil des gewählten theoretischen Modells mittels geodätischer Messungen optimal angepasst, wird dieser Vorgang als "Modell-Kalibrierung" bezeichnet (siehe z. B. HEUNECKE 1995, EICHHORN 2005).

Wird die Modellwahl selbst zur Diskussion gestellt, muss die Anpassung auch auf den stochastischen Teil des Modells erweitert werden und wird als "Störgrößen-Modellierung" bezeichnet. Dabei wird versucht, die verbleibenden hinreichend kleinen systematischen Unzulänglichkeiten des Modells hinsichtlich der Realität stochastisch zu modellieren.

In diesem Beitrag soll anhand von Ergebnissen aus synthetisch generierten Deformationsmessungen an einem einfachen Tragwerk gezeigt werden, wie sich die Analyse von geodätischen Überwachungsmessungen und die Verifizierung des Übertragungsverhaltens auf Basis eines statischen Auswertemodells realisieren lassen, sowie, dass die Ideen der "Modell-Kalibrierung" und "Störgrößen-Modellierung" grundsätzlich funktionieren. Dazu werden die Ergebnisse von numerischen Experimenten vorgestellt, die die Schätzung des Materialparameters der Biegesteifigkeit eines Einfeldträgers im Rahmen einer adaptiven Kalman-Filterung realisieren.

2 Modellierung von Belastungsversuchen an einem Einfeldträger

Die Untersuchungen werden an einem 6 Meter langen, zweifach gelenkig gelagerten Einfeldträger aus Aluminium durchgeführt, der in seiner Mitte durch eine Einzelkraft F belastet wird. Die Einzelkraft F wird beginnend von 9,81 N (entspricht einer Belastung von ca. 1 kg) schrittweise um jeweils 9,81 N erhöht. Die maximale Belastung liegt dabei bei 40 kg (entspricht einer Einzelkraft von 392,4 N), sodass insgesamt 40 Belastungsexperimente vorliegen. Die Durchbiegung des Einfeldträgers wird dabei im Sinne einer Messepoche erfasst (vgl. Abbildung 1).



Abb. 1: Synthetisch modellierte Durchbiegungen des Einfeldträgers bei unterschiedlichen Belastungen

Die Modellierung der Belastungsversuche im Rahmen eines adaptiven Kalman-Filters wird mit zwei numerischen Experimenten untersucht. In beiden Experimenten wird die Biegesteifigkeit *EI* des Einfeldträgers sowie deren Standardabweichung s_{EI} iterativ bestimmt. Experiment 1 realisiert dabei eine s. g. "Modell-Kalibrierung", während Experiment 2 eine zusätzliche "Störgrößen-Modellierung" berücksichtigen soll.

3 Modell-Kalibrierung

Die synthetischen Durchbiegungen werden im ersten numerischen Experiment auf der Grundlage des Bernoulli-Balkens modelliert. Da die Modellierung im adaptiven Kalman-Filter bei allen Belastungsversuchen das gleiche Modell verwendet, stimmen in diesem Fall das Modell und die gemessene Realität bis auf stochastische Abweichungen überein.

Die zu bestimmende Biegesteifigkeit *EI* ist als Näherungswert auf 0,5 kN/m² genau bekannt. Dies bedeutet, dass der Anfangswert für die Filterinitialisierung maximal um diesen Betrag vom gesuchten Wert abweichen kann.

Abbildung 2 zeigt, dass die Schätzung des Materialparameters der Biegesteifigkeit *EI* nach einer kurzen Identifikationsphase (die ersten fünf Messepochen) gegen den Sollwert konvergiert. In der s. g. Nutzphase des Filters (ab der sechsten Iteration) bleibt die Schätzung nahezu konstant und variiert nur geringfügig um den Sollwert. Die Unsicherheit der Schätzung verringert sich von der ersten bis zur 40. Messepoche um 1/10 auf ca. 3 N/m².



Abb. 2: Geschätzter Materialparameter Biegesteifigkeit *EI* (links) und deren Unsicherheit s_{EI} (rechts)

4 Störgrößen-Modellierung

Bei dem zweiten numerischen Experiment soll gezeigt werden, welchen Einfluss eine unzulängliche Modellwahl bei der Analyse von gemessenen Verformungen haben kann. Dafür werden in diesem Fall die synthetischen Durchbiegungsmessungen aller 40 Belastungsversuche auf Basis eines komplexeren Modells (s. g. Timoschenko-Balken, siehe MERKEL & OECHSNER 2014) generiert. Für die Modellierung im adaptiven Kalman-Filter wird jedoch weiterhin das (jetzt unzulängliche) Modell des Bernoulli-Balkens verwendet.

Zur Kompensation der Modellunzulänglichkeiten werden die s. g. Störgrößen modelliert, die die (in diesem Fall bekannten) systematischen Abweichungen in den Durchbiegungen zwischen den beiden Balken-Theorien durch ein stochastisches Modell beschreiben. Die systematischen Abweichungen werden somit in jedem Belastungsversuch als Varianzen in der Varianz-Kovarianz-Matrix der Störgrößen Q_{rr} zusammengefasst:

$$Q_{rr} = diag(w_{i,Timoschenko} - w_{i,Bernoulli})^2$$

Dabei bezeichnet w_i die Durchbiegungen des Einfeldträgers an der entsprechenden Stelle entlang der Balkenachse.

Die Differenzen zwischen den beiden Balken-Theorien nehmen mit der größer werdenden Einzelkraft F immer mehr zu und müssen somit in jedem Iterationsschritt (jede Messepoche) neu bestimmt werden.

Wie aus den Grundlagen der Kalman-Filter-Theorie bekannt, stellt das gefilterte Ergebnis einen gewichteten Mittelwert zwischen den prädizierten und gemessenen Größen dar, wobei die Gewichtung anhand von vorliegenden stochastischen Informationen der beiden Komponenten des Filters (Prädiktion und Messungen) erfolgt. Im Rahmen der Varianzfortpflanzung bei der Berechnung der Prädiktionsgenauigkeit führt die Berücksichtigung von Q_{rr} zu den wachsenden Unsicherheiten in den prädizieren Durchbiegungen. Im Gegensatz dazu bleibt die Unsicherheit der Messgrößen konstant. Dies führt zu einer höheren Gewichtung der Messdaten gegenüber den prädizierten Werten und zu einer Konvergenz des geschätzten Materialparameters zum Sollwert (vgl. Abbildung 3 links).


Abb. 3: Vergleich der Schätzung der Biegesteifigkeit EI (links) und deren Unsicherheit s_{EI} (rechts) mit und ohne stochastischer Modellierung der Störgrößen

Bei den kleinen Belastungen ist der Unterschied in den Durchbiegungswerten zwischen Timoschenko- und Bernoulli-Theorie sehr gering, sodass die geschätzte Biegesteifigkeit *EI* für beide Fälle nahezu übereinstimmt. Mit den größer werdenden Belastungen wird die Differenz immer signifikanter.

Bei der Schätzung mit der stochastischen Störgrößen-Modellierung erfolgt die Konvergenz des Filterergebnisses zum richtigen Wert (EI_{soll}) mit der 10. Iteration. Werden die Modellunzulänglichkeiten dagegen nicht kompensiert, wird aufgrund der kontinuierlich höher werdenden Prädiktionsgenauigkeit das Ergebnis der Schätzung immer mehr mit dem theoretisch aufgestellten Systemmodell zusammenfallen. Durch die nach der Bernoulli-Theorie berechneten Durchbiegungen wird die Biegesteifigkeit *EI* größer als der tatsächliche Wert bestimmt und die Schätzungen der Biegesteifigkeit *EI* konvergieren zum falschen Wert (siehe 20. bis 40. Iteration in Abbildung 3 links).

Dass die Standardabweichungen für die geschätzte Biegesteifigkeit *EI* ohne stochastische Störgrößen-Modellierung kleiner ist, resultiert aus kleineren Unsicherheit für die falsch prädizierten Durchbiegungen, weil hier der Unsicherheitsanteil aus der Störgrößen-Modellierung in der Varianzfortpflanzung fehlt (vgl. Abbildung 3 rechts) und die Prädiktion damit zu optimistisch bewertet wird.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Da das Kalman-Filter-Ergebnis von der Gewichtung zwischen dem Mess- und Systemmodell abhängig ist, müssen die stochastischen Komponenten der beiden Modelle sehr sorgfältig ausgewählt werden. Im Fall des synthetischen Beispiels sind diese genau bekannt. In der Realität werden diese nur näherungsweise abgeschätzt. Ist diese Näherung nicht genau genug, so wird das komplette Filterergebnis verzerrt. Die stochastischen Komponenten sollen aus diesem Grund idealerweise im Rahmen der Filterung selbsttätig angepasst werden.

Die ersten Untersuchungen zu diesem Thema wurden in WANG (1997) am Beispiel eines kinematischen Modells durchgeführt. Dabei wurde gezeigt, dass mithilfe von Redundanzanteilen nicht nur die Varianzkomponenten der Einzelbeobachtungen, sondern auch diejenigen der Modellfaktoren im Rahmen der Filterung mitgeschätzt werden können. Die Adaption eines solchen Verfahrens auf das statische Modell des Einfeldträgers soll der Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Literatur

- EICHHORN, A. (2005): Ein Beitrag zur Identifikation von dynamischen Strukturmodellen mit Methoden der adaptiven Kalman-Filterung, Dissertation, Universität Stuttgart
- HEUNECKE, O. (1998): Zur Identifikation und Verifikation von Deformationsprozessen mittels adaptiver Kalman-Filterung, Dissertation, Universität Hannover
- HU, C. (2013): Adaptive Kalman Filtering for Vehicle Navigation. In: Journal of Global Positioning Systems, Vol. 2: 42-47
- MERKEL, M. & OECHSNER, A. (2014): Eindimensionale Finite Elemente. Springer Vieweg Verlag, Heidelberg
- WANG, J. (1997): Filtermethoden zur fehlertoleranten kinematischen Positionsbestimmung, Dissertation, Universität der Bundeswehr München

Ingenieurvermessung in der Praxis

Digitalisierung im Stollen – Zustandsdokumentation der Wiener Wasserleitung

Lothar EYSN

1 Zusammenfassung

Die Wasserleitung der Stadt Wien wird in einem kontinuierlichen Prozess auf Zustand und Schäden im Innenraum der Leitungsstollen untersucht. Die Inspektion erfolgt aktuell weitgehend durch einen manuellen Prozess, wobei die engen Stollen vor Ort besichtigt und bewertet werden. Risse und Veränderungen der Oberflächen der Bauwerke wurden bislang selten flächenhaft dokumentiert, und die Verortung der Schäden ist schwierig. Aus diesem Grund wurde ein Aufnahmeverfahren entwickelt, das eine Dokumentation des Zustandes von ausgesuchten Abschnitten ermöglicht. Die Datenerfassung erfolgt sequenziell durch ein bildgebendes Verfahren, wobei ein kalibriertes photogrammetrisches Aufnahmesystem im Stollen positioniert und mittels Tachymetrie verortet wird. Durch die Aufnahme von hochauflösenden HDR-Bildserien werden pro Standort grob genordete Kugelpanoramen mit 160 Megapixeln erfasst. Mit den Bilddaten werden Schäden langfristig flächig dokumentiert und verortet. Erste Pilotprojekte zeigen zufriedenstellende Ergebnisse in Bezug auf Datenaufnahme und -verarbeitung. Beispielsweise wurde ein rund 2 Kilometer langer Stollen mit 81.483 Einzelbildern bzw. 645 Kugelpanoramen erfolgreich digitalisiert. Die verorteten Bilddaten werden weiterführend über GIS-Systeme oder einen interaktiven Viewer an die mit der Instandhaltung der Wasserleitung betrauten Dienststellen publiziert. Die Bauwerke können von ExpertInnen vom PC aus virtuell begutachtet und interpretiert werden.

2 Einleitung

2.1 Allgemeines zur Wiener Wasserleitung

Die Wasserleitung der Stadt Wien wurde seit der Inbetriebnahme der ersten Wiener Hochquellenwasserleitung im Jahr 1873 sukzessive erweitert und besteht heutzutage aus einem komplexen Netz aus verschiedensten Bauwerken (siehe Abbildung 1). Neben Dükern, Aquädukten, Wasserspeichern und Tiefbrunnen besteht das Leitungsnetz der Zuleitung in die Stadt Wien hauptsächlich aus Tunnel- und Stollenbauwerken mit mehreren hundert Kilometern Länge. Sie transportieren das hygienisch einwandfreie Wasser von den Quellschutzgebieten nach Wien (FLAMM 2010). Die beiden längsten Zuleitungen sind die erste und zweite Wiener Hochquellenwasserleitung (HQL-I und HQL-II) mit 112 km und 183 km Länge, die das Wasser aus den Alpen in Niederösterreich und der Steiermark nach Wien leiten. Dies passiert rein durch Gravitation, denn teilweise mäandern die Leitungen entlang der Schichtenlinien des Geländes oder durchdringen Bergformationen, um in den Bauwerken ein kontinuierliches Gefälle in Richtung Stadt Wien zu ermöglichen. Aus dieser Sicht sind die Bauwerke der HQL eine vermessungstechnische und bautechnische Meisterleistung. Bauwerke dieser Dimension sind in Ihrem Lebenszyklus vielen Einflüssen ausgesetzt. Aufgrund von Bodenbewegungen musste zum Beispiel vor wenigen Jahren ein Umgehungsstollen im Bereich Scheibbs gebaut werden, um die Funktionalität der HQL-II aufrecht zu erhalten. Dies zeigt, wie wichtig ein Monitoring und die zugehörige Pflege dieser Bauwerke ist.



Abb. 1: Verlauf der Wiener Wasserleitungen. Die Bauwerke HQL-I und HQL-II leiten das Wasser aus den Alpen der Steiermark und Niederösterreichs nach Wien. Quelle: WIKII (2016).

2.2 Ausprägung der Stollenbauwerke

Die Stollen wurden seit Bestehen der HQL je nach Technologiestand und Möglichkeiten in unterschiedlichen Ausführungen hergestellt. Neben Stollen im rohen Felsausbruch findet man gemauerte und innen verputzte oder verspachtelte Stollen sowie glatte Beton-Fertigteile (siehe Abbildung 2). Die Oberflächenbeschaffenheit und der Zustand der Oberflächen ist abschnittsweise sehr unterschiedlich (z. B. nass, glatt und porös). In jedem Fall umschließt die Geometrie des Stollens das darin fließende Wasser in vollem Maße. Die Ei- und Rundprofile existieren in unterschiedlichen Dimensionen, wobei das kleinste Profil nur 80 cm breit und 140 cm hoch ist. Die größten Profile haben mehrere Meter Durchmesser. Teilweise fließt das Wasser frei durch die Querschnitte und teilweise wird das Wasser in den Stollen in eigenen zusätzlichen Metallrohren gefasst. Die großen Stollenbauwerke sind sehr unübersichtlich und weisen durch glatte, gleich aussehende Oberflächen wenig Anhaltspunkte für eine Orientierung auf. In den meisten Abschnitten der HOL gibt es aus Sicht der Vermessung und Positionierungsmöglichkeiten keine signalisierten Passpunkte. GNSS ist aufgrund der unterirdischen Applikation ebenfalls nicht verfügbar. In den Objekten gibt es in der Regel keine Beleuchtung durch natürliches Licht und keine Stromversorgung. Die Einstiege in die Stollenbauwerke können als vertikale Schächte oder horizontale Zugangsstollen ausgeprägt sein. In der Regel ist das Einbringen von großem Equipment nicht möglich. Die Bauwerke der HQL



gelten als kritische Infrastruktur (eine Großstadt mit 1,8 Millionen Menschen hängt an diesem Versorgungsnetz), wodurch der Zugang in die Bauwerke streng reglementiert ist.

Abb. 2: Unterschiedliche Stollen der HQL. Links Oben: Scheinblingstollen im Felsausbruch und Wasserführung im Stahlrohr. Rechts Oben: Gemauerte Stollenstrukur mit freiem Wasserlauf. Links Unten: Kleines HQL Profil (80 cm breit) mit verputzter Innenschale und freiem Wasserlauf im Abschnitt Rohrbach. Rechts Unten: Weiß verspachtelter Stollen mit freiem Wasserlauf im Abschnitt Mitterberg.

2.3 Inspektion der Bauwerke

Die HQL wird in einem kontinuierlichen Prozess gewartet, kontrolliert und verbessert. In Querschnitten mit frei fließendem Wasserspiegel werden viermal pro Jahr planmäßige Wartungen, die sogenannten Abkehren, durchgeführt. In diversen Abschnitten gibt es auch häufigere Wartungen. Im Zuge der Inspektion werden die Stollen unter anderem auf Zustand und Schäden im Innenraum der Leitungsstollen untersucht. Die Inspektion erfolgt aktuell weitgehend durch einen manuellen Prozess, wobei die teilweise engen Stollen vor Ort durch Expertinnen und Experten besichtigt und bewertet werden. Im Bedarfsfall werden Maßnahmen zur Instandhaltung gesetzt.

Risse und Veränderungen der Oberflächen der Bauwerke wurden bislang kaum flächenhaft dokumentiert, denn die Dokumentation und Verortung der Schäden ist in den unübersichtlichen und dunklen Objekten herausfordernd. Aus diesem Grund wurde von der Stadtvermessung (MA 41) ein Aufnahmeverfahren entwickelt, das eine photogrammetrische Dokumentation des Zustandes von ausgesuchten Leitungsabschnitten ermöglicht. Zusätzlich werden auf Bedarf die geometrischen Merkmale der Leitungen vermessen. Im nachfolgenden Artikel wird das entwickelte System erläutert und anhand eines Beispiels präsentiert.

3 Stollen Inspektionssystem

3.1 Anforderungen

Aktuell gibt es diverse Spezialsysteme zur Inspektion von Tunnelsystemen, Stollen und Rohrleitungen. Diese Systeme werden in der Regel von Spezialfirmen für den Eigenbedarf entwickelt und stellen am freien Markt nicht erhältliche Expertensysteme dar. Für die öffentliche Verwaltung ist der Einsatz dieser Technologie weitgehend nur als Dienstleistung über externe Firmen beziehbar. Um der Stadt Wien die Möglichkeit einer bildgebenden Dokumentation ihrer Stollen mit eigener Hardware zu geben, die zudem von Eigenpersonal bedient werden kann, wurde von der Stadtvermessung (MA 41) in Kooperation mit der Firma Dr. Clauss Bildtechnik GmbH (www.dr-clauss.de) das bildgebende Stollen Inspektionssystem "Herr Clauss" entwickelt. Initial wurden die Umgebungsbedingungen für den Einsatz des Systems und die damit verbundenen Rahmenbedingungen festgelegt. Aus den in Abschnitt 2 definierten Umgebungsbedingungen der Stollenbauwerke und diversen technischen und logistischen Überlegungen wurden für das Inspektionssystem folgende Anforderungen definiert:

- Bildgebendes, photogrammetrisches System mit geringem Gewicht, kompakten Maßen und schneller Aufnahmezeit,
- immersive Aufnahme der Umgebung mit hochauflösenden Bilddaten in den umschließenden Geometrien der Bauwerke,
- entzerrte, korrekt zusammengefügte Kugelpanoramen,
- hohe Empfindlichkeit gegenüber unterschiedlichen Lichtverhältnissen und Beschaffenheiten von Oberflächen,
- aktive, schlagschattenfreie und homogene Beleuchtung der Objekte,
- autarke Stromversorgung sowie Staub- und Feuchtigkeitsresistenz (IP54),
- einfache Bedienbarkeit und autarke Aufnahme der Daten pro Standpunkt,
- Positionierbarkeit über eine Totalstation und grobe Ermittlung der Nordrichtung.

Aus logistischer Sicht, der beengten Situation in den Stollen und wegen einer einfachen Bedienbarkeit soll das System kein komplexes kinematisches Daten-Erfassungssystem im Sinne von Mobile Mapping darstellen. Vielmehr soll eine schrittweise punktuelle Aufnahme von Stollenabschnitten möglich sein, wobei die Standorte als Kugelpanorama erfasst und mit einer Totalstation eingemessen werden.

Um Schäden, wie zum Beispiel Risse, sinnvoll erfassen zu können, wurde eine Abschätzung für die notwendige Auflösung der Bildaten vorgenommen. In Bezug auf die Ortsauflösung der Bilder und die zu erwartende resultierende Datenmenge zeigt sich eine Auflösung von rund 150 Megapixeln für ein Kugelpanorama als sinnvoll. Dabei ergibt sich in einem Abstand von 1 m eine Ortsauflösung von 0,4 mm und in 3 Metern Distanz eine Ortsauflösung

von 1,1 mm. Die resultierende Filegröße liegt pro Kugelpanorama bei zirka 50 Megabyte. Für die engen Stollenbauwerke der HQL ist dies ausreichend.

3.2 Inspektionssystem "Herr Clauss"

Die in Abschnitt 3.1 definierten Anforderungen wurden mit dem Stollen Inspektionssystem "Herr Clauss" umgesetzt. Die Datenerfassung erfolgt durch ein bildgebendes Verfahren, wobei ein kalibriertes photogrammetrisches Aufnahmesystem sequenziell im Stollen positioniert und mittels Tachymetrie verortet wird. Im Post-Processing entstehen Kugelpanoramen, deren Ort und Ausrichtung bekannt sind.



Abb. 3: *Links und Mitte:* Kameraroboter "Herr Clauss" *Rechts:* Einsatz des Aufnahmesystems im Stollen – Im Vordergrund ist ein TLS-System positioniert.

3.3 Aufnahme der Bilddaten

Das Aufnahmesystem ist als autarker, kardanisch gelagerter Robotik-Panoramakopf ausgeführt, der eine Canon EOS 5DS Spiegelreflex-Kamera mit präzisen Stellmotoren in 18 verschiedene Raumlagen bewegt (siehe Abbildung 3). Die Kamera ist mit einer Fixbrennweite von 24 mm bestückt, wobei das optische Zentrum der Kamera mit wenigen Zehntelmillimetern Genauigkeit im Nodalpunkt des Panoramakopfes positioniert ist. Dies minimiert das Auftreten von Parallaxen und Ghosting-Effekten in den Kugelpanoramen, da die einzelnen Aufnahmen der unterschiedlichen Raumrichtungen stets von einer 3D-Position durchgeführt werden. Speziell bei Situationen mit kurzer Distanz zwischen Kamera und Objekt ist dies vorteilhaft. Ein Multi-Optik-Panoramakopf mit mehreren Optiken und dezentralen Aufnahmezentren wurde aufgrund der Parallaxen-Problematik nicht gewählt.

Das Kamerasystem ist nach dem Verfahren von CLAUSS (2011) kalibriert, wobei die Abbildungsfehler (z. B. Verzeichnungsparameter, Vignettierung, Sensorlage, Farbtreue) des Aufnahmesystems bekannt sind. Um die Signal-to-Noise-Ratio des Sensors in dunklen Umgebungen zu verbessern, werden nicht die vollen 50,6 Megapixel der Canon EOS 5DS verwendet – jeweils vier benachbarte Pixels des Sensors werden zu einem Pixel zusammengeführt. Die resultierende Auflösung eines einzelnen Bildes sind 4.320 x 2.880 Pixel.

Durch das segmentierende Aufnahmeverfahren werden pro Standort in 90 Sekunden 126 Bilder aufgenommen. An jeder der 18 Raumlagen der Kamera werden sieben High Dynamic Range (HDR)-Stufen erfasst, um weiterführend die Ermittlung von HDR-Bildern zu ermöglichen. Ein Dynamikumfang von 26 Belichtungsstufen sorgt dafür, dass die resultierenden HDR-Bilder bei Spiegelungen, Gegenlicht, und starken Hell-Dunkel- bzw. Kontrastunterschieden zuverlässige Ergebnisse liefern. Mit 18 Raumlagen der Kamera wird eine volle Sphäre des umliegenden Raumes abgebildet. Die Ausleuchtung der aufzunehmenden Objekte erfolgt durch eine LED-Ringleuchte, die dem Spektralbereich des Aufnahmesystems gerecht wird und eine gleichmäßige Ausleuchtung der Objekte in bis zu 10 m Distanz erzielt.

3.4 Verortung und Orientierung der Bilddaten

In der Stehachse des Gerätes ist ein Prisma montiert, dessen Offset zum Nodalpunkt des Systems bekannt ist (siehe Abbildung 3). Durch Einmessen des Standortes des Aufnahmesystems mittels Totalstation kann durch Anbringen des vertikalen Offsets zwischen Prisma und Nodalpunkt die exakte 3D-Koordinate des jeweiligen Kugelpanoramas ermittelt werden. Die Positionierung erfolgt in den engen Stollenbauwerken in der Regel mittels Tachymetrie und eingehängtem Polygonzug, der zwangszentriert durch die Stollenbauwerke gemessen wird. Einhängepunkte für den Polygonzug sind abgelotete Punkte an den Einstiegsschächten der HQL.

Die erzielten Genauigkeiten der Verortung variieren stark je nach Konstellation des Polygonzuges. Durch die Bauweise der HQL entlang der Schichtenlinien gibt es in den Stollen teilweise sehr kurze Visuren im Polygonzug, die von sehr langen Abschnitten gefolgt sind. Dadurch entsteht durch die ungünstige Konstellation der Geometrie eine Unsicherheit in der Lagegenauigkeit. In der Regel werden bei den Messungen in der HQL 3D-Lagegenauigkeiten unter ± 3 cm erreicht. Um eine Zuordnung zwischen den Messungen der Totalstation und den Daten der Kamera zu ermöglichen, wird im ersten Bild jedes Kugelpanoramas ein beschriftetes Schild mit der Nummer des Panoramas fotografiert.

Um bei einer weiterführenden Nutzung der Kugelpanoramen die 3D-Blickrichtung zu kennen, wird die räumliche Ausrichtung des Kugelpanoramas ermittelt. Das Aufnahmesystem wird stets horizontiert positioniert, wodurch der Äquator des entstehenden Kugelpanoramas im Horizont liegt. Um die Ausrichtung der Kugelpanoramen in Bezug auf die Nordrichtung zu kennen, ist ein digitaler 3-Achs-Kompass am Aufnahmesystem verbaut. Die Nordrichtung wird während der Messung mehrfach ermittelt, und der jeweilige Winkel in den EXIF-Daten der aufgenommenen Bilder gespeichert. Durch die Stellmotoren des Robotik-Panoramakopfes, die einen Vollkreis mit 24 000 Schritten auflösen, sind die Drehwinkel der 126 Einzelaufnahmen mit einer Genauigkeit von 0,02 gon bekannt.

3.5 Post-Processing der Daten

Im Post-Processing werden die 126 Einzelbilder zu HDR-Serien verknüpft, und weiterführend vollautomatisch zu Kugelpanoramen mit rund 160 Megapixeln zusammengeführt. Auf einer mittleren Hardware (Xeon E5 mit 10 Kernen, 2,2 GHz, 64 GB RAM) dauert die Berechnung eines Kugelpanoramas ca. 5 Minuten, wobei auf den Kernen der CPU gerechnet wird. Aufgrund der bekannten Kalibrierung des Systems werden die Aufnahmelagen der Bilder sowie die Abbildungsfehler und Verzerrungen des Systems in der Berechnung berücksichtigt. Durch eine lokale Anpassung der Belichtung wird eine möglichst homogene Ausleuchtung der Objekte in den Bildern erzielt. Das Ergebnis ist ein nahtloses, entzerrtes Kugelpanorama, das als äquirektanguläre Projektion (Plattkarte) mit 18 000 x 9 000 Pixel gespeichert wird.

Um den hohen Dynamikumfang der Bilder zu erhalten, können die Daten zum Beispiel im Format HDR-EXR gespeichert werden. In den Metadaten der Bilder werden Aufnahmezeitpunkt, Geschäftszahl, Standpunktnummer und 3D-Position der Bilder gespeichert. Wurde am selben Standort eines Kugelpanoramas ein terrestrischer Laserscan (TLS) durchgeführt, so kann die Plattkarte über das Intensitätsbild des TLS gelegt werden, um eine Verbindung zur 3D-Geometrie herzustellen.

Die Positionen und Metadaten der Kugelpanoramen werden weiterführend als ESRI-Shapefile abgelegt, um eine vereinfachte Darstellung der Daten in GIS-Systemen oder in einem interaktiven Viewer zu ermöglichen. Durch eine zentrale Datenhaltung werden die Bilder an die mit der Instandhaltung der Wasserleitung betrauten Dienststellen publiziert. Die Bauwerke können weiterführend von ExpertInnen vom PC aus virtuell begutachtet und interpretiert werden.

4 Ergebnisse

4.1 Allgemeines

In den ersten Monaten des Gerätebetriebes konnten unterschiedliche Objekte der HQL mit Bilddaten dokumentiert werden. Dabei wurden Stollen mit unterschiedlichen Dimensionen und Oberflächen digitalisiert (siehe Abbildung 2). Der Einsatz des Gerätes zeigt sich aufgrund der leichten Bauweise (5 kg) und der einfachen Bedienung sehr benutzerfreundlich. Alle Einstellungen sind vorab definiert, wodurch der Operator nur ein Startsignal geben muss, um die 90 Sekunden dauernde Messung zu starten. Der Aufbau des Systems hält den schwierigen Bedingungen in den Stollen stand, und kann für unterschiedlichste Einsatzzwecke verwendet werden. Die Ausleuchtung und Farbtreue der abgebildeten Objekte ist homogen und ermöglicht eine gute Inspektion der Oberflächen. Spiegelungen, Gegenlicht und starke Kontrastunterschiede werden durch den HDR-Ansatz des Aufnahmesystems zuverlässig ausgeglichen (siehe Abbildung 4).

Eine gute Bildschärfe ist auch bei den kleinsten Stollenquerschnitten noch gegeben, wodurch Risse und Strukturen der Oberflächen gut erkennbar sind. In den aus 126 Bildern ermittelten Kugelpanoramen gibt es kaum erkennbare Nahtstellen oder Artefakte, und die umschließende Tunnelgeometrie wird lokal vollständig erfasst. Durch die Verknüpfung mit den Messungen der Totalstation und der Messung der Drehwinkel werden die Kugelpanoramen mit einer Genauigkeit von ± 3 cm verortet, wobei die Nordrichtung aufgrund des magnetbasierten



Kompasses eine relativ hohe Unsicherheit aufweist. Dies ist speziell in der Konstellation des Untertage-Messortes und der teilweise umliegenden metallischen Objekte begründet. Ein glasfaserbasierter Nordsucher könnte hier Abhilfe schaffen, ist für die aktuelle Aufgabenstellung der visuellen Beurteilung der Oberflächen aus Bilddaten jedoch nicht sinnvoll, denn die genäherte Nordrichtung mit einer Genauigkeit von zirka $\pm 20^{\circ}$ reicht für eine grobe Orientierung des Auswerters aus.

Abb. 4: Plattkarte eines Standortes im Abschnitt Rohrbach. Am unteren Ende sieht man den Aufbau der Kamera. Rechts oben ist im GIS die Lage der diversen Kamera-Standorte einem Orthofoto überlagert. Im Hintergrund ein Mitarbeiter der Stadtvermessung (MA 41) in dem nur 1,4 m hohen Stollen. Der Stollen ist normalerweise zur Hälfte mit Wasser gefüllt. Das Objekt wurde wegen anstehender Umbauarbeiten an der Oberfläche (Kreuzung) dokumentiert.

4.2 Testversuch Schneealpenstollen

Der Schneealpenstollen (siehe Abbildung 5) ist ein unterirdischer Verbindungsstollen der HQL-I von der Steiermark nach Niederösterreich, der mit rund 10 Kilometern Länge unter der Schneealpe hindurchführt. Ein Teil des Stollens (ca. 7,5 km) ist vollständig mit Wasser gefüllt, ein ca. 1,9 km langer Abschnitt ist auf der südlichen Seite aufgrund von Einfassungen des Wassers in Stahlrohre begehbar. In diesem begehbaren und mit Spritzbetonschale hergestellten Abschnitt wurden mit "Herrn Clauss" zur Dokumentation des Zustandes Bilddaten gesammelt.

In Summe wurden 81 483 Einzelbilder aufgenommen, die einer Anzahl von 645 Kugelpanoramen und 261 Gigabyte an Daten entsprechen. Die Aufnahme der Daten erfolgte über einen Zeitraum mehrerer Tage. Die Daten wurden mittels Totalstation verortet, wobei die Totalstation über eine Freie Stationierung unter Zuhilfenahme von in die Tunnelwand eingeschraubten Prismen stationiert wurde. Das Datenhandling und die Berechnung der Kugelpanoramen wurde auf der in Abschnitt 3.5 genannten Hardware in rund 36 Stunden Laufzeit durchgeführt.

Die erfassten Bilddaten zeigen flächendeckend den Zustand der Oberflächen des Stollens. Durch die Auflösung von 160 Megapixeln sind auch in wenigen Metern Objektabstand feine Details der Objekte noch ersichtlich.

Die Daten wurden in die GIS-Systeme der mit der Wartung der Objekte beauftragten Dienststellen eingepflegt, und können weiterführend von ExpertInnen begutachtet werden. Veränderungen der Oberflächen wie zum Beispiel Risse oder Abplatzungen (siehe Abbildung 6) können anhand der Bilddaten erfasst und mit dem Standort des jeweiligen Kugelpanoramas verortet werden.

Auch in schwer zugänglichen Bereichen des Stollens konnte das System Daten mit guter Qualität aufnehmen. Die in Abbildung 7 gezeigte Plattkarte zeigt im Hintergrund einen schwer zugänglichen Bereich mit nur 1,6 m Höhe.



Abb. 5: Projekt Schneealpenstollen. Der begehbare Teil des Stollens der HQL-I ist in der oberen Karte (Quelle: Basemap.at) eingezeichnet. Im unteren Bild sieht man einem Orthofoto überlagert die eingemessenen Standorte der einzelnen Bilder und einen Auszug aus einem Panoramabild in der Nähe des Eingangsportals des Stollens.



Abb. 6: Beispiele für dokumentierte Schäden im Schneealpenstollen. Die gezeigten Bilder sind Details der aufgenommenen Kugelpanoramen.



Abb. 7: Plattkarte eines Standortes im Schneealpenstollen. Die Kamera konnte in den beengten Verhältnissen erfolgreich eingesetzt werden. Das Detail zeigt das Auflösungsvermögen der 160 Megapixel.

5 Conclusio und Ausblick

Durch die schrittweise Aufnahme von Panoramabildern in den Stollen der Wasserleitung werden Schäden langfristig dokumentiert. Die Aufnahmen können im Streitfall als Beweissicherung dienen. Da die Bilder verortet sind, können Schäden mit einem Raumbezug versehen werden. Die Qualität der Bilddaten ist für eine visuelle Überprüfung des Zustandes geeignet. Durch die Entwicklung eines speziellen Kamerasystems kann die Dokumentation der Stollenbauwerke künftig selbstständig durch MitarbeiterInnen der Stadt Wien durchgeführt werden, was Zeit und Aufwand an Vergabeleistungen spart. Die Daten können weiterführend ohne Begehung des Objektes von mehreren ExpertInnen vom PC aus begutachtet und bewertet werden.

Aktuell wird das System noch manuell in den Stollen positioniert und verortet. Als zukünftige Ausbaustufe ist eine automatisierte Positionierung mittels eines selbst navigierenden Robotiksystems als Trägerplattform wie zum Beispiel dem System von BOSTON DYNAMICS (2019) denkbar. Kinematische Trägerplattformen sind in der Regel mit einer inertialen Messeinheit ausgestattet, die zusätzlich für die Positionierung der Bilddaten verwendet werden könnte.

In Bezug auf das Publizieren der Daten an die zuständigen Dienststellen ist aktuell nur ein punktuelles Betrachten einzelner Kugelpanoramen möglich. Eine Erweiterung auf ein System mit der Möglichkeit eines virtuellen Durchganges, also das sequentielle Sichten der Bilddaten unter Einbezug ihrer logischen Reihenfolge und des Blickwinkels des Betrachters, ist angedacht. Dabei werden speziell die Orientierungen der Kugelpanoramen ein wichtiger Bestandteil sein, wobei diese Informationen bereits vom Aufnahmesystem "Herr Clauss" erfasst werden. Um die Analyse des Zustandes der abgebildeten Objekte zu automatisieren, können die Bilder in weiterer Folge Systemen Künstlicher Intelligenz zugeführt werden.

Danksagung

Großer Dank gilt den KollegInnen der Magistratsabteilung 41 – Stadtvermessung, die in den engen Bauwerken unter körperlichen und psychischen Belastungen stets präzise Messungen durchführen.

Dank gilt den KollegInnen der Magistratsabteilung 31 – Wiener Wasser, für ihr Vertrauen, die finanzielle Unterstützung und die konstruktiven Gespräche.

Dank gilt der Firma Dr. CLAUSS GmbH, die gemeinsam mit der Wiener Stadtvermessung die Entwicklung des Aufnahmesystems "Herr Clauss" diskutiert und vorangetrieben hat.

Literatur

- BOSTON DYNAMICS (2019): Homepage Spot Robotik System https://www.bostondynamics.com/spot (17.11.2019)
- CLAUSS, R. (2011): Universelles Kamerakalibriersystem mit zentraler Zielmarke. In: LUHMANN T. & MÜLLER C. (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, optische 3D-Messtechnik: Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2011. S. 348–356
- FLAMM, H. (2010): 170 Jahre Streit der Wiener Ärzte für ein hygienisch einwandfreies Trinkwasser. In: Wiener Medizinische Wochenschrift 160 (7-8), S. 194–208
- WIKI1 (2019): Homepage Wikipedia zur Wiener Hochquellenwasserleitung. https://de.wikipedia.org/wiki/I._Wiener_Hochquellenwasserleitung (11.11.2019).

Do BIM models intrinsically possess geodetic distortions or not?

Štefan JAUD, Andreas KOHLHAAS and André BORRMANN

1 Abstract

With the introduction of infrastructure objects to the Building Information Modelling (BIM) developments, an interesting problem (re)appeared. Are BIM models intrinsically distorted in the same manner as the underlying geospatial data used during the design processes or should they be interpreted as a true-to-scale representation of the real world? Literature review shows the latter to be the case among researchers and practitioners, although many do not even recognise this dilemma exists. We present three possibilities of interpretation of a BIM model: distorted, not distorted or a combination of the two. We highlight the differences and their advantages and disadvantages over the other. More importantly, we depict the consequences of false interpretation and evaluate their extent. We find that there is no right or wrong answer to this question; rather, the knowledge among the experts is partially missing or simply not stressed enough. It is of utmost importance to address this issue in the areas of linked data, BIM coordination processes, as well as Scan-to-BIM approaches, as these connect different models among themselves but tend to oversee the issue presented.

2 Introduction

2.1 Motivation

Building Information Modelling (BIM) is steadily gaining acceptance in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) domain. Object oriented modelling in a three-dimensional (3D) coordinate system (CS) is successfully replacing two-dimensional (2D) drawings and getting implemented in the complex stakeholder and software landscape (BORRMANN et al., 2015). Lately, the infrastructure sector has shown interest in the benefits and increased productivity promised by BIM methods (BARAZZETTI & BANFI, 2017).

With the introduction of infrastructure objects to the BIM developments, an interesting problem (re)appeared. The BIM model's project coordinate system (PCS) is a right-handed, orthogonal Cartesian CS, where each plane with constant height coordinate (z = const.) represents an equipotential surface. This is the intuitive human understanding of horizontality, where the Earth seems flat in observer's close surroundings. For example, the two pylons of the Golden Gate Bridge in San Francisco, USA, are seen as standing vertical and parallel to each other.

However, the Earth's equipotential surfaces are shaped more like a "potato" and the gravity field vectors can be assumed parallel only in a small area. Thus, in the global sense, the

aforementioned pylons are not standing parallel, but rather both follow the direction of the gravity vector at their corresponding positions.

2.2 Problem Statement

Obviously, the transfer of design data into the field is a necessary task in the construction process. For that, the BIM model is placed within its geospatial context and the set-out values calculated from established reference points. Since the Earth is not flat, the Euclidean geometry on its surface fails and discrepancies between the BIM model and its true form occur. However, when the model is designed, this fact tends to be neglected by, or hidden from, the designer. Therefore: how to handle georeferencing of BIM models in a transparent, correct and unambiguous manner?

2.3 Related Works

The problem of georeferencing of BIM models has not yet been thoroughly addressed in the literature, to the best of our knowledge. buildingSMART International (bSI) handled this issue in the *Model Setup IDM* project (BSI, 2018). The focus of the project was the use case of georeferencing in simple and complex projects and how to successfully federate models from different construction sites in a single model. The vendor-neutral data format Industry Foundation Classes (IFC) versions 2x3 and 4 have been looked at in detail and a guideline for software vendors has been published on how to properly use georeferencing entities within the IFC standard.

KADEN & CLEMEN (2017) walked through an example study on the CSs from the geodetic perspective. They noted that a correct understanding of coordinate reference systems (CRS) is crucial for the success of BIM projects in the infrastructure sector, where large extents lead to potentially large distortions. However, most CAD data is created without this consideration. In their later study, CLEMEN & GÖRNE (2019) proposed different Levels of GeoReferencing (LoGeoRef). This establishes a metric of maturity and quality of georeferencing meta data within a BIM model in IFC format. They noted, that only LoGeoRef 50 provides enough information needed for geodetic activities directly from a BIM model.

UGGLA & HOREMUZ (2018) presented their understanding of the georeferencing by means of the IFC schema from another point of view. They highlighted that the BIM model *is to be viewed as a 1:1 representation of the terrain at the construction site* and that it is not distorted by a CRS. They concluded that the current implementation in the IFC schema is not usable and wish for addition of support for object specific map projections and separate scale factors for different axes. Similarly, WUNDERLICH & BLANKENBACH (2017) see the BIM model as a 1:1 representation of the built asset.

