Araneo: Bestimmung eines erweiterten Unsicherheitsbudgets für die Deformationsmessung basierend auf terrestrischen Laserscans

Araneo: Determination of an Extended Uncertainty Budget for Deformation Measurement Based on Terrestrial Laser Scans

Daniel Wujanz

Das terrestrische Laserscanning (TLS) kann als etablierte Methode für die quasi-flächenhafte Messung von Deformationen angesehen werden. Basierend auf mindestens zwei gemessenen Epochen gilt es zunächst, alle Datensätze in ein gemeinsames Koordinatensystem zu überführen. Anschließend kann eine Deformationsberechnung erfolgen, die numerische Abweichungen von der Folge- zur Referenzepoche farblich codiert darstellt und als Inspection, Change oder Deformation Map bezeichnet wird. Die Farbcodierung und damit auch das Endergebnis des Prozesses ist in der Regel von durch den Nutzer festgelegten Grenzwerten abhängig, die „akzeptable“ beziehungsweise größte und kleinste tolerierbare Abweichungen definieren. Folglich werden globale Schwellenwerte bezüglich der detektierbaren Deformationen angenommen, die dem etablierten Wissen über die heterogene Verteilung der Präzision einzelner Punkte in einem Laserscan klar widersprechen. Dieser Beitrag zielt daher auf die Ableitung stochastischer Größen aus Laserscans als essenzielle Entscheidungsgrundlage für statistische Tests. Dabei werden erstmals die Unsicherheit der Punktverteilung im Objektraum bei der Datenerfassung sowie die stochastischen Eigenschaften des eingesetzten Sensors berücksichtigt. Der vorgestellte Algorithmus wird im Rahmen eines Lastversuchs an einer historischen Bogenbrücke zur Abschätzung einzelner Einflussgrößen auf die Deformationsmessung angewendet.

Schlüsselwörter: Terrestrisches Laserscanning, Deformationsmessung, Unsicherheitsmodellierung, Punktwolken

Terrestrial laser scanning (TLS) can be regarded as an established method for the quasi-laminar measurement of deformations. Based on at least two measured epochs, all data sets must first be transformed into a common coordinate system. Subsequently, deformation measurement can be performed, which displays numerical deviations from the subsequent to the reference epoch by colour-coding and is called Inspection, Change or Deformation Map. The colour coding and thus also the final result of the process is usually dependent on thresholds defined by the user, which define "acceptable" or largest and smallest tolerable deviations. Consequently, global thresholds for detectable deformations are assumed, which clearly contradict the established knowledge about the heterogeneous distribution of the precision of individual points in a laser scan. This contribution therefore aims at deriving stochastic quantities from laser scans as an essential decision basis for statistical tests. For the first time, the uncertainty of the point

sampling in the object space during data acquisition as well as the stochastic properties of the applied sensor are taken into account. The presented algorithm is used in a load test on a historical arch bridge to estimate individual influencing factors on the deformation measurement.

Keywords: *Terrestrial laser scanning, deformation measurement, uncertainty modelling, point clouds*

EINLEITUNG

Aufgabe der Deformationsmessung ist es, geometrische Veränderungen eines Untersuchungsobjekts in Abhängigkeit von der Zeit festzustellen. Die zeitliche Häufigkeit der Datenerfassung ist in diesem Zusammenhang direkt von der individuellen Charakteristik des Objekts abhängig und wird in der Regel durch Experten der jeweiligen Problemdomäne bestimmt. Je nach zu erwartender Magnitude und/oder flächenmäßiger Veränderungsrate gilt es zunächst geeignete Sensorik zu wählen. Etablierte geodätische Instrumente für diese Aufgabe sind beispielsweise GNSS-Antennen, Tachymeter oder Nivelliere. Für die Nutzung der zuvor genannten Sensoren ist es in der Regel unabdingbar, diskrete Punkte im Objektraum dauerhaft zu signalisieren, die zwei Kategorien zugeordnet werden können. Punkte der ersten Kategorie werden in Arealen platziert, in denen davon ausgegangen wird, dass dort geometrische Veränderungen auftreten werden. Wirken sich Deformationen im Objektraum entgegen der getroffenen Annahmen nicht auf die vermarkten Punkte aus, so können diese folglich nicht durch Vermessung dieser nachgewiesen werden. Zur zweiten Kategorie werden Punkte gezählt, die in Gebieten vermarkt wurden, die vermutlich dauerhaft geometrisch stabil bleiben. Mithilfe dieser stabilen Punkte werden Datensätze, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfasst wurden und als sogenannte Epochen bezeichnet werden, in ein gemeinsames Referenzkoordinatensystem überführt /Möser 2004, S. 4/. Diese Maßnahme ermöglicht es schließlich, die möglicherweise an den vermarkten Punkten aufgetretenen Deformationen zu quantifizieren. Abschließend erfolgt die Betrachtung der nachgewiesenen Magnituden und Wirkungsrichtungen der geometrischen Veränderungen im Rahmen der Deformationsanalyse.