An important study naming the three options presented in Section 4 has been published by HEUNECKE (2017). He provides the necessary background and goes in depth on the reasons and the rationale behind the three solutions presented. However, he does not provide any criteria or clues as to which solution is most suitable for AEC projects.

Similarly, in our latest study, we present the three options together with an exhaustive background on the topic (JAUD et al., 2020). We critically evaluate the options and consider the consequences of neglection of georeferencing. We provide a decision tree to help practitioners determine the correct interpretation of a BIM model as well as a nomograph to deduct the maximum horizontal extent of a structure, where a misinterpretation of the BIM model does not lead to significant errors.

2.4 Structure of the Paper

This section introduces the reader to the topic with our motivation and related works from the academia. Next section shortly summarises the theoretical background needed to understand the research question at hand. Section 4 presents possible solutions as first introduced by HEUNECKE (2017). We evaluate the solutions in Section 5 and conclude the paper with Section 6.

3 Theoretical Background

3.1 Coordinate Reference System

All geospatial data lies in a well-defined coordinate reference system (CRS). Every object is correctly located on Earth, which includes its location in a CRS and the meta data about this underlying CRS. This meta data is composed of parameters of the geodetic transformations undertaken when producing the CRS. We call such geospatial data georeferenced.

CRSs are split in two independent systems: the location and the height reference, named the geodetic and the vertical datum, respectively. A geodetic datum relates an oblate ellipsoid to the Earth, which represents its mathematical model. The longitude, λ , and latitude, φ , denote the angles from the reference lines, e.g. the Greenwich meridian and the Earth's mean equatorial plane, respectively. A pair of angles, (λ , φ), defines a unique location on the ellipsoid (ISO 19111). Through the history, many ellipsoids have been defined and used with different areas of best fit. The "best fit" objective is to minimize the differences between the Earth's equipotential surface and ellipsoid in a specific area or globally. For example, the ellipsoid WGS84 used in World Geodetic System 1984 geodetic datum is an ellipsoid with its origin in Earth's centre of mass and has a global best fit.

The vertical datum defines the physical model of the Earth – the geoid. The vertical axis, H, follows the plumb line and the coordinate value is usually given as a distance to some reference surface and not to the point of origin. This reference surface – the physical elevation, H = 0 – is one of the Earth's equipotential surfaces. It is most common to take the mean sea level. It defines the geoid form which disagrees with the ellipsoid form to a certain extent. This so-called undulation, N, can be determined with measurements and can amount to up to ± 100 m from a globally best-fitting ellipsoid (ISO 19111, JAUD et al. 2020).

The Cartesian coordinates Eastings und Northings, (E, N) = (X, Y), of the PCS are obtained by projecting the ellipsoidal coordinates, (λ, φ) , onto a plane using some sort of map projection. Since projecting the curved surface of an ellipsoid onto a plane without any deformation is not possible, a map projection can only preserve either angles, distances or surface areas. The compromise most frequently chosen in large scale topographic applications or cadastral surveying is to preserve angles by using the conformal map projections, such as the Transverse Mercator (TM) or Universal Transverse Mercator (UTM) projections (ISO 19111).

A geometric projection of the geodetic datum flattens the Earth's curvature and both together with the vertical datum establish a well-defined CRS (KADEN & CLEMEN 2017, ISO 19111). A comprehensive collection of these systems and their combinations is the database of the European Petroleum Survey Group (EPSG), where nearly 6000 CRSs from around the world are listed together with datum definitions and transformations (EPSG 2018).

To summarize, a CRS is composed of multiple parts. The choice of ellipsoid's size, position, and orientation regarding the Earth together with the height reference define the geodetic and vertical datums, respectively. The chosen projection defines transition from the double-curved surface of the ellipsoid to an orthogonal Cartesian CS. The map projection together with a geodetic datum is named a projected CRS, which uniquely defines the transformation of the PCS's *X* and *Y* axes to the ellipsoid surface. In combination with a vertical CRS which defines the interpretation of the PCS's *Z* axis, the reference system is called a compound CRS (ISO 19111, ISO 19162).

3.2 Distortions

Because of the projections and reductions induced by the chosen CRS, the geospatial data possesses a well-defined discrepancy from the real world denoted with a scale factor, m_{CRS} , usually measured in parts-per-million (ppm): 1 % = 10 000 ppm

$$m_{CRS} = \frac{\text{geospatial distance}}{\text{real world distance}} \tag{1}$$

This scale applies only to horizontal distances. This scale factor is composed of two sources of the distortions as presented in Figure 1. First, the elevated data is reduced to the ellipsoid's surface inducing the reduction factor, m_h , (HEUNECKE 2017):

$$m_h = m_h(\lambda, \varphi, h) = 1 - \frac{h(\lambda, \varphi)}{R(\varphi)} = 1 - \frac{H(\lambda, \varphi) - N(\lambda, \varphi)}{R(\varphi)}$$
(2)

where *h* is the elevation above the reference ellipsoid depending on the normal height, *H*, and the undulation, *N*, and $R(\varphi)$ is the Earth's Gaussian radius of curvature at latitude φ .

Second, the reduced data is projected from the ellipsoid to a plane inducing the projection factor, m_{proj} (HEUNECKE 2017):

$$m_{proj} = m_{proj}(m_0, \varphi, X) = m_0 \left(1 + \frac{X}{2m_0^2 R(\varphi)^2} \right)$$
(3)

where m_0 is the scale of projection at the projection's meridian; $R(\varphi)$ the Earth's Gaussian radius of curvature at latitude φ and X is the Easting coordinate of the point without offset and prepended zone number.

The combined scaling factor from (1) can be calculated using both factors in (2) and (3) (HEUNECKE 2017):

$$m_{CRS} = m_h(\lambda, \varphi, h) m_{proj}(m_0, \varphi, X)$$
(4)

It is obvious that the scaling factor can only be calculated for a specific point. The overall scale, m_{CRS} , is through the linear combination in (4) dependent on all three coordinates of a point in space and changes continuously when moving from one coordinate to another (HEUNECKE 2017). With this in mind, m_{CRS} would more correctly be called the scaling function and not merely a scaling factor.



Fig. 1: The main sources of the distortions of geospatial data. The projection may prolong or shorten the distances depending on the distance to and the projection scale at the meridian of the chosen projection (left). The vertical reduction may prolong or shorten the distances, depending on the elevation above the reference ellipsoid (right) (KADEN & CLEMEN 2017).

We stress again that the scaling factor applies only to horizontal distances as indicated in Eq. (1) and has no influence on vertical distances. However, following Eq. (4), the scaling factor of the horizontal axes depends on the elevation coordinate as well. Additionally, let it be noted on this place that a circular arc in nature may not be circular in the combined CRS and vice versa.

4 Interpretations

The focus of our paper is the correct interpretation of a BIM model considering georeferencing consequences. Following the nature of geodetic transformations as described in Section 3, georeferencing only influences the geometry and positioning of BIM data (see Eq. (1)). Therefore, the main concern is the definition and the meaning of the PCS and how it relates to the Earth. Specifically, we wish to unambiguously define the model scale, m_m , and its relation to the CRS of the geospatial data used during the design process.

We see three possibilities for an interpretation of a BIM model:

- 1. distorted with $m_m = m_{CRS}$,
- 2. not distorted with $m_m = 1$ or
- 3. a combination of the two (HEUNECKE 2017).

While the literature review shows general preference for the second option, infrastructure objects can only be designed in the first because of their great horizontal extent. Since the third option merely combines the first two, the evaluation focuses on the former and is consequently valid for the third option as well.

We highlight the differences in the handling of geometric data in Figure 2. Recall that all geospatial data lies in a well-defined CRS which defines the parameters for the scaling function, m_{CRS} . In Option 1, the model's scale factor, m_m , is equal to the scaling function, $m_m = m_{CRS}$, resulting from the underlying geodetic transformations and is thus continuously changing throughout the whole BIM model. In Option 2, the scaling factor is $m_m = 1$, which denotes no difference in position as well as geometry between the model and the reality.



Fig. 2: The flow of data and its transformations between the real world (built asset), the geospatial analysis (geospatial data) and the design processes (BIM model). Top left represents Option 1 ($m_m = m_{CRS}$), top right Option 2 ($m_m = 1$) and bottom Option 3 (a mix of Options 1 and 2) (JAUD et al. 2020).

In the first option, the geospatial data is used as-is in the design processes. Thus, the BIM models themselves possess the same distortions as the geospatial data and cannot be used without previous manipulation for stake out or prefabrication processes. As seen on Figure 2, top left, they need to be inversely transformed to their true geometry using the inverse of the scaling function, m_{CRS}^{-1} .

On the contrary, the second option allows the BIM model to be used directly for stake out and prefabrication processes without any preprocessing. However, the geospatial data needs to have been inversely transformed with m_{CRS}^{-1} before being included in the design process as seen on Figure 2, top right. Additionally, there is a limit to the horizontal extent of such model as described by UGGLA & HOREMUZ (2018).

The third option foresees the (inverse) transformation to happen between the designers themselves (see Figure 2, bottom). Structures with significantly larger horizontal than vertical dimensions count as infrastructure objects (for example, roads or railways), whereas structures with comparatively similar extent as well as very high buildings count as building objects (for example, short bridges or skyscrapers). We name the former *horizontal* BIM and the latter *vertical* BIM, and the geospatial data must be transformed when switching among them.

5 Evaluation

The problem addressed in this paper is of systematic nature and can be easily averted if every project stakeholder acknowledges it and acts accordingly. However, this is not always the case, especially in the vertical BIM community, where BIM models are generally interpreted according to Option 2 (see Section 2.3). If the geospatial data is not inversely transformed before the design processes as presented in Figure 2, top right, the introduced mistake may at first not be noticed. As such, its source could be hard to pinpoint when the design is staked out at the construction site at a later stage.

The consequences of such false interpretation depend on the position of the asset as well as the underlying CRS of the geospatial data as presented in Section 3. The magnitude of misinterpretation at a specific location can be calculated using Eq. (4). As an approximation, an average magnitude over the whole project site can be calculated with average coordinate values of the far-most corners (marked with indices 1 and 2) (HEUNECKE 2017):

$$\overline{m_{CRS}} = m_h \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}, \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}, \frac{h_1 + h_2}{2} \right)$$

$$m_{proj} \left(m_0, \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}, \frac{X_1^2 + X_1 X_2 + X_2^2}{3} \right)$$
(5)

The distortion can be knowingly neglected in special cases. Determining the (average) distortion at the construction site expressed as $\Delta = m_{CRS} - 1$ and knowing the construction precision strived for, the maximal horizontal extent of the construction site can be determined using the diagram in Figure 3. If the far-most corners of the construction site lie closer than the determined length, then the distortions of the CRS may be neglected, as the mistake induced does not exceed the construction precision. Only in this case the BIM model can be interpreted according to Option 2, even though the geospatial data may not have been inverse transformed with m_{CRS}^{-1} as depicted in Figure 2, top right (JAUD et al. 2020).

Section 4 introduced a differentiation between the horizontal and the vertical BIM models. For a clear definition, the diagram in Figure 3 helps to determine where to draw the border. If the distortions of the model can be neglected as described above, the model may be a *vertical* BIM model. If the distortions cannot be neglected, it is definitely a *horizontal* BIM model and the distortions induced by the CRS must be considered following Option 1.

It is possible to circumvent the obligations of a horizontal BIM model by choosing a CRS carefully. For that, one can use an existing CRS as provided by EPSG (2019) or define a new CRS, such that it minimizes the distortions of the CRS at the construction site. Preferably, this CRS is chosen in a way, where the tolerances imposed throughout the project exceed the CRS's distortions at every location. How to design such a CRS is not a part of this research paper and the reader is advised to consult geodetic literature.

An additional problem occurs when interpreting a BIM model according to Option 3 (e. g., a confederated BIM model which includes both types of sub-models). If there are parts of the model which neglect the distortions, the mistakes induced by neglection need to be smoothen out between the different types. These transition zones require special care when setting out at the construction site. This is not handled by this paper and needs further consideration.



Fig. 3: The maximum horizontal extent of a BIM model, where the distortions can be knowingly neglected. It depends on the construction precision and the absolute (average) CRS's distortions on the construction site expressed as $\Delta = m_{CRS} - 1$. For example, with construction precision of 1 cm and distortion of 20 ppm, the maximum horizontal extent is 500 m (see black arrows) (JAUD et al., 2020).

6 Conclusions

This paper aims at addressing the question posed in the title and outlined in Section 1.2: Are BIM models intrinsically distorted in the same manner as the underlying geospatial data used during the design, or are they to be interpreted as a 1:1 representation of the real world? Literature review shows that no clear consensus is present, but that the 1:1 view seems to be the preferred case among researchers and practitioners for vertical BIM models.

We present three possibilities of how to interpret a BIM model in Section 3. Option 1 interprets the BIM model in the same way as the underlying geospatial data: distorted. Option 2 perceives the BIM model as a true representation of the built asset. Option 3 is a combination of the previous two, regarding horizontal and vertical models as Option 1 and 2, respectively.

We provide a graph to determine the maximal horizontal extent of a BIM model, where to draw the line between vertical and horizontal BIM models as well as where the geodetic distortions can be ignored. This is dependent on the construction precision and on the (average) scale factor of CRS at the construction site. This comes especially useful, if the meta data of the BIM model's CRS is not available and thus a correct interpretation is questionable.

We find that there is no right or wrong answer to the question posed in the title; rather, the knowledge among the experts is partially missing or simply not stressed loudly enough. We call for increased transparency among the project stakeholders. Every surveying, design or stake-out contract should explicitly specify the CRS of the models and how they are to be interpreted. In this way, disputes can be solved quickly, and costly errors averted.

The meta data of BIM models need to be adapted accordingly, in order to correctly incorporate CRS parameters. It is of utmost importance to address this issue in the areas of linked data, BIM coordination processes, as well as Scan-to-BIM approaches. These fields connect or transform models with different CRSs among themselves and tend to oversee the issue presented, which can lead to systematic errors, although easily averted.

References

- BARAZZETTI, L. & BANFI, F. (2017): BIM and GIS: When Parametric Modelling meets Geospatial Data. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences 4.
- BORRMANN, A., KÖNIG, M., KOCH, C. & BEETZ, J. (2015): Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. VDI-Buch, Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- BSI, buildingSMART International (2018): Model Setup IDM, Vol I: Geo-referencing BIM. https://bsi-intranet.org/kos/WNetz?art=Folder.show&id=5568 (31.08.2018).
- CLEMEN, C. & GORNE, H. (2019): Level of Georeferencing (LoGeoRef) using IFC for BIM. Journal of Geodesy, Cartography and Cadastre 2019, pp. 15–20.
- EPSG (2019): The European Petroleum Survey Group homepage. http://www.epsg.org/ (30.11.2019).
- HEUNECKE, O. (2017): Planung und Umsetzung von Bauvorhaben mit amtlichen Lage- und Höhenkoordinaten. In: zfv 142, pp. 180–187.

- ISO 19111:2007 (2007): Geographic information Spatial referencing by coordinates. Standard International Organization for Standardization Geneva, CH.
- ISO 19162:2015 (2015): Geographic information Well-known text representation of coordinate reference systems. Standard International Organization for Standardization Geneva, CH.
- KADEN, R. & CLEMEN, C. (2017): Applying Geodetic Coordinate Reference Systems within Building Information Modeling (BIM). In: Technical Programme and Proceedings of the FIG Working Week 2017, Helsinki, Finnland.
- JAUD, Š., DONAUBAUER, A. HEUNECKE, O. & BORRMANN, A. (2020): Georeferencing in the Context of Building Information Modelling. Automation in Construction. [In press].
- UGGLA, G. & HOREMUZ, M. (2018): Georeferencing Methods for IFC, in: Proceedings of the 2018 Baltic Geodetic Congress, BGC–Geomatics 2018, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. pp. 207–211.
- WUNDERLICH, T. & BLANKENBACH, J. (2017): Building Information Modeling (BIM) und Absteckung, in: Ingenieurvermessung 2017, TU Graz.

Aufdecken von Baumängeln aus Punktwolken

Christian THURNER

Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung durch anonyme Fachkollegen als "peer reviewed paper" angenommen.

1 Einleitung und Begriffsdefinition

Das vorliegende Paper beschäftigt sich mit der Beurteilung von Baumängeln anhand des Vergleiches von Punktwolken mit Planungsdaten und die Einbindung der Baumängel in BIM.

Durch den erhöhten Einsatz von Laserscannern auf Großbaustellen werden immer mehr Planabweichungen und Baumängel aufgedeckt. Ein Baumangel führt auf verschiedene Weise zu Zusatzkosten, bei denen es zu klären gilt, wer sie zu tragen hat. Dieses Paper zeigt einen Ansatz, wie, ausgehend von einer aufgedeckten Planabweichung, ein Baumangel bestätigt oder ausgeschlossen werden kann. Gleichzeitig kann die hier gezeigte Vorgehensweise einen Hinweis auf die Herkunft des Baumangels geben.

Es stellt sich die Frage, wie mit den aufgedeckten Planabweichungen und Mängeln in Bezug auf das BIM-Modell umzugehen ist. Hier wird eine mögliche Vorgehensweise beschrieben, bei der, zusammen mit der Analyse der Planabweichung eines verformten Bauteils, das Bauteil verformungsgerecht modelliert wird. Anschließend kann dieses Modell des Bauteils als Overlay in das BIM-Modell eingebettet werden.

Das Paper führt zunächst durch Begriffsdefinitionen zur korrekten Anwendung der Norm, um Baumängel festzustellen. Weiterhin wird gezeigt, wie im BIM-Modell mit den festgestellten Planabweichungen umgegangen werden kann. Da das Erkennen von Planabweichungen eine aussagekräftige Punktwolke erfordert, wird zunächst auf die Problematik bei der Erstellung einer solchen Punktwolke eingegangen, bevor gezeigt wird, dass diverse Störeinflüsse auf die Punktwolke das Interpretieren von aufgedeckten Planabweichungen schwierig machen. Wie eine Punktwolke analysiert werden kann, macht das anschließende praktische Beispiel deutlich. Das nächste Kapitel stellt die automatisierte Erzeugung eines Overlays direkt aus der Analyse der Planabweichungen vor, bevor mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick abgeschlossen wird.

1.1 Was ist ein Baumangel?

Aus juristischer Sicht handelt es sich bei einem Mangel um eine Abweichung zwischen dem ausgeführten Ist- und dem vertraglich vereinbarten Soll-Zustand einer Sache. Tritt ein Mangel an einer Sache auf, hat der Besteller laut § 634 BGB das Recht auf Mangelbeseitigung, Nacherfüllung, Vertragsrücktritt oder Schadensersatz.

In der Baubranche gibt es grundsätzlich zwei verschiedene, juristische Definitionen von Baumängeln: Einmal im BGB (Bürgerliches Gesetzbuch) und in der VOB/B (Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen). Der Deutsche Vergabe- und Vertragsausschuss hat mit der VOB ein Normwerk geschaffen, das im Gegensatz zum BGB den vertraglichen Besonderheiten des Bauvertrags Rechnung tragen soll (SCHMIDT-MORSBACH 2019). Die größten allgemeinen Unterschiede zwischen VOB/B und BGB liegen in den Abrechnungen, da mit der VOB/B, im Gegensatz zum BGB, z.B. Abschlagszahlungen möglich sind. Das wird hier aber nicht weiter thematisiert.

Im Folgenden wird zunächst die Definition des Baumangels nach BGB vorgestellt, um dann im Vergleich mit der Definition des Baumangels nach VOB/B die Unterschiede der beiden Definitionen aufzuzeigen.

Baumangel laut BGB

Laut § 633 Abs. 1 BGB wird vom Auftragnehmer verlangt, dem Auftraggeber das Werk frei von Sach- und Rechtsmängeln zu verschaffen. Ein Rechtsmangel liegt dann vor, wenn ein Dritter in Bezug auf die Sache (z.B. Immobilie, Bauwerk, ...) seinerseits Rechte gegen den Käufer geltend machen kann, vorausgesetzt die Rechte sind nicht im Kaufvertrag übernommen (§ 633 Abs. 3 BGB). Solche Rechtsmängel sind z.B. Verstoße gegen gewerbliche Schutzrechte oder Urheberrechte Dritter, was in diesem Artikel jedoch keine weitere Relevanz hat.

Nach § 633 Abs. 2 Satz 1 BGB ist das Werk frei von Sachmängeln, wenn es der vereinbarten Beschaffenheit entspricht.

WEIBENFELS et al. (2019a) beschreiben ihn ihrem Baurecht-Ratgeber sehr anschaulich, was das bedeutet. Das Gesetz legt mit oben genanntem Paragraf fest, dass die Grundlage zur Klärung für die Mängelfrage zunächst die vertraglichen Vereinbarungen sind. Haben die Vertragsparteien Vereinbarungen zu Art, Güte und Qualität getroffen und weicht das hergestellte Bauwerk zum Zeitpunkt der Abnahme von dieser Vereinbarung negativ ab, ist das Werk mangelhaft. Wenn z. B. vertraglich vereinbart ist, dass eine Tiefgarage pfützenfrei auszuführen ist, so ist das Werk mangelhaft, sobald eine Pfütze entsteht, auch wenn das gesamte Bauwerk inkl. der Tiefgarage alle Normen und gängigen Ebenheiten einhält.

Da es unmöglich ist, alle geschuldeten Beschaffenheiten in Bauverträgen zu regeln, enthält das BGB für letztere eine genauere Definition, § 633 Abs. 2 Satz 2f:

"Soweit die Beschaffenheit nicht vereinbart ist, ist das Werk frei von Sachmängeln,

- 1. wenn es sich für die nach dem Vertrag vorausgesetzte, sonst
- 2. für die gewöhnliche Verwendung eignet und eine Beschaffenheit aufweist, die bei Werken der gleichen Art üblich ist und die der Besteller nach der Art des Werkes erwarten kann."

Eine "übliche Beschaffenheit" wird vor den Gerichten bevorzugt durch die sogenannten "anerkannten Regeln der Technik" (d. i. z. B. die DIN, s. u.) festgelegt. Das ist so zwar nicht im BGB geregelt, aber die Mehrzahl der gerichtlichen Entscheidungen über Mängelfragen zeigt, dass dies in der Praxis die gängige Vorgehensweise ist. Rechtlich wird es so gehandhabt, dass davon ausgegangen werden muss, die meisten Parteien hätten die Einhaltung der Regeln der Technik stillschweigend vereinbart.

Wo es keine "anerkannten Regeln der Technik" gibt oder bei sonstigen Zweifeln, wird durch einen Sachverständigen geklärt, ob ein Mangel vorliegt oder nicht.

Baumangel laut VOB/B

Nach § 13 Nr. 1 VOB/B liegt ein Mangel dann vor, wenn mindestens einer der folgenden Punkte gegeben ist:

- Nichteinhaltung der vereinbarten Beschaffenheit
- Verstoß gegen die anerkannten Regeln der Technik.

Der größte Unterschied in der Definition des Mangels im BGB und in der VOB/B liegt darin, dass die VOB/B den Begriff des Rechtsmangels nicht kennt. Wird ein Bauwerk nach VOB/B errichtet und liegt ein Rechtsmangel vor, bleibt es bei der Anwendung der Gewährleistungsrechte des BGB.

Ein kleiner Unterschied zwischen BGB und VOB/B besteht darin, dass die VOB/B im Gegensatz zum BGB die "anerkannten Regeln der Technik" schon in der Definition des Baumangels beinhaltet.

1.2 Was sind die "Anerkannten Regeln der Technik"?

WEIBENFELS et al. (2019b) zeigen, dass die Definitionen der "anerkannten Regeln der Technik" sowohl nach dem BGB als auch nach der VOB/B nicht zwingend eindeutig sind. Im Allgemeinen gilt für die "anerkannten Regeln der Technik", dass sie in der technischen Wissenschaft als theoretisch richtig und gleichzeitig aufgrund praktischer Erfahrung als technisch geeignet, angemessen und notwendig anerkannt sind.

Aufgrund dieser Handhabung der "anerkannten Regeln der Technik" wird keine schriftliche Fixierung ebendieser notwendig. Damit wird es zur Frage des Einzelfalls, ob sich auf der Baustelle die technischen Regeln als wissenschaftlich richtig und geeignet erweisen. In der Praxis werden die "anerkannten Regeln der Technik" durch Normen wie die DIN, VOB, Europäische Norm (EN), Richtlinien des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI), Schweizer Ingenieur- und Architektenverein (SIA- Norm) etc. umgesetzt.

1.3 Was ist eine Verformung?

In der Kontinuumsmechanik ist eine Verformung die Änderung der Form eines Körpers aufgrund einer äußeren Kraft. RÖSLER et al. (2006) beschreiben in ihrer Arbeit sehr detailliert das Verhalten von Materialien unter Krafteinwirkung.

Eine Verformung besteht aus einem elastischen und einem plastischen Anteil. Ein elastisch verformter Werkstoff nimmt seine ursprüngliche Form wieder an, sobald die Krafteinwirkung aufhört. Die plastische Verformung hingegen ist irreversibel. Hierfür muss der Werkstoff umformbar sein. Sehr spröde Werkstoffe brechen eher, ohne sich nennenswert plastisch zu verformen.

Ein Material kann auch zeitlich verzögert auf eine Belastung reagieren. Hierbei spricht man dann von einer zeitabhängigen Verformung.

Es gibt also vier Arten von Verformungen: die elastische und die plastische Verformung, die jeweils zeitlich abhängig oder unabhängig sein können. Eine Verformung muss somit kein Baumangel sein.

2 Korrekte Anwendung der DIN 18202 um Mängel an einem Bauwerk festzustellen

ERTL (2013) zeigt in seinem sehr hilfreichen Kommentar zur DIN 18202 (Zulässige Maßabweichung im Roh- und Ausbau), wie die DIN 18202 in der Praxis anzuwenden ist.

Mit der DIN 18202 sind nur die Genauigkeitsanforderungen für die Ausführung von Bauwerken bzw. Bauteilen erfasst. Nicht erfasst sind ausdrücklich zeit- oder lastabhängige Verformungen nach der Herstellung des Bauwerks oder Bauteils. D. h. mit der DIN 18202 können nur Maße unmittelbar nach der Fertigstellung kontrolliert werden. Damit ist klar, dass die DIN 18202 ein Beurteilungsmaßstab für die maschinelle Fertigung bzw. die handwerkliche Ausführung ist. Somit ist es lediglich möglich, den Herstellungsprozess zu beurteilen.

Verformungen, die nicht unmittelbar mit der Herstellung zusammenhängen, fallen also nicht in den Anwendungsbereich der DIN 18202. Beispiele hierfür sind zeitabhängige Verformungen wie das Quellen oder Schwinden aufgrund von Wasserabgabe oder -aufnahme. Aber auch temperaturbedingte Verformungen oder Verformungen aufgrund von andauernden oder temporären Lasten wie z.B. Eigengewicht, Verkehrs- oder Windlast werden nicht berücksichtigt. Das betroffene Bauteil muss somit um den Anteil derartiger Verformungen korrigiert werden, damit die Norm Anwendung finden kann.

Um die Anteile zusätzlicher Verformungen (z.B. durch Belastung des Bauteils) zu ermitteln, müssen andere Vorgehensweisen genutzt werden, siehe Kapitel 6.

3 Möglichkeit der Einbettung von Planabweichungen in das BIM-Modell durch ein verformungsgerechtes Overlay

Bereits 2013 zeigten EGGER et al. in ihrem BIM-Leitfaden auf, dass BIM als zentrale Verwaltung von möglichst allen projektrelevanten Informationen verwendet werden sollte. Das bestätigen und erweitern zugleich KADEN et al. (2018) im Leitfaden Geodäsie und BIM, wenn vom "multidimensionalen Bauwerksmodell und darüber hinaus" gesprochen wird. THURNER & WUNDERLICH (2015) argumentieren aus dieser Tatsache, dass nicht nur das geplante Modell als Informationsgrundlage geführt und gepflegt, sondern auch das hergestellte Bauwerk aufgemessen und verformungsgerecht modelliert werden sollte. Denn nur wenn der tatsächlich hergestellte Zustand als Modell zur Verfügung steht, kann von einer "verlässlichen Grundlage für Entscheidungen" nach der Vorstellung von NBIMS (2012) gesprochen werden. KADEN et al. (2018) widmen der Bestandserfassung für BIM ein gesamtes Kapitel, jedoch wird BIM dort als eine zentrale Methode für die digitale Planung eines Bauwerks beschrieben. Die Bestandserfassung, die KADEN et al. beschreiben, meint also das Schaffen der Planungsgrundlage. Auch die Baukontrolle, Kontrollvermessung und Beweissicherung sprechen KADEN et al. in einem kurzen Kapitel an. Sie schlagen vor, wenn Planabweichungen auftauchen, entweder das Bauwerk zu korrigieren oder das Modell entsprechend der Realität anzupassen.

THURNER & WUNDERLICH (2015) zeigen zusätzlich, dass durch ein Gebäudeaufmaß in der Detailstufe, wie es BIM verlangt, deutlich mehr Planabweichungen aufgenommen werden, als es ohne BIM der Fall war. Auf der modernen Großbaustelle jedoch, vorausgesetzt, die

Punktwolke des fertigen Bauwerks und das BIM-Model sind beide im selben Bezugssystem, können Planabweichungen sichtbar gemacht werden, indem der Abstand zwischen der Punktwolke und dem Modell farbcodiert und die Punktwolke entsprechend eingefärbt wird. Nahezu jede Software bietet hierfür ein Tool an.

Da Planabweichungen, wenn sie sich als Baumängel herausstellen, zu einer juristischen Angelegenheit werden (siehe Kapitel 1), muss geklärt werden, wie mit den deutlich mehr aufgedeckten Planabweichungen umzugehen ist. Wie bereits oben beschrieben, können Planabweichungen, die ein Toleranzmaß überschreiten (z.B. aus der DIN), erkannt werden. Als nächstes wird geprüft, ob es sich bei dem betroffenen Bauteil tatsächlich um einen Baumangel handelt oder nicht (vgl. Kapitel 6). Wird ein Baumangel ausgeschlossen, kann das entsprechende Bauteil freigegeben werden. Handelt es sich jedoch um einen Baumangel, so muss entschieden werden, was mit dem betroffenen Bauteil passiert. Bis zur endgültigen Entscheidung kann z. B. das verformungstreu modellierte Bauteil im BIM-Modell als Overlay eingebettet werden. So ist es möglich, den Mangel im Modell für jeden Betroffenen sichtbar zu dokumentieren. Eine Möglichkeit, ein verformungstreues Overlay zu erstellen, zeigt Kapitel 7. Wird das Bauteil in der Realität nachgebessert oder ersetzt, kann das Overlay einfach entfernt oder angepasst werden. Wird das Bauteil so belassen, da sich die Vertragspartner z. B. auf eine verminderte Vergütung geeinigt haben, kann die entsprechende Information dem Overlay des Bauteils hinzugefügt werden. Die Regelung bezüglich dieses Baumangels ist somit eindeutig und für alle Beteiligten sichtbar hinterlegt. Zudem dient das Overlay des Bauteils als Grundlage für weitere Planungen. Soll z. B. unter einem Unterzug eine Trennwand aus Glas eingebracht werden, so kann es bei der Planung entscheidend sein, ob der Unterzug aufgrund eines Baumangels zu stark durchgebogen ist oder nicht.

4 Schwierigkeiten bei der Erstellung aussagekräftiger Punktwolken

Die Scans finden meistens noch im Rohbauzustand statt und zu dem Zeitpunkt ist die Baustelle i. d. R. alles andere als aufgeräumt. Sprieße, Gerüste, Brüstungen, Geländer, Material, Schutt und vieles mehr wird mitgescannt. Die Punktwolke muss gründlich bereinigt werden, ansonsten erscheinen diese Objekte beim Vergleich zwischen Modell und Punktwolke als Pseudomodellabweichung. OHLMANN-LAUBER (2012) befasst sich mit der Thematik der Pseudodeformationen in Tunnels. Beim Scan des Rohbaus kann selbstverständlich nur der Zustand des Rohbaus mit dem Modell des Rohbaus verglichen und im BIM dokumentiert werden. Um also ein verformungsgerechtes Modell des fertigen Bauwerks erzeugen zu können, müsste nach Abschluss des Innenausbaus erneut gescannt werden. Wird nur nach Fertigstellung des Bauwerks gescannt, so kann der Rohbau bis auf Ausnahme von Sichtbetonelementen nicht überprüft und modelliert werden.

An dieser Stelle sei nochmal darauf hingewiesen, dass ein BIM-Modell nach NBIMS (2012) eigentlich verlangt, dass Gebäude im Rohbau und im fertigen Zustand verformungsgerecht zu erfassen und zu dokumentieren sind. Unserer Erfahrung nach ist ein solcher Aufwand zum momentanen Zeitpunkt weder nötig noch wirtschaftlich.

Üblicherweise werden auf Großbaustellen bislang nicht alle Bauteile explizit kontrolliert. Oft beschränken sich die Kontrollmessungen auf Ebenheitskontrollen und speziell angeforderte

Kontrollmessungen kritischer Bauteile. Wird auf einer Baustelle hierfür ein Laserscanner verwendet, so könnten mehr Bauteile kontrolliert werden. Die Scans erfolgen i. d. R. wenige Wochen nach der Fertigstellung eines Bauteils, nach der Ausschalung der Decke und dem Entfernen des Großteils der Sprieße, immer jedoch, bevor der Innenausbau beginnt (Tachymetrische Ebenheitskontrollen erfolgen i. d. R. am Tag nach der Betonage, was beim Scannen aufgrund der Folie auf den frischen Deckenfeldern unmöglich ist). Somit ist der Scan zwar nicht der direkten Witterung, jedoch der Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankung über die Jahreszeiten ausgesetzt. Aus diesen von den Umweltbedingungen abhängigen Einzelscans wird die Gesamtpunktwolke des Gebäudes zusammengesetzt. Eine Temperaturschwankung von bis zu 40 °C zwischen den Sommer- und Wintermonaten muss erwartet werden. Werden solche Umwelteinflüsse in der Analyse nicht berücksichtigt, kann die Aussagekraft der Gesamtpunktwolke beim Aufdecken von Maßabweichungen angezweifelt werden.

Der jeweilige Scan eines Gebäudeteils kann aber nur als Grundlage zur Kontrolle von Maßabweichungen desselben Bauteils herangezogen werden. Wie BOSCHÈ & BIOTTEAU (2015) und HEUNECKE (2014) zeigen, reicht die Genauigkeit eines Laserscanners i. d. R. aufgrund der hohen Redundanz durch die hohe Punktdichte aus, um Aussagen aus dem Scan wie z. B. Ebenheitskontrollen treffen zu können. Die Ebenheitskontrolle kann aus Scandaten mithilfe der 2D Continuous Wavelet Transformation automatisiert werden (VALERO & BOSCHÈ 2016).

Viel leichter umzusetzen ist das verformungsgerechte Aufmaß eines bereits bestehenden Bauwerks, für das ein BIM inklusive Modell angelegt werden soll. Das geschieht oft zur Schaffung von Planungsgrundlagen, damit BIM konform mit digitaler Planung umgebaut oder erweitert bzw. saniert werden kann, was KADEN et al. (2018) klarmachen. Hierfür gibt es bereits bestimmte Vorschriften, in welcher Genauigkeit und welchem Detailierungsgrad welche Objektklassen zu erfassen sind. Des Weiteren stellen KADEN et al. (2018) fest, dass die Darstellung der Abweichungen zur Regelgeometrie aufgrund der BIM-Software nur sehr eingeschränkt möglich ist, weshalb ein verformungsgerechtes Aufmaß zurzeit nur im Sinne der Baukontrolle durchgeführt werden kann. Damit meint KADEN den Abgleich des Gebauten mit der BIM-Planung.

In solchen Fällen ist es nicht selten, dass verformungsgerechte Aufmaße verlangt werden. Hier werden zwar, je nach Detailierungsgrad, "verformungsgerechte" Modelle abgegeben, aber auch nur, soweit es der Software- Rahmen zulässt. Wie THURNER & WUNDERLICH (2015) zeigen, gibt es viele softwarebedingte Probleme. Einige davon sind mittlerweile lösbar, dennoch ist ein verformungsgerechtes Modell nur bedingt realisierbar. Nach wie vor müssen z. B. unebene oder dellige Wände per Hand mit Freiformflächen modelliert werden, indem die Hoch- und Tiefpunkte manuell geformt werden. Auch schräge bzw. durchhängende Decken können modelliert werden, indem von einem ebenen Deckenelement ein Differenzkörper mit dem manuell erzeugten Negativ der Durchbiegung abgezogen wird. Übrig bleibt der durchgebogene Deckenkörper. Auf die gleiche Weise ist es möglich, sich verjüngende Wände darzustellen.

Überall besteht aber das Problem, dass die unregelmäßigen Formen manuell modelliert werden. So liegt es vor allem am Bearbeiter und seinem investierten und finanzierten Zeitaufwand für die Auswertung, wie "verformungsgerecht" ein Modell wirklich wird. Abbildung 1 zeigt exemplarisch zwei Schnitte durch Modelle historischer Gebäude. Beide Modelle wurden verformungsgerecht nach dem oben beschriebenen Vorgehen ausgewertet.



Abb. 1: Links: Schnitt durch ein Modell eines historischen Gebäudes. Beachtenswert sind vor allem die schrägen Decken und Wände im linken Teil, die z. T. auch in der Stärke variieren (LINGEL 2017).

Rechts: Schnitt durch einen mittelalterlichen Kirchturm. Auffallend auch hier die sich ändernden Wandstärken (IGL 2015).

5 Probleme beim Erkennen und Analysieren von Planabweichungen

Zu glatte oder spiegelnde Oberflächen sowie sehr steile Visuren sind durch Scanner nicht erfassbar. Um z.B. die Rissbildung bei frisch betonierten Decken zu vermeiden, werden die Decken stark mit Wasser begossen und anschließend mit Folien abgedeckt. So härten die Decken an der Oberfläche langsamer aus und es entstehen weniger Risse. Das führt allerdings dazu, dass zum Zeitpunkt des Scans häufig noch viele Pfützen vorhanden sind, die durch Spiegelung an der Oberfläche z. T. erhebliche Datenlücken erzeugen. Dies bewirkt zusammen mit den unzähligen Gegenständen auf Großbaustellen (Kapitel 4), dass die tatsächlich verwendbaren Scandaten oft sehr große Lücken aufweisen. Vor allem Pfützen sind in diesem Zusammenhang zu betonen. Die Tatsache, dass eine Pfütze entsteht, zeigt, dass an dieser Stelle die Decke niedriger betoniert wurde als in der Umgebung; ansonsten würde sich das Wasser nicht sammeln. Genau diese Stelle wird aber vom Scanner nicht erfasst. Selbst wenn die Ebenheitskontrolle durch Laserscanner laut VALERO & BOSCHÈ (2016) automatisierbar ist, ist das in der Praxis auf Großbaustellen oft kein Vorteil, da die kritischen Stellen häufig

gar nicht erfasst werden. Aus diesem Grund ist ein herkömmliches Aufmaß eines Deckenfeldes mittels Tachymeter meist schneller durchführbar und aussagekräftiger als ein Laserscan, insbesondere bei Ebenheitskontrollen. Das führt dazu, dass eigentlich für die BIM-gerechte Gebäudedokumentation, wie oben beschrieben, separat gescannt werden müsste. Das wird, unserer Erfahrung nach, bislang noch nicht bezahlt.

Eine Aussage zur Maßabweichung kann nur außerhalb des Bereichs des Messrauschens eines Scanners erfolgen. HEINZ et al. (2018) befassen sich mit der Genauigkeitsbeurteilung von Laserscans anhand realer Messobjekte. Sie kommen zum Schluss, dass zwischen 10 und 55 m Messdistanz auf eine Rauputzwand und eine Sichtbetonwand ein Messrauschen zwischen 2–7 mm bei eigentlich allen getesteten Laserscannern von Low-Cost- bis High-End-Geräten zu erwarten ist. Die Daten für diesen Beitrag wurden allerdings auch nicht auf einer Großbaustelle in vollem Baubetrieb erzeugt. Die Praxis hat uns gelehrt, dass beim Einsatz eines Scanners im Tagesgeschäft einer Großbaustelle (d. h mit zusätzlichen zu erwartenden unbekannten systematischen Abweichungen aufgrund eines nicht kalibrierten und durch den Transport z. B. über Leitern geschüttelten Scanners) mit einer Gesamtabweichung von 10–20 mm zu rechnen ist, was jedoch im Einzelfall zu prüfen wäre. Entsprechend könnten im schlechtesten Fall nur Aussagen zu Planabweichungen größer 2 cm getroffen werden. Somit kann es schwer werden, etwaige festgestellte Planabweichungen aussagekräftig zu analysieren.

Bei manchen Oberflächen, vor allem von unplanmäßig tordierten Objekten wie es häufig bei Massivholzbalken der Fall ist, treten große Probleme auf. Hierbei wird es schwierig, Punktwolken auf Planabweichungen zu untersuchen, da für solche Szenarien eine automatisierte Punktwolkenverarbeitung fehlt.

6 Aufdecken von Baumängeln mithilfe statischer Berechnung

In Kapitel 2 wurde bereits gezeigt, dass Bauteile nur dann auf Maßüberschreitungen geprüft werden können, wenn das Aufmaß des zu prüfenden Bauteils um jede zusätzliche Verformung, z. B. aus der Belastung eines Bauteils, korrigiert wird.