Um den zuvor genannten Nachteilen der etablierten geodätischen Instrumente zu begegnen, wurde bereits früh das Potenzial von terrestrischen Laserscannern (TLS) für die Deformationsmessung erkannt /Gordon et al. 2004/. Die Schlüsselkomponente, die zur Entwicklung von TLS führte, sind reflektorlos messende Entfernungsmesser, wodurch auf eine Signalisierung von diskreten Punkten im Objektraum verzichtet werden kann. Durch eine Ablenkeinheit wird das Untersuchungsobjekt diskret abgetastet, wobei aufgrund der hohen Informationsdichte eine quasi-flächenhafte Erfassung erfolgt /Wujanz 2016a, S. 7/. Voraussetzung für die Erfassung einer Objektfläche sind deren radiometrische Eigenschaften, die genähert einem Lambertschen Strahler entsprechen müssen. Bei z. B. starker Absorption oder einer Übersteuerung des Signals infolge von spekularer Reflektion schlägt die Messmethode fehl. Das Ergebnis einer Laserscannermessung ist eine sogenannte Punktwolke. Neben den erfassten geometrischen Informationen, die durch kartesische Koordinaten beschrieben werden, erfassen Laserscanner zusätzlich radiometrische Informationen. Diese als Intensitäten bezeichneten Werte beschreiben die verbliebene Signalstärke eines im Objektraum reflektierten Laserstrahls und eignen sich unter anderem für die Visualisierung oder Segmentierung der erfassten Daten /Burger et al. 2018a/. Soll eine Deformationsmessung mittels TLS durchgeführt werden, empfiehlt es sich, die folgende Prozesskette zu durchlaufen:

- Durchführung einer Standpunktplanung /Bechthold & Höfle 2016/, /Wujanz et al. 2016b/,
- Datenerfassung in mehreren Epochen,
- Überführung einzelner Epochen in einen stabilen Bezugsrahmen,
- Quantifizierung der Deformationen /Lindenbergh & Pietrzyk 2015/.

Obwohl die aktuelle Vorgehensweise prinzipiell der von /Ganz 1914/ vorgeschlagenen entspricht, ist die Komplexität dieser Aufgabe dennoch gestiegen, wie im Laufe dieses Beitrags ersichtlich wird.

1.1 Punktwolkenbasierte Deformationsmodelle

Entgegen der im deutschen Sprachraum häufig verwendeten Kategorisierung zur Ableitung von Deformationen aus TLS-Daten nach /Ohlmann-Lauber & Schäfer 2011/ wird in diesem Beitrag eine alternative Einteilung gewählt. Diese gruppiert die Menge der bestehenden Deformationsmodelle in die folgenden drei Strategien:

- modellbasierte Deformationsmessung,
- objektbasierte Deformationsmessung,
- modellfreie Deformationsmessung.

Bei der modellbasierten Deformationsmessung wird ein funktionaler Zusammenhang zwischen einer Menge von Punkten eines Laserscans angenommen. Die Entscheidung, ob eine statistisch signifikante geometrische Veränderung zwischen erfassten Epochen aufgetreten ist, erfolgt auf Grundlage der geschätzten Parameter (z. B. /Holst et al. 2017a/, /Zhao et al. 2018/) oder daraus abgeleiteten Größen /Eling 2009/. Als entscheidende Herausforderung dieser Vorgehensweise ist die Wahl eines geeigneten funktionalen Modells zu werten /Petrović 2003, S. 1/. Während dies für triviale funktionale Modelle wie beispielsweise Ebenen, wie von /Lindenbergh & Pfeifer 2005/ demonstriert, keine Herausforderung darstellt, ist die Modellbildung für unstetige Freiformflächen eine hochkomplexe Aufgabenstellung (siehe z. B. /Harmening & Neuner 2016/) und somit Gegenstand aktueller Forschungsbemühungen.