Aus statischen Berechnungen ist bekannt, wie sich ein Bauteil erwartungsgemäß verformen wird. Liegen nun aussagekräftige Aufmaßdaten eines Bauteils vor (siehe Kapitel 4 und 5), so kann das Aufmaß mit der Statik verglichen werden. Im Idealfall unterscheidet sich die vorhergesagte Verformung aus der statischen Berechnung nicht bzw. nicht wesentlich von der tatsächlich gemessenen Verformung des Bauteils. THURNER & WUNDERLICH (2015) zeigen mit Hilfe eines individuellen Ansatzes auf, welche Ableitung ein solcher Vergleich möglich macht.

Zur Verdeutlichung der Vorgehensweise wird ein Einfeldbiegeträger analysiert. Hierbei handelt es sich um einen Balken, der waagrecht auf zwei Auflagern gelenkig gelagert ist. Ein Auflager ist in Längsrichtung des Balkens beweglich, damit es Längenänderungen, z. B. aufgrund thermischer Einflüsse, aufnehmen kann. Dies ist ein statisch bestimmtes System, da die Anzahl der möglichen Lagerreaktionen gleich der Anzahl der möglichen Bewegungsrichtungen ist. Für die Anwendung dieses Ansatzes in der Praxis sollte die statische Berechnung von einem Statikbüro angefordert werden. Um die Vorgehensweise zu verdeutlichen, wird der reale Scan eines Balkens in ein Beispiel eingebaut. Gescannt wurde ein weiß lasierter massiver Leimbinderbalken auf einer Distanz von 8–16 m und mit Einfallswinkeln zwischen 30° und 45°. Der verwendete Scanner war ein Faro Focus 70 mit einer Distanzgenauigkeit laut Hersteller von 3 mm.

Für das Beispiel wird ein 10,9 m langer Leimbinderbalken mit den Querschnittsmaßen $b \cdot h$ von 20 \cdot 60 cm² analysiert. Der Balken ist Teil der Dachkonstruktion einer 4 m hohen Montagehalle. Alle zur Berechnung der Biegelinie benötigten Informationen sind gegeben. Prof. Dr. Schröder hat eine sehr übersichtliche Formelsammlung zur Verformung durch Durchbiegung veröffentlicht. Diese dient hier als Berechnungsgrundlage (SCHRÖDER 2019).

Der Balken wird durch eine Linienlast q [kN/m] belastet. q setzt sich aus der Summe der ständigen Lasten und der Summe der veränderlichen Lasten zusammen. Im vorliegenden Fall ist die ständige Last das Eigengewicht des Balkens und der darüber liegenden Dachkonstruktion. Die veränderlichen Lasten setzen sich aus der Schnee- und der Windlast zusammen. Da es sich um eine Dachkonstruktion handelt, kommen keine Nutzlasten wie z. B. Personen dazu. Aus der DIN 1055 können die Rechenwerte und die Bemessungsregeln zur Planung von Bauwerken entnommen werden. Konkret finden sich in der DIN 1055-4 die Rechenwerte zur Windlast und in der DIN 1055-5 die Rechenwerte zur Schnee- und Eislast. q sei somit aus der statischen Berechnung gegeben mit:

$$q = 5,4825 \ kN/m$$
 (1)

Das Elastizitätsmodul *E* ist entsprechend der verwendeten sehr guten Holzqualität gegeben (Tabelle F.5, DIN 1052):

$$E = 12.5 \cdot 10^9 \ Pa \tag{2}$$

Das Flächenträgheitsmoment I errechnet sich wie folgt:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \tag{3}$$

Jetzt kann die Biegelinie w_x für einen Balken mit konstanter Linienlast und konstantem Querschnitt mit der Balkenlänge *l* errechnet werden aus:

$$w_x = \frac{ql^4}{24EI} \left[\frac{x}{l} - 2\left(\frac{x}{l}\right)^3 + \left(\frac{x}{l}\right)^4 \right]$$
(4)

Um einen Vergleich der DIN zu einer anderen Norm zu haben, wird die maximal zulässige Durchbiegung eines Balkens aus der Zif.4.4.4 der SIA- Norm 260 berechnet:

$$w_{max} = \frac{l}{350} \tag{5}$$

Nun wird die berechnete Biegelinie mit dem bereinigten Scan der Unterseite des Balkens verglichen. In Abbildung 2 ist in hellgrau der in die x-Ebene projizierte Scan zu sehen und in dunkelgrau die berechnete Biegelinie. Die Biegelinie ist absichtlich etwas unterhalb der Scandaten gehalten, damit der Plot übersichtlich bleibt. Zu erkennen ist, dass die Gesamtabweichung der Scandaten, zusammengesetzt aus Messrauschen und systematischen Einflüssen, von 5–15 mm variiert. Es zeigt sich, dass der Balken um ca.8 mm mehr durchgebogen ist, als die Biegelinie erwarten lässt und dass der Balken nicht exakt waagrecht verbaut ist. Die rechte Seite des Balkens ist ca. 10 mm höher als die linke Seite. Zufälligerweise biegt

sich der Balken mit 31 mm exakt nach dem maximal zulässigen Wert für diese Balkenlänge nach der SIA- Norm 260 durch. Ebenso deutlich wird, dass sich der Träger nicht symmetrisch durchbiegt. Das könnte z. B. auf eine etwas einseitige Belastung oder auf einer leicht abweichenden Materialqualität zurückzuführen sein.



Abb. 2: Gegenüberstellung des in die x-Ebene projizierten Scans und der Form der Biegelinie (7 mm nach unten verschoben). Zu erkennen ist, dass sich der Balken tatsächlich etwas mehr durchbiegt als es die Biegelinie vorhersagt.

Da der Balken erst nach Gebäudefertigstellung gescannt wurde, kann keine Aussage in Bezug zur DIN 18202 getroffen werden, da, wie in Kapitel 2 beschrieben, die DIN 18202 ausdrücklich keine zeit- oder lastabhängigen Planabweichungen betrachtet. Der Anteil der lastabhängigen Verformung muss von der Durchbiegung abgezogen werden, um bewerten zu können, ob der Balken korrekt nach DIN 18202 – also nach den "anerkannten Regeln der Technik" – verbaut wurde. Deshalb wird die Durchbiegung erneut, nur anhand der Belastung aufgrund des Eigengewichts, berechnet ohne sonstige Lasten wie Verkehrs- und Schneelasten zu berücksichtigen. So wird der Zustand unmittelbar nach dem Einbau theoretisch wiederhergestellt. Die Differenz beider Berechnungen zeigt, dass sich der Balken ohne Belastung (nur durch Eigengewicht) 21 mm weniger durchbiegen würde, d. h. er wäre lediglich 10 mm durchgebogen.

Zur Kontrolle von Grenzabmaßen an der Unterseite von Decken oder Unterzügen wird die Zeile 4 der Tabelle 1 der DIN 18202 herangezogen. Laut dieser Zeile gilt für "Lichte Maße im Aufriss, z. B. unter Decken und Unterzügen" bei einem Nennmaß von 4 m (lichtes Maß bis an die Balkenunterseite) ein Grenzabmaß von \pm 30 mm. Nach Anbringung der Korrektur
hat sich der Balken zum Zeitpunkt nach der Montage nur um 10 mm durchgebogen. Damit wurde der Balken innerhalb der Toleranz, also nach "anerkannten Regeln der Technik", verbaut. Wäre das Aufmaß nicht DIN 18202 konform interpretiert worden, d.h. wäre die zusätzliche lastabhängige Durchbiegung nicht korrigiert worden, läge mit einer Durchbiegung von 31 mm eine Toleranzüberschreitung nach DIN 18202 vor. Die Toleranz nach der Schweizer SIA-Norm 260 wäre trotzdem eingehalten gewesen.

Für ein weiteres Beispiel wird wieder ein realer Scan eines Balkens herangezogen. Es handelt sich hierbei ebenfalls um einen weiß lasierten Leimbinderbalken, der zusammen mit dem Balken aus dem ersten Beispiel gescannt wurde.

In diesem Beispiel soll ein 19,4 m langen Leimbinderbalken analysiert werden, bei dem eine fiktive, nachträgliche Baumängelanzeige durch den Bauherrn an den zuständigen Bauträger eingegangen ist. Dem Bauherrn ist aufgefallen, dass sich der Balken "seltsam durchbiegt". Vom Balken ist nur noch ein Teil der Unterseite zu erkennen, da die abgehängte Decke den Balken bis zur halben Höhe verdeckt. Laut Angabe des Bauherrn sei von einem Einfeldbiegeträger auszugehen. Der Balken wird gescannt und wie oben beschrieben ausgewertet. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse.



Abb. 3: Gegenüberstellung des in die Ebene projizierten Scans und der Biegelinie. Scan und Biegelinie haben keinerlei Gemeinsamkeiten.

Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen eindeutig, dass bei korrekten Angaben des Bauherrn grobe Planabweichungen vorliegen. Der Balken biegt sich nicht wie aus der Statik zu erwarten durch. Bei einem Einfeldbiegeträger ist die zu erwartende Durchbiegung immer eine Parabel. Abbildung 3 zeigt in dunkelgrau mit Hilfe der berechneten Biegelinie an, wie sich ein Einfeldbiegeträger dieser Länge und Belastung durchbiegen sollte. Ganz offensichtlich biegt sich der reale Balken aber nicht parabelförmig durch.

In so einem Fall gibt es nur zwei mögliche Schlussfolgerungen:

- 1. Die Mängelanzeige des Bauherrn ist berechtigt, da der Balken bereits beschädigt mit dieser Form eingebaut wurde. Z. B. könnte sich der Holzbalken durch falsche (z.B. feuchte) Lagerung entsprechend verzogen haben. Laut Aussage von Doka Deutschland ist das die häufigste Ursache eines verzogenen Leimbinders. Das Verziehen eines Leimbinderbalkens nach dem Einbau kann ausgeschlossen werden, indem die Holzfeuchtigkeit an mehreren Stellen des Balkens gemessen wird. Ein derartiger Holzbalken verzieht sich nur, wenn die Holzfeuchtigkeit zu hoch ist. Zudem sollten, wenn möglich, auch noch die Stirnseiten eines verzogenen Leimbinderbalkens begutachtet werden, ob die übereinander geleimten Bretter korrekt (Faserrichtung etc.) und in der richtigen Materialqualität verbaut sind. Wie sich Hölzer in den verschiedenen Gütequalitäten in Bezug auf Rissbildung, Längskrümmung und Verdrehung verhalten, regelt die DIN 4074.
- 2. Die Mängelanzeige ist nicht berechtigt, da es sich nicht um einen Einfeldbiegeträger handelt.

In diesem konkreten Fall trifft der zweite Punkt zu. Es handelt sich nicht um einen Einfeldbiegeträger, sondern um ein Fachwerk. Abbildung 4 zeigt die vollständige Tragkonstruktion aus dem BIM- Modell des real gescannten Balkens. In diesem Fall kann der Balken also nicht mit der Biegelinie eines Einfeldträgers verglichen werden. Dieses Fachwerk lässt eine solche Biegelinie erwarten, wie sie der Scan gezeigt hat.



Abb. 4: Gut zu erkennen sind die typischen Felder eines Fachwerks. Die dünnen Bänder in den Feldern sind auf Zug belastet, die senkrechten Balken auf Druck.

In Abbildung 3 fällt noch auf, dass die Punkte zum Teil stark streuen. Das kommt daher, dass es sich um einen Massivholzbalken handelt, der sich im Laufe der Zeit verdreht hat, wodurch große Risse entstanden sind. Dieses Beispiel zeigt konkret, wie schwierig es sein kann, unregelmäßig tordierte Bauteile, wie z. B. einen Massivholzbalken, zu analysieren (vgl. Kapitel 5).

Das zweite Beispiel wird nicht bis zum Ende durchanalysiert, da es hier nur um die Vermittlung des Prinzips und der Möglichkeiten geht.

7 Automatisierte Erstellung eines verformungsgerechten Overlays

Für die Analyse in Kapitel 6 wird durch die in die Ebene projizierte Punktwolke (vgl. die Scandaten in Abbildung 2) der betrachteten Trägerunterseite ein Polynom vom Grad *n* mittels der Methode der Kleinsten Quadrate angepasst. Die Stirnseiten des modellierten Trägers bilden sich aus dem Trägerquerschnitt, der aus der statischen Berechnung bekannt ist (siehe Kapitel 6). Die Seitenflächen werden vom angepassten Polynom als Längskanten des Trägers begrenzt. Dadurch entsteht ein modellierter Balken, der die mittlere Durchbiegung der Balkenunterseite darstellt. Aus dem ersten Beispiel in Kapitel 6 ergibt sich ein parabelförmig durchgebogener Balken, der in Abbildung 5 dargestellt ist. Das Potential eines derartigen Overlays wurde in Kapitel 3 gezeigt.



Abb. 5: Automatisch modellierter Balken aus dem Analyseprozess der tatsächlichen Durchbiegung.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Das Paper verdeutlicht die Schwierigkeiten, Bauteile auf Baumängel zu untersuchen und geht dabei explizit auf die korrekte Anwendung der Norm in diesem Zusammenhang ein. Danach wird die Möglichkeit und das Potential gezeigt, welches sich durch ein Integrieren der detektierten Baumängel mittels Overlays in das BIM-Modell ergibt, weil es auf diese Weise möglich wird, Zusatzleistungen zu dokumentieren, die wiederum eine echte Grundlage für weitere Planungsleistungen bilden. Anschließend wird sowohl auf die Problematik der Erstellung aussagekräftiger Punktwolken eingegangen (die für die Detektion von Baumängeln entscheidend sind), als auch auf die Schwierigkeit des Erkennens und der Interpretation von Planabweichungen, da die Aussagekraft jeder Punktwolke durch Rauschen, sonstige Abweichungen und Datenlücken beeinträchtigt ist. Daraufhin wird gezeigt, wie eine bereinigte und aussagekräftige Punktwolke durch korrekte Anwendung der Norm auf Baumängel untersucht werden kann. Dabei werden zusätzliche Verformungen eines belasteten Bauteils mithilfe strukturmechanischer Prädiktion korrigiert. Die Ergebnisse dieses Analysevorganges können verwendet werden, um das verformungstreue Overlay des betroffenen Bauteils automatisiert zu erstellen.

Die automatische Erstellung des Overlays bietet zusätzliches Potential dadurch, dass nicht mehr nur ein einzelnes Polynom in den Scan angepasst wird, sondern mehrere bzw. Freiformflächen. Auf diese Weise wird es auch möglich, tordierte oder sonstige komplexere Bauteile zu modellieren.

Als nächsten Schritt gilt es, die tatsächliche Abweichung eines Scanners zu ermitteln um aussagekräftige Analysen machen zu können. Dazu hat HEINZ (2018) einen wichtigen Beitrag geleistet (vgl. Kapitel 5). Aber auch WUNDERLICH et al. (2013), die sich mit der Vergleichbarkeit von terrestrischen Laserscannern beschäftigen, oder LINDSTAEDT et al. (2012), die sich mit der gemeinsamen geometrischen Genauigkeitsuntersuchung verschiedener Scanner befassen. Auch STENZ et al. (2017) zeigen verschiedene Methoden zur Qualitätsuntersuchung von Scannern. Diese wertvollen Beiträge sind unter sehr guten Umweltbedingungen entstanden, weshalb es für die hier vorliegende Arbeit noch nötig wird, die Genauigkeit von Scannern im laufenden Betrieb einer Großbaustelle zu untersuchen. Dazu gehört auch der harte und ruppige Umgang mit dem Messequipment.

Es ist auch nötig, einen statistischen Test einzubauen, mit dem es möglich wird, aussagekräftig und juristisch stichhaltig belegen zu können, ob es sich bei der aufgedeckten Planabweichung um einen Baumangel handelt oder nicht. Da bei der hier gezeigten Vorgehensweise in den Scan des Einfeldbiegeträgers eine ausgleichende Parabel angepasst wird, kann aus den Ergebnissen der Ausgleichung, über die Standardabweichungen der Beobachtungen geprüft werden, ob es sich aller Wahrscheinlichkeit nach um eine Parabel handelt oder nicht (bei anderen statischen Systemen handelt es sich natürlich nicht um eine Parabel). Vorausgesetzt ist, das Unsicherheitsbudget des Scanners ist bekannt und systematische Fehler in den Daten sind ausgeschlossen (vgl. Kapitel 3–5). Die Information, ob die tatsächliche Durchbiegung der vorhergesagten Durchbiegung aus der Biegelinie ähnelt, hat großes Potential. Ist bei einem Einfeldträger aus dem Scan statistisch nachweisbar, dass der Balken parabelförmig durchgebogen ist, jedoch stärker als zulässig, so wurde der Balken entweder zu stark belastet oder zu schwach ausgeführt bzw. zu schwach dimensioniert. Auch die Verwendung der falschen Materialqualität oder ein Verarbeitungsfehler (z.B. zu frühes Ausschalen oder Entfernen der Sprieße bei Beton) sind denkbar. Ist der Balken jedoch statistisch nachweisbar nicht parabelförmig durchgebogen, so liegt der Schluss nahe, dass der Balken in der Herstellung beschädigt oder fehlerhaft hergestellt wurde (z.B. durch die Verwendung fehlerhafter Schalungselemente).

Literatur

BOSCHÈ, F. & BIOTTEAU, B. (2015): Laser Scanning and the Continuous Wavelet Transformation for Flatness Control. In: International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 2015 Proceedings of the 32th ISARC, OULU, Finland, S.1-7.
EGGER, M., HAUSKNECHT, K., LIEBLICH, T. & PRZYBYLO, J. (2013): BIM – Leitfaden für Deutschland, Information und Ratgeber, Endbericht. Im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumentwicklung (BBR), S.18 + S.40.

- ERTL, R. (2013): Toleranzen im Hochbau, Kommentar zur DIN 18202 Zulässige Maßabweichung im Roh- und Ausbau. Rolf Müller Verlag, Auflage 3, 24.Sept.2013. S.26.
- HEINZ, E., MEDIĆ, T., HOLST, C. & KUHLMANN, H. (2018): Genauigkeitsbeurteilung von Laserscans Anhand Realer Messobjekte. In: Terrestrisches Laserscanning 2018 (TLS 2018). DVW-Schriftenreihe, Band 93, 41–56. Wißner Verlag, Augsburg.
- HEUNECKE, O. (2014): Eignung geodätischer Messverfahren zur Maßkontrolle im Hochbau. In: zfv 4/2014 Fachbeitrag, S.241-251.
- IGL (2015): Scan der Kirche St. Ägidius in Gelchsheim. Ingenieurgesellschaft Gemmer und Leber mbH., 23.07.15.
- KADEN, R., CLEMEN, C., SEUß, R., BLANKENBACH, J., BECKER, R., EICHHORN, A., DONAUBAUER, A., KOLBE T.H. & GRUBER, U. (2018): Leitfaden Geodäsie und BIM. DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V. und Runder Tisch GIS e.V. Version 1.2 vom 01.Oktober 2018. S.18-19+ S.70+S.73-75.
- LINDSTAEDT, M., KERSTEN, T., MECHELKE, K. & GRAEGER, T. (2012): Prüfverfahren für terrestrische Laserscanner – Gemeinsame geometrische Genauigkeitsuntersuchungen verschiedener Laserscanner an der HCU Hamburg. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2012, Wichmann, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 264–275.
- LINGEL, A. (2017): Bestandsaufnahme vom 26.Juli 2017, Schnitt 4.
- NBIMS (2012): National Institute of Building Science. United States National Building Information Modeling Standard, Version 2.0. www.nationalbimstandard.org/faq.php#faq1
- OHLMANN- LAUBER, J. (2012): Filterungsansaätze zur Bestimmung flächenhafter Deformationen aus TLS- Daten. In: Tagungsband DVW- Seminar, TLS2012.
- RÖSLER, J., HARDERS, H. & BÄKER, M. (2006): Mechanisches Verhalten der Werkstoffe. 2. durchgesehene und erweiterte Auflage, B.B. Teubner Verlag, GWV Fachverlag GmbH, Wiesbaden 2006, Kap.2.
- SCHMIDT-MORSBACH, M. (2019): VOB/B. Homepage der Kanzlei Schmidt-Morsbach & Partner. www.rasmp.de/bau-und-immobilienrecht-berlin/privates-baurecht/vob-baurecht-sicherheit (17.09.19).
- SCHRÖDER, C. (2019): Konstruktionsmechanik. Lehrmaterial, Fachhochschule Gelsenkirchen. S.83-89. www.w-hs.de/fileadmin/public/dokumente/erkunden/fachbereiche/FB2_ElaN/FB2_ElaN_PT/Lehre/FuCAD/formeln-fest3.pdf (18.09.19).
- STENZ, U., HARTMANN, J., PAFFENHOLZ, J.-A. & NEUMANN, I. (2017): A Framework Based on Reference Data with Superordinate Accuracy for the Quality Analysis of Terrestrial Laser Scanning-Based Multi-Sensor-Systems. In: Sensors 2017, 17(8), 1886, DOI: 10.3390/s17081886.
- THURNER, C. & WUNDERLICH, T. (2015): Verformungsgerechtes Aufmaß in einem BIM. In: Tagungsband DVW- Seminar, TLS2015.
- VALERO, E. & BOSCHÈ, F. (2016) Automatic Surface Flatness Control using Terrestrial Laser Scanning Data and the 2D Continuous Wavelet Transformation. In: 33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC 2016), Centre of Excellence for Sustainable Building Design, Heriot- Watt University, UK.
- WEIßENFELS, G., KLING, W., MEIßNER, B., REHM, R., SCHNEIDER, M., SEUL, J., ROHR-SUCHALLA, K., VOGEL, O. & WESTPHAL, D. (2019a): Wann liegt überhaupt ein Mangel vor? Homepage von conjus GmbH. www.baurecht-ratgeber.de/baurecht/gewaehr/content_01.html (17.09.19).

- WEIBENFELS, G., KLING, W., MEIBNER, B., REHM, R., SCHNEIDER, M., SEUL, J., ROHR-SUCHALLA, K., VOGEL, O. & WESTPHAL, D. (2019b): Mangel. Homepage von conjus GmbH. www.baurecht-ratgeber.de/baurecht/gewaehr/content_05_01.html#11 (17.09.19).
- WUNDERLICH, T., WASMEIER, P., OHLMANN-LAUBER, J., SCHÄFER, T. & REIDL, F. (2013): Objektivierung von Spezifikationen Terrestrischer Laserscanner – Ein Beitrag des Geodätischen Prüflabors der Technischen Universität München. In: Blaue Reihe des Lehrstuhls für Geodäsie, Technische Universität München, Heft 20, 02/2013.

ProTeL – Kinematische Bestandserfassung und Lichtraum-Analyse für die Münchner U-Bahn

Ulrich VÖLTER und Markus FEDERMANN

1 Ausgangssituation und Projektdarstellung

1.1 Die Münchner Verkehrsgesellschaft, Betreiberin der Münchner U-Bahn

Ein Grund für den Erfolg Münchens ist das gut ausgebaute und funktionierende öffentliche Personennahverkehrssystem (ÖPNV), das von der Münchner Verkehrsgesellschaft mbH (MVG), dem größten rein kommunalen Verkehrsunternehmen in Deutschland, betrieben wird.

Die MVG wurde als hundertprozentige Tochter der Stadtwerke München GmbH (SWM) gegründet und hat seit 2002 die Verantwortung für U-Bahn, Bus und Tram. Über 650 U-Bahnwagen, 132 Trams (Niederflur) und rund 500 Busse befördern jährlich fast 600 Mio. Fahrgäste, täglich also rund 1,6 Mio. Menschen.

Die Geschichte der U-Bahn in München begann 1971. Das Gesamtnetz der U-Bahn hat eine Streckenlänge von rund 100 km. Die derzeit 8 U-Bahn-Linien fahren ca. 100 Bahnhöfe und 2 Betriebshöfe an. Die letzten Jahre waren geprägt vom Kauf neuer U-Bahn-Fahrzeuge, von Taktverdichtungen und der Sanierung einiger großer Bahnhöfe (Marienplatz, Hauptbahnhof, Münchner Freiheit, Sendlinger Tor).

1.2 Projektbeschreibung und -umfang

Projektbeschreibung

Die Projektbezeichnung ProTeL steht für "<u>Pro</u>zesse und <u>Te</u>chnologien zur Prüfung des <u>L</u>ichtraums". Im Rahmen des Projekts sollen sowohl eine zukunftsfähige Technologie zur Lichtraumprüfung eingeführt als auch die zugehörigen operativen Prozesse definiert werden. Diese Technologien und Prozesse sollen die SWM in die Lage versetzen, stets nachzuweisen, dass der geforderte Lichtraum zur Verfügung steht. Dies ist etwa relevant für die Zulassung neuer U-Bahn-Züge und für die Lichtraum-Überprüfung als Teil der Gleisfreimeldung unmittelbar nach Baumaßnahmen in den U-Bahn-Tunneln.

Im Rahmen eines Vorprojekts der MVG stellte sich das kinematische Laserscanning als die am besten geeignete Technologie heraus. Während der Anforderungserhebung wurde deutlich, dass mittels Laserscan gewonnene Daten auch für weitere Anwendungszwecke wie Prüfung der Gleisqualität und bedingt auch für die Identifikation von Bauwerksschäden nutzbar sind.

Projektumfang

- Durchführen eines Pilotversuches zur Validierung der Ergebnisse,
- Aufbauen und Einmessen eines Festpunktfeldes im gesamten Streckennetz,
- Befahren, Vermessen und Auswerten des gesamten Streckennetzes inkl. aller Abstell-, Wende- und Betriebsanlagen
- Aufbauen einer Lichtraumdatenbank (Eintragen aller lichtraumrelevanten Objekte)

Netzinformationen

- Anzahl Bahnhöfe: 100
- Anzahl Betriebsanlagen: 3
- Anzahl Weichen: 490
- Gesamtgleislänge Betriebsstrecken: 196 916 m
- Gesamtgleislänge Abstell- und Wendeanlagen: 14 160 m
- Gesamtgleislänge Betriebsanlagen: 22 800 m



Abb. 1: Übersicht über das Streckennetz der Münchner U-Bahn (Quelle: SWM 2016)

Rahmenbedingungen

Sämtliche Arbeiten dürfen den laufenden U-Bahnbetrieb nicht beeinflussen. Im Gleisbereich kann nur während der nächtlichen Betriebspause zwischen 02:00 und 04:00 Uhr gearbeitet werden. Auf betriebliche Besonderheiten muss auch kurzfristig reagiert werden.

2 Anforderungen – Leistungsbeschreibung

2.1 Festpunktfeld

Ziel war es, ein neues homogenes Festpunktfeld über das komplette Streckennetz aufzubauen und über oberirdische Punkte an das übergeordnete amtliche Referenznetz mit Lagebezug ETRS89 anzuschließen.

Die Festpunkte waren vom Auftraggeber in Vorbereitung auf das Projekt bereits als Wandbolzen mit M8-Innengewinde vermarkt worden. In jedem Bahnhof sind mindestens 10 Festpunkte, in den Tunneln sind beidseitig Punkte im Stations-Abstand von 50 m vermarkt.

2.2 Laserscanning und Gleisvermessung

Die Gleisaufnahmen und 3D-Punktwolken dienen als Grundlage für die anschließende Lichtraum-Analyse und den Aufbau der Lichtraum-Datenbank. Aufgrund der engen Platzverhältnisse in den Tunneln wird großer Wert auf hohe Genauigkeiten der ermittelten Geometrien gelegt. Sämtliche Aufnahmen sind relativ zum neu erstellten Festpunktfeld zu georeferenzieren. Sie bilden die Datenbasis für eine neue Soll-Trasse und die nachfolgende Lichtraum-Analyse.

Auch senkrecht zum Gleis stehende Schilder und Tafeln sollen sichtbar und möglichst auch lesbar sein. Daher wird eine sehr hohe Punktdichte von 5 mm gefordert. Zudem ist definiert, dass auch der Raum zwischen den Schienen und die Schienen selbst abschattungsfrei erfasst werden sollen. Die geforderten Genauigkeiten sind: 5 mm in der Höhe und quer zur Gleisachse, 15 mm in Stationsrichtung.

2.3 Trassierung

Auf Basis der mittels Laserscanning erfassten Ist-Gleislage und Zwangspunkten ist eine Soll-Trasse festzulegen. Als Grundlage stehen die lokal definierten Trassierungselemente der Original-Trassierung zur Verfügung. Als Ergebnis sind Trassenpläne sowie Soll-Ist-Vergleiche zu erstellen.

2.4 Lichtraum-Analyse

Die Lichtraum-Analyse ist das Hauptziel des Projekts. Es ist zu zeigen, dass der vorhandene Lichtraum den Erfordernissen eines sicheren Betriebs genügt und dieser Nachweis so zu führen, dass er den Forderungen der Technischen Aufsichtsbehörde gerecht wird. Dafür muss die georeferenzierte 3D-Punktwolke auf die neu ermittelte Soll-Trasse transformiert und mit dem gleitenden Lichtraumprofil verglichen werden. Als Ergebnis sind vollflächige Lichtraumkarten zu erstellen, in denen etwaige Lichtraumeinschränkungen farblich markiert dargestellt sind. Außerdem sollen etwa vorhandene Lichtraumeinschränkungen detektiert, klassifiziert und in einer Lichtraum-Datenbank dokumentiert werden.

Basis ist der sogenannte "dynamische Lichtraum": an jeder Stelle der Strecke ist die Lichtraumumgrenzungslinie inklusive aller vertikalen und horizontalen Zuschläge gemäß den Vorgaben der MVG berechnet. Berücksichtigt sind insbesondere horizontale und vertikale Fahrzeugausschläge infolge Gleisbögen, Überhöhungen und Neigungswechseln.

2.5 Lichtraum-Datenbank

Die aktuellen Lichtraumverhältnisse sollen analysiert und dokumentiert werden. Dazu ist eine Lichtraum-Datenbank aufzubauen, zu befüllen und der MVG bereitzustellen. Die Lichtraum-Datenbank dient der Verwaltung aller lichtraumrelevanten Objekte. Die Lichtraum-Datenbank soll die MVG dabei unterstützen, die Beseitigung der Engstellen zu planen und zu dokumentieren.

Die Lichtraum-Datenbank soll Funktionen bereitstellen, um Lichtraumeinschränkungen zu suchen, zu visualisieren, deren Bearbeitung zu planen und die Behebung zu dokumentieren.

3 Auftragsvergabe

Die Grunder Ingenieure AG, Burgdorf, Schweiz hat uns, die intermetric GmbH, Stuttgart, gewinnen können, in derselben bewährten Konstellation wie beim Auftrag "Einbau der Bahntechnik im Gotthard Basistunnel" auch beim Projekt ProTeL anzubieten. Gemeinsam ist es unseren beiden Unternehmen gelungen, den anspruchsvollen Auftraggeber von unserer Leistungsfähigkeit zu überzeugen.

Für die kinematische Erfassung konnten wir mit dem SiTrack:One von Leica Geosystems ein Basissystem finden und dieses mit dessen Entwicklerteam so weiterentwickeln, dass die erzeugte Punktwolke den hohen Anforderungen des Auftraggebers genügt. Dies war nötig, da am Markt kein anderes, gleich leistungsfähiges System verfügbar war.

4 Projektdurchführung

4.1 Festpunktfeld

Für das Bestimmen der Festpunktfeldkoordinaten musste ein detailliertes Messkonzept vorgelegt werden, mit dem die zu erwartende Genauigkeit durch eine Netzsimulation nachgewiesen wurde. Im Rahmen des Pilotprojektes auf einem 1,5 km langen Abschnitt konnte gezeigt werden, dass mit dem vorgelegten Messkonzept die geforderten Genauigkeiten auch praktisch erreicht werden.



Abb. 2: Das für das Projekt ProTeL modifizierte Messsystem SiTrack:One

Das Messkonzept orientiert sich an unserer langjährigen Erfahrung in der Tunnelvermessung. Zum Einsatz kommen Präzisionsreflektoren Leica GPH1P und ein Tachymeter vom Typ Leica TS 60. Gemessen wird mit dem Programm "Automatische Satzmessung", so dass eine hohe Performance ohne die Gefahr von fehlerhaften Doppeleingaben erreicht wird. Obertägig haben wir an jeder Station drei für GNSS-Messungen geeignete Punkte vermarkt und deren Koordinaten im übergeordneten Referenznetz mittels Leica GNSS-Empfängern und Korrekturdaten aus dem SmartNet bestimmt. Den Bezug zwischen diesen obertägigen Punkten und Punkten auf der Gleisebene stellen wir in den Nachtstunden vor der Sperrpause mittels Tachymetermessungen durch die öffentlichen Zugänge her. Die Verbindungen zwischen den Bahnhöfen können nur durch die U-Bahn-Tunnel, also während der etwa zweistündigen nächtlichen Sperrpause gemessen werden. Dabei werden alle von der MVG vorab vermarkten Punkte und, wo für die Verknüpfung nötig, weitere Punkte aufgemessen.

Die Koordinaten ermitteln wir anschließend aus diesen GNSS- und TPS-Messungen mit Neptan in einer durchgehenden Netzausgleichung für jede U-Bahn-Strecke. Die Ergebnisse werden vom Geodätischen Prüflabor der Technischen Universität München verifiziert.

4.2 Kinematisches Laserscanning

Wir erfassen die 3D-Punktwolke mit kinematischem Laserscanning, also in Bewegung. Der modifizierte SiTrack:One besteht aus einem Gleismesswagen mit einer Vielzahl von Sensoren. Die wichtigsten sind:

• Zwei optische Odometer (DMI – Distance Measuring Instrument). Sie messen die Bewegung des Wagens in Stationsrichtung.

- Eine Inertialmesseinheit (IMU). Sie misst Beschleunigungen in und Drehraten um drei senkrecht zueinander stehende Achsen. Bei bekannter, ruhender Startposition und Startorientierung lässt sich das Anfangswertproblem lösen und somit der Ort und die Orientierung des Wagens zu jedem Zeitpunkt der Messfahrt ableiten.
- Ein Neigungsmesser zur Bestimmung der Querneigung / Überhöhung.
- Ein Profil-Laserscanner Z+F Profiler 9012, der so angeordnet ist, dass der Messstrahl in keiner Richtung auf das Gehäuse des Scanners oder den Messwagen trifft. Er misst in jeder Sekunde 200 Profile. Wird der Wagen mit 1 m/s fortbewegt, überstreichen die Messpunkte den gesamten Tunnel in einer Spirale mit 5 mm Profilabstand. Zusammen mit den Informationen aus der Wagengeometrie und der IMU ergibt sich eine 3D-Punktwolke.
- Vier Keyence Schienenscanner. Diese hochgenauen, hochfrequenten Laserscanner tasten die Schienen präzise ab, um den Schienenverschließ ableiten zu können.

Wie alle Sensoren, arbeitet auch die IMU nicht fehlerfrei. Daraus ergeben sich schnell erhebliche Abweichungen bei der Bestimmung von Ort und Orientierung, die sogenannte Drift. Daher ist es unabdingbar, IMUs mittels externer Referenzinformationen zu stützen. Im Freien lassen sich solche Stützungen oft durch GNSS-Messungen in ausreichender Qualität erreichen. Im U-Bahn-Tunnel ist dies natürlich nicht der Fall.

Der Arbeitsablauf beim verwendeten Messsystem ist daher wie folgt: Der zu erfassende Tunnelabschnitt wird in Fahrten von jeweils 800 m Länge eingeteilt. Im Bereich einer Fahrt werden an den Festpunkten im Abstand von 50 m Kugeln mit einem Durchmesser von 120 mm montiert. Der Wagen wird an der Start- und Endposition im übergeordneten Referenzsystem in Ruhe eingemessen. Daraus ergeben sich Startposition und –orientierung, aber auch die Zielposition und –Zielorientierung, also eine Überbestimmung des Anfangswertproblems. Während der Fahrt, dem kinematischen Teil der Messung, werden der gesamte Tunnel und mit ihm die Kugeln vom Laserscanner erfasst.

4.3 Auswertung einer kinematischen Messfahrt

Während einer Messfahrt mit dem SiTrack:One wird eine Vielzahl von Dateien erzeugt, die Messdaten, Zeit-, Synchronisations- und Konfigurationsinformationen enthalten. Diese werden in der Auswerte-Software SiSynchro zusammen mit weiteren Informationen zur Georeferenzierung in mehreren Schritten zur georeferenzierten Punktwolke ausgewertet.

Systematische Ablage der Dateien im Projektverzeichnis

Bei jeder Messfahrt erzeugt der SiTrack:One Dateien von Zeitgeber, inertialer Messeinheit, den beiden Odometern und dem Überhöhungsmesser. Die Messdaten der vier Schienenkopfscanner und vom Profil-Laserscanner werden in den Originalformaten der Hersteller gespeichert. Für die Auswertung wird zusätzlich die Konfigurationsdatei des Messwagens benötigt. Diese Dateien werden im Projektverzeichnis datums- und fahrtorientiert abgelegt.

Aus den Tachymetermessungen zu Start- und Endpunkt werden die Koordinaten ermittelt und in einem definierten ASCII-Format bereitgestellt. Ebenso werden die Referenzpunkte für den entsprechenden Abschnitt als ASCII-Datei im Projektverzeichnis abgelegt.

Ermitteln der Näherungstrajektorie

Vor der eigentlichen Auswertung werden die Laserscan-Daten in ein von der Software schnell zu lesendes Format konvertiert. Dies hat den Vorteil, dass dieser etwas länger dauernde Prozess nur einmal je Messfahrt ausgeführt werden muss und dass grundsätzlich unterschiedliche Laserscanner verwendet werden können. Die Fahrtgeschwindigkeit wird vor allem über die optischen Odometer (DMI-Sensoren) ermittelt. Da sie redundant ausgelegt sind, stützen sich die Messergebnisse gegenseitig.

Nun wird aus der Start- und Endposition sowie den Daten aus inertialer Messeinheit und den DMI-Sensoren eine erste Näherung der Trajektorie berechnet. Als Trajektorie werden der Verlauf des mathematischen Wagenzentrums im Projektkoordinatensystem und die jeweilige Orientierung des Wagens bezeichnet.

Verfeinern der Trajektorie

Anhand der in der Konfigurationsdatei abgelegten Wagengeometrie und der Synchronisationsinformation werden nun die Profil-Laserscanmessungen mit der genäherten Trajektorie verknüpft und somit zu einer genäherten georeferenzierten Punktwolke.

In der genäherten Punktwolke sind die während der Messfahrt mit Kugeln besetzten Referenzpunkte klar zu identifizieren. Die Positionen dieser Kugeln in der Punktwolke weichen von den wahren Positionen naturgemäß ab. Ihre wahren Positionen wurden im Zuge der Netzmessungen mit sehr hoher Genauigkeit bestimmt. Also können diese beiden Informationen – die aus der Punktwolke bestimmten Koordinaten der Referenzpunkte und deren Koordinaten aus der Netzmessung – verwendet werden, um die Trajektorie zu verbessern.



Abb. 3: Näherungsweise bestimmte Punktwolke mit Referenzpunkt im Vordergrund an der Bahnsteigkante

Das Ergebnis sind eine verbesserte Trajektorie des Messwagens und eine entsprechend präzise georeferenzierte Punktwolke.

Zum Abschluss werden Trajektorie und Punktwolke noch so beschnitten, dass sie nahtlos und überlappungsfrei an die benachbarten Fahrten anschließen, damit sich eine durchgehende Trajektorie und Punktwolke für die gesamte Strecke ergibt.

4.4 Trassierung

Die Trajektorie und die Punktwolke sind die Basis für die Trassierung: Aus der Trajektorie werden im Abstand von 1 m Gleisachspunkte und Querneigungen (Überhöhungen) abgeleitet, aus der Punktwolke ergeben sich Zwangspunkte. Die Gleisachspunkte und Überhöhungen entsprechen den bei einer traditionellen Gleisbestandsaufnahme mittels Tachymeter ermittelten Messdaten, wenngleich in deutlich dichterem Abstand. Der nachfolgende Prozess der Trassierung kann also identisch ablaufen wie im klassischen Fall.

Nach einer ersten, allein auf Basis der Gleisachspunkte und Überhöhungen ermittelten Trasse, wird die Punktwolke auf die Trasse transformiert, um festzustellen, ob Lichtraumeinschränkungen vorliegen.

4.5 Lichtraum-Analyse

Für die Lichtraum-Analyse wird das sogenannte dynamische Lichtraumprofil anhand der neu bestimmten Soll-Trasse inklusive aller Zuschläge automatisch berechnet. Für jeden der Punkte aus der 3D-Punktwolke wird dann der Abstand zu diesem "dynamischen" Lichtraumprofil bestimmt. Entsprechend einer Farbtabelle wird der Punkt dann eingefärbt und in einer Abwicklung dargestellt. Diese Abbildungen werden Lichtraumkarten genannt.

Das Identifizieren und Klassifizieren der Objekte erfolgt durch einen menschlichen Betrachter. In regelmäßigen Abständen und an den Stellen der identifizierten Lichtraumeinschränkungen sind bemaßte Profile zu zeichnen. Diese Lichtraumprofile werden in der Lichtraum-Datenbank erfasst.

4.6 Schienenverschleiß-Analyse

Die Schienenprofilscanner messen das Schienenprofil beider Schienen je von links oben und rechts oben, so dass sich ein im Bereich des Schienenkopfes und Schienenfußes vollständiges Messprofil ergibt. Die Wiederholgenauigkeit des Lasers ist mit 5 µm in z-Richtung und 60 µm in x-Richtung angegeben. Die Abtastfrequenz liegt über 1 kHz. Der Schienenverschleiß wird aus dem Vergleich des gemessenen Profils zum Soll-Profil ermittelt und im Projekt ProTeL im Abstand von 50 cm in die Projektdatenbank geschrieben.



Abb. 4: Eine Lichtraumkarte - Farblich markiert sind Objekte in der Nähe (grün) oder innerhalb (rot) des Lichtraumprofils

Literatur

SWM (2016): Ausschreibungsunterlagen des Projekts ProTeL

Untersuchung von Hauptreflektordeformationen an VGOS-Teleskopen mittels UAS

Cornelia ESCHELBACH, Michael LÖSLER, Rüdiger HAAS und Ansgar GREIWE

Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung durch anonyme Fachkollegen als "peer reviewed paper" angenommen.

1 Einleitung

Das Verfahren zur Interferometrie auf langen Basislinien (VLBI) zählt zu den geodätischen Raumtechniken, die zur Realisierung eines erdfesten geodätischen Bezugsrahmens (bspw. International Terrestrial Referenz Frame, ITRF) herangezogen werden. So haben VLBI-Ergebnisse Einfluss auf den Netzmaßstab des ITRF. Radioteleskope bilden dabei die erdfesten Sensoren, die sich durch Drehungen um eine Primärachse und eine Sekundärachse auf Radioquellen, z. B. Quasare, ausrichten lassen. Entspricht die primäre bzw. sekundäre Achse des Radioteleskops der Azimut- bzw. Elevationsachse, so handelt es sich um eine Azimut-Elevation-Montierung, die o. B. d. A. im Folgenden vorausgesetzt sei. Quasare sind sehr weit von der Erde entfernte extragalaktische Objekte, die einen quasi-inertialen himmelsfesten Bezugsrahmen realisieren. Durch Korrelation der von mehreren Radioteleskopen gleichzeitig aufgezeichneten Radiosignale der Quasare lassen sich u. a. die interkontinentalen Raumstrecken zwischen den Teleskopen mit Millimetergenauigkeit ableiten.

Im Rahmen der Agenda VLBI2010 wurden durch NIELL et al. (2006) Spezifikationen für eine neue Generation von Radioteleskopen formuliert. Inzwischen wurden bspw. in Europa, den USA und Australien die ersten VGOS-Teleskope (VLBI Global Observing System) errichtet und in Betrieb genommen. Das Design dieser neuen Teleskope zeichnet sich im Vergleich zu den bisher für VLBI verwendeten konventionellen Teleskopen vor allem durch eine stabilere und kompaktere Bauweise und eine deutlich erhöhte Ausrichtungsgeschwindigkeit aus. Die Erweiterung des internationalen VLBI-Netzes durch diesen neuen Teleskoptyp soll auch zu der durch GGOS (Global Geodetic Observing System) angestrebten Steigerung der Positionsgenauigkeit im globalen geodätischen Bezugsrahmen führen (ROTHACHER et al. 2009). PETRACHENKO et al. (2009) spezifizieren die Mindestanforderungen für VGOS-Teleskope, um die Systemsensitivität zu erhöhen und die angestrebte Positionsgenauigkeit von 1 mm im globalen terrestrischen Referenzrahmen zu erreichen. Hierzu zählt auch ein stabiler bzw. modellierbarer Strahlengang über den gesamten Elevationsbereich des Teleskops, sodass für alle Teleskoporientierungen die Signalwegänderungen 300 µm (RMS) nicht überschreiten. Im Gegensatz zu konventionellen Radioteleskopen, die eine Brennweitenvariation von z. T. mehreren Zentimetern aufweisen (SARTI et al. 2009), liegen die zu erwartenden Deformationen aufgrund der kompakten Bauweise für VGOS-Teleskope im unteren Millimeterbereich.

Teleskope sind trotz ihrer hohen Fertigungsqualität nie vollständig unelastisch und invariant. Alle Bauelemente können Veränderungen durch eine Vielzahl von Einflüssen erfahren. Durch die gesteigerte Genauigkeit von VLBI-Radioteleskopen und deren Empfangseinheiten

411

rücken nun verstärkt Einflüsse in den Vordergrund, die bisher noch nicht oder nicht ausreichend genau quantifiziert wurden. Dies gilt sowohl für Teleskope der konventionellen als auch für Teleskope der neuen Generation. So führen Temperaturänderungen zu einer (partiellen) thermischen Ausdehnung der Teleskopstruktur, die durch ein Korrekturmodell in der VLBI-Datenanalyse zu berücksichtigen ist (HAAS et al. 1999, WRESNIK et al. 2007). Weiterhin wirken sich Lastfalländerungen, die durch die Verlagerung des Eigengewichts der Antenne während des VLBI-Messprogramms den Antennenbrennpunkt verändern, auf die Struktur und damit auf die Empfangseigenschaften der Teleskope aus. Messtechnische Untersuchungen von Hauptreflektoren konventioneller VLBI-Radioteleskope zeigen ein signifikantes, elevationsabhängiges Eigenverformungsverhalten, das u. a. Variationen der Brennweite von z. T. mehreren Zentimetern hervorruft (SARTI et al. 2009, BERGSTRAND et al. 2019). Unkompensiert führen diese Verformungen zu einer systematischen Verzerrung der geschätzten Stationskoordinate, die u. U. den globalen Netzmaßstab des ITRF verfälscht.



Abb. 10: Nordöstliches Onsala Twin Teleskop (ONSA13NE) mit Hexacopter während der Befliegung in der 0° Elevationsposition.

Für diesen Beitrag wurde erstmals das elevationsabhängige Verformungsverhalten eines modernen, kompakten VGOS-spezifizierten VLBI-Radioteleskops untersucht. Als Untersuchungsobjekt diente eines der 2017 in Betrieb genommenen Onsala Twin Teleskope (OTT; vgl. Abbildung 1) am Onsala Space Observatory in Schweden, die der neuen VGOS-Bauart entsprechen (HAAS 2013). Die beiden baugleichen Teleskope stehen mit einem Abstand von etwa 70 m zueinander an der Küste des Kattegat, 40 km südlich von Göteborg auf schwedischem Festland. Der Hauptreflektor hat die Form eines sogenannten Ring-Fokus-Paraboloids und besitzt einen Durchmesser von 13,2 m. Kapitel 2 gibt den Modellierungsansatz für diese Antennenform wieder. Aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen für diese VGOS-Radioteleskope erfolgt die Datenerhebung photogrammetrisch. Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen, die einen Kran erfordern, erfolgte die photogrammetrische Datenerhebung zeiteffizient durch ein Unmanned Aircraft System (UAS). Kapitel 3 geht deshalb auf das Messverfahren und die Rahmenbedingungen beim Einsatz eines UAS ein. Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Auswertung der Bilddaten und in Kapitel 5 werden die Ergebnisse dargestellt und erläutert. Der Beitrag wird mit einem Fazit abgeschlossen.

2 Parametrisierung der Antennenoberfläche

Die neue Generation von VLBI-Teleskopen weist eine deutlich höhere Rotationsgeschwindigkeit zur Ausrichtung des Reflektors auf. Damit einher geht eine Verkleinerung des Hauptreflektordurchmessers, die zwangsläufig zu einer Reduktion der Signalstärke im Vergleich zu konventionellen Teleskopen mit größerer Apertur führt. Bei konventionellen Teleskopen mit rotationssymmetrischem Paraboloid befinden sich der Subreflektor und die Empfangseinheit in der optischen Achse. Dies verursacht Abschattungen auf dem Hauptreflektor und führt somit zu Signalabschwächungen (CUTLER 1947). Diese Signalabschwächung wird zunehmend signifikant, wenn die Antennenapertur verringert wird. Die Oberfläche der meisten VLBI-Teleskope der neuen Generation besitzt die Form eines rotationssymmetrischen Ring-Fokus-Paraboloids. Vereinfacht lässt sich diese Form als ein rotationssymmetrisches Paraboloid beschreiben, dessen Scheitelpunkt durch einen Kreis ersetzt wurde. Die einzelnen Parabeläste werden radial nach außen an die Kreislinie verschoben (vgl. Abbildung 2). Weder Subreflektor noch Empfangseinheit befinden sich so im eigentlichen Reflexionsbereich des Paraboloids.

Diese neue Form des Hauptreflektors hat zur Konsequenz, dass die einfallenden Signale sich nicht ohne Umlenkung an einem Subreflektor in einem Punkt bündeln lassen. Ein einzelner Brennpunkt wie bei der konventionellen Bauweise existiert nicht. Stattdessen wird dieser aufgeweitet zu einem im Raum liegenden Ring im Abstand der ursprünglichen Brennweite, weshalb diese Form des Hauptreflektors auch als Ring-Fokus-Paraboloid bezeichnet wird.

Zur mathematischen Darstellung des Paraboloids bezieht man sich auf die Normalform, auch kanonische Form genannt, also auf die eindeutig definierte Lage dieser Geometrie im Raum. Der Scheitelpunkt bzw. der Kreismittelpunkt fällt in den Koordinatenursprung und die Rotationsache bzw. Symmetrieachse fällt mit der z-Komponente des Koordinatensystems zusammen. Oberflächenpunkte, die zu einem rotationssymmetrischen Ring-Fokus-Paraboloid zählen, erfüllen folgende geschlossene mathematische Beschreibung:

$$a^{2}\left(\left(x_{i}-r_{i}n_{x,i}\right)^{2}+\left(y_{i}-r_{i}n_{y,i}\right)^{2}\right)=z_{i}.$$
(1)

Hierbei steuert der Parameter *a* die Öffnung des Paraboloids bzw. der Parabeläste und kann für die Ableitung der Brennweite $f = \frac{1}{4a^2}$ verwendet werden.

Der normierte Vektor $\mathbf{n}_i^{\mathrm{T}} = (n_{x,i} \quad n_{y,i} \quad 0)$ in Verbindung mit seiner Skalierung um den Betrag *r* dient dabei zur radialen Verschiebung des Punktes $\mathbf{p}_i^{\mathrm{T}} = (x_i \quad y_i \quad z_i)$ rechtwinklig zur Rotationsachse mit

$$n_{x,i} = \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}},$$
(2)

$$n_{y,i} = \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}.$$
(3)

Dies entspricht der Verschiebung der Parabeläste von der Kreislinie zum Scheitelpunkt des Paraboloids. Somit verbleiben nur die Parameter a und r als zu schätzende Modellparameter. Das Parameterset kann erweitert werden, indem das Paraboloid nicht rotationssymmetrisch, sondern mit elliptischem Außenrand modelliert wird:

$$a^{2}(x_{i} - r_{i}n_{x,i})^{2} + b^{2}(y_{i} - r_{i}n_{y,i})^{2} = z_{i}.$$

$$(4)$$

In diesem Fall führen die beiden Parameter a und b zu den beiden Extremwerten der Brennweite f_a und f_b . Weitere Variationen in der Modellierung sowie eine detaillierte Beschreibung können LöSLER et al. (2017, 2019) entnommen werden.



Abb. 11: Varianten paraboloidischer Hauptreflektorformen in kanonischer Form; links oben: rotationssymmetrisches Paraboloid, links mittig: rotationssymmetrisches Ring-Fokus-Paraboloid, links unten elliptisches Paraboloid; rechts: elliptisches Ring-Fokus-Paraboloid mit den beiden Extremwerten der Brennweite f_a und f_b ; ergänzt wurden in den Grafiken die Brennlinie (schwarz, durchgezogen) und parallel einfallende Signalwellen (grau, gestrichelt) sowie weitere Hilfslinien.

Um eine Überparametrisierung zu vermeiden, sollte nur in begründeten Ausnahmen auf ein elliptisches Ring-Fokus-Paraboloid zurückgegriffen werden. Den Regelfall bildet das rotationssymmetrische Ring-Fokus-Paraboloid. Liegt das zu bestimmende Paraboloid nicht in kanonischer Form vor, kann es durch eine 3D-Transformation in diese überführt werden.

Zur Bestimmung der implizit in Gleichung (1) bzw. Gleichung (4) beschriebenen Modellparameter $\mathbf{x}_{P}^{T} = (a \ r)$ bzw. $\mathbf{x}_{P}^{T} = (a \ b \ r)$ ist ein Errors-in-Variables-Modell (EIV-

Modell) zu verwenden. Im gleichen Schritt sind auch die unbekannten Transformationsparameter $\mathbf{x}_T^T = (X_0 \ Y_0 \ Z_0 \ \xi_X \ \xi_Y \ \xi_Z)$ zu ermitteln. Drei Translationen und drei Eulersche Drehwinkel überführen die Geometrie in ihre kanonische Form. Ein geeignetes Verfahren zur Schätzung der Parameter ist die Sequentielle Quadratische Programmierung, die für die Optimierung nichtlinearer Zusammenhänge empfohlen wird (NOCEDAL & WRIGHT 2006).

3 Photogrammetrische Datenerfassung mittels UAS

Neben den Genauigkeitsanforderungen bestimmen in der Messtechnik häufig Dimension und Handhabung des Messobjekts sowie die zu erwartenden Rahmenbedingungen während der Messungen das geeignete Messverfahren. Der Hauptreflektor des nördlichen OTT hat einen Durchmesser von 13,2 m und befindet sich mit seinem Scheitelpunkt in etwa auf 10 m Höhe über dem Grund. Angestrebt wurde die Untersuchung der Antennengeometrie bei Lastfalländerung, also bei Änderung der Teleskopausrichtung, sodass die zu erfassende Antennenoberfläche in den verschiedenen Teleskoppositionen von Fall zu Fall sehr unterschiedlich im Raum orientiert war. Variationen in der Elevation führen im Vergleich zu Variationen im Azimut zu deutlich größeren Lastfalländerungen, sodass der gravitative Einfluss nur in Abhängigkeit des Elevationswinkels zu modellieren war.

3.1 Messsysteme zur Datenerhebung

Taktile Messsysteme wie Tachymeter oder Lasertracker konnten nicht eingesetzt werden, da die Signalisierung von Einzelpunkten zu zeitaufwändig und in diesem Fall auch zu kompliziert gewesen wäre. Laserscanner sind für flächige Aufnahmen sehr gut geeignet, da sie ohne Einzelpunktsignalisierung am Objekt auskommen. Der vergleichsweise schlechten Einzelpunktgenauigkeit steht die hohe Datenmenge gegenüber. Eine Herausforderung bildet aber in diesem Zusammenhang die Wahl eines geeigneten Instrumentenstandpunktes. Bei einer Ausrichtung des Teleskops in den Zenit ist ein stabiler Standpunkt außerhalb des Teleskops praktisch nicht möglich. Alternativ könnte der Laserscanner nahe des Subreflektors an dessen Aufhängung kardanisch befestigt werden, um die Teleskopoberfläche in möglichst vielen Teleskoppositionen zu scannen (HOLST et al. 2017, BERGSTRAND et al. 2019). Der Tubus mit der Empfangseinheit verursacht jedoch große Abschattungen der zu scannenden Fläche, siehe Abbildung 1. Zudem wäre ggf. das zusätzlich eingebrachte Gewicht des Laserscanners aufgrund der Hebelwirkung am Subreflektor zu berücksichtigen.

Die Nahbereichsphotogrammetrie ermöglicht, Positionsgenauigkeiten von 5 μ m + 5 ppm zu erreichen (LUHMANN 2018). Dieses Verfahren wird standardmäßig eingesetzt, um die einzelnen Teleskoppaneele des Hauptreflektors formschlüssig zu justieren. Bei photogrammetrischen Messungen beeinflussen zum einen die geometrische Stabilität der Kamera und die Bildqualität die einzelnen Aufnahmen. Zum anderen haben die Aufnahmekonfiguration und die Verteilung von Pass- und Verknüpfungspunkten Auswirkungen auf die Genauigkeit des auszuwertenden Bildverbandes. Um qualitativ hochwertige und räumlich gut verteilte Aufnahmen für den gesamten Elevationsbereich des Teleskops zu erhalten, musste bisher kostspielig ein Kran eingesetzt werden. Durch die technologischen Fortschritte in der Drohnenentwicklung können inzwischen auch unbemannte Luftfahrzeuge (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) als Plattform für Messkameras genutzt werden. In diesem Projekt wurde erstmals ein Hexacopter eingesetzt, der mit einer Nutzlast von 850 g eine Flugzeit von 25 Minuten erreicht. Mit einer leichtgewichtigen Kompaktkamera war dieses System also in der Lage, mit einem Flug die Oberfläche eines VGOS-Radioteleskops komplett zu erfassen. Somit konnte das Messobjekt in lediglich 21 Flügen in den verschiedenen Elevationspositionen erfasst werden, um die lastfallabhängigen Deformationen zu ermitteln.

3.2 Konfiguration des UAS

Ein UAS besteht aus einem unbemannten Luftfahrzeug (UAV) und einer Bodenstation zur Fernsteuerung des UAV. In der Regel wird das UAV GNSS-gestützt im halbautomatischen Modus mit einem vordefinierten Flugplan betrieben. Der Flugplan enthält die anzufliegenden Wegpunkte und die Triggerpunkte für die Kameraauslösung. Hierbei ist die Fluggeschwindigkeit an die Auslösegeschwindigkeit (Speicherzeiten) der Kamera anzupassen. Die Kamera wird an eine universelle Trägerplattform (Gimbal) montiert, welche servogesteuert durch die Lageregelung des Hexacopters die Eigenbewegung des Hexacopters kompensiert und die Ausrichtung der Kamera weitestgehend stabilisiert.



Abb. 12: Positionen der Zielmarken auf der Antennenoberfläche, dem Subreflektor sowie an den Enden der kalibrierten Kohlefaserstäbe und dem Koordinatenkreuz am Subreflektor.

Im Gegensatz zur halbautomatischen Aufnahme erfolgt die Ausrichtung der Kamera auf das Messobjekt in diesem Projekt manuell. Dieses Vorgehen erlaubt gerade bei den kurzen Aufnahmedistanzen und den turbulenten Windverhältnissen nahe am Reflektor eine gezielte Ausrichtung auf das Messobjekt. Durch die begrenzte Nutzlast des Hexacopters richtet sich die Auswahl der Kamera vorrangig nach deren Gewicht. In diesem Projekt wurde eine leichtgewichtige Consumer-Kamera (Sigma DP3 Merrill) mit einem fest eingebauten Objektiv mit einer Brennweite von 50 mm und einem Gewicht von 380 g verwendet. Diese geringe Nutzlast ermöglicht eine Flugzeit von 25 Minuten mit dem eingesetzten Hexacopter (HP-TS960,

last ermöglicht eine Flugzeit von 25 Minuten mit dem eingesetzten Hexacopter (HP-TS960, HEXAPILOTS). Zwar erreichen kalibrierte und geometrisch stabilisierte Messkameras höhere Genauigkeiten als Consumer-Kameras, sie sind jedoch auch deutlich schwerer und reduzieren maßgeblich die Flugzeit des akkubetriebenen UAV.

Die verwendete Sigma DP3 Merrill besitzt einen Foveon-Sensor in APS-C Größe (16 mm × 24 mm) anstelle eines Bayer-Patterns, der in allen anderen CCD- oder CMOS-Kamerasensoren verwendet wird (GREIWE & GEHRKE 2013a). Die Farbfilteranordnung eines Bayer-Patterns erfordert Farbinterpolationen mit Nachbarpixeln, um die volle RGB-Farbinformation zu erhalten. Im Gegensatz hierzu erfasst ein Foveon-Sensor für jedes Pixel die volle RGB-Farbinformation ohne eine Interpolation (GREIWE & GEHRKE, 2013b). Durch diese Sensortechnik weisen die Bilder einen besseren Mikrokontrast auf und ermöglichen folglich auch eine genauere Bildmessung der Zielzeichen.



Abb. 13: UAV-Flugplan für die 30° Elevationsposition. Die Abstände zwischen dem Referenzpunkt und dem inneren bzw. äußeren Kreis betragen ca. 20 m bzw. 25 m. Der Abstand zwischen den horizontalen Flugtraversen und dem Referenzpunkt des Teleskops beträgt ca. 20 m.

Als Zielzeichen dienten 12-bit-codierte Schwarz-Weiß-Marken, die flächig auf der Teleskopantenne verklebt wurden. Anzahl und Anordnung richteten sich jeweils nach den Paneelen der Antennenoberfläche, die drei konzentrische Kreise mit 2 x 24 und 1 x 12 Elementen bilden. Diese 60 Zielmarken wurden ergänzt durch weitere 12 Zielmarken in der Nähe des Übergangs zum inneren Teil der Antenne und vier Zielmarken am Subreflektor. Darüber hinaus wurde nahe dem Subreflektor ein Koordinatenkreuz bestehend aus sechs Zielmarken fixiert, das näherungsweise das Bezugssystem der resultierenden 3D-Punkte definiert (vgl. Abbildung 3). Zur Maßstabsdefinition wurden sechs kalibrierte Kohlefaserstäbe mit Zielmarken an den Stabenden verwendet. Um das Messvolumen zu umschließen, wurden die Maßstäbe gleichmäßig am Rand des Hauptreflektors, an den Stützen und in der Nähe des Subreflektors angebracht.

Die eingesetzte Kamera ist zwar leichtgewichtig, aber nicht geometrisch stabilisiert. Der Objektivtubus wird beim Ein- und Ausschalten mechanisch bewegt. Da die Stromversorgung der Kamera durch den Hexacopter erfolgt, musste die photogrammetrische Erfassung einer Elevationsposition des Reflektors in einem Flug ohne Zwischenlandung bzw. Akkuwechsel erfolgen. Der Flugplan für eine Antennenposition bestand aus zwei horizontalen Flugbahnen und zwei Kreisen (vgl. Abbildung 4). Die kreisrunden Flugbahnen mit einem Radius von 6,5 m bzw. 11,5 m waren um den Elevationswinkel des Teleskops geneigt und lagen zentrisch um die optische Achse des Teleskops. Die Kamera wurde jeweils manuell auf die Teleskopoberfläche ausgerichtet und ausgelöst. Das Teleskop wurde zwischen 0° und 90° in 10°-Schritten in Elevation verfahren. Alle zehn Positionen wurden zweimal erfasst, wobei zur Steigerung der Unabhängigkeit der Ergebnisse die Wiederholungsmessung nie direkt im Anschluss erfolgte. Ergänzt wurde die Datenreihe durch einen Datensatz in 34° Elevation, die der Justierposition des Herstellers entspricht. Die ganze Messkampagne umfasste inklusive Vorbereitungszeit, Teleskoppräparierung und Testflügen zwei Wochen und lieferte insgesamt 21 getrennt voneinander auswertbare Datensätze, die effektiv innerhalb von zwei Tagen photogrammetrisch erfasst wurden.

4. Auswertung der Bilddaten

Für jede Antennenposition wurde ein Bildverband mit mindestens 250 Bildern generiert. Um die nötige Schärfentiefe bei den kurzen Aufnahmedistanzen zu gewährleisten, wurden die Aufnahmen mit Blende 8 und einer für einen Coptereinsatz entsprechend langen Belichtungszeit von 1/320 Sekunde erzeugt. Nach der Detektion von Bewegungsunschärfen standen für jeden Bildverband mindestens 150 Aufnahmen für eine Auswertung in AICON 3D zur Verfügung. Da die Kamera während der Befliegung für einen Bildverband nicht ausgeschaltet werden musste, konnte sich die Bestimmung der Kalibrierparameter auf einen Parametersatz pro Bildverband beschränken und in-situ mit der Bündelausgleichung erfolgen. Neben den Zielmarken wurden auch natürliche, kreisförmige Ziele, bspw. Schrauben an den Paneelen, als Verknüpfungspunkte in der Auswertung zugelassen. Im Schnitt war jede Zielmarke in 55 Aufnahmen enthalten. Mehr als 500 Verknüpfungspunkte wurden je Bildverband verwendet, wobei nur die codierten Zielmarken im weiteren Auswerteprozess zur Ableitung der Antennengeometrie berücksichtigt wurden. Da diese aus einem hochredundanten Beobachtungsmaterial abgeleitet wurden, konnten Ausreißer in den Bildkoordinaten zuverlässig eliminiert werden. Die abgeschätzten Unsicherheiten der Koordinatenkomponenten der codierten Zielmarken betrug 80 µm bis 120 µm (LÖSLER et al. 2019). Diese Einzelpunktunsicherheiten sind zwar etwas größer als bei hochpräzisen photogrammetrischen Kameras (LUHMANN 2018), dennoch liegen sie in einer Größenordnung, die zur Erkennung der erwarteten Verformungen ausreichend sind (vgl. Kapitel 1).

Temperaturschwankungen wirken sich auf die dünnen Antennenelemente mit leichter Verzögerung aus. Die Zeitreihe des Temperatursensors in der Nähe des Radioteleskops ergab eine Spannweite der Temperaturänderung von weniger als 2 K. Es wurde jeweils für eine Antennenposition der repräsentative Temperaturwert ermittelt, um mit Hilfe des Ausdehnungskoeffizienten von Stahl ($\gamma = 10^{-5} \text{K}^{-1}$) die jeweiligen Koordinatensets auf die Bezugstemperatur von 9 °C zu skalieren. Im Gegensatz zu der in der Messtechnik üblichen Bezugstemperatur von 20 °C wird für VLBI die Bezugstemperatur weltweit für alle Stationen durch eine IVS-Konvention geregelt. Diese leitet sich aus dem globalen Temperatur- und Luftdruckmodell (GPT) ab (NOTHNAGEL 2009).

5. Ergebnisse der Messungen

Um die Modellparameter des Ring-Fokus-Paraboloids abzuleiten, wurden alle Datensätze entsprechend der Beschreibung aus Kapitel 3 ausgewertet. Voruntersuchungen am OTT von LÖSLER et al. (2017) zeigten in einem vom Teleskophersteller zur Verfügung gestellten photogrammetrischen Datensatz mit höherer Genauigkeit (< 50 µm) eine Systematik in den Oberflächenresiduen, die auf ein elliptisches Ring-Fokus-Paraboloid hindeuteten. Die Ausgleichung basierend auf dem komplexeren Modell mit zwei verschiedenen Brennweiten lieferte die Schätzwerte und die zugehörige Varianz-Kovarianz-Matrix der Parameter \hat{a} und \hat{b} . Aus diesen wurden die Brennweiten \hat{f}_a und \hat{f}_b , deren Abweichung $\hat{d} = \hat{f}_a - \hat{f}_b$ sowie dessen zugehörige Standardabweichung $\hat{\sigma}_d$ abgeleitet (JÄGER et al. 2005). Mittels der Teststatistik

$$T = \frac{\hat{d}^2}{\hat{\sigma}_d^2} \sim \mathcal{F}_{1;n;1-\alpha} \tag{5}$$

lässt sich prüfen, ob die Schätzung eines elliptischen Ring-Fokus-Paraboloids gerechtfertigt ist, oder zugunsten des einfacheren rotationssymmetrischen Ring-Fokus-Paraboloids verworfen werden sollte. Hierin entspricht n dem Freiheitsgrad im Ausgleichungsmodell. Zwar ergeben sich in den niedrigeren Elevationsstellungen tendenziell größere Teststatistiken, diese erreichen jedoch nie den Grenzwert des 0,1% igen Signifikanzniveaus.



Abb. 14: Teststatistiken nach Gleichung (5) zur Abschätzung einer Überparametrisierung; keine Teststatistik überschreitet den Grenzwert des 0,1% igen Signifikanzniveaus.

Abbildung 5 zeigt alle Teststatistiken sowie als gestrichelte Linie das Quantil des Signifikanzniveaus. Auch wenn das photogrammetrische Datenmaterial eine relativ hohe Genauigkeit von 100 μ m aufweist, ist es dennoch nicht ausreichend sensitiv, um diese mögliche Modellvariation aufzulösen. Aus diesem Grund wurde die Modellierung des elliptischen Ring-Fokus-Paraboloids für diese Datenerhebung zugunsten des rotationssymmetrischen Ring-Fokus-Paraboloids verworfen.

Die Residuen der einzelnen Zielmarken für ein rotationssymmetrisches Ring-Fokus-Paraboloid sind beispielhaft für die Antennenposition 0° Elevation in Abbildung 6 dargestellt. Der Abstand zwischen den Isolinien beträgt 0,1 mm. Die größten Residuen liegen in einer Größenordnung von 0,5 mm und befinden sich am Rand des Reflektors. Diese Residuen führen visuell zu dem Eindruck, ein elliptisches Ring-Fokus-Paraboloid könnte hier gerechtfertigt sein. Wie bereits beschrieben, wichen die Brennweiten jedoch nicht signifikant voneinander ab. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** enthält eine Liste aller Datensätze mit ihren aus den Oberflächenresiduen ermittelten RMS-Werten. Tendenziell werden die kleinsten RMS-Werte im Bereich von 30° bis 50° Elevation erreicht, in dem auch die Justierposition von 34° des Herstellers liegt. In den Extremstellungen der Teleskopantenne nahe 0° sowie nahe 90° nimmt der RMS-Wert zu, liegt jedoch immer unterhalb 300 µm.



Abb. 15: Graphische Darstellungen der Residuen der Antennenoberfläche bei 0° Elevation; schwarze Punkte symbolisieren die codierten Zielmarken.

Elevations- position	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	34°
1. Datensatz RMS in μm	204	187	200	167	192	182	173	178	221	292	169
2. Datensatz RMS in µm	190	194	166	147	154	155	162	167	227	282	-

 Tabelle 4: Übersicht über die analysierten Elevationspositionen des Teleskops und die RMS-Werte der Oberflächenresiduen.

Für jeden Datensatz konnte durch Gleichung (1) der Paraboloidparameter a geschätzt werden. Abbildung 7 zeigt die daraus abgeleiteten Brennweiten in Abhängigkeit der Elevationsstellung des Teleskops. Die größte Brennweite liegt erwartungsgemäß bei einer Elevation von 90°, da hier der Antennenrand von der Schwerkraft nach unten gezogen und die Antenne aufgeweitet wird. Mit dem Elevationswinkel fällt auch die Brennweite um bis zu 2,3 mm. Diese Spannweite ist um mehr als das 10-fache kleiner als in der Literatur dokumentierte Variationen konventioneller Radioteleskope (SARTI et al. 2009).

Der Kurvenverlauf kann durch die elevationsabhängige Kosinus-Funktion

$$F(\epsilon) = c_0 + c_1 \cos\epsilon = 3,7017 \text{ m} + 0,0023 \text{ m} \cos\epsilon$$
(6)

approximiert werden, wobei c_0 den Offset zum Funktionswert an der Stelle 90° Elevation beschreibt und c_1 die Amplitude darstellt. Die Funktionswerte der Kurvenparameter c_0 und c_1 wurden unter Verwendung aller Stützstellen und deren Unsicherheiten geschätzt. Die Stützstellen mit ihren Unsicherheiten, der Funktionsverlauf und das zugehörige Unsicherheitsband (2σ) sind in Abbildung 7 dargestellt. Die Brennweite, die bereits von LÖSLER et al. (2017) ermittelt wurde und durch ein schwarzes Quadrat symbolisiert wird, fügt sich sehr gut in den Funktionsverlauf ein. Dies kann als Indiz gesehen werden, dass die Ergebnisse der Studien sich gegenseitig bestätigen.



Abb. 16: Geschätzte Brennweiten in Abhängigkeit der Teleskopelevation; der funktionale Zusammenhang zwischen Elevation und Brennweite ist als gestrichelte Linie dargestellt, das Unsicherheitsband beträgt 2σ ; ein schwarzes Quadrat symbolisiert das Ergebnis aus LÖSLER et al. (2017).

5. Fazit

Mit der Forderung von GGOS, für den ITRF eine globale Positionsgenauigkeit von 1 mm zu erreichen (ROTHACHER et al. 2009), treten Einflussfaktoren in den Vordergrund, die bisher nicht oder nicht ausreichend bei der Analyse raumgeodätischer Messungen berücksichtigt werden konnten. Umso wichtiger werden entsprechende auf die Anforderungen abgestimmte Messverfahren und Auswertestrategien, die diese Einflussfaktoren quantifizieren. Beispielsweise können elevationsabhängige gravitative Verformungen der Antennenoberfläche die Brennweite von Radioteleskopen verändern und so zu systematischen Abweichungen bei der VLBI-Auswertung führen, die sich wiederum in einer verzerrten Höhenkomponente der Teleskopposition niederschlagen.

In diesem Projekt wurde erstmals das durch Gravitation hervorgerufene elevationsabhängige Deformationsverhalten eines VGOS-Teleskops untersucht. Neu ist weiterhin der Einsatz eines UAS zur photogrammetrischen Erfassung. Die 21 durchgeführten Befliegung lieferten das Datenmaterial von 11 unterschiedlichen Elevationspositionen des Teleskopes zwischen 0° und 90°. Hieraus konnten die Formparameter f und r des rotationssymmetrischen Ring-Fokus-Paraboloids in verschiedenen Elevationsstellungen bestimmt und ein funktionaler Zusammenhang zwischen Elevation und Brennweite hergestellt werden. Die signifikante Änderung der Brennweite von bis zu 2,3 mm kann durch geeignete Modelle im Analyseprozess von VLBI-Messungen berücksichtigt werden. Diese Studie ist ein erster Schritt zur Ableitung eines Kompensationsmodells zur Korrektur von elevationsabhängigen gravitativen Einflüssen an VGOS-Radioteleskopen.

Dank

Die Autoren danken Lars Wennerbäck und Christer Hermansson vom Onsala Space Observatory für ihre Unterstützung bei der Präparierung des Radioteleskops.

Diese Arbeit ist Teil des internationalen Projektes GeoMetre (*Large-scale dimensional mea*surements for geodesy, JRP 18SIB01) und wurde aus Mitteln des von den Teilnehmerstaaten kofinanzierten EMPIR-Programms und aus dem Forschungs- und Innovationsprogramm der Europäischen Union *Horizon 2020* finanziert.

Literatur

- BERGSTRAND, S., HERBERTSSON, M., RIECK, C., SPETZ, J., SVANTESSON, C.G. & HAAS, R. (2019): A gravitational telescope deformation model for geodetic VLBI. Journal of Geodesy, 93(5), S. 669–680. doi:10.1007/s00190-018-1188-1
- CUTLER, C.C. (1947): Parabolic-antenna design for microwaves. In: Proceedings of the IRE, 35(11), S. 1284–1294. doi:10.1109/JRPROC.1947.233571
- GREIWE, A. & GEHRKE, R. (2013a): Foveon Chip oder Bayer Pattern geeignete Sensoren zur Aerophotogrammetrie mit UAS. In: LUHMANN, T., SCHUMACHER, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik: Beiträge der 12. Oldenburger 3D-Tage 2013, Wichmann, Offenbach, S. 334–343. ISBN: 978-3879075287

- GREIWE, A. & GEHRKE, R. (2013b): Kameras zur 3D-Modellierung mit UAS. In: STROBL, J., BLASCHKE, T., GRIESEBNER, G. & ZAGEL, B. (Hrsg.): Angewandte Geoinformatik 2013: Beiträge zum 25. AGIT-Symposium Salzburg, Wichmann, Offenbach, S. 41–46.
- HAAS, R. (2013): The Onsala twin telescope project. In: ZUBKO, N., POUTANEN, M. (Hrsg.): Proceedings of the 21st European VLBI for Geodesy and Astrometry (EVGA) Working Meeting, S. 61–66. ISBN: 978-9517112963
- HAAS, R., NOTHNAGEL, A., SCHUH, H. & TITOV, O. (1999): Explanatory supplement to the section 'Antenna Deformation' of the IERS Conventions (1996). In: SCHUH, H. (Hrsg.): Explanatory supplement to the IERS conventions (1996), Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut. (DGFI), München, 71, S. 26–29.
- HOLST, C., SCHUNCK, D., NOTHNAGEL, A., HAAS, R., WENNERBÄCK, L., OLOFSSON, H., HAMMARGREN, R. & KUHLMANN, H. (2017): Terrestrial Laser Scanner Two-FaceMeasurements for Analyzing the Elevation-Dependent Deformation of the Onsala Space Observatory 20-m Radio Telescope's Main Reflector in a Bundle Adjustment. Sensors, 17(8), 1833, S. 1–21. doi:10.3390/s17081833
- JÄGER, R., MÜLLER, T., SALER, H. & SCHWÄBLE, R. (2005): Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren. Ein Leitfaden für Ausbildung und Praxis von Geodäten und Geoinformatikern. Wichmann, Heidelberg. ISBN: 978-3879076154
- LÖSLER, M., ESCHELBACH, C. & HAAS, R. (2017): Unified Model for Surface Fitting of Radio Telescope Reflectors. In: HAAS, R., ELGERED, G. (Hrsg.): Proceedings of the 23rd European VLBI for Geodesy and Astrometry (EVGA) Working Meeting, S. 29–34. ISBN: 978-91-88041-10-4
- LÖSLER, M., HAAS, R., ESCHELBACH, C. & GREIWE, A. (2019): Gravitational Deformation of Ring-Focus Antennas for VGOS – First Investigations at the Onsala Twin Telescopes Project. Journal of Geodesy, doi: 10.1007/s00190-019-01302-5.
- LUHMANN, T. (2018): Nahbereichsphotogrammetrie Grundlagen, Methoden und Anwendungen, Wichmann, Berlin, 4. Auflage. ISBN: 978-3879074792
- NIELL A., WHITNEY A., PETRACHENKO B., SCHLÜTER W., VANDENBERG N. & HASE H. (2006): Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems. In: BEHREND, D. & BAVER, K.D. (Hrsg.): International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2005 Annual Report, 13–40. NASA/TP-2006-214136
- NOCEDAL, J. & WRIGHT, S.J. (2006): Numerical Optimization. Springer, New York, 2. Auflage. doi:10.1007/978-0-387-40065-5
- NOTHNAGEL, A. (2009) Conventions on thermal expansion modelling of radio telescopes for geodetic and astrometric VLBI. Jornal of Geodesy, 83(8), S. 787–792. doi:10.1007/s00190-008-0284-z
- PETRACHENKO, B., NIELL, A., BEHREND, D., COREY, B., BÖHM, J., CHARLOT, P., COLLIOUD, A., GIPSON, J., HAAS, R., HOBIGER, T., KOYAMA, Y., MACMILLAN, D., MALKIN, Z., NILSSON, T., PANY, A., TUCCARI, G., WHITNEY, A. & WRESNIK, J. (2009): Design aspects of the VLBI2010 system. NASA/TM-2009-214180
- ROTHACHER, M., BEUTLER, G., BEHREND, D., DONNELLAN, A., HINDERER, J., MA, C., NOLL, C., OBERST, J., PEARLMAN, M., PLAG, H-P., RICHTER, B., SCHÖNE, T., TAVERNIER, G. & WOODWORTH, P.L. (2009): The future Global Geodetic Observing System. In: PLAG, H.-P. & PEARLMAN, M. (Hrsg.): The Global Geodetic Observing System. Meeting the Requirements of a Global Society on an Changing Planet in 2020, Springer, Berlin, S. 237–272. doi:10.1007/978-3-642-02687-4_9

- SARTI, P., LUCA VITTUARI, L. & ABBONDANZA, C. (2009): Laser Scanner and Terrestrial Surveying Applied to Gravitational Deformation Monitoring of Large VLBI Telescopes' Primary Reflector. Journal of Surveying Engineering, 135(4), S. 136–148, doi:10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000008
- WRESNIK, J., HAAS, R., BÖHM, J. & SCHUH, H. (2007): Modeling thermal deformation of VLBI antennas with a new temperature model. Journal of Geodesy, 81(6-8), S. 423–431. doi:10.1007/s00190-006-0120-2

Erkennung von sicherheitsrelevanten Defekten an den Flanschverbindungen von WKA-Türmen mit MEMS-Beschleunigungssensoren

Boris RESNIK und Tilman SCHLENZKA

1 Einführung

Freitragende Stahlrohrtürme sind heute die bevorzugte Bauart von kommerziellen Windkraftanlagen (WKA). Die wichtigsten Gründe hierfür liegen in der schnellen Montage am Aufstellort und in den vergleichsweise niedrigen Stahlpreisen. Obwohl solche Türme aus 10–50 mm dicken Stahlblechen unter günstigen Umständen auch in einem Stück im Werk gefertigt und am Aufstellort mit dem Fundament verschraubt werden können, ist diese Vorgehensweise wegen der üblichen Turmhöhen und Transportmöglichkeiten kaum von Bedeutung. Bei der heute bevorzugten Standardbauweise bestehen die WKA-Türme deswegen aus mehreren im Werk vorgefertigten Sektionen mit einer Länge von bis zu etwa 20–30 m, die am Aufstellort mit Hilfe von Flanschverbindungen miteinander verschraubt werden (GASCH & TWELE 2011).



Abb. 1: Flanschverbindung von WKA-Türmen

Die Formgebung und das Anschweißen von Flanschen an den Enden von relativ dünnen Turmsektionen erfordert bekanntermaßen einige Erfahrung, da es dabei sehr leicht zu einem Verziehen der Bauteile kommen kann. Die Folge sind dann ggf. nicht plan aufeinanderliegende Flansche und sich daraus ergebende "Klaffungen" k zwischen den Turmsektionen (Abbildung 1). Der Standardflansch wird in der Regel über Dehnschrauben verbunden, die sich dabei wie vorgespannte Zugfedern verhalten. Abweichungen der Ringflansche führen zu einer signifikanten lokalen Erhöhung der Vorspannkraft und können dann im Laufe des Betriebs und einer starken dynamischen Beanspruchung teilweise oder komplett versagen und zu erheblichen Schäden bis zum Absturz der Anlage führen.