Der Begriff der objektbasierten Deformationsmessung ist mehrdeutig und kann folglich unterschiedlich interpretiert werden. Eine Voraussetzung für dieses Deformationsmodell ist eine vorherige Segmentierung bzw. Klassifizierung der Eingangspunktwolken basierend auf geometrischen und/oder radiometrischen Informationen. Das Ergebnis dieses elementaren Vorverarbeitungsschritts

entspricht einer Objektbildung, sodass jeder Punkt genau einer Klasse zugeordnet wurde. Eine mögliche Interpretation liefern /Gojcic et al. 2018/. Dazu erfolgt zunächst eine Segmentierung der Punktwolke – im vorliegenden Fall sind dies einzelne Steinblöcke. Anschließend werden mithilfe eines lokalen Merkmaldeskriptors Punkt-zu-Punkt-Korrespondenzen zwischen einzelnen Punkten auf einem zu unterschiedlichen Zeiten erfassten Objekt gebildet. Basierend auf den ermittelten Korrespondenzen kann schließlich sowohl die Wirkungsrichtung als auch die Magnitude der Deformation bestimmt werden. Diese Informationen sind insbesondere für Geowissenschaftler von großer Bedeutung (siehe z. B. /Fey et al. 2015/). Die Grundlage für eine weitere Deutung liefern /Mayr et al. 2017/, die Punktwolken einer erfassten Hangrutschung in sieben geomorphologische Klassen einteilen. Dabei wird eine Kombination einer überwachten Klassifizierung und einer regelbasierten Re-Klassifizierung, die auf Objektwissen zurückgreift, verwendet. Dieser Ansatz ist prinzipiell dazu geeignet, Deformationen durch Veränderungen der semantischen Zugehörigkeit eines Punkts zu einer Region über die Zeit zu bestimmen. Die Herausforderung der objektbasierten Deformationsmessung liegt klar in der aufwendigen Objektbildung. Da das Ergebnis der Segmentierung in der Regel stark parameterabhängig ist, übt diese folglich auch einen großen Einfluss auf das Ergebnis aus.

Liegen keine Informationen bezüglich der anzunehmenden geometrischen Gestalt einer Punktwolke oder Teilen davon vor, spricht man von einer modellfreien Deformationsmessung, die im Fokus dieses Beitrags steht. Aufgrund der zuvor genannten methodischen Hürden, die es bei den bereits diskutierten Ansätzen zu bewältigen gilt, kann die modellfreie Deformationsmessung als Standardfall angenommen werden. Prinzipiell lassen sich die Vorgehensweisen der modellfreien Deformationsmessung bezüglich der gewählten Strategien der Korrespondenzbildung unterscheiden. Die Crux dieser Aufgabe entsteht durch die bereits angemerkte quasi-flächenhafte Charakteristik der Punktwolken, was bedeutet, dass keine wiederholt anmessbaren Punkte zu verschiedenen Epochen erfasst werden. Dies bedeutet, dass die bestimmten Deformationsvektoren rein interpretatorischer Natur sind und nicht zwingend mit der wirklichen Wirkungsrichtung einer Deformation übereinstimmen müssen, da sie keinem semantischen Objekt zugeordnet werden können. Die einfachste Möglichkeit der Ableitung von Deformationsvektoren aus Punktwolken basiert auf der Bildung von Punkt-zu-Punkt-Korrespondenzen. Als Deformation wird dabei der Abstand zwischen den am nächsten gelegenen Punkten aus zwei Epochen interpretiert. /Girardeau-Montaut et al. 2005/ wählen diese Vorgehensweise, da sie vergleichsweise kurze Prozessierungszeiten ermöglichen. Es ist offensichtlich, dass Unterschiede der lokalen Punktauflösung als Deformation missinterpretiert werden.

Der meistverwendete Ansatz in Wissenschaft und Wirtschaft ist der von /Cignoni et al. 1998/ vorgeschlagene Metro-Algorithmus. Dabei wird mindestens eine der erfassten Punktwolken triangulliert. Anschließend werden Korrespondenzen zwischen Punkten aus der einen und Dreiecken aus der anderen Epoche gebildet. Anschließend wird der Punkt entlang des Normalenvektors des Dreiecks auf selbiges projiziert. Als Deformation wird schließlich der Abstand zwischen dem Fußpunkt und dem ursprünglichen Punkt interpretiert. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass lokale Unterschiede der Punktauflösung kompensiert werden können. Nachteilig ist, wie auch bei der zuvor beschriebenen Methode, dass die Farbskalierung der Endergebnisse beliebig eingestellt werden kann. Dies hat zur Folge, dass beliebige Ergebnisse erzeugt werden können. Eine fundierte Aussage darüber, ob eine signifikante Deformation vorliegt oder nicht, kann nicht getroffen werden und ist Gegenstand des nächsten Abschnitts. Eine detaillierte und empfehlenswerte Studie zu Algorithmen der modellfreien Deformationsmessung basierend auf Punktwolken wurde von /Holst et al. 2017b/ durchgeführt.