In Deutschland wird eine WKA im baurechtlichen Sinne als "Bauwerk" bestehend aus Turm und Fundament eingestuft. Das Maschinenhaus mit dem Rotor gilt dagegen als ein aufgesetzter "Maschinenteil". Für die Turmauslegung gilt deshalb die "Richtlinie für Windenergieanlagen – Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Fundament", herausgegeben vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBT 2012). Entsprechend diesen Regelungen sollen auch bei den aufeinanderliegenden Flanschen eines WKA-Turms bestimmte Toleranzen eingehalten werden. So darf die Ebenheitsabweichung nach der Fertigung von einzelnen Turmsegmenten einen Wert von 2,0 mm über den gesamten Umfang des Flansches und max. 1,0 mm über ein Segment von 30° nicht überschreiten (DIBT 2012, S. 35).

Es ist bekannt, dass eine Vielzahl von Turmschäden wie Lackschäden, Dellen und Kerben im Rahmen von periodischen visuellen Kontrollen (vgl. RESNIK 2014) detektiert und ggf. mit relativ geringem Aufwand beseitigt werden können. Die oben genannten Fehlstellen bei den Ringflanschen und die begleitenden inneren Rostschäden sind jedoch beim Betrieb von Windkraftanlagen wesentlich kritischer, da sie bei bestimmen Voraussetzungen zu erheblichen Standsicherheitsproblemen bis zum Einsturz der ganzen Anlage führen können. Sowohl die Konstruktionsmängel bei der Turmherstellung (die oben genannten Klaffungen) als auch die verdeckten Transportschäden dieser Art können durch eine enorme dynamische Beanspruchung im Laufe von Betriebsjahren verstärkt werden und irregulär große Bewegungen an den Flanschverbindungen der Anlage verursachen. Je früher solche Schäden erkannt werden, desto größer ist das Spektrum von Möglichkeiten, einen ungeplanten Anlagenstillstand und eine kostspielige Sanierung zu verhindern.

2 Kontrolle der WKA-Flanschverbindungen bei den periodischen Inspektionen

Wie alle komplizierten Ingenieurbauwerke unterliegen auch die modernen Windkraftanlagen einem hohen Schadensrisiko. Die Instandhaltung dieser Bauwerke umfasst im Sinne der aktuellen Normen alle technischen und administrativen Maßnahmen, die zur Erkennung des Ist-Zustandes, zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes, zur Rückführung in diesen und zur Steigerung der Funktionssicherheit während des Lebenszyklus einer Einheit benötigt werden. Entsprechend der gültigen Regelung für die modernen WKA ist ihre Tragstruktur und u. a. auch Zustand der Flanschverbindungen während des Betriebs durch Sachverständige in regelmäßigen Intervallen zu prüfen (DIBT 2012, S. 40-41). Obwohl die zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP) im Bauwesen zur Ermittlung des Bauwerkszustands in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewinnen (vgl. MERTENS 2015), werden die periodischen Untersuchungen dieser Art heute weiterhin von den handwerklichen Methoden auf der Basis von visueller Beurteilung von Rissen bzw. Rostbildung und einer Kontrolle der Vorspannkraft von ausgewählten Schrauben dominiert.

Da für die Qualität und Dauerhaltbarkeit einer Schraubenverbindung eine genaue Einstellung bzw. Einhaltung der Montagevorspannkraft maßgebend ist, weist das angewandte Anziehverfahren neben der Größe der Schraube, der Festigkeitsklasse, der Oberflächengüte und den Reibungsverhältnissen eine entscheidende Bedeutung auf. Bei einer Kontrolle der Verbindung kann dabei z. B. der Zusammenhang zwischen dem aufgebrachten Drehmoment und dadurch erzeugter Vorspannkraft (Abbildung 1) ausgenutzt werden. Die Erfassung des Drehmoments kann mittels unterschiedlicher Arten von sog. Drehmomentschlüsseln bzw. mithilfe von extern oder intern angeordneten Sensoren erfolgen. Das Anziehen wird dann beendet, wenn das vordefinierte Anziehdrehmoment, das aus der erforderlichen Montagevorspannkraft bestimmt wurde, erreicht ist. Eine grundsätzliche Problematik für dieses Verfahren liegt in den schwankenden Reibungswerten, die dabei durch die Reibungskoeffizienten μ (auch Reibungszahl genannt) beschrieben werden können. Grundsätzlich handelt es sich bei solchen Koeffizienten um ein dimensionsloses Maß für die Reibungskraft im Verhältnis zur Anpresskraft zwischen zwei Körpern. Durch schwankende Werte μ (Abbildung 2) ergibt sich selbst bei einer hohen Wiederholgenauigkeit des Drehmomentes von etwa 10 % eine sehr große Streuung der Vorspannkraft bis zu 40 % und mehr. Dieses Verfahren erlaubt deswegen keine gesicherten Aussagen zur aktuellen Qualität der Verbindung und ist damit nach den aktuellen Normen (VDI 2200) für die Kontrolle nicht zulässig.



Abb. 2: Kontrolle der Flanschverbindungen durch Sachverständige

Alternativ zur Kontrolle des Drehmomentes werden gelegentlich solche einfachen Techniken wie Prüfhammereinsatz praktiziert, wobei am Klang erkannt werden kann, ob die Schraube lose (dumpfer Klang) oder verspannt (heller, glockenähnlicher Klang) ist. Dabei kann z. B. erkannt werden, ob bestimmte Schrauben bei der Montage vergessen wurden. Da eine validierbare Aussage dagegen nicht möglich ist, darf auch dieses Verfahren im Bereich der Montage bzw. Überwachung von hochbelasteten Schraubenverbindungen nicht eingesetzt werden.

Die messtechnische Erfassung der Größe von eventuellen Klaffungen in den WKA-Flanschen (Abbildung 1) kann nur bei einer starken dynamischen Beanspruchung, d. h. bei laufendem Betrieb und starkem Wind, aussagekräftige Informationen liefern. Das entspricht allerdings nicht den Bedienungen von periodischen Inspektionen, die in der Regel beim Stillstand der Anlage an mehreren Tagen durchgeführt werden. Deswegen bekommt die visuelle Kontrolle der Rostbildung eine besondere Bedeutung. Während die Turmsegmente auf der Außen- und Innenseite immer mit einem aufgespritzten Korrosionsschutz versiegelt werden, ist das an der Flanschverbindung kaum möglich, da die auftretenden Kräfte diese Schutzschicht in kürzester Zeit zerstören würde. Falls die erforderliche Planparallelität der Flanschblätter und die feste Verschraubung eine dichte Verbindung zwischen beiden ermöglichen, wird ein Korrosionsschutz dabei nicht unbedingt gebraucht. Bei eventuellen Herstellungsdefekten und einer jahrelangen dynamischen Beanspruchung sucht sich Wasser jedoch den Weg in diesen Bereich von außen oder als Kondenswasser von innen. Folglich entsteht Korrosion zwischen den Flanschblättern, die auch bei den visuellen Kontrollen dokumentiert werden kann (Abbildung 2).

Die anderen bekannten Messverfahren für die Kontrolle der WKA-Flansche wie Dehnmessstreifen-Technik (DMS-Technik), piezoelektrische Messverfahren, Wirbelstromverfahren und magnetostriktive Verfahren kommen dagegen meistens nur bei den wissenschaftlichen Untersuchungen von Testanlagen und sehr selten bei den routinemäßigen Kontrollen zum Einsatz (vgl. MUNTANIOL 2016) und werden hier deswegen nicht näher behandelt.

3 Kontrolle der WKA-Flanschverbindungen im Rahmen von Condition-Monitoring-Systemen

Während die Notwendigkeit von regelmäßigen Untersuchungen von Flanschverbindungen prinzipiell eine wachsende Akzeptanz bei WKA-Herstellern und -Betreibern findet, werden die Möglichkeiten von kontinuierlichen und automatischen Messungen im Rahmen von Condition-Monitoring-Systemen (CM) in diesem Bereich kaum genutzt. Für die Beurteilung des Zustandes eines Flansches soll dabei vor allem die Frage beantwortet werden, ob alle Sektionen des WKA-Turms fest miteinander verbunden sind. Die aussagekräftigen Informationen zur Beantwortung dieser Frage können inzwischen ganz unterschiedliche Sensoren liefern. Das Problem bei der Auswahl eines Messsystems bzw. Verfahrens für eine kontinuierliche Kontrolle der Flanschverbindungen liegt folglich lediglich darin, eine adäquate, der Problemstellung angepasste, die Anforderungen an die Genauigkeit erfüllende und zugleich kostengünstige Lösung zu finden. In den letzten Jahren wurden von den Autoren unterschiedliche Sensoren bzw. Messsysteme für eine vollautomatische Überwachung der WKA-Flanschverbindungen getestet. In diesem Beitrag wird nur die Anwendung von modernen Beschleunigungssensoren für diese Zwecke exemplarisch behandelt.



Abb. 3: Kontrolle der Flanschverbindungen mit Beschleunigungssensoren

Das verwendete Messsystem besteht aus mehreren Low-Cost-Beschleunigungssensoren, die für die Kontrolle der Flanschverbindung innerhalb des Turms fest eingebaut (Abbildung 3) und mit einer Recheneinheit verbunden sind. Es ist bekannt, dass schlanke Bauwerke wie WKA-Türme mit niedrigen Eigenfrequenzen bei geringer Dämpfung aufgrund natürlicher Anregungsquellen wie Wind oder Betrieb in Schwingungen mit einer relativ großen Amplitude versetzt werden. Diese Schwingungen bzw. dynamischen Verformungen können mit den paarweise angebrachten Sensoren oberhalb und unterhalb eines Flansches bei laufendem Betrieb erfasst werden. Grundsätzlich kann vermutet werden, dass sich das erfasste Schwingungsverhalten von Punkt zu Punkt in Abhängigkeit vom Zustand der entsprechenden Flanschverbindung unterscheidet und somit für das Ableiten von bestimmten Kontrollparametern geeignet ist.

Da die Beobachtungen mit Low-Cost-Sensoren durchgeführt werden, wird auf eine Erfassung von extremen Ereignissen wie z. B. die Einwirkung von einzelnen, relativ seltenen Windböen verzichtet. Stattdessen werden die zahlreichen ambienten Schwingungen nach dem Prinzip "Redundanz statt Intelligenz" an beiden Kontrollpunkten gemessen und in Intervalle der gleichen Größe zusammengefasst. Um Informationen über den Zustand des untersuchten Objektes aus Merkmalswerten einer Stichprobe (hier Amplitudendifferenzen bei bestimmten Paaren von Sensoren) zu gewinnen, können die üblichen statistischen Parameter (Streuung um den Mittelwert bzw. die entsprechenden empirischen Standardabweichungen s) berechnet werden (Abbildung 3). Abschließend muss aus diesen Parametern ein Verhältnis bzw. eine Differenz in den einzelnen Zeitintervallen abgeleitet und mit bekanntem "Normalverhalten" verglichen werden. Um vergleichbare Ergebnisse in bestimmten spektralen Bereichen der Messdaten zu erhalten, ist bei diesem Verfahren ein Bandpassfilter einzusetzen.

In der Regel wird man ein Messkonzept so entwerfen, dass die Genauigkeit ausreichend ist, um die zu erwartenden Änderungen zu bestimmen. Insbesondere im hochpräzisen Messbereich, wie im behandelten Beispiel, liegen die kontrollierten Amplitudendifferenzen jedoch oftmals im Bereich der Signifikanzschwelle des verwendeten Messverfahrens. D. h., die eigentlich gesuchten Parameter an unterschiedlichen Messpunkten sind besonders bei der schwachen dynamischen Beanspruchung des Bauwerkes kaum größer als das unvermeidbare Messrauschen von beiden Sensoren. In den Ergebnissen spiegeln sich dann lediglich die unterschiedlichen Empfindlichkeiten von einzelnen Sensoren statt Bewegungen innerhalb der Flanschverbindung wieder. Für die verwendete Methodik bedeutet diese Tatsache, dass in dem hier vorgestellten Verfahren unbedingt eine Schranke von einem etwa dreifachen Eigenrauschen des verwendeten Messsystems berücksichtigt werden muss. Nur in diesem Fall wird das Verhältnis der berechneten Schwingungsamplituden berechnet und gespeichert.

4 Testmessungen an einem WKA-Modell

Um die Kosten für die Testphase der entwickelten Verfahren zu reduzieren, wurde ein maßstabsgetreues WKA-Modell mit der Gesamthöhe von etwa 2,5 m im Labor für Förder- und Getriebetechnik der Beuth Hochschule durch mehrere Flanschverbindungen mit jeweils 8 Schrauben erweitert (Abbildung 4). Die Auswirkung von unterschiedlichen Defekten an diesen Flanschverbindungen könnte dadurch z. B. durch variierende Vorspannkräfte bzw. Anziehmomente von Schrauben (vgl. Abschnitt 2) wesentlich einfacher als bei den realen Anlagen modelliert und interpretiert werden. Das für die Tests verwendete Messsystem besteht aus mehreren Low-Cost-Beschleunigungssensoren, die bei den realen Anlagen innerhalb des Turms (Abbildung 3) und beim hier behandelten Modell an seiner Außenwand (Abbildung 4) fest eingebaut werden. Eine messtechnische Kontrolle des Flansches kann grundsätzlich mit mehreren Paaren von solchen Sensoren oberhalb und unterhalb der Verbindung realisiert werden. Beim hier beschriebenen Experiment wurden allerdings nur zwei kalibrierte Sensoren dieser Art verwendet. Um die Defekte in der Flanschverbindung zu modellieren, wurde das Drehmoment von allen acht Schrauben bei laufendem Betrieb der Anlage, mit einer konstanten Drehzahl des Rotors sowie einer unveränderten Orientierung der Gondel, stufenweise erhöht (1 Nm \rightarrow 2 Nm \rightarrow 4 Nm \rightarrow 6 Nm). Die Messdauer wurde auf ca. 30 Minuten pro Drehmomentstufe festgelegt. Die Messungen wurden bei der Auswertung in 23 Intervalle von jeweils 5 Minuten und einer konstanten Anziehkraft der Schrauben unterteilt. Abschließend wurden die mittleren Amplituden von vertikalen Deformationen als Standardabweichungen aus den jeweiligen Messintervallen ermittelt.

Die Differenzen dieser Amplituden (Ao – Au) für die beiden Sensoren (oben und unten) werden in der Abbildung 4 präsentiert. Die größten Differenzen zwischen den Kontrollparametern ergeben sich erwartungsgemäß beim kleinsten Drehmoment von 1 Nm. Bei der letzten Stufe (6 Nm) ist dagegen eine sehr gute Übereinstimmung der Amplituden (A_o – A_u \approx 0) deutlich erkennbar. Die beiden Sensoren folgen in dieser Phase des Experiments offensichtlich allen Bewegungen mit etwa gleicher Amplituden, was bei realen Anlagen eine fehlerfreie Verbindung bedeuten würde.



Abb. 4: Ergebnisse der ausgewählten Testmessungen an einem Modell

Es ist bekannt, dass die Qualität der Diagnose bei einem typischen Monitoring und folglich die Wirtschaftlichkeit einer konkreten Lösung weniger von der Messtechnik, sondern vor
allem von den verwendeten Algorithmen der Datenanalyse abhängig ist. Die hier präsentierte Methodik kann selbstverständlich auch weiter verfeinert und angepasst werden. So können auch bestimmte Frequenzbereiche für die Analyse im Voraus ausgewählt werden bzw. die Ergebnisse zusätzlich über mehrere Tage gefiltert und erst dann im Sinne der Kategorien "gut" und "sicherheitskritisch" klassifiziert werden, um hier nur zwei typische Beispiele dieser Art zu nennen.

5 Testmessungen an den Windkraftanlagen

In den letzten Jahren wurden von den Autoren zahlreiche Experimente an unterschiedlichen Windkraftanlagen durchgeführt, um die Möglichkeiten der dauerhaften messtechnischen Erfassung der dynamischen Charakteristik an den Flanschverbindungen von typischen WKA-Türmen zu testen. In diesem Beitrag wird lediglich ein Beispiel dieser Art präsentiert. Die beschriebenen Testmessungen wurden parallel an zwei 2MW-Windkraftanlagen mit dem Baujahr um 2002 und je zwei Paaren von Beschleunigungssensoren des gleichen Typs pro Anlage realisiert. Diese Paare wurden dabei an einem (unteren) Flansch der beiden Anlagen rechtwinklig zueinander angeordnet, sodass mit einem Paar die Schwingungen (Deformationen) in der bekannten jährlichen Windhauptrichtung und mit dem zweiten Paar in der Querrichtung dazu erfasst und analysiert werden konnten. Ziel der Untersuchung war es, nachzuweisen, dass sich die ermittelten dynamischen Kontrollparameter in den beiden Richtungen signifikant unterscheiden und somit auf eine wesentlich höhere Abnutzung des Flansches in einer Richtung hinweisen.



Abb. 5: Ergebnisse der ausgewählten Testmessungen an einer Windkraftanlage

Die hier behandelten Messungen wurden kontinuierlich im Laufe von mehreren Wochen bei variierenden Windverhältnissen und laufendem Betrieb durchgeführt. In diesem Beitrag wird

lediglich die vertikale Komponente der Schwingungen untersucht, die nach den gewonnenen Erkenntnissen für die gestellten Ziele am besten geeignet ist. Diese Messungen wurden bei der Auswertung immer in Intervalle von je 60 Minuten Dauer aufgeteilt und dann einzeln ausgewertet. Im Beitrag werden exemplarisch die Messergebnisse für etwa 11 Tage bzw. für 258 Stundenintervalle behandelt, wobei relativ stabile Windverhältnisse bis zu 8 m/s in 100 Metern Höhe herrschten.

In Abbildung 5 werden exemplarisch die sog. Trendkarten eines Sensors für dieses Zeitintervall und die entsprechenden Windverhältnisse (Windstärke und Windrichtung nur bei relativ starkem Wind ab 3 m/s) dargestellt. Die Frequenzspektren in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Erfassung werden in diesen Trendkarten (NEITZEL et al. 2018 bzw. RESNIK & SARGSYAN 2019) zusammengeschoben und eine variable Färbung in Abhängigkeit von den festgestellten Amplituden bei den einzelnen Frequenzen ausgewählt. Die Messungen unter Last (Anregung durch Wind und Betrieb) zeigen im behandelten Beispiel eine eindeutige dynamische Charakteristik des Tragwerkes mit mehreren Eigenfrequenzen, die sich als vertikale helle Linien in den entsprechenden Trendkarten zeigen. So sind z. B. in der Abbildung exemplarisch mehrere charakteristische Frequenzen im Intervall zwischen 1,4 und 1,6 Hz bei starkem Wind deutlich erkennbar.

Da die Beschreibung von allen Mess- und Auswertungsergebnissen in unterschiedlichen Frequenzbereichen von Schwingungen den Umfang des Beitrages sprengen würde, wird hier nur ein Amplitudenvergleich in diesem Frequenzbereich (Bandpassfilter zwischen 1 und 2 Hz) behandelt. In jedem Stundenintervall der gefilterten Zeitreihen des behandelten Zeitraums werden die mittleren Schwingungsamplituden ermittelt. Während in den oberen Diagrammen der Abbildung 6 die Amplituden der jeweiligen Messintervalle beider Sensoren einzeln dargestellt sind, zeigen die unteren Diagramme die ermittelten Verhältnisse von entsprechenden Amplituden (unten / oben). Die Änderungen der Schwingungsamplituden beider Sensoren können sehr gut mit den variierenden Windverhältnissen (Abbildung 5) erklärt werden. Falls in den entsprechenden Intervallen keine ausreichenden Windverhältnisse größer als 3 m/s bzw. die signifikanten Amplituden größer als das dreifache Sensorrauschen (vgl. Abschnitt 6) festgestellt wurden, wurden automatisch keine Kontrollparameter ermittelt.



Abb. 6: Ergebnisse der ausgewählten Testmessungen an einer Windkraftanlage

Die signifikanten Differenzen zwischen den Schwingungsamplituden ergeben sich erwartungsgemäß bei der Verbindung in der vorherrschenden Hauptwindrichtung. Das Verhältnis der Amplituden in diesem spektralen Bereich beträgt etwa 0,9, was auf eine starke Abnutzung im Laufe der Betriebsjahre bei dynamischen Belastungen hinweist. In der Querrichtung beider Anlagen ist dagegen eine sehr gute Übereinstimmung der Amplituden (A_u / A_o \approx 1) deutlich erkennbar, was als eine fehlerfreie Verbindung in diesem Bereich gedeutet werden kann.

6 Besondere Anforderungen an die Kalibrierung von Sensoren

Eine signifikante Änderung des Verhältnisses der ermittelten Schwingungsamplituden kann bei einer kontinuierlichen Überwachungsmessung nach der beschriebenen Methodik sowohl durch Bauschäden als auch durch induzierte Effekte in den Sensoren selbst verursacht werden. So können die ermittelten Differenzen sich z. B. durch unterschiedliches Grundrauschen der Sensoren ergeben. Solche sensorbedingten Effekte können nur durch eine sorgfältige Kalibrierung des Messsystems berücksichtigt werden.



Abb. 7: Berücksichtigung des Rauschverhaltens von MEMS-Sensoren (exemplarisch)

Das Niveau des Eigenrauschens der verwendeten Beschleunigungssensoren bestimmt maßgeblich die untere Auflösungsgrenze eines Sensors und ist oftmals frequenzabhängig (RESNIK & GERSTENBERG 2013). Bei der Anwendung von kommerziellen Sensoren, die speziell für präzise Messungen konzipiert werden, kann dieses Niveau aus den Kalibrierzertifikaten entnommen werden. Es ist dabei jedoch zu berücksichtigen, dass die Kalibrierung unter Labor- und optimalen Ankoppelbedingungen durchgeführt wird. In der Praxis können gewisse Parameter und auch das Rauschverhalten der im Labor ermittelten Parameter abweichen, da die Ankoppelbedingungen oft schlechter sind. Es ist außerdem bekannt, dass in den ersten Jahren nach Herstellung der Sensoren ein Absinken der Empfindlichkeit (Alterungsprozess) zu erwarten ist. Bei der Bestimmung des Eigenrauschens eines komplexen Messsystems ist auch das Rauschen der an den Sensor angeschlossenen Signalverarbeitungselektronik zu berücksichtigen, die sich ebenfalls von den Laborbedingungen unterscheiden kann.

Um die Kosten möglichst gering zu halten, beschränken sich die Hersteller von preiswerten MEMS-Massenmarktsensoren auf elektronische Tests auf Wafer-Ebene, bei denen Parameter wie z. B. die Empfindlichkeit und der Nulldurchgang (Offset) bestimmt werden. Auf Basis dieser Tests erfolgt die Charakterisierung der einzelnen Sensoren über statistische Informationen und ist daher weit von einer vollständigen Kalibrierung entfernt. Diese Vorgehensweise ist durchaus für die meisten Anwendungen in den sogenannten "low-quality"-Anwendungsbereichen akzeptabel, aber nicht für die hier behandelten Messaufgaben. Beim Kalibrieren unter Laborbedingungen in Eigenregie können die einzelnen Sensoren in der geplanten Konfiguration in einer möglichst ruhigen Umgebung, z. B. auf einem tiefgeründeten Pfeiler weit entfernt von Straßenverkehr und/oder Maschinen, aufgestellt werden. In der Abbildung 7 sind die typischen Ergebnisse der Testmessungen dieser Art für drei Messachsen eines Sensors dargestellt. In der Mitte sind die Signale von beiden Hauptachsen des Sensors zu erkennen. Konstruktionsbedingt weist die dritte Messachse (Z) ein wesentlich höheres Rauschen auf. Außerdem wirkt eine konstante Beschleunigung von 1 g auf diese Achse, die hier allerdings nicht dargestellt wurde. Im Zuge von umfangreichen Untersuchungen dieser Art wurde festgestellt, dass der Rauschpegel der verwendeten Sensoren Variationen bis zu einigen Prozent aufweist und sich außerdem im Laufe der Zeit ändert (RESNIK & GERSTENBERG 2013). Aus diesen Gründen sollte bei hohen Genauigkeitsanforderungen (wie in den hier behandelten Beispielen) ein regelmäßiger Nachkalibrierzyklus eingehalten werden. Da die oben beschriebene Ermittlung des Eigenrauschens aller verwendeten Sensoren einen sehr hohen organisatorischen und finanziellen Aufwand mit sich bringt, können die Vergleichswerte in den Ruhephasen der untersuchten Windkraftanlagen erfolgreich verwendet werden. Ein typisches Beispiel dieser Art ist exemplarisch in der Abbildung 7 präsentiert. Es handelt sich dabei um die Messwerte der Anlage 1 in der Hauptwindrichtung (oben, links in der Abbildung 6). Während das Verhältnis zwischen den Amplituden beider Sensoren bei einer starken dynamischen Beanspruchung etwa 0,9 beträgt, weisen die Amplituden in den Ruhephasen ohne Wind und Betrieb keine signifikanten Abweichungen voneinander auf, was auf ein etwa gleiches Grundrauschen von beiden MEMS-Sensoren hinweist.

Bei allen Typen von Schwingungsaufnehmern werden die Beschleunigungswerte nicht direkt, sondern über Hilfsgrößen wie z. B. elektrische Spannung ermittelt. Der Zusammenhang zwischen den Beschleunigungen und diesen Hilfswerten wird mit einem Übertragungsfaktor beschrieben, der ebenfalls durch eine Kalibrierung ermittelt wird. Dieser Parameter ist bei den meisten Sensoren gering frequenz- und temperaturabhängig und wirkt bei der hier behandelten Methodik als ein unterschiedlicher Maßstabsfaktor beider Sensoren eines Paars. Somit wird sich das ermittelte Amplitudenverhältnis je nach dynamischer Beanspruchung unterscheiden und die Interpretation von Messergebnissen erschweren. Eine Kontrolle und Berücksichtigung solcher Einflüssen wird in diesem Beitrag nicht näher behandelt.

7 Zusammenfassung

Die hier beschriebenen Vorhaben sind generell als eine Fortsetzung des im Jahr 2016 erfolgreich abgeschlossenen Forschungsprojektes "Entwicklung von Verfahren zur frühzeitigen Erkennung sicherheitsrelevanter Defekte an Fundamenten von Windenergieanlagen im Rahmen der Condition-Monitoring-Systeme" (RESNIK et al. 2015 bzw. WESAFE 2016) mit der Finanzierung durch das Institut für angewandte Forschung Berlin e.V. (IFAF) zu betrachten. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse und entwickelten Messsysteme werden von den Autoren nun auch für die Flanschverbindungen von WKA-Türme verwendet und entsprechend weiterentwickelt. Bei den ersten Testmessungen konnte erfolgreich ein Nachweis erbracht werden, dass sowohl das entwickelte Messsystem als auch die Auswerteprogramme eigener Entwicklung für eine Kontrolle von Flanschverbindungen und eine treffende Interpretation von dynamischen Bauwerksdeformationen auf Grund natürlicher Anregungsquellen, wie Wind und Betrieb, gut geeignet sind. Bei den weiteren Untersuchungen erhoffen die Autoren durch die Verknüpfung von unterschiedlichen Verfahren und ihre gemeinsame Analyse, eine bessere Kenntnis der Dynamik und Entwicklung von Flansch-Schäden von modernen Windkraftanalagen zu gewinnen und eine durchgehende Kontrolle dieser Prozesse zu ermöglichen.

Literatur

- DIBT (2012): Richtlinie für Windenergieanlagen Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung. Deutsches Institut für Bautechnik. https://www.dibt.de/fileadmin/dibt-website/Dokumente/Referat/I8/Windenergieanlagen_Richtlinie_Einwirkungen_Nachweise.pdf
- GASCH, R. & TWELE, J. (2011): Windenkraftanlagen. Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb. Verlag Vieweg Teubner. 587 S.

- MERTENS M. (2015): Handbuch Bauwerksprüfung. Standsicherheit, Verkehrssicherheit, Dauerhaftigkeit. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller. 400 S.
- MUNTANIOL, E. (2016): Rechercheergebnisse zum Thema: Überwachung von Schraubenverbindungen an Windenergieanlagen. Beuth Hochschule für Technik, Fachbereich Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik. Berlin, 42 S.
- NEITZEL, F. et al. (2018): Schwingungsuntersuchungen. In: Schwarz W. (Hrsg.) Ingenieurgeodäsie, Handbuch der Geodäsie, Verlag Springer, Berlin, S. 463 -506.
- RESNIK B. (2014): Kontrolle der Türme von Windenergieanalagen im Rahmen von periodischen Untersuchungen. Forum - Zeitschrift des Bundes der Öffentlich bestellten Vermessungsingenieure. Berlin. Heft 1. 2014. S. 4-13.
- RESNIK, B., SCHLENZKA, T., SCHIEFELBEIN, N. & WERNER, D. (2015): Konzepte der messtechnischen Erkennung sicherheitsrelevanter Defekte an Fundamenten von Windenergieanlagen. In: Groß & von Klinski (Hrsg.) Research Day 2015, Mensch und Buch Verlag, Berlin, S. 201-205.
- RESNIK B. & SARGSYAN, A. (2019): Anwendung von MEMS-Beschleunigungssensoren im Rahmen von Bauwerksüberwachungen anhand eines typischen Beispiels. AVN Allgemeine Vermessungs-Nachrichten. Wichmann Verlag, Heidelberg, Heft 6-7, S. 163-172.
- RESNIK B. & GERSTENBERG J. (2013): Qualitätssicherung bei der Anwendung von preiswerten MEMS-Sensoren für geodätische Zwecke. In: Neumann (Hrsg.) Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren. Wißner-Verlag, Augsburg. S. 171-186.
- VDI 2200 (2007): Dichte Flanschverbindungen Auswahl, Auslegung, Gestaltung und Montage von verschraubten Flanschverbindungen. Beuth Verlag, Berlin. 74 S.
- WESAFE (2016): prof.beuth-hochschule.de/resnik/wesafe-projekt/
- WIEGAND, H., KLOOS, K.-H. & THOMALA, W. (2007): Schraubenverbindungen. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg. 428 S.

Staumauerüberwachung – Vergleich dreier Technologien für epochenweise Deformationsmessungen

Andreas WIESER, Sebastian CONDAMIN, Vincent BARRAS, Lorenz SCHMID und Jemil BUTT

1 Einleitung

Stauanlagen sind besonders kritische Infrastrukturen, weil ihre Funktionsfähigkeit von großer wirtschaftlicher Bedeutung ist und ein allfälliges Versagen zu erheblichen Schäden führen kann. Das Risiko wird durch umfassende Überwachung der Gebrauchs- und Tragfähigkeit reduziert, deren Ziel es insbesondere ist, Abweichungen des Bauwerkszustandes und Bauwerksverhaltens vom Normalzustand bzw. Normalverhalten frühzeitig zu erkennen.

In der Schweiz regeln das Stauanlagengesetz (2010) und die Stauanlagenverordnung (2012) den Bau und Betrieb von Stauanlagen.⁴ Anforderungen an die geodätischen Überwachungsmessungen sind in der Richtlinie des Bundesamts für Energie BFE (2015)¹ und den Empfehlungen des Schweizerischen Talsperrenkomitees STK (2013)¹ beschrieben. Letztendlich verfügt jede Stauanlage über ein individuelles Überwachungsreglement, welches die Anforderungen an die Überwachungsmessungen regelt. Entsprechende Vorgaben und Empfehlungen existieren auch in anderen Ländern, wobei in Österreich diesbezüglich die Staubeckenkommission eine zentrale Rolle einnimmt und in Deutschland die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA).

Üblicherweise umfasst die Überwachung von Stauanlagen neben regelmäßigen Funktionskontrollen und visueller Inspektion auch ein umfangreiches messtechnisches Programm mit einer Kombination quasi-kontinuierlicher Messungen verschiedenster geometrischer und physikalischer Parameter sowie epochenweiser geodätischer Netzmessung zur hochgenauen Kontrolle und zur Einbindung der übrigen Beobachtungen in ein wohldefiniertes, externes Referenzsystem. Beiträge zur Überwachung von Stauanlagen haben damit beim Ingenieurvermessungskurs eine lange Tradition. Aus jüngerer Vergangenheit verweisen wir insbesondere auf den Beitrag von ROSENKRANZ und MEHL (2000), in dem die Autoren am Beispiel einer Trinkwassertalsperre das umfangreiche Messkonzept mit den zugrundeliegenden Anforderungen und Designkriterien beschreiben, sowie auf die Beiträge von BÄUMKER et al. (2000), ELING und KUTTERER (2007), KISTLER et al. (2010), LIENHART et al. (2014) sowie KREGAR et al. (2017).

Trotz des Potentials und verschiedener Arbeiten zum Einsatz flächenhafter Messverfahren im Zusammenhang mit der geodätischen Überwachung von Stauanlagen haben sich diese in der Praxis noch nicht durchgesetzt. Im Rahmen einer Zusammenarbeit zwischen dem Bundesamt für Landestopografie (swisstopo), der Haut Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD) und der ETH Zürich haben wir zwei solche Verfahren, nämlich

437

⁴ Diese Dokumente sind online verfügbar: <u>https://www.admin.ch/gov/de/start/bundesrecht/suche-und-neuigkeiten.html</u>, <u>https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/aufsicht-und-sicherheit/tal-sperren/richtlinien-und-hilfsmittel.html</u>, <u>http://www.swissdams.ch/de/publications/publications-csb</u>

terrestrisches Laserscanning (TLS) und terrestrische Radarinterferometrie (TRI), an einer Staumauer experimentell mit der Überwachung durch geodätische Netzmessung verglichen. Ziel der Untersuchung ist es, an einem konkreten Beispiel aufzuzeigen, ob und inwiefern TLS bzw. TRI im aktuellen Stand der Entwicklungen alleine oder in Kombination die etablierten Verfahren zur Staumauerüberwachung sinnvoll ergänzen oder teilweise vielleicht sogar substituieren können.

Im vorliegenden Beitrag berichten wir über erste Resultate aus dieser Untersuchung. Wir stellen in Kapitel 2 die Staumauer vor, an der wir Messungen von 25.2. bis 8.3.2019 (Winterkampagne "W19") und von 20.8 bis 5.9.2019 (Sommerkampagne "S19") durchgeführt haben. Die Zeitfenster hatten wir so ausgewählt, dass aufgrund des typischen Verhaltens der Mauer Deformationen von 2-3 cm zwischen den Epochen und vernachlässigbare Deformationen innerhalb der Epochen zu erwarten waren. In den Kapiteln 3, 4 und 5 berichten wir über die geodätische Netzmessung, TLS und TRI und deren jeweilige Auswertung. Abschließend vergleichen wir die Verfahren zusammenfassend (Kapitel 6).



Abb. 1: Blick von Südosten auf die Staumauer Schiffenen (Foto: © VBS/DDPS, Genehmigung zum Abdruck: 10.12.2019).

2 Staumauer Schiffenen

Für die vorliegende Untersuchung haben wir die Staumauer Schiffenen ausgewählt, die von der Firma «Groupe E» betrieben und seit Inbetriebnahme (1964) von swisstopo geodätisch überwacht wird. Es handelt sich um eine Bogenmauer, die die Saane im Kanton Fribourg (Schweiz) zum Schiffenensee aufstaut (vgl. Abbildung 1). Die Mauer ist 417 m lang und 47 m hoch. Sie ist am Fuß 12 m und an der Krone 7 m breit.

Die Staumauer ist mit acht permanent messenden Loten ausgerüstet: drei Pendel- und fünf Schwimmloten. Die Lotmessungen zeigen die aufgrund von Temperatur- und Seestandänderung zu erwartenden Bewegungen. In der Mitte der Mauer beträgt die jährliche radiale Kronenbewegung ca. 35 mm (vgl. Abbildung 2), nahe dem Mauerfuß, im Niveau C (s. Abbildung. 2, rechts) sind es noch ca. 4 mm (hier nicht dargestellt). Die tangentialen Bewegungen erreichen auf Höhe der Krone etwa 2 mm und liegen im Bereich des Mauerfußes bei wenigen 0,1 mm. Ergänzend zu den Lotmessungen werden periodisch geodätische Deformationsmessungen durchgeführt. Die Netzanlage und weitere Details zur Netzmessung sind in Kapitel 3 ausgeführt.



Abb. 2: Lotmessungen Block 12, Niveau A (radiale Auslenkung gegenüber Fels unterhalb des Mauerfußes; Balken kennzeichnen Messepochen in 2019); Vertikalschnitt durch Block 12 mit Niveaus A und C der Lote sowie Reihen A bis E der Zielmarken (Daten und Schnitt: Groupe E, J.-C. Kolly).

3 Geodätische Netzmessung

Das geodätische Überwachungsnetz der Stauanlage Schiffenen besteht aus verschiedenen Netzteilen, die in der Regel alle 5 Jahre gemessen werden. Das *äußere Netz* besteht aus 4 Punkten außerhalb des Einflussbereichs der Staumauer (Entfernung zur Stauanlage 0,5 bis 2,5 km). Diese Punkte sowie 2 Punkte des inneren Netzes werden seit 1989 jeweils mit langen statischen GNSS-Messungen bestimmt, wobei alle 6 Punkte gleichzeitig besetzt sind und die

Messdauer zwei bis drei Tage beträgt. Die Auswertung erfolgt mit der Bernese GNSS Software (DACH et al., 2015) unter Anschluss des lokalen Netzes an das Automatische GNSS Netz Schweiz (AGNES)⁵.

Das *innere Netz* besteht aus mehreren Teilen: Einerseits werden 26 Punkte an der Mauer mit Vorwärtseinschnitten hochpräzise bestimmt. Andererseits wird ein beidseitig angeschlossener Polygonzug durch die Kontrollgänge der Mauer gemessen, um die Lotmessungen zu kontrollieren und in das geodätische Netz zu integrieren. Schließlich werden Distanzen, Horizontal- und Vertikalwinkel zwischen den Pfeilern des inneren Netzes gemessen und mittels Präzisionsnivellement allfällige Höhenänderungen auf der Mauerkrone und am Fuß der Mauer bestimmt.



Abb. 3: Netzplan der tachymetrischen Messungen der vorliegenden Untersuchung, Radarstandpunkt und TLS-Standpunkte.

Da die letzte 5-Jahresmessung erst im Oktober 2015 erfolgt war, haben wir für die vorliegende Untersuchung nicht das gesamte Überwachungsnetz gemessen, sondern nur jenen Teil des inneren Netzes, der die Geometrie der Mauer repräsentiert (vgl. Abbildung. 3). Dafür wurden tachymetrische Messungen auf sechs Pfeilern des inneren Netzes durchgeführt. Auf GNSS-Messungen und das Präzisionsnivellement haben wir verzichtet. Die Netzauswertung erfolgte mit LTOP⁶ 2011.1.3, wobei das Netz stochastisch auf drei Referenzpunkten gelagert

⁵ https://www.swisstopo.admin.ch/de/wissen-fakten/geodaesie-vermessung/permanentnetze.html

⁶ https://shop.swisstopo.admin.ch/de/products/geo_software/LTOP_info

wurde, welche sich in den vergangenen Jahrzehnten als stabil erwiesen hatten. Trotz der annähernd linearen Anordnung dieser drei Punkte ist das Datum für den Vergleich mit TLS und TRI genau genug definiert. Aufgrund der identischen Netzlagerung in beiden Epochen wurden die Verschiebungen schließlich punktweise als Koordinatendifferenz zwischen beiden Epochen geschätzt.

Für die Koordinaten der Pfeiler (außer den Datumspunkten) liefert die epochenweise Netzauswertung eine Genauigkeit zwischen 0,4 und 1,0 mm (große Halbachse der 95 %-Konfidenzellipse). Verschiebungen dieser Pfeiler können ab einem Betrag von 0,6 bis 1,4 mm identifiziert werden (große Halbachse der 95 %-Konfidenzellipse der Koordinatendifferenzen zwischen den beiden Messepochen), Verschiebungen der Punkte an der Staumauer, je nach Punkt, ab einem Betrag von 1,5 bis 3,5 mm (vgl. Abbildung 4).

Die Lotmessungen (vgl. Abbildung 2, links unten) zeigen in der Mitte der Mauer, nahe der Krone, eine radiale Verschiebung von ca. 26 mm zwischen den beiden Messepochen. Aus den tachymetrischen Messungen resultieren berechnete Verschiebungen auf Punktreihen in fünf verschiedenen Höhen an der Staumauer (Abbildung 2, rechts). Für zwei dieser Reihen (Reihe A, unmittelbar unter der Krone, und Reihe C, 18 m tiefer) sind sie in Abbildung 4 dargestellt. Außer auf den Punkten 2A und 2C ragen die Vektoren an allen Punkten deutlich aus der jeweiligen relativen 95 %-Konfidenzellipse heraus. Dies zeigt, dass die betreffenden Verschiebungen statistisch signifikant sind. Ihre Differenzen gegenüber den Lotdaten sind dagegen nicht signifikant: Die mittels Netzmessung bestimmten Deformationen stimmen unter Berücksichtigung des Höhenunterschiedes zwischen Netzpunkten und Lotablesestellen auf 0,5 - 1,5 mm mit den Lotwerten überein. Die maximalen Verformungen während der Winter- und Sommer-Kampagne betrugen laut Lotdaten ebenfalls etwa 1,5 mm, was in der Netzauswertung nicht gesondert berücksichtigt wurde.



Abb. 4: Tachymetrisch bestimmte Verschiebungen zwischen den Kampagnen W19 und S19 (Vektoren) und zugehörige relative 95%-Konfidenzellipsen.

4 Terrestrisches Laserscanning

Terrestrische Laserscans der Staumauer wurden in beiden Epochen mit einem Riegl VZ-2000i und in der Sommerkampagne zusätzlich mit einer Leica P40 durchgeführt. Jeder Scan umfasste azimutal 360° mit einer Schrittweite von etwa 0,01°. Die Messdaten wurden

mithilfe vor Ort gemessener atmosphärischer Parameter meteorologisch korrigiert. Die originalen Punktwolken weisen auf der Staumauer Punktabstände von 0,9 bis 4,5 cm auf. In der Winterkampagne W19 erfolgten die Scans zeitgleich mit der geodätischen Netzmessung von Stativen aus. Die Scannerstandpunkte waren dafür vermarkt und in die Netzmessung einbezogen worden. In der Sommerkampagne S19 wurden die Scans zeitlich vor der geodätischen Netzmessung durchgeführt, sodass es möglich war, direkt von den geodätischen Pfeilern aus zu scannen. Die Standpunkte waren in beiden Epochen ähnlich (daher jeweils nur ein Symbol in Abbildung 3), aber nicht identisch. Angesichts der Entfernungen von 50 bis über 200 m zur Staumauer haben wir die resultierenden geringen Änderungen der Aufnahmegeometrie als vernachlässigbar eingestuft.

Auf die Errichtung von Targets für die Registrierung und Georeferenzierung wurde bewusst verzichtet. Stattdessen wurden die Scans rein punktwolkenbasiert registriert und durch Einpassung der resultierenden Standpunktskoordinaten auf die aus der geodätischen Netzauswertung bekannten Koordinaten der betreffenden Epoche georeferenziert. Beide Schritte wurden für die Scans mit dem VZ-2000i mittels RiScan Pro 2.8.2 inkl. GeoSysManager-Plugin und für die Scans mit der P40 mit Cyclone 9.2.1 durchgeführt. Die aus diesen Schritten resultierende Unsicherheit (Standardabweichung) der Koordinaten in den georeferenzierten Punktwolken betragen auf der Staumauer etwa 4 bis 20 mm (10–50 % des Punktabstandes). Sie resultieren jedoch hauptsächlich aus Unsicherheiten der Scannerorientierung und entsprechen aufgrund der Aufnahmegeometrie in erster Linie tangentialen Unsicherheiten auf der Staumauer.



Abb. 5: Sukzessive Filterung und Ausdünnung der Punktwolke (schematische Visualisierung im Querschnitt).

Nach diesen Schritten liegen drei Punktwolken im selben Koordinatensystem vor, welches durch die 3 Referenzpunkte des geodätischen Netzes realisiert ist (s. Kapitel 3). Eine Punktwolke (VZ-2000i) repräsentiert die Situation während der Epoche W19 und je eine für VZ-2000i und P40 die Situation während der Epoche S19. Ab hier kann die Analyse z. B. nach der von ELING & KUTTER (2007) bzw. ELING (2009) vorgeschlagenen Methode erfolgen. Wir haben uns jedoch zugunsten der Verwendung von Standardsoftware dafür entschlossen, auf Basis gefilterter Dreiecksvermaschungen der georeferenzierten Punktwolken direkt einen Model-to-Model-Vergleich, s. z. B. WUNDERLICH et al. (2016), HOLST et al. (2017), durch-zuführen, ohne zwischengeschaltete Segmentierung der Punktwolke und ohne Anpassung geometrischer Primitive.

Die Punktwolkenfilterung und der Epochenvergleich wurden mit 3D Reshaper 2018 MR1 ausgeführt. Die Analyse der rohen Punktwolken zeigt, dass die Punkte auf der Maueroberfläche in radialer Richtung etwa innerhalb eines Bereichs von 20 mm streuen (Peak-to-Peak). Die Punktwolken wurden zur Reduktion des Rauschens unter Verwendung der Funktionalität "Refine Mesh" mit Interpolation von Punkten sukzessive zu einem Mesh mit 15 cm Kantenlängen ausgedünnt (s. Abbildung 5). Schließlich wurden die Differenzen zwischen W19 und S19 als Mesh-to-Mesh-Vergleich berechnet. Für eine der beiden Analysen (W19: VZ-2000i, S19: P40) ist das Ergebnis in Abbildung 6 visualisiert. Zusätzlich zeigt die Abbildung die Deformation für den Block 12 auch am Beispiel eines stark überhöhten Vertikalprofils. Aus diesem Profil lässt sich auf eine Deformation von 21 mm im Bereich zwischen den Reihen E und A schließen (vgl. Abbildung 2). Sowohl dieser Wert als auch die im Profil ersichtliche Bewegung der Maueroberfläche von 7 mm im unteren Abschnitt differieren um weniger als 1 mm von einer linearen Interpolation der Lotdaten (nur Daten von 2 Ablesestellen verfügbar) für die betreffenden Höhen und Zeitpunkte der Scans. Das weist auf eine sehr hohe Genauigkeit der aus den Scans abgeleiteten lokalen Deformation in der Mitte der Mauer hin. Die oben erwähnten tangentialen Unsicherheiten aus der Registrierung wirken sich hier offenbar nur geringfügig aus.



Abb. 6: Repräsentation der Oberflächendeformation (Winter: VZ2000i / Sommer: P40) mit einer Querschnittsansicht im Profil des zentralen Pendellots.

Um die Qualität der TLS-basierten Analyse möglichst über die gesamte Mauer hinweg zu beurteilen, haben wir einen Vergleich mit den Resultaten der geodätischen Netzmessung vorgenommen. Die Zielmarken auf der Staumauer (Bolzen mit Bohrung) sind zu klein, um in den Scans identifiziert zu werden. Wir haben sie daher auf Basis der bekannten Koordinaten jeweils orthogonal auf die TLS-Dreiecksvermaschung projiziert und die Koordinatenänderungen zwischen W19 und S19 anhand dieser Projektionen verglichen. Die RMS-Werte der Abweichungen zwischen TLS-Resultaten und geodätischer Netzmessung betragen über die gesamte Mauer etwa 5 mm, wobei die Abweichungen in den Außenbereichen der Mauer grösser sind als in der Mitte. Obwohl dieser Wert nur etwa um den Faktor 2 größer ist als die großen Halbachsen der relativen 95 %-Konfidenzellipsen aus der geodätischen Punktbestimmung (s. Kapitel 3), bedürfen die Abweichung weiterer Untersuchung, weil sie über die Mauer hinweg systematisch sind (Median ca. -3 mm für Riegl/Riegl und -1 mm für Riegl/Leica). Die Scanner wurden nicht vor Ort kalibriert, sodass wir entsprechend den von HOLST et al. (2019) berichteten Erfahrungen mit Abweichungen aufgrund nicht mehr ganz aktueller Kalibrierparameter rechnen. Außerdem ist zu erwarten, dass die TLS-Resultate noch von verbleibenden Abweichungen aus Registrierung und Georeferenzierung beeinflusst sind.

5 Terrestrische Radarinterferometrie

Für die Deformationsanalyse mithilfe terrestrischer Radarinterferometrie wurde das GPRI-II von Gamma Remote Sensing eingesetzt (WERNER et al. 2008; CADUFF et al. 2015). Als Ku-Band Interferometer bietet es das Potential, flächenhafte Deformationen geeigneter Oberflächen mit Sub-Millimeter Genauigkeit zu bestimmen. Bereits in den ersten Arbeiten zur Überwachung eines Staudamms mit Hilfe von Radarinterferometrie, z.B. TARCHI et al. (1999), wurde nachgewiesen, dass das Verfahren an solchen Bauwerken auch mit großen Zeitabständen zwischen den Messepochen noch eingesetzt werden kann, weil die Kohärenz auf den künstlichen Oberflächen gut erhalten bleibt.

Das Ergebnis jeder Einzelmessung ist ein Single Look Complex (SLC) Bild, dessen Achsen Azimut (Winkel um die annähernd vertikale Rotationsachse des Radars) und Entfernung (Range) repräsentieren und dessen Pixel (Bins) Signalstärke und Phase des rückgestreuten Signals im betreffenden Azimut-Range-Bin zeigen. In der gewählten Konfiguration hatte das Instrument eine Bin-Größe von 0,75 m x 0,1°, führte die Messung alle 2 min durch und benötigte jeweils 25 s zur Abdeckung des gewählten azimutalen Messbereichs von 250°.

Eine erste Herausforderung beim Einsatz eines Radarinterferometers ist die Standortwahl. Technologiebedingt können Signale aus unterschiedlicher Elevation nur unterschieden werden, wenn die betreffenden Objektoberflächen in unterschiedlichem Azimut und unterschiedlicher Entfernung liegen (JACQUEMART & MEIER 2014). Außerdem erlaubt die Phasenmessung nur die Schätzung der Deformationskomponenten in Richtung der Line-of-Sight (LOS). Wir haben daher einen zentralen Standort nahe der Staumauer und etwa auf Höhe des Mauerfußes gewählt (s. Abbildung 3). In der Mitte der Mauer entspricht ein Radarpixel damit etwa einer Fläche von $0,1 \ge 1,5 \le 0$ (b x h). An den äußeren Rändern überdeckt ein einzelnes Radarpixel dann allerdings die gesamte Höhe der Mauer.

Um eine hohe Wiederholbarkeit der Positionierung bei der zweiten Epoche zu gewährleisten, waren vorab Hülsen in den Boden eingelassen worden, in denen das Stativ für die Messungen verschraubt werden konnte. Die Zentrierung wurde mit Hilfe eines Vermarkungsbolzens und des im GPRI verbauten Laserlots sichergestellt. Die Orientierung wurde manuell mithilfe eines von uns selbst am Antennenaufbau fixierten Zielfernrohrs und eines markanten Referenzpunktes in ca. 45 m Entfernung realisiert; eine datengetriebene Feinregistrierung zwischen den Epochen war nicht mehr erforderlich.

Wegen der quasi-kontinuierlichen Messung über 48 (W19) bzw. 18 Stunden (S19), lag für jede Epoche ein umfangreicher Bildstapel von SLCs vor. Aufgrund veränderlicher meteorologischer Bedingungen während der Epochen (z. B. zwischenzeitlich Regen in W19) sind

nicht alle SLCs für die nachfolgende Analyse gleich gut geeignet. Wir haben daher zunächst auf Basis der Kohärenz zwischen aufeinanderfolgenden SLCs und einer Prä-Analyse der Deformation innerhalb der Epochen 171 SLCs aus der ersten und 61 aus der zweiten Epoche ausgewählt. Aus diesen haben wir unter der Annahme vernachlässigbarer Deformation innerhalb der Epochen (laut Lotdaten < 0,5 mm) jeweils pixelweise ein Epochenmittel gebildet. Das führt zu einem deutlich verbesserten Signal-Rausch-Verhältnis, was die nachfolgenden Schritte vereinfacht. Aus den Epochenmitteln wurde anschließend das Interferogramm gebildet, dessen Phasenwerte die geschätzten LOS-Deformationen modulo π beinhalten. Da die tatsächlichen Deformationen zwischen den Epochen die halbe Wellenlänge (8,8 mm) überschreiten, muss ein Phase-Unwrapping durchgeführt werden, um die Mehrdeutigkeiten aufzulösen (s. Abbildung 7). Wir haben dafür den SNAPHU Algorithmus von CHEN & ZEBKER (2002) mit einem Ausgangspunkt in der Nähe des Mauerfußes verwendet.



Abb. 7: Amplitudenbild (links) und Phasendifferenz (rechts) nach dem Unwrapping des Interferogramms W19-S19; Bins: 0,1° x 0,75 m.

Um die Resultate mit der Staumauer geometrisch in Bezug zu setzen, muss für jedes Pixel des Interferogramms die entsprechende Oberfläche im 3D-Raum gefunden werden. In der Literatur wird für diese Georeferenzierung der Radarresultate die Verwendung von Kontrollpunkten (Radarreflektoren) an bekannten Orten vorgeschlagen, s. z. B. ALBA et al. (2008). Wir haben im vorliegenden Projekt stattdessen eine Projektion der Azimut-Range-Bins auf eine TLS-Punktwolke und Merkmale, die in beiden Intensitätsbildern gefunden werden können, verwendet. Jeder Punkt der Punktwolke wurde dafür zunächst in Azimut und Entfernung bezogen auf das Radarinstrument umgerechnet, anschließend wurden korrespondierende Amplitude und Phasendifferenz aus dem Interferogramm abgegriffen und als Attribute dem jeweiligen Punkt der 3D Punktwolke zugeordnet. Die Registrierung von TLS-Punktwolke und Interferogramm wurde mithilfe manuell identifizierter markanter Punkte (z. B. Metallpfosten) im Azimut-Range-Raum durchgeführt, wobei es sich als nötig erwiesen hat, zusätzlich zu einer azimutalen Orientierung einen Distanzoffset und Maßstab für die Radardaten zu schätzen. Ebenso wie die übrige Auswertung der Radardaten wurde auch diese Registrierung mit selbst geschriebenen Funktionen in Matlab durchgeführt. Das entsprechende Resultat ist in Abbildung 8 ersichtlich und zeigt farbkodiert die ermittelten Deformationen in LOS-Richtung.



Abb. 8: LOS-Deformationen auf die TLS Punktwolke projiziert; Lage der Vertikalprofile aus Abbildung 9.

Die Resultate im mittleren Drittel der Staumauer sehen plausibel aus. Für einen Vergleich mit den Lotdaten und den Resultaten der anderen beiden Methoden haben wir noch punktweise entlang ausgewählter Vertikalprofile (s. Abbildung 8) die radiale Verschiebung im jeweiligen Horizont berechnet (Projektion von LOS in die Horizontalebene), auf das tiefstliegende sichtbare Niveau der Mauer bezogen (Verschiebung 0 in Höhe 497 m ü. M.), tiefpassgefiltert und in Abbildung 9 dargestellt. Die Kurven zeigen die beobachtete Deformation der Mauer entlang der Vertikalprofile. Sie betragen im mittleren Abschnitt demnach etwa -23 mm zwischen Mauerfuß und Krone. Die Abweichung zwischen den Radarresultaten und den Lotdaten betragen in diesem Bereich etwa bis 1,5 mm. Dies zeigt das Potential für epochenweise Staumauerüberwachung mittels TRI.

Die Darstellung der Profile, die 3D-Visualisierung in Abbildung 8 und das Amplitudenbild (Abbildung 7, links) zeigen jedoch auch weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf: Im vorliegenden Projekt haben wir die Zuordnung von Azimut-Range-Bins zu 3D-Koordinaten mittels nächster Nachbarschaft durchgeführt, was die Unstetigkeiten an den Grenzen der Bins auf das 3D-Modell überträgt und die nicht der Realität entsprechenden (geglätteten) Treppenfunktionen in den Vertikalprofilen verursacht (s. Abbildung 9). Zwischen den Epochen stark veränderte Reflexionsbedingungen (z. B. durch lokale Oberflächennässe) führen ebenso zu Artefakten in den Daten (z. B. im Schwemmbereich) wie unbehandelte Signalabschattungen (z. B. scheinbare Diskontinuität der Deformation hinter dem Werksgebäude). Signalreflexionen sind im Amplitudenbild dort klar erkennbar, wo sich keine sichtbaren Reflektoren befinden (z. B. Abbildung 7, links, am linken und rechten Bildrand hinter der Mauer); es muss jedoch erwartet werden, dass ähnliche Effekte auch die Mauer selbst betreffen und dort, in Kombination mit geänderten Reflexionsbedingungen, aufgrund von Mehrwegeffekten Abweichungen im Interferogramm verursachen. Alle diese Punkte sowie die angemessene Korrektur meteorologischer Effekte, deren Auswirkung derzeit noch einige 0,1 mm betragen können, brauchen weitere Untersuchungen.



Abb. 9: Aus den Radardaten abgeleitete radiale Deformation entlang ausgewählter Vertikalprofile (s. Abbildung 8).

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im vorliegenden Beitrag haben wir erste Resultate aus einem Projekt zur vergleichenden Analyse der Deformationen an einer Bogenmauer für die beiden flächenhaften Messverfahren terrestrisches Laserscanning (TLS) und terrestrische Radarinterferometrie (TRI) sowie für geodätische Netzmessung präsentiert. Alle drei Verfahren liefern vergleichbare Resultate für die Deformation entlang von Vertikalprofilen im zentralen Bereich. Die Verformung zwischen Winter und Sommer 2019 beträgt in diesem Abschnitt etwas über 20 mm. Die Resultate weichen von denen der Lotdaten bei allen drei Verfahren nur etwa bis 1,5 mm ab. Das liegt etwa in der Größenordnung der Veränderungen, die unter den realen Einsatzbedingungen an der vorliegenden Staumauer mit Hilfe der geodätischen Netzmessung gerade signifikant nachweisbar sind.

Als Ersatz für die geodätische Netzmessung kommen derzeit dennoch weder TLS noch TRI in Frage. Zunächst liegt das an zahlreichen Detailproblemen, welche weiterer Untersuchungen bedürfen. Im Zusammenhang mit TLS sind das vor allem die ausreichend genaue Registrierung und eine zeitlich ausreichend nahe liegende Kalibrierung. Im Zusammenhang mit TRI sind es unter anderem die mögliche Beeinflussung durch Signalausbreitungseffekte (Mehrwegausbreitung und Atmosphäre), die Zuordnung der Radarpixel zu 3D-Positionen bzw. Flächensegmenten (inkl. Registrierung und Vermeidung von Overlay-Effekten), sowie die hohen Anforderungen an Wiederholbarkeit von Instrumentenstandort und Orientierung. Vor allem aber sind die Modelle zur Prädiktion der Unsicherheit der abgeleiteten Deformationen für beide Verfahren noch nicht weit genug entwickelt. Diese Verfahren können derzeit also noch nicht ohne weitere Vorarbeiten für einen statistisch gesicherten Nachweis kleiner, lokaler Veränderungen eingesetzt werden.

Die Betreiberin der Staumauer Schiffenen ist dennoch an einer Untersuchung flächenhafter Überwachungstechnologien interessiert, und zwar aus Gründen, die auch für andere Stauanlagenbetreiber gelten dürften: Einerseits betreibt die Groupe E auch Staumauern, bei welchen konstruktionsbedingt keine Lotanlagen verbaut werden konnten, z. B. weil die Mauer zu dünn ist, sodass eine unabhängige Kontrolle geodätischer Netzmessungen wünschenswert ist. Andererseits weisen diverse Staumauern spezielle Konstruktionen auf, welche mit den klassischen geodätischen Überwachungsmessungen nur ungenügend detailliert überwacht werden können, bei der Staumauer Schiffenen beispielsweise markante Verstärkungen im Bereich der Überläufe. Schließlich muss auch die Umgebung der Stauanlage wasserseitig und luftseitig überwacht werden, soweit Deformationen oder Oberflächenveränderungen in diesen Bereichen die Funktionsfähigkeit oder Standsicherheit der Anlage beeinträchtigen können. Es ist wert, weiter zu untersuchen, ob flächenhafte Messverfahren für solche Fragestellungen die benötigte Information tatsächlich effizient liefern.

Der Einsatz von TRI für epochenweise Überwachungsmessung an Staumauern birgt – selbst abseits der noch offenen Fragen zu Kalibrierung und Unsicherheitsmodellierung – noch deutlichen Forschungsbedarf. Aufgrund der großen Reichweite, der möglichen hohen zeitlichen Auflösung (wenige Minuten pro Aufnahme), der Möglichkeit, auch durch Nebel zu messen, und der potentiell hohen Präzision ist TRI insbesondere für zeitweise kontinuierliche Überwachung von Stauanlagen inklusive der Umgebung interessant, etwa im Zusammenhang mit dem Einstauvorgang, dem Verhalten unter Pumpbetrieb oder zur Risikoabklärung von Hangrutschungen. TLS erscheint dagegen bereits jetzt als Ergänzung zur geodätischen Netzmessung interessant, wenn flächenhafte Indikation z. B. zu Übergangszonen oder auffälligen Unterschieden an Übergängen zwischen Blöcken der Staumauer oder an Ein- und Aufbauten gebraucht wird. Wegen der hohen räumlichen Auflösung und des direkten 3D-Bezugs können die Resultate unmittelbar bestimmten Abschnitten der Anlage zugeordnet werden.

Dank

Die Groupe E hat diese Untersuchung durch Zugang zur Stauanlage, Bereitstellung von Daten und durch Beiträge zur Diskussion der Resultate unterstützt; ein besonderer Dank gebührt Herrn Jean-Claude Kolly. Das Bundesamt für Landestopografie swisstopo hat diese Arbeit über die Eigenleistungen hinaus finanziell unterstützt. Das Bundesamt für Energie BFE hat zur Auswahl der Stauanlage und zur Definition der Projektziele beigetragen.

Literatur

- ALBA, M., BERNARDINI, G., GIUSSANI, A., RICCI, P.P., RONCORONI, F., SCAIONI, M., VALGOI, P. & ZHANG, K. (2008): Measurement of dam deformations by terrestrial interferometric techniques. Intl. Archives ISPRS, 37(B1), S. 133-139
- BÄUMKER, M., FITZEN, H.-P. & BACKHAUSEN, D. (2000): Dreidimensionale permanente Überwachung der Edertalsperre mit GPS. In: Beiträge zum 13. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, München, S. 155-165

- CADUFF, R., SCHLUNEGGER, F., KOS, A. & WIESMANN, A. (2015): A review of terrestrial radar interferometry for measuring surface change in the geosciences. Earth Surface Processes and Landforms, 40(2), 208–228
- CHEN, C.W. & ZEBKER, H.A. (2002): Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, S. 1709-1719
- DACH, R., LUTZ, S., WALSER, P. & FRIDEZ, P. (HRSG) (2015): Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual, Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing. DOI: 10.7892/boris.72297; ISBN: 978-3-906813-05-9
- ELING, D. & KUTTERER, H. (2007): Terrestrisches Laserscanning f
 ür die Bauwerks
 überwachung am Beispiel einer Talsperre. In: Beitr
 äge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, S. 119-130
- ELING, D. (2009): Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung. Dissertation, Leibniz Universität Hannover. DGK Reihe C (641)
- HOLST, C., SCHMITZ, B., SCHRAVEN, A. & KUHLMANN, H. (2017) Eignen sich in Standardsoftware implementierte Punktwolkenvergleiche zur flächenhaften Deformationsanalyse von Bauwerken? ZfV 142, S. 98-110
- HOLST, C., MEDIĆ, T., BLOME, M. & KUHLMANN, H. (2019) TLS-Kalibrierung: in-situ und/oder a priori? In: Terrestrisches Laserscanning 2019 (TLS2019), DVW-Schriftenreihe, Band 96, S. 89-104
- JACQUEMART, M. & MEIER, L. (2014). Deformationsmessungen an Talsperren und in deren alpiner Umgebung mittels Radarinterferometrie. Wasser Energie Luft (106), 105-111
- KISTLER, M., GUILLAUME, S., MARTI, U., RAY, J. & WIGET, A. (2010): Vergleich und Evaluation von Ausgleichungsmodellen f
 ür die Deformationsanalyse an Talsperren oder die Bauwerks
 überwachung. In: Beitr
 äge zum 16. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, M
 ünchen, S. 211-216
- KREGAR, K., SAVSEK, S. & STEBE, G. (2017): Statistical Evaluation of the Structural Monitoring with Terrestrial Laser Scanning. In: Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, S. 337-349
- LIENHART, W., WOSCHITZ, H. & KLUG, F. (2014): Faseroptische Überwachung von Blockfugenbewegungen einer Talsperre. In: Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Zürich, S. 371-380
- ROSENKRANZ, H. & MEHL, J. (2000): Messtechnische Bauwerksüberwachung für den Neubau der Talsperre Leibis/Lichte (Thüringen) - Messprogramm für eine der höchsten Gewichtsstaumauern Deutschlands. In: Beiträge zum 13. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, München, S. 40-50
- TARCHI, D., RUDOLF, H., LUZI, G., CHIARANTINI, L., COPPO, P. & SIEBER, A. J. (1999): SAR interferometry for structural changes detection: a demonstration test on a dam. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), S. 1522–1524
- WERNER, C., STROZZI, T., WIESMANN, A. & WEGMULLER, U. (2008): GAMMA's portable radar interferometer. In: Proc. IAG/FIG Symposium, 12-15. Mai, Lissabon, Portugal
- WUNDERLICH, TH., NIEMIER, W., WUJANZ, D., HOLST, C., NEITZEL, F. & KUHLMANN, H. (2016) Areal Deformation Analysis from TLS Point Clouds – The Challenge. AVN 123, S. 340-351

Naturräumliche Gegebenheiten und dreidimensionale Vermessung des Luftschutzstollens Schloss St. Martin, Graz

Viktor KAUFMANN, Christian BAUER, Bostjan STRMSEK und Thomas MIKL

1 Zusammenfassung

In Graz (Bundesland Steiermark, Österreich) wurden während des Zweiten Weltkrieges mehrere Luftschutzstollen angelegt. Sie dienten gleichermaßen der NS-Administration, der Wehrmacht und der Zivilbevölkerung als Schutz vor Fliegerbomben. Der bekannteste ehemalige Luftschutzstollen ist jener im Grazer Schloßberg. Über kleinere Luftschutzstollen ist wenig bekannt, da sie im Laufe der Zeit meist in Vergessenheit geraten sind. Im Rahmen der 100-Jahre-Feier des Bildungshauses Schloss St. Martin im Jahre 2019 wurde u.a. auch die NS-Zeit näher beleuchtet, und im Zuge dessen wurde der im Nahbereich des Schlosses St. Martin befindliche Luftschutzstollen erstmals in 3D vermessen sowie einer detaillierten ingenieurgeologischen und auch archäologischen Untersuchung unterzogen. In diesem Beitrag werden schwerpunktmäßig die geologische Situation und die dreidimensionale Vermessung der Stollenanlage beschrieben.

2 Einleitung

In Vorbereitung der 100-Jahre-Feier des Bildungshauses Schloss St. Martin im Jahre 2019 wurde die Geschichte des Schlosses und des Bildungshauses detailliert erforscht und in einem Jubiläumsband umfassend dokumentiert (BERGMANN-PFLEGER et al. 2019). Spezielles Augenmerk wurde auf die NS-Zeit (1938–1945) gelegt. In einem Gastbeitrag (THEUNE et al. 2019) wurden die Forschungsergebnisse zum Luftschutzstollen Schloss St. Martin erstmals einer breiten Öffentlichkeit vorgestellt. Zur Erforschung und Dokumentation des Stollens wurde eine 3D-Vermessung und auch eine geologische Kartierung durchgeführt. Der vorliegende Aufsatz soll nun vertiefende Einblicke in die durchgeführten Arbeiten geben.

3 Geographische Lage und geologische Situation

Das Schloss St. Martin (Abbildung 1 links) liegt auf einem östlichen Felsensporn des Plabutsch-Buchkogel-Zuges, der die nordwestliche Begrenzung des Grazer Feldes bildet. Geologisch besteht der Bergzug überwiegend aus Gesteinen des Paläozoikums, wobei die Schichtglieder vom Liegenden zum Hangenden allgemein mit Sandsteinen beginnen, dann zunehmend in eine dolomitische Fazies bzw. nachfolgend in eine kalkige Fazies übergehen. Die Karbonate des Plabutsch-Buchkogel-Zuges sind allgemein stark verkarstungsfähig. So ist das Gebiet einerseits durch eine intensive Dolinenbildung an der Oberfläche, andererseits durch eine ausgeprägte unterirdische Entwässerung gekennzeichnet (FLÜGEL 1983). Der Luftschutzstollen selbst wurde in der sogenannten Flösserkogel-Formation vorangetrieben. Die dominierende Lithologie dieser zur Rannach-Decke zugehörigen Formation sind Dolomite, teilweise mit Einschaltungen von Sandsteinen (HUBMANN 2003). Weitere geologische Besonderheiten im Stollenbereich werden später im Text an geeigneter Stelle erläutert. Der derzeit einzige Zugang zum Stollensystem ist über den Eingangsbereich (Abbildung 1 rechts) am nördlichen Ende des Gebäudekomplexes Bildungshaus Schloss St. Martin gegeben (vgl. dazu die Karte in Abbildung 7).



Abb. 1: Links: Blick in nordöstlicher Richtung auf den Felsensporn mit dem Schloss St. Martin und der dazugehörigen Schlosskirche. Rechts im Bild liegt das Grazer Feld mit der Landeshauptstadt Graz; rechts: Zugang zum ehem. Luftschutzstollen Schloss St. Martin. Fotos: V. Kaufmann, 4.10.2019.

4 Bau und Nutzung des Luftschutzstollens

Im Zweiten Weltkrieg war Graz als Eisenbahnknotenpunkt und Standort von wichtigen Industrieanlagen Ziel von zahlreichen Luftangriffen der Alliierten. Im Laufe des Luftkrieges in den Jahren 1941–1945 wurden auf Graz mindestens 16500 Sprengbomben und ca. 11750 Brandbomben im Gesamtgewicht von 3700 Tonnen abgeworfen und damit, abgesehen von Gebäudeschäden, über 1700 Menschen getötet (BRUNNER 1989). Zum Schutz der Zivilbevölkerung sowie der NS-Administration und der Wehrmacht wurden im Stadtgebiet bis Kriegsende 16 Luftschutzstollen sowie ein Luftschutzbunker errichtet. Das Stollensystem im Grazer Schloßberg war das größte und konnte bis zu 40000 Personen aufnehmen (BRUNNER 1989). Die sonstigen Luftschutzräume boten oft keinen ausreichenden Schutz bei Bombeneinwirkung. Die nationalsozialistische Politik verhinderte durch falsche Selbsteinschätzung (Österreich sei "Luftschutzkeller des Reiches") und gezielte Propaganda eine rechtzeitige, adäquate Vorbereitung auf Bombenangriffe aus der Luft. 1939 wurde noch ein Vorschlag von Major Hermann Noltsch zum Ausbau des Schloßbergstollens bei Androhung einer Strafe (Konzentrationslager) abgelehnt. Noltsch meinte zurecht, dass nur Luftschutzstollen ausreichend Schutz böten (NOLTSCH 1948, BEER & KARNER 1992). Am 19.12.1944 und am 9.3.1945 erfolgten u.a. zwei für das Schloss St. Martin und den angrenzenden dörflichen Raum am Kehlberg folgenschwere Luftangriffe mit großen Schäden an Gebäuden und mehreren Todesfällen (BRUNNER 1989, YOUTUBE 2019a).

Die Anlage des Luftschutzstollens Schloss St. Martin geht auf einen Bauplan im Maßstab 1:200, welcher beim Straßen- und Brückenbauamt der Stadtverwaltung Graz Anfang Dezember 1943 ausgefertigt wurde, zurück (Abbildung 2). Das Stollensystem wurde größtenteils durch Wehrmachtsangehörige der nahegelegenen "Jägerkaserne" (jetzt Gablenz-Kaserne) erbaut, wobei der Vortrieb über zwei Längsstollen erfolgte. Während die Erstplanung nur einen einzigen Querstollen (Kaverne) vorsah, umfasst der Endausbau neben einem weiteren Querstollen einen zusätzlichen Annex im Norden und den jetzigen Zugang über einen schrägverlaufenden Stollen (im Bauplan bereits mit Bleistift angedeutet mit verbauter Betonstiege). Der Stollenbau wird wohl das ganze Jahr 1944 gedauert haben. Die geplante alleinige Nutzung des Stollens durch die Reichsgauleitung musste wegen Materialmangels und Widerstands der lokalen Zivilbevölkerung aufgegeben werden. In der Folge fanden im Stollen bei dualer Nutzung Wehrmachtsangehörige und Zivilbevölkerung gleichermaßen Schutz. Noltsch bezifferte das Fassungsvermögen des Stollens mit 1550 Personen. 1945 war im Stollen eine Luftnachrichtenabteilung untergebracht (NOLTSCH 1948). Nach Kriegsende (9. Mai 1945) wurde der Stollen geräumt. Ein Foto aus dem Jahr 1955 (THEUNE et al. 2019, S. 107) zeigt den Eingangsbereich des südlichen Längsstollens bereits stark verfallen. Zeitzeugen (u. a. Karlheinz Kern, Graz) berichteten, dass sie als Kinder bzw. Jugendliche den Stollentrakt in den 1970er- bzw. frühen 1980er-Jahren betreten bzw. das Stollensystem auch mit Rädern abfahren konnten. Der Ausstieg über die Betonstiege war jedoch durch ein Gitter verwehrt (vgl. dazu auch Abbildung 3).



Abb. 2: Bauplan des Luftschutzstollens Schloss St. Martin, Originalmaßstab 1:200, datiert mit 1.12.1943. Die beigefügten Nummern ③-⑥ dienen der Lagezuordnung mit Hilfe der Abbildung 7. Quelle: Stadtarchiv Graz, Signatur AT-STARG 4.2.1.17.15-AC8/05/01-8.

1982 ließ die Schlossverwaltung aus Sicherheitsgründen die beiden Längsstollen in ihren Eingangsbereichen verfüllen (BERGMANN-PFLEGER et al. 2019). Am 4.10.2019 wurde im Zuge einer eigenen Begehung eine kleine Tagöffnung im Bereich des südlichen Längsstollens entdeckt, durch die das Sonnenlicht in das Stolleninnere gelangen konnte. Es ist zu vermuten, dass auch Kleintiere, wie z.B. Fuchs, Igel, etc. diesen Zugang zeitweise benutzen. Ein Einflugloch im jetzigen Eingangsbereich ermöglicht Fledermäusen den dauernden Zugang zum Stollensystem. Die Autoren führten Begehungen des Luftschutzstollens in den Jahren 2017, 2018 und 2019 durch.

5 Erstvermessung

Die beiden Höhlenforscher Karl Pawlija und Josef Flack haben das Stollensystem am 2.11.1970 mit einfachen Messmitteln, wie Bussole und Maßband, erstmals vermessen und als Ergebnis einen Lageplan im Maßstab 1:200 erstellt (Abbildung 3). Aufschlussreich sind die zahlreichen zeichnerischen Details, wie z.B. Längs- und Querprofile, Hinweise zu Bodenunebenheiten oder Ablagerungen, Wassereintrag und Absperrungen im jetzigen Eingangsbereich.



Abb. 3: Lageplan des Luftschutzstollens Schloss St. Martin, Originalmaßstab 1:200, datiert mit 3.11.1970. Die beigefügten Nummern ①-⑥ dienen der Lagezuordnung mit Hilfe der Abbildung 7. Quelle: Landesverein f. Höhlenkunde in der Steiermark, B 2793/1.

6 Neuvermessung

In den Jahren 2017 und 2018 führte das Institut für Geodäsie (Arbeitsgruppe für Fernerkundung und Photogrammetrie) der Technischen Universität Graz im Auftrag der Direktion des Bildungshauses Schloss St. Martin eine Neuvermessung der Stollenanlage mit modernen Methoden durch. Ergänzungsarbeiten und weitere Begehungen erfolgten 2019. Wesentliche Arbeiten, wie z.B. die Messung des Grundlagennetzes, das Laserscanning und die 3D-Modellierung, wurden im Rahmen einer Masterarbeit (2019 noch nicht abgeschlossen) durchgeführt. Die Ergebnisse der Vermessung und auch der 3D-Modellierung sind als wichtige Grundlagen für (1) Planungen (Instandhaltung, zukünftige Neunutzung), (2) denkmalpflegerische Maßnahmen, (3) Bauforschung, (4) Bürgerinformation (Beiträge zur Zeitgeschichte) sowie für (5) etwaige Rettungsmaßnahmen im Falle des Einschlusses von Personen anzusehen. Ein interessantes Beispiel einer Dokumentation eines Stollensystems (Roggendorf-Stollen östlich von Melk, Niederösterreich) aus der NS-Zeit findet sich in BURGHART & HERTENBERGER (2018). Höhlenvermessungen (Karst, Eis) können mit den unterschiedlichsten Methoden durchgeführt werden (HÄMMERLE et al. 2014, PETTERS et al. 2019).

6.1 Grundlagennetz

Als geometrische Basis für die 3D-Dokumentation des Stollensystems wurde ein untertägiges, vermarktes Polygonnetz gemessen. Der geodätische Anschluss an das übergeordnete Landeskoordinatensystem (Gauß-Krüger MGI M34) erfolgte über lokale Festpunkte, Fernziele und zusätzliche RTK-GNSS-Messungen (VRS APOS). Ausgehend vom Polygonnetz wurden die an den Stollenwänden vermarkten für die Georeferenzierung der terrestrischen Laserscans und photogrammetrischen Aufnahmen benötigten Passpunkte (insgesamt 17), zusätzliche Boden-, Gewölbe- und Firstpunkte, sowie in regelmäßigen Abständen 22 Querprofile gemessen. Alle geodätischen Arbeiten und auch sonstigen Begehungen erfolgten unter Einhaltung der naturschutzrechtlichen Vorgaben zum Fledermausschutz (Winterruhe).

6.2 Terrestrisches Laserscanning

Als Grundlage für die 3D-Modellierung des Stollensystems erfolgte am 24.10.2017 eine Aufnahme mit dem handgehaltenen Laserscanner GeoSLAM ZEB-REVO (GEoSLAM 2019; Abbildung 4 links). BADFORD (2019) beschreibt eine erfolgreiche 3D-Aufnahme eines weitläufigen Stollensystems aus dem Zweiten Weltkrieg unter Verwendung eines ähnlichen Aufnahmesystems. Die gegenständliche Gesamtaufnahme setzt sich aus zwei sich überlappenden Rundgängen mit insgesamt ca. 50 Mill. Einzelpunkten zusammen. Die Passpunkte wurden mit Referenzkugeln von Leica (Styropor, $\emptyset = 15$ cm, M8-Gewinde) signalisiert (Abbildung 4 rechts). Die Georeferenzierung der beiden Punktwolken erfolgte in zwei getrennten Schritten (relativ, absolut) mittels CloudCompare (CLOUDCOMPARE 2019). Der mittlere Punktlagefehler errechnete sich mit 1,5 cm. Die weitere Modellbildung erfolgte mit dem Programm 3DReshaper. Spezielles Hauptaugenmerk wurde auf die Rauschunterdrückung gelegt.



Abb. 4: Terrestrisches Laserscanning mit dem System GeoSLAM ZEB-REVO (links); Signalisierung mit einer Kugelkalotte aus Styropor (rechts). Fotos: V. Kaufmann, 24.10.2017.

Zusätzlich zur GeoSLAM-basierten 3D-Aufnahme wurden zwei ausgewählte Objekte, nämlich die großräumige Kaverne im östlichen Querstollen und eine kleinflächige Felsritzung im südlichen Längsstollen, durch terrestrisch-photogrammetrische Aufnahme mit einer digitalen Spiegelreflexkamera Nikon D300 (f = 20 mm, Auflösung 4288 x 2848) dokumentiert. Im Vergleich zur Laserscan-Aufnahme können mit der gewählten photogrammetrischen Auswertemethode (Structure-from-Motion) höher aufgelöste, genauere Oberflächenmodelle erstellt werden. Überdies ist eine Texturierung des so erstellten Modells leicht möglich.

6.3 Terrestrisch-photogrammetrische Aufnahme der Kaverne

Die Kaverne (5,3 m x 33 m) im östlichen Querstollen hat ausbetonierte Seitenwände und ein mit Betonsteinen ausgeformtes Gewölbe. Die Seitenwände sind mit Graffiti aus den 1970erund frühen 1980er-Jahren versehen (THEUNE et al. 2019). Am Boden der Kaverne befinden sich diverse kleinformatige Relikte aus der Nachkriegszeit. Für die Georeferenzierung der Bilddaten wurden insgesamt 7 Passpunkte mit retroreflektierenden Schwenk-Targets signalisiert. Der gesamte Raum wurde in relativ kurzer Zeit (ca. 100 Minuten) in Form mehrerer linearer, überlappender Aufnahmesequenzen freihändig mit der Kamera Nikon D300 aufgenommen. Für die Ausleuchtung der Objektoberfläche wurde nur der interne Blitz der Kamera verwendet. Die Fokussierung erfolgte auf eine mittlere Aufnahmeentfernung von ca. 4 m und blieb während der fotografischen Aufnahme (durch Klebeband fixiert) unverändert. Der rechteckige Bodenbereich konnte bei gegebener Augenhöhe des Fotografen nur mittels Schrägaufnahmen aufgenommen werden.

Für die photogrammetrische Auswertung in Agisoft Photoscan 1.4 (AGISOFT 2019) standen insgesamt 378 Fotos zur Verfügung. Der durch Blitzwirkung und Weitwinkeloptik bedingte starke radiale Lichtabfall in den Fotos wurde durch Histogrammmodifikation in Photoshop CS2 (Bild Anpassen Tiefen/Lichter) ausreichend gut beseitigt. 34 Aufnahmen des Bodenbereichs konnten leider nicht referenziert werden, da einerseits im Bodenbereich keine Passpunkte vorhanden und andererseits keine für die automatische Bildzuordnung ausreichende Überlappung geringer Verzerrung mit den übrigen Aufnahmen gegeben war. Für die

Georeferenzierung (in einem nunmehr lokalen auf die Längsachse bezogenen Koordinatensystem) wurden alle 7 Passpunkte berücksichtigt. Die Bündelausgleichung in Agisoft Photoscan ergab einen mittleren Rückprojektionsfehler von 0,642 Pixeln. Die mittleren Restfehler in den Passpunkten betrugen: $m_X = 7,2$ mm, $m_Y = 6,5$ mm und $m_Z = 0,5$ mm. Für die Modellierung der inneren Orientierung der Kamera wurden folgende Parameter gewählt: F, Cx, Cy, K1, K2, B1, B2, P1 und P2.