1.2 Unsicherheitsmodellierung in der Deformationsmessung

Neben der Quantifizierung von Deformationen ist es ebenso wichtig zu klären, ob diese statistisch signifikant sind /Möser 2004, S. 5/. Daher gilt es zunächst, Einflussgrößen zu identifizieren und bei der Auswertung der Messungen in einem Unsicherheitsbudget zu berücksichtigen. Nach einer Diskussion einzelner Einflussgrößen wird deren Berücksichtigung in aktuellen wissenschaftlichen Beiträgen untersucht. In diesem Abschnitt stehen die drei folgenden Kategorien im Fokus:

- das stochastische Modell des eingesetzten terrestrischen Laserscanners,
- die aus der Abtastung des Objektraums resultierende Unsicherheit,
- der Einfluss der Registrierung.

Eine ausgiebig untersuchte Einflussgröße auf die Qualität von Punktwolken ist das Messrauschen von reflektorlosen Distanzmessern terrestrischer Laserscanner. Üblicherweise zielten die durchgeführten Studien auf die lokalen radiometrischen Eigenschaften des Objekts, die Objektentfernung sowie den Auftreffwinkel (siehe z. B. /Soudarissanane 2016/), blieben dabei aber die Antwort schuldig, wie diese gemeinsam in einem stochastischen Modell abgebildet werden können. Daher blieb dieses Element im Unsicherheitsbudget der Deformationsmessung bislang unberücksichtigt. Jüngere Erkenntnisse in der stochastischen Modellierung von Laserscannern zeigten jedoch einen inhärenten Zusammenhang zwischen roher Intensität und Präzision eines reflektorlos messenden Distanzmessers /Wujanz et al. 2017, Wujanz et al. 2018b/. Mithilfe dieser Modelle kann das Messrauschen einzelner Punkte bestimmt und so im Unsicherheitsbudget berücksichtigt werden.

Bei der Datenerfassung im Feld gibt es in der Regel lediglich zwei Stellgrößen, die direkt am Scanner eingestellt werden können und so einen Einfluss auf das Ergebnis bewirken. Die Erste bestimmt die Größe des Winkelinkrements, mit der Scanner Ihre Umwelt mithilfe eines Laserstrahls abtasten. Folglich entscheidet diese maßgeblich sowohl über die laterale Auflösung der resultierenden Punktwolke als auch deren räumlichen Verteilung im Objektraum. Dies hat zur Folge, dass jeder Scan eines geometrisch gesehen unveränderten Objekts zu einer anderen Punktverteilung und damit auch zu einer anderen Beschreibung der physischen Realität führt. Folglich ist es unerlässlich, diese polymorphe Charakteristik von terrestrischen Laserscannern im Unsicherheitsbudget der Deforma-

tionsmessung zu berücksichtigen. Darüber hinaus übt die Spotgröße des Messstrahls ebenfalls einen Einfluss auf die resultierende Auflösung aus, allerdings im Sinne der lokalen Auflösung bei der Abtastung /Lichti & Jamtsho 2006/. Die zweite Stellgröße ist die Messrate, die bei zahlreichen Scannern einstellbar ist und die Frequenz der Distanzmessung beschreibt. Bei Scannern, deren Distanzmesser nach dem Phasenvergleichsverfahren arbeitet, führt eine niedrigere Messrate zu einer höheren Präzision /Wujanz et al. 2017, Heinz et al. 2018/, die auf einer Auswertung mehrerer Streckenmessungen beruht. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass diese Erkenntnis bisher lediglich für die Erfassung planarer Oberflächen nachgewiesen wurde. Bei unstetigen Oberflächen ist damit zu rechnen, dass eine niedrigere Messrate zu einem „verschmieren" der Distanzmessungen führt, die durch stark unterschiedliche Strecken hervorgerufen wird. Um diesem Effekt zu begegnen, drosseln die Scannerhersteller daher die Rotationsgeschwindigkeit der Ablenkeinheit.