Aus der dichten Punktwolke (ca. 10,67 Mill. Punkte) wurde ein 3D-Maschennetz (ca. 2,13 Mill. Maschen) zur Modellierung der Oberfläche abgeleitet. Für die 4 Hauptansichten wurden Orthofotos mit einer Bodenauflösung von 2 x 2 mm² gerechnet (Abbildung 5). Für die 3D-Visualisierung wurde ein fototexturiertes Modell mit einer hochaufgelösten Texture Map (12288 x 12288) erstellt und im Format PLY exportiert. Die anschauliche Visualisierung der Kaverne in Form eines virtuellen Rundgangs erfolgte mit dem Programmsystem CloudCompare. Ein Video im Format MP4 ist auf YOUTUBE (2019b) bzw. in KAUFMANN (2019) bereitgestellt.



Abb. 5: Orthofoto der östlichen Längsseite der Kaverne. Aufnahmedatum: 24.10.2017.

6.4 Terrestrisch-photogrammetrische Aufnahme einer Felsritzung

Im Zuge einer Stollenbegehung am 4.10.2019 wurde am unteren Ende des betonierten Stiegenabgangs an der westlichen Ecke eine weitere Felsritzung in Form einer Doppelraute ca. 50 cm oberhalb des Bodenniveaus entdeckt (Abbildung 6). Diese Ritzung ist im Vergleich zu den in THEUNE et al. (2019) publizierten nicht in hartem Material (Beton) ausgeführt, sondern in einer äußert weichen Verwitterungsschicht, welche durch mechanische Beanspruchung leicht zerstört werden könnte. Die Bedeutung der gegenständlichen Ritzung ist unklar. Die relativ frische Farbe in den Vertiefungen lässt vermuten, dass die Ritzung nicht aus der NS-Zeit stammt, sondern eher danach ausgeführt wurde. Um die Ritzung für die Nachwelt zu dokumentieren, wurde eine terrestrisch-photogrammetrische Aufnahme mit einfachen Mitteln durchgeführt, wobei für die Aufnahme die vorhin beschriebene Kamera im gleichen Aufnahmemodus eingesetzt wurde. Für die Ableitung des Maßstabs wurden vier Referenzpunkte (R1-R4) mit Stecknadeln (Plastikhalter mit Zentrierpunkt, vgl. Abbildung 6 links) temporär und oberflächenschonend in der Felsoberfläche markiert. Mit einem Rollmeter wurden alle 6 Sperrmaße gemessen. Insgesamt wurde ein für die photogrammetrische Auswertung günstiger Block von 15 Aufnahmen (im Ouer- und Hochformat) aufgenommen. Die Auswertung und Analyse der Fotos erfolgte im Wesentlichen nach der in MIKL & KAUFMANN (2019) beschriebenen Vorgangsweise. Der mittlere Rückprojektionsfehler ergab sich mit 0,235 Pixeln bei einer Relativgenauigkeit im Modellraum von ca. 1:520. Das berechnete 2.5D-Oberflächenmodell besitzt eine Rasterauflösung von 0.5 mm. Das Orthofoto wurde mit einer Auflösung von 0.2 mm gerechnet (Abbildung 6 links). Für die Detailanalyse der Oberflächenstruktur haben sich Beleuchtungssimulationen (Abbildung 6 rechts) in Kombination mit farbkodierter Höhen-/Tiefendarstellung bewährt. Anschauliche Visualisierungen siehe KAUFMANN (2019).



Abb. 6: Dokumentation der Felsritzung. Orthofoto (links), geschummertes Oberflächenmodell (rechts). Aufnahmedatum: 4.10.2019.

7 Räumliche Ausprägung und Lage des Luftschutzstollens

Für die anschauliche Visualisierung des Raumbezugs des Stollensystems wurden Karten bzw. kartenähnliche Produkte (Abbildungen 7 – 9 auf den folgenden Seiten), Computeranimationen und auch ein taktiles Modell mittels 3D-Druck (Modellierung mit Rhino 3D unter Verwendung von nur 30 % aller Scanpunkte, Druck mit einem alphacam-Printer) erstellt.

8 Stollenbeschreibung

Die heutige Ausgestaltung des Innenraumes des Stollens ist einerseits das Ergebnis des Stollenbaues selbst, aber andererseits auch das Ergebnis intendierter bzw. nicht-intendierter anthropogener Modifikationen sowie naturaler Prozesse seit dem Stollenbau (daher nach 1945).

Neben den bereits angesprochen Relikten aus der Zeit der Entstehung und/oder aus jüngerer Zeit (Felsritzungen), belegen Bohrlöcher an einigen Stellen im Stollen die Vortriebsmethode (Abbildung 10D). Der Innenraum des Stollens weist einige morphologische Überprägungen auf, die zum Zeitpunkt des Vortriebes noch nicht bestanden haben können. Am auffallendsten ist dabei die Einschwemmung von Material durch eine Regenableitung von außen über die Treppe (Abbildungen 10A und B). Der Beginn sowie die Dauer dieser Einleitung und Einschwemmung lässt sich auf Basis der derzeitigen Befunde nicht näher eruieren. Die durchaus beachtliche Quantität des akkumulierten Materials im Bereich der Stiege in Verbindung mit der kleinen Zuleitung indizieren aber eine Einschwemmung über viele Jahre hindurch.



Abb. 7: Lage des Luftschutzstollens Schloss St. Martin im Orthofoto (2015). Legende: ① Oberer Stolleneingang (Höhe ü. A.: 401,43 m), ② Stollenzugang über Betonstiege, ③ vermutete Lüftungsöffnungen, ④ verfallener Stolleneingang (bergseitig) mit betoniertem Eingangsbereich, ⑤ Kaverne, ⑥ verfallener, zweiter Stolleneingang (bergseitig). Lagebezug: Gauß-Krüger-Kartenprojektion (M34). Orthofoto: Magistrat Graz, Stadtvermessungsamt. Die geometrischen Kenngrößen (gerundete Werte) des Stollensystems sind: Gesamtlänge 328 m, davon 62 m im Zugang; Gesamtfläche 894 m², davon 112 m² im Zugang; Fläche der Kaverne ca. 164 m², bei einer Breite von 5,3 m und einer Länge von ca. 33 m.



Abb. 8: Geschummertes Geländerelief mit Situationsdarstellung des Bildungshaus Schloss St. Martin, der Schlosskirche und des Luftschutzstollens. Legende siehe Abbildung 7. Geländerelief: GIS-Steiermark, Amt der Steiermärkischen Landesregierung.



Abb. 9: Axonometrische Darstellung des Luftschutzstollens Schloss St. Martin. Die korrespondierende Geländeoberfläche ist darüber dargestellt. Die maximale Überdeckung des Stollensystems beträgt 21,6 m. Legende siehe Abbildung 7. Digitales Geländemodell: GIS-Steiermark, Amt der Steiermärkischen Landesregierung.

Abb. 10 (gegenüberliegende Seite):

Stollenbeschreibung. A-B: Einleitung von Regenwasser und Akkumulation des eingeschwemmten Materials im Bereich der Stiege. Der Geologenhammer dient zur Größenabschätzung (30 cm Länge); C: Akkumulation von Verwitterungsmaterial der Dolomitvergrusung. Auffallend ist die gelbbraune Färbung des Materials; D: Bohrloch; E-F: Innenund Außenansicht eines verschütteten Zutritts des Stollens (vgl. ④ in Abbildung 7); G: Kleine Sinterbildung (Wandsinter und Sinterröhrchen); H: Lehmgefüllter, korrosiv erweiterter Hohlraum; I: Relikte (vermutete Kabelstranghalterung) des originalen Stolleninnenausbaus. Fotos: C. Bauer, 4.10.2019.

Sehr markant ist auch die, für anthropogene Hohlräume sehr unübliche, unebene Sohle in Teilbereichen des Stollens. So treten immer wieder Materialakkumulationen mit relativ gleichmäßigen kleinen Korngrößen in Erscheinung (Abbildung 10C). Das Material entstammt dabei unmittelbar aus den Ulmen, die dementsprechend morphologisch durch kleinere Nischen hervortreten. Bemerkenswert ist, dass diese Formen bereits im Höhlenplan aus dem Jahr 1970 verortet worden sind (vgl. Abbildung 3). Die Ursache ist in der spezifischen physikalischen Verwitterung des Dolomitgesteins (der sogenannten Vergrusung) begründet, deren Verwitterungsprodukt als unkonsolidiertes, gelbbraunes Material in Erscheinung tritt. Dieser Verwitterungsprozess ist in seinen Prozessraten effizienter als die sonst für Karbonatgesteine übliche Lösungsverwitterung (Korrosion/Verkarstung). Dementsprechend finden sich in diesen Bereichen auch keine nennenswerten Karstformen. Die Verwitterung des Gesteins in einzelne Kornfragmente zeigt sich eindrucksvoll in der Zerstörung des jungen Graffito mit nationalsozialistischer Symbolik durch die Erschütterungen des bei der Vermessung eingesetzten Bohrhammers. Aber auch in den angesprochenen Nischen lassen sich mit einem Geologenhammer sehr leicht weitere oberflächennahe Verwitterungsschichten von der Stollenwand abkratzen.

Aus geologischer Sicht sind Aufschlüsse im Berginneren immer interessant. Sie ermöglichen beispielsweise eine detailliertere stratigraphische Einordnung des Gesteinsverbandes oder bezeugen (teilweise reliktische) morphologische Prozesse. In diesem Zusammenhang sind die Akkumulationen von Lehm zu nennen, der Diskontinuitäten im Gesteinsverband, insbesondere aber durch den Prozess der Verkarstung erweiterte Hohlräume, ausfüllt (Abbildung 10H). Diese Lehme sind als Residuen (d. h. nicht verwitterbare Rückstände) der Korrosion, aber auch als Relikte nicht-verkarstungsfähiger Auflagen auf dem Karbonatgestein zu sehen. In beiden Fällen erfolgte eine sukzessive Einschwemmung in den Gesteinskörper über Klüfte bzw. korrosionserweiterte Hohlräume. Ebenfalls eine Überprägung durch Verkarstungsvorgänge sind die kleineren Vorkommen von Kalksinter (Abbildung 10G). Die Ausfällung von Kalksinter ist eine für Stollensysteme häufige Überprägung. Die nötigen Kalzium-gesättigten Wässer können dabei aus dem Umgebungsgestein entstammen (im Falle von St. Martin Kalk und Dolomit) oder auch durch Lösung aus Beton. Üblicherweise gelten bei Beton höhere Kalkumsatzraten, was sich in einem sehr raschen Wachstum von Kalksinter (typische Sinterröhrchen) niederschlägt. Im St. Martiner Stollen ist die Überprägung mit Kalksinter aber nur von untergeordneter Rolle.

Der normalerweise für Menschen nicht zugängliche Stollen erfüllt in den Wintermonaten eine wichtige Funktion als Fledermausrefugium. Gleiches gilt auch für einen weiteren ehemaligen Luftschutzstollen unter der Basilika Mariatrost in Graz, der diesbezüglich auch als Naturschutzgebiet ausgewiesen wurde (VERORDNUNG 2009).



9 Zusammenfassung und Ausblick

Der Luftschutzstollen beim Schloss St. Martin ist einer von insgesamt 6 ehemaligen Stollen aus dem Zweiten Weltkrieg im Plabutsch-Buchkogel-Zug und konnte im Rahmen des 100-Jahre-Jubiläums des Bildungshauses Schloss St. Martin erstmals näher untersucht und mit modernen Vermessungsmethoden dreidimensional erfasst werden. Die vermessungstechnischen Grundlagen vereint mit den Erkenntnissen aus der Geologie und der Archäologie bilden eine fundierte Basis für etwaige weiterführende Aktivitäten, wie z.B. der Erschließung als zeitgeschichtliches Denkmal oder als Ausstellungsraum. Der handgehaltene Laserscanner GeoSLAM ZEB-REVO hat sich zur schnellen Dokumentation von komplexen 3D-Räumen bewährt. Die Erfassung von kantenscharfen Strukturen wie z.B. von Betonstiegen ist jedoch aufgrund des hohen Rauschniveaus problematisch. Bei einer etwaigen Neunutzung des Stollensystems müssten insbesondere die hydrologisch-geologischen Gegebenheiten verstärkt berücksichtigt werden.

Dank

Die Autoren bedanken sich sehr herzlich bei der Direktorin des Bildungshauses Schloss St. Martin, Frau Dipl. Päd.ⁱⁿ Ing.ⁱⁿ Anna Thaller für die gewährte Unterstützung. Der Laserscanner wurde durch die Firma UTB Laser- und Vermessungstechnik GmbH, Oberwart dankenswerterweise im Rahmen einer Machbarkeitsstudie kostenlos zur Verfügung gestellt. Herr Ing. Alexander Kager (Firma UTB) hat das Laserscanning vor Ort technisch betreut und auch das Postprocessing durchgeführt. Dank gilt auch den Urhebern des Höhlenplans aus dem Jahr 1970 für die Erlaubnis des Abdruckes in diesem Beitrag. Der 3D-Druck wurde von Herrn Dr. Albert Wiltsche vom Institut für Architektur und Medien der Technischen Universität Graz perfekt umgesetzt. Quellenmaterial wurde von folgenden Organisationen bereitgestellt: Stadtvermessungsamt Graz, GIS-Steiermark – Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Stadtarchiv Graz und Steiermärkisches Landesarchiv.

Literatur

AGISOFT (2019): https://www.agisoft.com/ (11.11.2019).

- BADFORD, J. (2019): World War Two Tunnels Surveyed with SLAM Technology. GIM International. https://www.gim-international.com/content/news/ww2-tunnels-surveyedwith-slam-technology (8.11.2019).
- BEER, S. & KARNER, S. (1992): Der Krieg aus der Luft. Kärnten und Steiermark: 1941–1945. Herbert Weishaupt Verlag, Graz
- BERGMANN-PFLEGER, K., STELZL-MARX, B. & STREIT, E. (2019): Bildungshaus Schloss St. Martin. begegnen – begeistern – bilden: 100 Jahre. Veröffentlichungen des Ludwig Boltzmann Instituts für Kriegsfolgenforschung, Graz-Wien-Raabs, Sonderband 22, Leykam Verlag, Graz-Wien
- BRUNNER, W. (1989): Bomben auf Graz. Die Dokumentation Weismann. Veröffentlichungen des Steiermärkischen Landesarchives, Band 18, Leykam Verlag, Graz

- BURGHART, W. & HERTENBERGER, G. (2018): Stollenanlage "Quarz" bei Melk. Die NS-Rüstungsindustrie und tausende (fast) vergessene Tote. In: Österreichs gefährdetes Kulturerbe. Vom Umgang mit historischen Bauten: 70 Fallbeispiele. Schreybgasse, Wien, S. 104–106
- CLOUDCOMPARE (2019): https://www.danielgm.net/cc/ (12.11.2019).
- FLÜGEL, W.W. (1983): Zur neogen-quartären Morphogenese und Verkarstung des Plabutschzuges westlich von Graz (Steiermark). Mitt. Naturwiss. Ver. Steiermark, 113: S. 15–23
- GEOSLAM (2019): https://geoslam.com/solutions/zeb-revo/ (11.11.2019).
- HÄMMERLE, M., HÖFLE, B., FUCHS, J., SCHRÖDER-RITZRAU, A., VOLLWEILER, N. & FRANK, N. (2014): Comparison of Kinect and Terrestrial LiDAR Capturing Natural Karst Cave 3-D Objects. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 11, No. 11, 1896– 1900
- HUBMANN, B. (2003): Plabutsch-Formation: nomen novum pro Barrandeikalk (Mitteldevon, Grazer Paläozoikum). In: PILLER, W. (Hrsg.): Stratigraphia Austriaca. – Österr. Akad. Wiss., Schriftenr. Erdwiss. Komm. 16: S. 269–292
- KAUFMANN, V. (2019): Schloss St. Martin Luftschutzstollen am Kehlberg, Graz Straßgang. https://www.staff.tugraz.at/viktor.kaufmann/Kehlberger_Luftschutzstollen/Kehlberger_Luftschutzstollen.html (7.11.2019).
- MIKL, T. & KAUFMANN, V. (2019): Kostengünstige 3D-Dokumentation von Skulpturen des Barockbildhauers Philipp Jakob Straub. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 28, T. Kersten (Hrsg.), 39. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 20.–22. Februar 2019, Universität für Bodenkultur, Wien, S. 597–605. https://www.dgpf.de/src/tagung/jt2019/proceedings/start.html (25.11.2019).
- NOLTSCH, H. (1948): Luftschutzstollenbauten in Graz. Maschinschriftliches Manuskript, Landesarchiv Steiermark, Sammlung Rudolf Weissmann, Signatur Weissmann-K-3-H-12
- PETTERS, C., MILIUS, J. & BUCHROITHNER, M.F. (2019): Eisriesenwelt: Terrestrial Laser Scanning and 3D Visualisation of the Largest Ice Cave on Earth. Web-Books im Austria-Forum, http://austria-forum.org/web-books/doceisenriesen00enisds/000001 (7.11.2019).
- THEUNE, C., KAUFMANN, V., BAUER, C. & STRMSEK, B. (2019): Der Luftschutzstollen Schloss St. Martin: Archäologie Untersuchungen. In: BERGMANN-PFLEGER, K., STELZL-MARX, B. & STREIT, E. (2019): Bildungshaus Schloss St. Martin. begegnen – begeistern – bilden: 100 Jahre. Veröffentlichungen des Ludwig Boltzmann Instituts für Kriegsfolgenforschung, Graz-Wien-Raabs, Sonderbd. 22, Leykam Verlag, Graz-Wien, S. 101–111
- VERORDNUNG (2009): Erklärung eines Naturschutzgebietes Stollenanlage Mariatrost. Verordnung der Landeshauptstadt Graz, GZ.: A17-013504/2009/0005 https://www.ris.bka.gv.at/ (Gemeinderecht) (22.11.2019).
- Interpretation (22.11.2019).
- YOUTUBE (2019a): Schloss St. Martin zur Kriegsende: Zeitzeugen berichten (lange Version). https://www.youtube.com/watch?v=Y8Kwtv1bHvo (7.11.2019).
- YOUTUBE (2019b): Luftschutzstollen (1944) Schloss St. Martin, Graz. https://www.youtube.com/watch?v=t8QVE3mxi6Y (7.11.2019).

Stabilitätsberechnung von Segelschiffen auf Basis von Laserscanneraufnahmen

Otto HEUNECKE

1 Stabilität eines Schiffes

Die Stabilität eines Schiffes bezeichnet seine Eigenschaft, sich als Reaktion auf ein krängendes Moment eigenständig wieder in seine Ursprungslage aufzurichten. Die entscheidenden Größen zur Kennzeichnung der Stabilität sind der Gewichtsschwerpunkt G(x,y,z) und der Auftriebsschwerpunkt B(x,y,z) in einem Schiffskoordinatensystem gemäß DIN 81209-1 (1999). Als Ursprung des Koordinatensystems wurde der Kielpunkt K festgelegt, siehe Abbildung 1. Bei aufrechter Schwimmlage koinzidiert das Schiffskoordinatensystem mit dem erdfesten System ξ , η , ζ .

x, y, z - Schiffskoordinatensystem nach DIN 81209-1

 ξ . η , ζ - Erdfestes Koordinatensystem; koinzidiert bei aufrechter Schwimmlage



Abb. 1: Schiffskoordinatensystem nach DIN 81209-1 und erdfestes Koordinatensystem

Bei aufrechter Schwimmlage liegen die beiden Schwerpunkte *G* und *B* lotrecht übereinander unterhalb des Metazentrums *M* (*x*,*y*,*z*). Das Metazentrum ist der Schnittpunkt der Auftriebsvektoren, die zwei benachbarten Drehlagen zuzuordnen sind. Man unterscheidet das Breitenmetazentrum (Drehung um die Längsachse *x*; Krängung φ) und das Längenmetazentrum (Drehung um die Querachse *y*; Trimm ψ - i.d.R. als Stichmaß *t* bezogen auf die Schiffslänge in der Konstruktionswasserlinie angegeben). Zu Vorzeichenkonventionen für Krängung und

T. Wunderlich (Hrsg.), Ingenieurvermessung 2020

Trimm siehe Abbildung 1. Befindet sich *G* bei aufrechter Lage unterhalb von *B*, handelt es sich um ein gewichtsstabiles Schiff, im umgekehrten Fall um ein formstabiles Schiff. Von Ausnahmen abgesehen, sind Schiffe formstabil. Von der Stabilität zu unterscheiden ist die Festigkeit eines Schiffes, den einwirkenden Beanspruchungen, z. B. durch Seeschlag bei den Aufbauten oder Winddruck auf das Rigg, zu genügen.

Für die Bewertung sowohl der statischen Stabilität (Momentengleichgewicht) als auch der dynamischen Stabilität (Energiegleichgewicht) müssen die aufrichtenden und die krängenden Hebelarme bekannt sein. Aufrichtende Momente ergeben sich aus der Rumpfgeometrie, krängende Momente speziell bei Segelschiffen vor allem aus dem Winddruck. Die Intaktstabilität geht von einem "unverletzten" Schiff aus, bei dem der Auftrieb unverändert gegenüber der Ausgangslage erhalten bleibt. Untersuchungen bei verbleibendem Restauftrieb nach dem Eindringen von Wasser führen zu Fragen der Leckstabilität.

2 Stabilität von Traditionsschiffen – Aktualität des Themas

Mangelnde Anfangsstabilität und/oder der Verlust der Stabilität durch verrutschte Ladung sowie eindringendes Wasser sind ursächlich für eine Reihe von Unglücken speziell bei Segelschiffen. Prominente Beispiele sind der Untergang der Segelschiffe Niobe 1932 im Fehmarnbelt, der Pamir 1957 im Atlantik und der Albatross 1961 in der Karibik (PARROTT 2003). Derartige Fragen sind in jüngster Zeit in Deutschland im Zusammenhang mit Stabilitätsunfällen bei Traditionssegelschiffen aufgekommen, bei denen das Rigg und/oder die Aufbauten durch die Eigner gegenüber dem ursprünglichen Zustand verändert wurden. Zuständig für die Untersuchung von Seeunfällen mit Schiffen unter deutscher Flagge ist die Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung (www.bsu-bund.de), die in ihren im Internet frei verfügbaren Berichten stets Empfehlungen gibt, wie ein jeweils untersuchter Unfall zukünftig vermieden werden kann.

Traditionsschiffe im Sinne von § 1 Abs. 3 Sportseeschifferscheinverordnung sind historische Wasserfahrzeuge oder deren Nachbauten unter deutscher Flagge bis zu einer Rumpflänge von 55 Metern, an deren Erhaltung und Präsentation in Fahrt ein öffentliches, insbesondere kulturelles Interesse besteht und deren Restaurierung und Betrieb der Pflege des maritimen Erbes dienen. Für ihren Betrieb benötigt ein Eigner bzw. Betreiber, i.d.R. ein Verein, seit dem 07.03.2018 ein Sicherheitszeugnis auf der Grundlage der Sicherheitsrichtlinie für Traditionsschiffe (SCHSICHRÄNDV 2018), einem neu gefassten Anhang zur Schiffssicherheitsverordnung (SCHSV 1998). Ein solches Sicherheitszeugnis ist, sofern keine Auflagen gemacht werden und Zwischenbesichtigungen nicht zu Beanstandungen führen, alle fünf Jahre zu erneuern. Die SCHSICHRÄNDV 2018 ist basierend auf den Empfehlungen der BSU u.a. dahingehend formuliert, dass zur Erteilung eines Sicherheitszeugnisses zwingend ein genehmigtes Stabilitätshandbuch vorzulegen ist. Die durch den Betreiber bereitzustellenden Stabilitätsunterlagen und darauf aufbauend das Stabilitätshandbuch müssen durch eine anerkannte Organisation geprüft werden, wobei mit "anerkannte Organisation" in der Interpretation des Gesetzgebers allein Klassifikationsgesellschaften wie DNV GL, seit 2013 ein Zusammenschluss von Det Norske Veritas und Germanischer Lloyd, gemeint sind. Fachaufsicht im Auftrag des BMVI und für die Ausstellung der Sicherheitszeugnisse zuständig ist die Dienststelle Schiffsicherheit der BG Verkehr (www.bg-verkehr.de/die-bg-verkehr/standorte/dienststelle-schiffssicherheit).
Die Anerkennung als Traditionsschiff – derzeit ca. 120 in Deutschland – ist praktisch alternativlos bei einem Betreiberkonzept des Fahrens mit Gästen (z. B. Tagesfahrten bei maritimen Events) und/oder Vereinsmitgliedern bei mehr als 12 Personen an Bord.

Zu den Inhalten eines Stabilitätshandbuches auf Grundlage des IMO-Codes über Intaktstabilität (IMO 1993) macht die SCHSICHRÄNDV (2018) detaillierte Vorgaben. Es sind Stabilitätsberechnungen gefordert mindestens für die Betriebszustände

- Schiff leer und betriebsklar,
- voll ausgerüstet und besetzt mit Tankfüllung 98 % (Reiseanfang) sowie
- ausgerüstet und besetzt bei Tankfüllung 10 % (Reiseende).

Die Berechnungen müssen unter Einbezug eines (unter Aufsicht der Dienststelle Schiffsicherheit und einer Klassifikationsgesellschaft) durchgeführten Krängungsversuches erfolgen.

3 Laserscanneraufnahme "Johann Smidt"

Bei dem Toppsegelschoner "Johann Smidt", CLIPPER – Deutsches Jugendwerk zur See e.V. (näheres siehe www.clipper-djs.org), handelt es sich um ein 1974 in Amsterdam gebautes und 1989 nach Deutschland verkauftes Stahlschiff mit einer Länge über alles von 36,30 m. Der Rumpf wurde im Februar 2016 auf dem Slip liegend durch dhp:i (www.dhpi.com) gescannt und das Oberdeck sowie das Rigg im September 2017 durch das Institut für Geodäsie der UniBw (www.unibw.de/bau/geodaesie) ergänzt. Die Abbildung 2 zeigt eine Gegenüberstellung des Rumpfes als Foto und als Punktwolke. Aus der Punktwolke lassen sich alle zur Stabilitätsberechnung erforderlichen geometrischen Größen wie z. B. der metazentrischen Evolvente, siehe Abbildung 3, ableiten.



Abb. 2: Gegenüberstellung von Foto und Punktwolke des Rumpfes "Johann Smidt"

Für die Neuerteilung des Sicherheitszeugnisses war für die "Johann Smidt" ein Stabilitätshandbuch durch den Eigner und Betreiber CLIPPER zu erarbeiten. Anders als üblich dafür allein Zeichnungen und sonstige Konstruktionsunterlagen heran zu ziehen, wurde die Laserscanneraufnahme des Schiffes als Grundlage für alle durchzuführenden Berechnungen gemacht. DNV GL (www.dnvgl.de) hat das vorgelegte Handbuch geprüft und genehmigt, ebenso ist die statuarische Prüfung durch BG Verkehr erfolgt.

4 Bestimmung von Volumen und Verdrängung

In die Punktwolke lässt sich ein Schiffskoordinatensystem nach Abbildung 1 legen. Ein Querprofil des Rumpfes ergibt sich als Konturlinie der Punktwolke an jeder Stelle *j* entlang *x*-Achse. Entsprechend des Betriebszustandes und damit dem Tiefgang und der Trimmlage des Schiffes teilt die Wasserlinie diese Konturlinie in einen Über- und Unterwasserbereich. Die Fläche *A* eines Ringpolygons und ihr Schwerpunkt y_B , z_B in der y, z-Ebene mit *n* Punkten berechnen sich nach Gauß zu

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} (y_{i} \cdot z_{i+1} - y_{i+1} \cdot z_{i}),$$

$$y_{B} = \frac{1}{6 \cdot A} \sum_{i=1}^{n} (y_{i} + y_{i+1}) (y_{i} \cdot z_{i+1} - y_{i+1} \cdot z_{i}),$$

$$z_{B} = \frac{1}{6 \cdot A} \sum_{i=1}^{n} (z_{i} + z_{i+1}) (y_{i} \cdot z_{i+1} - y_{i+1} \cdot z_{i}).$$
(1)

Bei einer Äquidistanz von $\Delta x = 0.5$ m der Querprofile, wie hier gewählt, führt dies auf insgesamt p = 58 Querprofile entsprechend der Länge des Rumpfes. Zwei benachbarte Querprofile bilden ein Kompartiment. Das Volumen eines Kompartiments *j* unterhalb der Wasserlinie lässt sich mit der aus der Stereometrie bekannten Pyramidenstumpfformel

$$\Delta V_{oj} = \frac{x_{j+1} - x_j}{3} \left(A_{j+1} + \sqrt{A_{j+1} \cdot A_j} + A_j \right); \quad j = 1, \dots, p-1$$
⁽²⁾

ermitteln. Über alle *p*-1 Kompartimente summiert, ergibt sich das verdrängte Volumen

$$V_{O} = \int dV_{O} \approx \sum_{j=1}^{p-1} \Delta V_{Oj} \left[\mathbf{m}^{3} \right]$$
(3)

des Schiffes. Mit einer Annahme zur Dichte des Mediums, bei Salzwasser im Mittel $\rho_W = 1,025 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$, gelangt man zum Gewicht des Schiffes (Deplacement $D = \int dD [t]$). Krängt das Schiff um einen Winkel φ , muss das in der geneigten Situation eingenommene Volumen V_K identisch V_0 sein. Es gilt somit

$$V_O = V_K = \sum_{j=1}^{p-1} \Delta V_{Kj} \quad \forall \varphi .$$
⁽⁴⁾

Dieser konventionelle Weg zur Bestimmung von Volumen und Verdrängung ist bereits bei MIDDENDORF (1903) beschrieben, wenngleich hier im Wesentlichen als grafische Lösung mit der Planimetermethode. Die sich unmittelbar aus einer Software zur Auswertung von Punktwolken, im vorliegenden Fall wurde Leica Cyclone benutzt, ergebende Verdrängung mittels einer TIN-Vermaschung des Rumpfes und dem Schnitt mit einer Referenzebene je nach Tiefgang lässt sich mit der ermittelten Angabe als Summe der Kompartimente vergleichen. Da sich V_0 bzw. D in nahezu allen weiteren hydrostatischen Formeln wiederfindet, ist ihre gesicherte Bestimmung von Bedeutung für die Richtigkeit der Stabilitätsberechnungen. Es lässt sich zeigen, dass die Größe D auf ca. 2 % ihres Wertes bekannt sein muss, um zu

verlässlichen Aussagen sowohl bei einem Krängungsversuch als auch bei der Bestimmung der krängenden Hebelarme zu gelangen (HEUNECKE 2017).

Analog (1) lassen sich in der Grundrissebene die Wasserlinienflächen (AWL) und ihre Schwerpunkte, die sog. Longitudinal Centre of Floatation (LCF), ermitteln. Der LCF ist die Stelle, um die ein Schiff je nach Tiefgang trimmt. Die Berechnung – üblicherweise in Intervallschritten von 1 cm über den gesamten möglichen Tiefgangsbereich eines Schiffes – ist obligatorischer Teil der Formkurvenermittlung einer Stabilitätsuntersuchung.

5 Aufrichtende Hebelarme

Krängt ein Schiff, wandert der Auftriebsschwerpunkt *B*, der bei symmetrischer Gewichtsverteilung zunächst in der Mittschiffsebene liegt, zur geneigten Seite aus und beschreibt dabei eine Formschwerpunktskurve, die metazentrische Evolvente. Da das Auswandern von *B* um ein Wegstück *dp* parallel zur Wasserlinie bei Krängung um *dφ* gleich dem Flächenträgheitsmoment I_{ϕ} geteilt durch die Verdrängung V_0 ist (KRÜGER 2013), ergibt sich mit dem Flächenträgheitsmoment der Wasserlinienfläche für die Krümmungsradien der Evolvente

$$BM(\varphi) = \frac{1}{12 \cdot V_o} \sum_{j=1}^{p-1} (x_{j+1} - x_j) \left(\frac{1}{2} (WL_{j+1}(\varphi) + WL_j(\varphi)) \right)^3 [m].$$
(5)

Trägt man die Krümmungsradien orthogonal zu $F(\varphi)$ auf, gelangt man zur metazentrischen Evolute und somit zu den wahren Metazentren $M(\varphi)$, siehe Abbildung 3. Festzuhalten bleibt, dass die Bestimmung sowohl von $F(\varphi)$ als auch von $M(\varphi)$ und den scheinbaren Metazentren $N(\varphi)$, d.h. auch von $M_0 = N_0$ für $\varphi = 0^\circ$, eine rein geometrische Aufgabe ist.

Das Lot vom Kielpunkt auf die Wirklinie der Auftriebskraft durch *B* sind die Pantokarenen $w(\varphi)$, ihre Bestimmung ist eine Aufgabe der Kongruenztransformation

$$w(\varphi) = y_B \cdot \cos\varphi + z_B \cdot \sin\varphi \,. \tag{6}$$

Entsprechend ergibt sich für das Lot des Gewichtsschwerpunktes G

$$u(\varphi) = y_G \cdot \cos\varphi + z_G \cdot \sin\varphi \tag{7}$$

und damit für den aufrichtenden Hebelarm (Abbildung 4 links)

$$h_a(\varphi) = w(\varphi) - u(\varphi) = GZ(\varphi) .$$
(8)

Dies setzt die Kenntnis des Gewichtsschwerpunktes *G* voraus. Seine Bestimmung erfolgt mit Hilfe eines Krängungsversuches. Dabei wird eine bekannte Testmasse *m* um einen Weg *e* verschoben und die Krängung φ gemessen. Mit einer Testmasse von ca. 2-3 % der Verdrängung *D* bleibt $\varphi < 5^{\circ}$ und damit $M_0 = const$. Der Gewichtsschwerpunkt *G* verändert sich zu *G*'. Aus dem Schwerpunktverschiebungssatz folgt für die metazentrische Anfangshöhe



Abb. 3: Metazentrische Evolvente (Formschwerpunktskurve) und metazentrische Evolute



Abb. 4: Aufrichtender Hebelarm und Schwerpunktverschiebung beim Krängungsversuch

$$GM_0 = \frac{m \cdot e}{D \cdot \tan \varphi} = \frac{M_{\text{Krängungsversuch}}}{D \cdot \tan \varphi} \,. \tag{9}$$

Wegen $GZ(\varphi) = GM_0 \cdot \sin \varphi \ \forall \varphi \leq 5^\circ \text{ ist } \frac{\partial GZ}{\partial \varphi} = GM_0 \cdot \cos \varphi = GM \text{ für } \varphi = 0^\circ$. Mit anderen Worten: Die metazentrische Anfangshöhe ist die Steigung der aufrichtenden Hebelarmkurve $h_a(\varphi)$ bei aufrechtem Schiff. Freie Oberflächen, also die Oberflächen von Flüssigkeiten in nur zum Teil gefüllten Tanks, führen auf ein zusätzliches krängendes Moment, siehe Abbildung 5 für einen Quader der Breite *B* und der Länge *L*. Für eine solche einfache Tankgeometrie erhält man mit einer Dichte $\rho_T = 1$ [t·m⁻³] für Tankinhalte wie Frisch- und Abwasser sowie Brenn- und Schmierstoffe

$$M_{\text{Quader}} = \rho_T \cdot \left(\frac{B^2}{8} \tan \varphi\right) \cdot L \cdot \frac{2}{3} B = \rho_T \cdot \frac{1}{12} B^3 L \cdot \tan \varphi = \rho_T \cdot I_B \cdot \tan \varphi \quad [\text{t} \cdot \text{m}].$$
(10)



Abb. 5: Krängendes Moment infolge einer freien Oberfläche bei einem Quader



Abb. 6: Verlauf der aufrichtenden Hebelarmkurve bis zum Kenterpunkt (aus PARROTT, 2003)

Freie Oberflächen führen auf eine Erhöhung von G bzw. eine Verminderung von GM_0 , hier wegen (10) um $\Delta GM_0 = M_{Quader} \cdot D^{-1}$ als Beispiel, siehe (9). Ihre in SCHSICHRÄNDV (2018) geforderte Berücksichtigung bedeutet eine Erfassung aller Tankgeometrien eines Schiffes. Den Effekt freier Oberflächen einbeziehend, lässt sich für jeden Betriebszustand die aufrichtende Hebelarmkurve $h_a(\varphi)$ bestimmen. Die SCHSICHRÄNDV verlangt dies mindestens für die Zustände Leerschiff, Reiseanfang und Reiseende. Den schematischen Verlauf einer Hebelarmkurve bis zum Kenterpunkt zeigt die Abbildung 6.

6 Krängende Hebelarme

Krängende Momente bei einem Segelschiff entstehen vor allem durch Winddruck. Für die Stabilitätsberechnungen wird dabei die ungünstige Situation angenommen, dass die Segel brettsteif mittschiffs stehen und der Wind querab einfällt. Der Winddruck p in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit v und einer mittleren Dichte der Luft $\rho_L = 1,22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (unter Berücksichtigung von Regen, Gischt usw.) errechnet sich zu

$$p = \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot v^2 \cdot \frac{1}{9,81} \left[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^2} \right].$$
(11)

Die Windgeschwindigkeiten werden standardmäßig entsprechend der Beaufort-Skala klassiert. Heute wird basierend auf Versuchsergebnissen für das krängende Moment des Winds im Allgemeinen und von der International Maritime Organization (www.imo.org) empfohlen die Formel

$$M_W(\varphi) = c_w \cdot p \cdot A_{LV} \cdot h_W(0, 25 + 0, 75 \cdot \cos^3 \varphi) [\text{t} \cdot \text{m}]$$
(12)

benutzt (KRÜGER 2013), wobei c_w ein Form- und Höhenbeiwert ist, um berücksichtigen zu können, wie verschiedene Flächen angeströmt werden, und dass der Wind mit der Höhe exponentiell zunimmt. Für Höhen zwischen 15 m und 30 m über der Wasseroberfläche ist der Höhenbeiwert 1,1, darunter 1,0. Die Windangriffsfläche A_{LV} setzt sich zusammen aus den Flächenanteilen für die Segelflächen A_s , den Aufbauten A_A (inklusive Masten, Stagen etc. unter Berücksichtigung von Beiwerten c_w) und der bei Krängung austauchenden Fläche des Rumpfes A_{φ} . Der Hebelarm h_W bezieht sich auf den Formschwerpunkt des Unterwasserlateralplanes des Schiffes (MIDDENDORF 1903), verschiedentlich wird auch der halbe Tiefgang als Bezug genommen. Beide Werte unterscheiden sich i. d. R. nur geringfügig.

Aus dem Längsriss einer Punktwolke lassen sich wiederum mit (1) die Segelflächen A_S mit ihren gewichteten Schwerpunkten in den einzelnen Segelführungen, die Flächen A_A des Überwasserlateralplanes mit ihren Schwerpunkten je nach Betriebszustand und auch die Fläche A_{φ} als Funktion der Krängung angeben. Exemplarisch gibt dies die Abbildung 7 wieder.

Die obere horizontale Linie mit 15 m über der Wasserlinie gibt an, für welche Flächen der Höhenbeiwert $c_w = 1,1$ anzusetzen ist. Dividiert man $M_W(\varphi)$ durch das Gewicht des Schiffes, werden die krängenden Hebelarme oder auch "Windarme"

$$h_k(\varphi) = \frac{M_W(\varphi)}{D} [m]$$
(13)

erhalten.



Abb. 7: Beispiele für Segel- und Überwasserlateralflächen mit ihren jeweiligen Schwerpunkten

In (13) ist die Verdrängung des jeweiligen Betriebszustandes anzusetzen. Bei dem hier betrachteten Schiff beträgt der Gewichtsunterschied zwischen dem Leerschiff und dem voll ausgerüsteten Zustand zu Beginn einer Reise etwa 44 t bei einem Leergewicht von 195 t. Die krängenden Hebelarmkurven müssen daher für jeden Betriebszustand und jede Segelführung separat berechnet werden, da sowohl der Zähler als auch der Nenner in (13) davon abhängt. In Kombination mit den aufrichtenden Hebelarmkurven $h_a(\varphi)$, die bei "Johann Smidt" im Stabilitätshandbuch für die geforderten Zustände Leerschiff, Reiseanfang und Reiseende zu berechnen waren, ergeben sich die zu bewertenden Stabilitätslastfälle – hier in Summe ca. 230 (ohne die Sonderbetrachtungen zu Drehkreisfahrt und Personenmoment).

7 Momenten- und Energiegleichgewicht

Der Schnittpunkt der aufrichtenden und der krängenden Hebelarme führt auf den Krängungswinkel $\varphi_{stat.}$ des statischen Gleichgewichts ("Glattwasserstabilität"), siehe Abbildung 8.

Momentengleichgewicht: $h_a(\varphi) = h_k(\varphi)$. (14)

Bei Berücksichtigung dynamischer Effekte, z. B. bei einfallenden Böen, wird ein Schiff soweit krängen, dass die bei Krängung gespeicherte potentielle Energie $E_P(\varphi)$ gleich der Energie $E_W(\varphi)$ der einfallenden Bö ist, um danach wieder den statischen Gleichgewichtszustand einzunehmen. Hebelarmkurven müssen daher über das Momentengleichgewicht hinaus eine genügende Sicherheitsreserve bieten. Um das Energiegleichgewicht zu ermitteln, ist über die Hebelarmkurven zu integrieren:

Energiegleichgewicht:
$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} h_a(\varphi) d\varphi = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} h_k(\varphi) d\varphi.$$
(15)



Abb. 8: Momentengleichgewicht und Flächenbezeichnungen (siehe SCHSICHRÄNDV, 2018)



Abb. 9: Energiegleichgewicht in Segelführung C im Betriebszustand Reiseanfang

Die Abbildung 9 zeigt dies exemplarisch für die Segelführung C im Betriebszustand Reiseanfang. $\varphi_{dyn.}$ ist der Krängungswinkel, der sich für $E_P(\varphi) = E_W(\varphi)$ einstellt. Weiterhin angegeben ist mit der Tabelle die Relation von $\varphi_{dyn.}$ zu $\varphi_{stat.}$ für die Windstärken Bft. 4 bis 9. Bei einer plötzlich einfallenden Bö entsprechend der jeweiligen Stärke und mittschiffs festgesetzten Segeln wird sich das Schiff dieser Relation entsprechend überneigen im Vergleich wie es geschieht, wenn der Wind das Schiff allmählich in die geneigte Lage bringt (MIDDENDORF 1903). Eine Faustregel besagt $\varphi_{dyn.} \approx 1,5 \cdot \varphi_{stat.}$ für moderate Krängungssituationen. Auf dieses dynamische und für die Stabilität kritische Verhalten des Schiffes sind die Stabilitätskriterien der IMO (1993) ausgelegt, wie sie sich auch in SCHSICHRÄNDV (2018) spiegeln. Die Prüfkriterien sind je nach Schiffstyp u.a. vorgegeben mit Mindestanforderungen an *GM*₀, Vorgaben zum zulässigen statischen Krängungswinkel und Vorgaben in Form von Flächenrelationen der Hebelarmkurven im Hinblick auf die dynamische Stabilität. Es heißt in SCHSICHRÄNDV (2018, Teil 3, Abschnitt 2.14) u.a.:

- Die metazentrische Anfangshöhe GM_0 muss mindestens 0,60 m betragen.
- Der statische Neigungswinkel $\varphi_{stat.}$ unter Segeln darf 20° nicht überschreiten.
- Bei gestrichenen Segeln muss ein seitlicher Winddruck entsprechend 12 Beaufort ertragen werden können.
- Verschließbare Öffnungen, durch die der Schiffskörper geflutet werden kann, dürfen nicht bei einem Krängungswinkel zu Wasser gehen, der kleiner ist als 35°.
- Die Flächen B und C der Hebelarmkurve müssen bei der zu berechnenden Kurve der krängenden Hebelarme infolge seitlichen Winddrucks immer größer oder gleich der 1,4-fachen Fläche von A und B sein.

Entsprechend den Bezeichnungen der Flächen A, B und C in Abbildung 8 ist somit der Nachweis

$$\frac{\mathbf{B}+\mathbf{C}}{\mathbf{A}+\mathbf{B}} = \frac{\int_{\varphi_0}^{\varphi_{CB}} h_a(\varphi) d\varphi}{\int_{\varphi_0}^{\varphi_{CB}} h_k(\varphi) d\varphi} > 1,4$$
(16)

für die jeweiligen Stabilitätsfälle zu führen.

Kritisch im Hinblick auf die Stabilität ist immer das Leerschiff. Wie die Abbildung 10 zeigt, erfüllt das hier betrachtete Schiff auch beim Leerschiff klar die Forderung, dass bei gestrichenen Segeln ein seitlicher Winddruck entsprechend 12 Beaufort ertragen werden kann. Die Abszisse der Abbildung 10 ist aus Vergleichsgründen der Windarme wie in Abbildung 12 skaliert.

Aufbauend auf einer Laserscanneraufnahme lässt sich anhand simulierter Krängungen veranschaulichen, bei welcher Neigung welcher Teil des Rumpfes bzw. der Aufbauten zu Wasser kommt. Dabei muss der Auftrieb in der jeweiligen Krängungssituation beachtet werden. Die Abbildung 11 zeigt, dass im Betriebszustand Reiseanfang das Hauptdeck bei $\varphi = 20^{\circ}$ zu Wasser kommt und als erste verschließbare, mit Seeschlagblenden zu sichernde Schiffsöffnungen die Bulleyes der Messe bei einer Krängung von $\varphi = 38^{\circ}$.



Abb. 10: Stabilitätsfall Topp & Takel im Betriebszustand Leerschiff



Abb. 11: Simulierte Krängungen im Betriebszustand Reiseanfang

Auf Grundlage der Stabilitätsberechnungen erstellt der Betreiber eines Segelschiffes als den für den Betrieb des Schiffes wichtigsten Teil eines Stabilitätshandbuches eine Segelanweisung, in der er der Schiffsführung vorgibt, bis zu welcher Bft-Stärke welche Segelfläche maximal geführt werden darf. Für die in Abbildung 12 gezeigte Segelführung C ist der Segelanweisung von "Johann Smidt" zu entnehmen, diesen ungerefften Zustand bis maximal Bft. 5 zu



fahren. Die IMO-Prüfkriterien würden es erlauben, das Schiff mit dieser Segelführung sogar bis Bft. 7 zu fahren, bevor eine nicht mehr zulässige Situation gemäß IMO-Kriterien eintritt.

Bft.	A [m rad]	B [m rad]	C [m rad]	$\frac{B+C}{A+B}$	> 1,4	𝒫 _{stat.} [°]	
5	0,01276	0,17950	0,73922	4,78		7,5	
6	0,03460	0,28261	0,63420	2,89		12,1	
7	0,07872	0,40345	0,50932	1,89		17,8	
8	0,15979	0,53722	0,36752	1,30	nicht	24,6	nicht
9	0,29053	0,66128	0,22900	0,94		33,6	
10	0,49836	0,76116	0,10311	0,69	zulässig	44,2	zulässig
11	0,79634	0,77066	0,01027	0,50	Zulassig	57,8	Zulassig

Abb. 12: Stabilitätsfall Segelführung C im Betriebszustand Reiseanfang (exemplarisch)

8 Zusammenfassung

Stabilitätsberechnungen sind essentiell wichtig für die sichere Führung eines Schiffes. Wie gezeigt, verlangen derartige Berechnungen die Kenntnis geometrischer Randbedingungen und stellen im Wesentlichen geometrische Auswerteoperationen dar. Der Nutzen einer Laserscanneraufnahme ergibt sich insbesondere dann, wenn keine zuverlässigen Zeichnungen und Konstruktionsunterlagen bei älteren Schiffen vorhanden sind und/oder zwischenzeitlich konstruktions- bzw. stabilitätsrelevante Umbauten erfolgt sind, wie folgt:

- Das Laserscanning liefert ein digitales Modell in Form der Punktwolke
- Einführung eines einheitlichen Schiffskoordinatensystem für alle Größen
- Gesicherte Bestimmung des Volumens und damit der Verdrängung sowie der LCF
- Gesicherte Bestimmung der Formschwerpunktskurve und damit der Pantokarenen sowie des Anfangsmetazentrums in allen Betriebszuständen

• Gesicherte und genaue Erfassung der Lateralflächen und ihrer Schwerpunkte in allen Betriebszuständen

In Kombination mit einem Krängungsversuch zur Bestimmung der metazentrischen Anfangshöhe und damit des Gewichtsschwerpunktes resultieren valide Aussagen, da sich alle Ergebnisse unmittelbar auf durch (Ver)Messung bestimmte Werte stützen.

Literatur

- DIN 81209-1 (1999): Geometrie und Stabilität von Schiffen Formelzeichen, Benennungen, Definitionen - Teil 1: Allgemeines, Überwasser-Einrumpfschiffe, Beuth-Verlag Berlin
- HEUNECKE, O. (2017): Ermittlung von Stabilitätshebelarmkurven aus 3D-Punktwolken. zfv, Heft 2, S. 90-97. DOI: 10.12902/zfv-0157-2016
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (Ed.): A.749(18) Code on intact stability for all types of ships covered by IMO instruments. Resolution adopted 4 Nov. 1993
- KRÜGER, S. (2013): Hydrostatik von Schiffen. Schriftenreihe Schiffbau, Technische Universität Hamburg-Harburg
- MIDDENDORF, F. L. (1903): Bemastung und Takelung von Schiffen. Nachdruck Salzwasser Verlag Bremen 2010. ISBN 978-3-86195-561-0

PARROT, D. S. (2003): Tall ships down, The McGraw Hill Companies. ISBN 0-07-139092-8 SCHSV (1998) Schiffssicherheitsverordnung. Siehe www.gesetze-im-internet.de

SCHSICHRÄNDV (2018): Änderung der schiffssicherheitsrechtlichen Vorschriften über Bau und Ausrüstung von Traditionsschiffen und anderen Schiffen, die nicht internationalen Schiffssicherheitsregeln unterliegen

Hochgenaue automatische Punktabsteckung für Industrieanwendungen

Andreas WEHNER

1 Multisensorsysteme und Roboter

Im Bereich der Geodäsie ist der Begriff des Multisensorsystems weit verbreitet. Er bezeichnet Geräte, welche verschiedene Sensoren, eine Steuereinheit und eine eigene Energieversorgung umfassen (vgl. Abbildung 1a). Durch eine Kombination der einzelnen erfassten Messgrößen werden Berechnungen von abgeleiteten Maßen ermöglicht. Zusätzlich dazu können redundante Systeme aufgebaut werden, welche auch bei einem Ausfall von einzelnen Komponenten immer noch Ergebnisse liefern. Um eine korrekte Datenerfassung und Auswertung zu ermöglichen, ist es notwendig, dass alle Komponenten innerhalb ihrer gemeinsamen Plattform kalibriert sind. Das bedeutet, dass sowohl die Lage als auch die Ausrichtung jedes Sensors (seine Pose) im Rahmen eines durch die Plattform aufgespannten gemeinsamen Objektkoordinatensystems gegeben sein muss. Beispiele für Multisensorsysteme, welche im geodätischen Umfeld genutzt werden, sind vielzählig. Sie reichen von klassischen Vermessungsgeräten wie Tachymetern bis hin zu Lasertrackern oder Mobile Mapping Systemen.

Tatsächlich beinhalten viele als Multisensorsystem bezeichnete Geräte nicht nur Sensoren, sondern auch Aktoren. Im Gegensatz zu Sensoren, die die Aufgabe haben, ein nichtelektrisches Eingangssignal in ein elektrisches Ausgangssignal umzuwandeln, handelt es sich bei Aktoren um das genaue Gegenteil. Ihre Aufgabe ist es, ein elektrisches Signal mit einer zur Verfügung stehenden Spannung in eine physikalische Größe umzuwandeln. Beispiele sind Elektromotoren (Bewegung), Heizelemente (Temperatur) oder Lautsprecher (Schall).

Werden neben Sensoren auch Aktoren innerhalb eines Systems verbaut, kann man strenggenommen nicht mehr von einem Multisensorsystem sprechen. Vielmehr handelt es sich dann um einen Roboter (siehe dazu Abbildung 1b).



Abb. 17: Komponenten von a) Multisensorsystemen und b) Robotern

Im Gegensatz zu Multisensorsystemen ist es Robotern dadurch möglich, die Umwelt wahrzunehmen und in ihr zu handeln. Dazu ist es aber genau wie bei Multisensorsystemen nötig, dass die einzelnen Komponenten innerhalb des Gerätekoordinatensystems hinsichtlich ihrer Pose kalibriert sind.

Eine Möglichkeit zur weiteren Klassifizierung von Robotern liegt in der Betrachtung ihrer Fähigkeit zur Fortbewegung. Mobile Roboter stellen dementsprechend eine Unterkategorie von Robotern dar. Je nach Einsatzumgebung existieren unterschiedliche Bauweisen und Antriebe. So gibt es schwimmende, fliegende und bodengebundene Systeme. Die wohl größte und bekannteste Klasse stellen bodengebundene Roboter dar, welche über Räder angetrieben werden. Doch selbst innerhalb dieser Kategorie existieren unterschiedlichste Bauarten, die sich aufgrund der Anzahl der Räder und ihrer Radkonfiguration stark voneinander unterscheiden.

Letztendlich stellen die unterschiedlichen Roboterplattformen mit ihren Möglichkeiten der Fortbewegung aber oft nur den Träger für ein Werkzeug zur Durchführung von speziellen Aufgaben dar. Die Auswahl einer geeigneten Plattform hängt dementsprechend unmittelbar mit dem Verwendungszweck bzw. der eigentlichen Aufgabe des Roboters und dem dazu benötigten Werkzeug zusammen. Für das hier vorgestellte System ist die Aufgabe durch die automatische präzise Punktabsteckung in einem industriellen Umfeld gegeben, so dass von einem mobilen Absteckroboter gesprochen wird.

2 Aufbau des mobilen Absteckroboters

Für die Aufgabe der automatisierten Punktabsteckung wurde ein mobiler Roboter konzipiert, der in der Lage ist, eine große Anzahl von projektieren Koordinaten eigenständig innerhalb eines definierten Koordinatenrahmens abzustecken und zu vermarken. Die Absteckung geschieht rein nach Lage und innerhalb einer definierten Arbeitsfläche. Diese Fläche entspricht dem Boden in Werkshallen und kann somit als weitestgehend eben und frei von Höhenversätzen in Form von Stufen angesehen werden. Für die Absteckung selbst gilt die selbstgestellte Anforderung nach hochgenauen Punktmarkierungen mit maximalen Abweichungen von T = 1 mm.

Durch diese Anforderungen ergeben sich drei Teilbereiche für den Aufbau des Absteckroboters:

- Die Auswahl eines geeigneten Führungssystems
- Die Konfiguration einer mobilen Plattform
- Die Installation eines Werkzeugs zur automatischen Punktmarkierung

Die Lösung dieser drei Aufgaben resultiert in einem System, das durch die vom Führungssystem erfassten Messwerte von Koordinate zu Koordinate navigiert und diese mit Hilfe der Markiervorrichtung kennzeichnet. Aufgrund der Aufgabe der Punktabsteckung (englisch: to set out points) wird der entwickelte Roboter als sobot (set out Robot) bezeichnet.

2.1 Auswahl des Führungssystems

Prinzipiell ist es möglich, dass sich ein mobiler Roboter selbst im Raum positioniert, ohne dafür ein externes Messsystem zu nutzen. Dies kann z. B. über Simultaneous Localization

and Mapping (SLAM) Algorithmen und den Einsatz von Profilscannern oder Kameras geschehen. Dazu muss die Umgebung jedoch über ausreichend identifizierbare "Landmarks" verfügen. Weiterhin müssen mit den Sensoren genügend Punkte erfasst werden können, die sich auch in Aufnahmen der Folgeepochen identifizieren lassen. Eine solche Positionierung erlaubt zwar die Navigation durch unbekannte Räume, erfüllt jedoch nicht die Genauigkeitskriterien der hier geforderten Absteckung.

Für die Positionierung des Absteckroboters wird daher ein geodätisches Messinstrument verwendet, so dass die verlangten Einzelpunktabsteckungen mit einer Genauigkeit von T = 1 mm gewährleistet werden können. Um Koordinaten mit dieser Genauigkeit abstecken zu können, muss die Positionsbestimmung des Abstecksignals mit hinreichend großer Messgenauigkeit erfolgen. Die geforderte Genauigkeit des Messsystems für Einzelpunktbestimmungen ergibt sich aus der DIN 18710-1 (2010), in der die Relation zwischen einer Maßtoleranz T und der Standardabweichung σ_x eines Messsystems gegeben ist:

$$0.1 \le \frac{\sigma_X}{T} \le 0.2 \tag{1}$$

Entsprechend DIN 18710-3 (2010) ist zwischen der Abstecktoleranz und der Ausführungstoleranz ein angemessenes Verhältnis zu wählen. Daher kann die benötigte Messgenauigkeit mit

$$\sigma_X \approx T \cdot 0,2 \tag{2}$$

berechnet werden. Für eine Maßtoleranz von T = 1 mm ergibt sich damit eine geforderte Messgenauigkeit von $\sigma_X = 0,2$ mm.

Diese hohe Messgenauigkeit kann mit aktuellen Tachymetern nicht erreicht werden. Premiumgeräte erreichen zwar Einzelpunktgenauigkeiten von fast 0,5 mm (z. B. LEICA 2015), für die Anforderung des Absteckroboters ist dies jedoch zu ungenau. Eine andere Möglichkeit zur Punktbestimmung stellen Indoor GNSS Systeme dar. Bei diesen müssen aber die Sender vor jedem Einsatz aufwendig eingemessen werden. Zusätzlich werden auch bei diesem System die geforderten Genauigkeiten nicht erreicht. Aus diesen Gründen wird für die Positionsbestimmung des Absteckroboters ein Lasertracker verwendet. Lasertracker erlauben Einzelpunktbestimmungen im Bereich von wenigen µm und verfügen zusätzlich über hohe Messfrequenzen. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Zielverfolgung damit praktisch kontinuierlich erfolgt. Jedoch existieren für Lasertracker keine 360° -Prismen. Lasertrackermessungen sind prinzipiell nur auf spezielle Corner Cube Reflektoren (CCR) mit begrenzten Winkelöffnungen möglich. Daher muss der Roboter mit einem beweglichen CCR ausgerüstet werden, der so installiert ist, dass das System diesen immer automatisch zum Messsystem ausrichten kann.

2.2 Die Roboterplattform

Das Chassis des Roboters dient als Träger für die On-board Komponenten und macht den Roboter erst zu einem mobilen System. Die Auswahl einer optimalen Trägerplattform hängt von mehreren Faktoren ab. Dazu gehören nach SIEGWART ET AL. (2011) insbesondere die folgenden:

- Stabilität während der Fahrt und im Stillstand
- Geschwindigkeit und Beweglichkeit
- Beschaffenheit der Umgebung

Übertragen auf den Absteckroboter lassen sich diese Faktoren so zusammenfassen, dass das System stets stabil gelagert sein sollte, sowohl während der Fahrt, insbesondere aber im Stillstand. Die Geschwindigkeit spielt zumindest gegenwärtig eine untergeordnete Rolle, wohingegen die Beweglichkeit ein wichtigeres Kriterium darstellt. Aufgrund des Arbeitsfeldes, welches durch die Bodenfläche gegeben ist, müssen keine größeren Hindernisse überwunden werden. Das Chassis soll jedoch in der Lage sein, über Kabel und ähnliche Barrieren zu navigieren. Aus diesem Grund fällt die Wahl auf eine rollende Plattform. Eine Radkonfiguration mit zwei unabhängig steuerbaren Rädern auf einer Achse und einem frei nachfolgenden Rad erlaubt ein hohes Maß an Beweglichkeit und Stabilität (Abbildung 2b). Eine mögliche (und untersuchte) Alternative dazu wäre eine Plattform mit vier unabhängig gesteuerten omnidirektionalen Mecanumrädern (Abbildung 2a). Diese ermöglichen es einer Plattform, auf der Stelle zu drehen und auch seitwärts zu fahren. Jedoch kommt es zu Problemen beim Überwinden von kleineren Hindernissen wie Kabeln oder Leitungen, da die omnidirektionalen Räder deutlich mehr Schlupf haben.



Abb. 18: a) Omnidirektionale Plattform mit Mecanumrädern b) Zwei unabhängige Antriebsräder mit einem nachfolgenden Rad (nach SIEGWART ET AL. 2010)

Neben diesen beiden Konfigurationen gibt es weitere bekannte und weniger bekannte Konfigurationen mit zwei, drei, vier oder mehr (unterschiedlichen) Rädern, von denen einige in SIEGWART ET AL. (2010) vorgestellt und erläutert werden. Für den Absteckroboter fällt die Wahl aus den bereits genannten Gründen auf die Variante gemäß Abbildung 2b) mit zwei unabhängig steuerbaren Rädern und einem freien Rad. Abbildung 3 zeigt die gewählte Plattformkonfiguration von vorne und von der Seite. Durch ihre Größe und ihr Gewicht ist sie in der Lage, das Werkzeug, den Rechner und ausreichend Batterien für die Stromversorgung aller Komponenten zu transportieren und einen festen Stand zu bieten.

Außerdem erlauben es die großen Reifen, auch kleinere Hindernisse zu bewältigen. Mit dieser Konfiguration ist es möglich, die Roboterplattform über Messungen des Lasertrackers bis auf wenige Zentimeter an die abzusteckende Koordinate zu führen. Die Feinpositionierung des Werkzeugs und die Punktmarkierung geschieht dann mit Hilfe der Markiervorrichtung.



Abb. 19: Ansicht der Plattform von a) der Seite und b) vorne (ULRICH, 2011)

2.3 Eine präzise Markiervorrichtung

Den letzten Baustein des Roboters stellt das eigentliche Werkzeug in Form einer Vorrichtung zum Markieren der projektierten Koordinaten dar. Dieses Werkzeug hat zwei Aufgaben: zum einen soll die Vorrichtung die Feinpositionierung durchführen, welche das Markierwerkzeug über eine Distanz von wenigen Zentimetern präzise zum Zielpunkt führt. Zum anderen muss das System im Anschluss daran die Koordinate auf dem Boden markieren. Markierungen können dauerhafter oder reversibler Art sein. Mechanisch gesehen gibt es Möglichkeiten der Kontaktmarkierung und einer berührungsfreien Markierung. Um die tatsächliche Forderung von Absteckungen in Millimetergenauigkeit nicht ad absurdum zu führen, muss die umgesetzte Zielmarkierung des Roboters aber in jedem Fall entsprechend genau durchgeführt werden.

Das typische Verfahren, um Koordinaten exakt zu markieren, ist der Einsatz von Körnern. Mit diesen kann ein Punkt auf entsprechendem Untergrund eingeschlagen werden. Eine andere reversible Möglichkeit ist der Einsatz von Schablonen und Farbe. Beide Verfahren benötigen jedoch einen weitestgehend ebenen Untergrund, der frei von Staub und Verschmutzung sein sollte. Gerade in Werkhallen ist dieser Zustand aber nur selten gegeben. Zusätzlich bringt das Verfahren mit Körnern den Nachteil, dass beim Markieren ein starker Impuls freigesetzt wird, der bei einem automatisierten System zu hohen Belastungen führen würde.

Aus diesen Gründen wird für den entwickelten Absteckroboter ein anderer Ansatz verfolgt. Koordinaten sollen mit Hilfe eines Lasers markiert werden. Somit entspricht der Roboter gewissermaßen einem mobilen Laserengraver. Der Laser wird in drei Achsen beweglich installiert. Damit kann er präzise zu den Zielpunkten geführt werden und unterschiedliche Geometrien in den Boden brennen. Über die Bewegungsgeschwindigkeit der Achsen und den Abstand zum Boden lässt sich regeln, wie stark eine Markierung gebrannt werden soll. Wird ein Punkt länger und im Brennpunkt beleuchtet, so erfolgt die Markierung kräftiger. Kürzere Bestrahlungen außerhalb des Brennpunktes führen dagegen zu "transparenten", aber auch unschärferen Markierungen. Die Beleuchtungsdauer ist natürlich auch an die Materialien des Untergrundes gebunden – ein typischer Untergrund in Werkhallen ist jedoch in Form einer betonierten Fläche vorzufinden und eignet sich daher optimal. Markierungen sind grundsätzlich aber auf allen nichtspiegelnden Materialien möglich. Abbildung 4 zeigt schematisch den Aufbau der Markiervorrichtung mit den drei beweglichen Achsen. Das Markiersystem kann in zwei Komponenten aufgesplittet werden. Zum einen spannen die motorisierte X- und Y-Achse eine Ebene auf, innerhalb welcher das Markierwerkzeug und der Reflektor bewegt werden können. Innerhalb dieser Ebene können präzise Bewegungen umgesetzt werden und einzelne Punkte mit einer Wiederholgenauigkeit von d = 0,01 mm zu Koordinaten geführt werden. Zusätzlich kann der Schlitten in Form einer Geometrie oder eines Schriftzugs geführt werden, um Zielpunkte zu markieren und zu beschriften.



Abb. 20: System zur Feinpositionierung und zum Markieren von Punkten: a) Seitenansichtb) Ansicht von vorne

Die zweite Komponente stellt die bewegliche Z-Achse dar. Diese trägt den Laser, den drehbaren CCR und einen Distanzsensor. Der Reflektor befindet sich innerhalb des Fahrzeugkoordinatensystems direkt lotrecht über dem Laser. Neben dem Laser ist ein Ultraschall- Distanzsensor installiert, welcher den Abstand zum Untergrund misst. Über dessen Messungen lässt sich der Laser entsprechend der Vorgabe fokussieren.

3 Steuerung des Roboters

Die Steuerung des Roboters erfolgt durch einen ebenfalls auf der Plattform installierten Windows-Rechner. Auf diesem Rechner läuft das Hauptprogramm, das den Roboter über Regelkreise die für die Absteckung erforderlichen Aktionen durchführen lässt. Die einzelnen Aktoren, das heißt die Motoren der Plattform, der Markiervorrichtung und des Drehmoduls zum Ausrichten des CCR, werden nicht direkt angesprochen. Stattdessen dienen Microcontroller als Treiber, die nach den entsprechenden Befehlen aus dem Hauptprogramm die für die Aktoren notwendigen Signale ausgeben. Abbildung 5 zeigt die Sensoren und Aktoren des Roboters mit ihren verwendeten Schnittstellen.

Der gesamte Aufbau ist in zwei Gruppen unterteilt. Auf der On-board Seite sind die Komponenten, welche direkt auf der Plattform verbaut sind. Auf der Off-board Seite befinden sich das Führungssystem und ein Computer zum Senden spezifischer Roboterbefehle. Der Lasertracker bestimmt in einer festen Frequenz die Position des CCR und damit die Position der Plattform. Die Daten werden unmittelbar über eine Ethernet Verbindung an den auf der Plattform befindlichen Rechner übertragen. Der Steuer-PC auf der Off-board Seite erlaubt es, die abzusteckenden Koordinaten an den Plattformrechner zu übertragen. Zusätzlich wird der Absteckvorgang dort visualisiert und protokolliert und es existieren Befehle zum manuellen Starten, Stoppen und Pausieren des Absteckvorgangs.

Auf der On-board Seite steht im Zentrum der Windows-Rechner, der die Steuerung des Roboters in Form eines Regelkreises kontrolliert und die Befehle von dem Off-board Rechner empfängt. Über eine RS-232 Verbindung erfolgt die Kommunikation mit der Plattform und damit die Steuerung der zwei Motoren der Vorderräder. Über USB sind ein Zeilenscanner zur Hinderniserkennung, ein Beschleunigungssensor und zwei Mikrocontroller zur Steuerung des Markiersystems und des Drehmoduls angeschlossen. Der erste Mikrocontroller (Abbildung 5: "XY-Achse") steuert das Drehmodul und richtet dadurch den Reflektor stetig zum Messsystem hin aus. Zusätzlich werden über diesen Controller über zwei Endschalter und drei Motoren die Bewegungen in der XY-Ebene gesteuert. Der zweite Mikrocontroller kontrolliert die Z-Achse. Dazu erfolgt hier die Steuerung eines Motors mit Endschalter, des Lasers und des Ultraschall-Distanzsensors.



Abb. 21: Sensoren und Aktoren des Roboters

All diese Komponenten werden über zwei Batterien mit Strom versorgt. Zur Stromversorgung dienen zwei 48 V Fahrradbatterien mit je 10 Ah Nennkapazität. Für die Plattform wird diese Spannung zu 24 V, für den Rechner zu 12 V transformiert. Die Mikrocontroller laufen über die 5 V Spannungsquelle der USB-Anschlüsse.

3.1 Programmablauf

Die Steuerung des Roboters ist in Form von Regelkreisen umgesetzt. Die zentralen Führungsgrößen sind durch die Messungen des Lasertrackers und die aktuelle Orientierung des Roboters gegeben. Aus diesen Größen können die Distanz zum Zielpunkt und die Richtung, in der sich dieser relativ zum System befindet, berechnet werden. Entsprechend der verbleibenden Distanz zwischen Roboter und abzusteckender Koordinate müssen für die Punktabsteckung verschiedene Aktionen durchgeführt werden, die schematisch im Ablaufdiagramm entsprechend Abbildung 6 dargestellt sind.

Bei jedem Start des Roboters wird zunächst eine Initialisierung durchgeführt. Dieser Initialisierungsblock umfasst mehrere Prozesse:

- Starten des Führungssystems und Platzieren des CCR auf dem Roboter
- Übertragen der Absteckkoordinaten an den Roboter-PC
- Überprüfen aller Sensoren und Aktoren auf Bereitschaft

Nach der Initialisierung verfügt das System über alle Informationen, um mit der automatischen Punktabsteckung zu beginnen. Zunächst wird die exakte Pose des Roboters im Raum bestimmt. Anschließend beginnen die kontinuierlichen Messungen des Lasertrackers. Die erfassten Positionen werden an den Roboter übertragen und die verbleibende Distanz zur abzusteckenden Koordinate berechnet. Ist diese größer als ein gesetzter Schwellwert S (3 cm), so wird die Plattform bewegt. Dafür werden aus der aktuellen Pose Steuerparameter für die zwei Antriebsräder berechnet.



Abb. 22: Ablaufdiagramm zur Steuerung des Roboters

Die Regelung der Geschwindigkeit ist abhängig von der verbleibenden Distanz zur Koordinate und bei einem Unterschreiten des Schwellwerts wird die Plattform angehalten. Daraufhin erfolgt eine Neubestimmung der exakten Pose. Diese Parameter sind zwingend erforderlich, um die Feinpositionierung des Lasers durchzuführen. Trotzdem kann es geschehen, dass die Zielposition nicht auf Anhieb genau genug angefahren werden kann. Aus diesem Grund erfolgt eine Kontrollmessung. Ist die Positionierung zu ungenau, wird nachgeregelt, ansonsten erfolgt die Zielmarkierung entsprechend der gesetzten Parameter durch den Laser. Sind weitere abzusteckende Koordinaten vorhanden, wird daraufhin der nächste Punkt ausgewählt und der gesamte Vorgang wird erneut durchgeführt.

3.2 Die Roboterposition und Orientierung

Für die weiteren Betrachtungen zur Bestimmung und Darstellung der Roboterposition und Orientierung müssen zwei Koordinatensysteme herangezogen werden. Ein Weltkoordinatensystem {W}, und ein Fahrzeug- oder Objektkoordinatensystem {O}. Das Objektkoordinatensystem ist fest mit dem Chassis des Roboters verbunden. Um die 2D-Pose des Fahrzeugkoordinatensystems (und somit des Roboters) innerhalb des zweidimensionalen Weltkoordinatensystems darzustellen, sind drei Parameter nötig:

$$\xi_W = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ \theta \end{bmatrix}$$
(3)

Die ersten zwei Parameter geben den Ursprung des Fahrzeugkoordinatensystems innerhalb des übergeordneten Koordinatensystems an, der dritte Parameter die Rotation entgegen dem Uhrzeigersinn. Abbildung 7 zeigt den Roboter und die verwendeten Koordinatensysteme schematisch.



Abb. 23: Fahrzeug- und Weltkoordinatensystem

Bei beiden verwendeten Koordinatensystemen handelt es sich um Rechtssysteme. Der Ursprung des Fahrzeugkoordinatensystems fällt mit der Ausgangsstellung bzw. der Mittelstellung des beweglichen Reflektors überein. Die X₀-Achse des Fahrzeugs weist entlang der Längsachse der Plattform nach vorne, die Y₀-Achse weist dazu orthogonal innerhalb des Fahrzeugsystems nach links.

3.3 Bestimmung der exakten Pose

Die Bestimmung der exakten Fahrzeugpose ist nur bei einem Stillstand der Plattform möglich. Zuerst wird die Position der Mittelstellung, welche mit dem Ursprung des Fahrzeugkoordinatensystems zusammenfällt, bestimmt. Anschließend wird der Reflektor von der vorderen linken in die hintere rechte Ecke bewegt. Daraufhin erfolgt eine Bewegung von der hinteren linken in die vordere rechte Ecke. Während beiden Orientierungsbewegungen werden laufend Messungen durch den Lasertracker durchgeführt. Aus den aufgezeichneten X- und Y-Koordinaten der beiden Fahrten werden im Anschluss zwei ausgleichende Geraden berechnet. Mit den Steigungen der Geraden m₁ und m₂ können im Anschluss über die Beziehung

$$\alpha = \arctan(m) \tag{3}$$

der Steigungswinkel α_1 und α_2 berechnet werden. Für eine korrekte Orientierungsbestimmung ist an dieser Stelle ebenfalls eine Quadrantenabfrage notwendig. Danach kann die Orientierung des Roboters als das Mittel der beiden Steigungen berechnet werden.

$$\theta = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \tag{4}$$

Der Vorteil dieser Bestimmung der Orientierung liegt darin, dass sie in zwei "Lagen" bestimmt und kontrolliert wird. Dadurch kann unmittelbar eine Aussage über die Qualität der Orientierung getroffen werden. Untersuchungsmessungen, bei denen die gleiche Orientierung wiederholt bestimmt wurde, haben eine Standardabweichung von 0,03 gon ergeben (Abbildung 8).



Abb. 24: Genauigkeit der Orientierung

1

Für die Bewegung der Plattform genügt die Bestimmung der exakten 2D-Pose. Durch die zwei aufgezeichneten Geraden können aber analog zum Gier- auch die Nick- und Rollwinkel bzw. die Längs und Querneigung des Roboters bestimmt werden (hierfür sind die X-, Y-, und Z-Koordinaten der aufgezeichneten Fahrten notwendig). Diese sind später für die exakte Zielmarkierung notwendig, da schon leichte Abweichungen von einer horizontalen Plattformstellung zu verfälschen Absteckungen führen.

3.3 Kinematik und Steuerung der Plattform

Die Bewegung der Plattform erfolgt durch die zwei voneinander unabhängig angetriebenen Räder in Form eines Differentialantriebs. Die Änderung der 2D-Pose in einem Weltkoordinatensystem ξ_W kann in Abhängigkeit des Durchmessers der Antriebsräder r, deren Abstand l, der momentanen Orientierung θ und den Winkelgeschwindigkeiten der Räder $\dot{\phi}_1$ (linkes Rad) und $\dot{\phi}_2$ (rechtes Rad) angegeben werden. (SIEGWART ET AL. 2011)

$$\dot{\xi}_{W} = \begin{bmatrix} x \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = f(l, r, \theta, \dot{\varphi}_{1}, \dot{\varphi}_{2})$$
(5)

Für die Beschreibung der Kinematik wird zuerst ein lokales Roboterkoordinatensystem {O} betrachtet. Aufgrund der Radkonfiguration ist eine Bewegung in die Y_O-Richtung nicht möglich und immer gleich Null. Die Bewegung entlang der X_O-Richtung ergibt sich aus den einzelnen Bewegungen der beiden Räder und setzt sich zur Hälfte aus der Bewegung des linken und zur anderen Hälfte aus der Bewegung des rechten Rades zusammen. Die Änderung der Orientierung ist ebenfalls von der Drehgeschwindigkeit der beiden Räder abhängig. Damit kann das kinematische Modell der Plattform innerhalb ihres Objektkoordinatensystems beschrieben werden:

$$\dot{\xi}_{0} = \begin{bmatrix} \frac{r\dot{\phi}_{1}}{2} + \frac{r\dot{\phi}_{2}}{2} \\ 0 \\ \frac{r\dot{\phi}_{1}}{2l} - \frac{r\dot{\phi}_{2}}{2l} \end{bmatrix}$$
(8)

Ein Übergang in das übergeordnete Weltkoordinatensystem ist möglich durch die Multiplikation mit der inversen Drehmatrix um die Z-Achse. Damit ist das Bewegungsmodell innerhalb des übergeordneten Systems gegeben.

$$\dot{\xi}_{I} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0\\ \sin\theta & \cos\theta & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{r\varphi_{1}}{2} + \frac{r\varphi_{2}}{2}\\ 0\\ \frac{r\dot{\varphi}_{1}}{2l} - \frac{r\dot{\varphi}_{2}}{2l} \end{bmatrix} = R(\theta)^{-1}\dot{\xi}_{0}$$
(9)

Für die Navigation zu einer Absteckkoordinate (X_{ZP}, Y_{ZP}) wird eine reaktive Navigation verwendet. Dafür wird aus den kontinuierlichen Messungen die Position der Plattform (X_R, Y_R) ermittelt. Aus der Koordinatendifferenz zwischen Plattformposition und Absteckkoordinate wird eine Sollorientierung θ_{W_Soll} bestimmt.

$$\theta_{W_Soll} = \frac{Y_{ZP} - Y_R}{X_{ZP} - X_R} \tag{10}$$

Die Differenz $\Delta\theta$ der aktuellen Orientierung und der Sollorientierung und die verbleibende Distanz Δd zum Zielpunkt stellen die Regelabweichung für die Anpassung der Drehgeschwindigkeit der beiden Antriebsräder dar. Die maximale Drehgeschwindigkeit der Räder ist abhängig von der Distanz zum Zielpunkt und wird entsprechend der folgenden Fälle angepasst, wobei S einen Schwellwert für die Restdistanz zwischen abzusteckender Koordinate und Plattform darstellt:

$$\Delta\theta > 0 \land \Delta d > S \to \dot{\phi}_1 > \dot{\phi}_2 \qquad \Delta\theta = 0 \land \Delta d > S \to \dot{\phi}_2 = \dot{\phi}_1$$

$$\Delta\theta < 0 \land \Delta d > S \to \dot{\phi}_2 > \dot{\phi}_1 \qquad \Delta\theta > 0 \land \Delta d \le S \to \dot{\phi}_2 = \dot{\phi}_1 = 0$$
 (11)

Über diese Regelung wird die Plattform so bewegt, dass sie zuerst auf einen direkten Kurs zur abzusteckenden Koordinate gedreht wird und anschließend gerade auf diese zusteuert. Je näher sie zum Zielpunkt kommt, desto langsamer wird die Bewegung. Die Integration der Orientierung während der Plattformbewegung erfolgt im Sinne einer Koppelnavigation mit dem Bewegungsmodell der Plattform im übergeordneten System gestützt durch die Messungen des Beschleunigungssensors.

3.4 Feinpositionierung und Punktmarkierung

Wird der Schwellwert des Abstandes zwischen der Plattform und der abzusteckenden Koordinate unterschritten, hält die Plattform an und eine exakte Pose wird bestimmt. Anschließend wird die abzusteckende Koordinate in das Roboterkoordinatensystem transformiert.

$$\begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \end{bmatrix}$$
(12)

Daraufhin werden die Distanzen in X_R - und Y_R - Richtung in Motorschritte umgerechnet. Ein Motorschritt entspricht dabei 0,0125 mm. Ebenfalls muss an dieser Stelle die davor bestimmte Längs- und Querneigung miteinbezogen werden. Der Abstand zwischen Boden und Reflektor wird bei jedem Fokussieren genau bestimmt und ist somit bekannt. Die Längsneigung hat einen direkten Einfluss für die Bewegung entlang der X_R -Achse, die Querneigung auf die Bewegung entlang der Y_R -Achse.

Mit den berechneten Werten wird der Laser auf Position gebracht und durch eine Messung des Lasertrackers kontrolliert. Ist diese im Rahmen der Genauigkeit, erfolgt die Zielmarkierung.

4 Aktueller Stand und Ausblick

Die Entwicklung des Roboters ist gegenwärtig noch nicht komplett abgeschlossen. Die Ableitung der 3D-Pose mittels der "Bestimmung der Pose" funktioniert einwandfrei. Genauso die Markierung von Zielpunkten und das exakte Positionieren des Werkzeugs. Die Bewegung der Plattform wird im Moment noch optimiert. Sie funktioniert zwar prinzipiell, bei äußerst engen Kurven oder einem Drehen auf der Stelle kommt es jedoch wegen Reifenschlupf zu Problemen mit der Integration der Orientierung. Ein weiterer Arbeitsschwerpunkt ist der Umgang mit Hindernissen. Diese werden durch den Zeilensensor detektiert. Damit wird aktuell verhindert, dass der Roboter mit Objekten in der Umwelt kollidiert. Die reaktive Steuerung des Roboters ist aber noch nicht in der Lage, um solche Hindernisse zu manövrieren, das heißt, aktuell wird ein freies Arbeitsfeld benötigt. Zwar ist allein für den Einsatz mit polaren Messsystemen ein offenes Arbeitsfeld notwendig, kleinere Hindernisse wie Säulen oder Stützen sollten jedoch umfahren werden können – selbst wenn der Messstrahl unterbrochen wird. Das Umfahren von Hindernissen soll durch den Einsatz eines "Ant-Algorithmus" ergänzt werden.

Abbildung 9 zeigt die aktuelle Version des Absteckroboters mit dem installierten Markierwerkzeug. Gut erkennbar ist das Werkzeug zum Feinpositionieren und Markieren der Punkte, mit dem auf einem Schrittmotor installiertem CCR. In der Box auf dem Roboter befinden sich USB- und Strom-Verteiler, Wandler und der Rechner zur Steuerung. Seitlich angebracht sind die zwei Fahrradbatterien.



Abb. 25: Absteckroboter "sobot" und exemplarische Punktmarkierung auf Beton

Ebenfalls ist in Abbildung 9 eine exemplarische Punktmarkierung auf Beton zu sehen. Diese wurde mit dem Markiersystem mit verschiedenen Mustern und Brennweiten erzeugt. Die Markierung ist permanent, lässt sich jedoch gut erkennen und ist gleichzeitig mit der geforderten Genauigkeit erzeugt.

Literatur

DIN 18710-1 (2010): Ingenieurvermessung – Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Beuth-Verlag Berlin

DIN 18710-3 (2010): Ingenieurvermessung – Teil 3: Absteckung, Beuth-Verlag Berlin LEICA (2015): Leica Nova TS60. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz

SIEGWART, R., NOURBAKHSH, I. R., SCARAMUZZA, D. (2011): Introduction to Autonomous Mobile Robots. The MIT Press

ULRICH, C. (2011): CU-CHASSIS-XT 2WD-MAX (Abmessungen) - Datenblatt