Einen wesentlichen Einfluss auf das Unsicherheitsbudget bewirkt die Transformation einzelner Scans und/oder Epochen in ein übergeordnetes Koordinatensystem. Ein Problem bei der Berücksichtigung dieser Einflussgröße ist, dass fast alle Registrierungsalgorithmen lediglich relative, datumsinvariante Qualitätsmaße ausgeben. Dies wiederspricht dem geodätischen Grundwissen, dass Qualitätsmaße von Transformationsparametern stark von der vorliegenden Netzgeometrie abhängen und folglich zwingend zu berücksichtigen sind. Aus Gründen des Umfangs wird dieser Aspekt in einem gesonderten Beitrag diskutiert.

Zur Überprüfung der Signifikanz von Deformationen bestimmen /Lague et al. 2013/ stochastische Maße aus lokalen Punktnachbarschaften. Dazu ist ein Zylinderdurchmesser zu definieren, der den Umkreis bestimmt, in dem Punkte für die Berechnung der stochastischen Maße berücksichtigt werden. Die berechneten Maße werden schließlich sogenannten Kernpunkten zugewiesen – der Abstand zwischen Kernpunkten aus zwei Epochen wird als aufgetretene Deformation interpretiert. Obwohl dieser Algorithmus als der aktuell am ausgereiftesten eingeschätzt werden kann, wird lediglich der Einfluss der Registrierung berücksichtigt, allerdings rudimentär als globale Fehlerkomponente. /Wujanz 2016a, S. 105 ff./ erweiterte den Ansatz von /Cignoni et al. 1998/ um einen Signifikanztest. Dieser basiert auf einer Kette von Fehlerfortpflanzungen und berücksichtigt die Stochastik des Scanners, nicht aber die Abtastunsicherheit sowie den Einfluss der Registrierung. Bei der vorgeschlagenen Vorgehensweise zeigte sich ein Paradox: Bei niedrigerer räumlicher Auflösung verbesserte sich die Detektierbarkeit von Deformationen, obwohl dies Diskretisierungsfehler bei der Datenerfassung begünstigt. Zur Bestimmung von Signifikanzschranken für Punktwolken berechnen /Chen et al. 2018/ eine sogenannte „Fehler-Entropie" für jeden Punkt und berücksichtigen dabei zumindest theoretisch den Einfluss der Scannerstochastik sowie der Registrierung. Dennoch sind zahlreiche Ergebnisse dieses Beitrags als fragwürdig einzustufen.

	/Lague et al. 2013/	/Wujanz 2016a, S. 105 ff./	/Chen et al. 2018/
Stochastische Eigenschaften des Scanners	nein	ja	ja
Unsicherheit der Abtastung	nein	nein	nein
Registrierung	ja	nein	ja

Tab. 1 | Berücksichtigte Einflussgrößen bei der Bestimmung statistisch signifikanter Deformationen

1.3 Motivation

Abschließend kann festgehalten werden, dass, obwohl sich die Deformationsmessung basierend auf Laserscans zweifelsfrei etabliert hat, die generierten Ergebnisse in Form von farbcodierten Deformation oder Change Maps nicht den geodätischen Standards genügen, da keine aussagekräftigen statistischen Tests Auskunft darüber geben, ob signifikante Deformationen vorliegen oder nicht. Zum selben Schluss kommen auch /Holst et al. 2017b/, die in diesem Kontext anfügen, dass zur Lösung des Problems realistische stochastische Modelle für TLS vorliegen müssen. *Tab. 1* zeigt darüber hinaus, dass alle existierenden Methoden zur Bestimmung von signifikanten Deformationen über unvollständige Unsicherheitsbudgets verfügen. Des Weiteren zeigt sich, dass keiner der diskutierten Lösungen die variierende Punktverteilung beim TLS als zusätzliche Quelle der Unsicherheit modelliert /ISO 2008/.

Dieser Beitrag befasst sich daher mit der Unsicherheitsmodellierung im Kontext der Deformationsmessung basierend auf terrestrischen Laserscans, die im Fokus von Abschnitt 2 steht. Praktische Ergebnisse basierend auf Daten aus einem Lastversuch an einer Bogenbrücke werden in Abschnitt 3 vorgestellt, während eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick den Artikel beschließen.

2 UNSICHERHEITSMODELLIERUNG IN DER DEFORMATIONSMESSUNG

In diesem Abschnitt wird ein neuer Algorithmus zur Modellierung des Unsicherheitsbudgets von terrestrischen Laserscans als zentrale Entscheidungsgrundlage für die Deformationsmessung vorgestellt. Ein wesentlicher Schritt der Deformationsmessung umfasst zunächst die Bestimmung von Korrespondenzen zwischen Punktwolken bzw. triangulierten Punktwolken, der in Abschnitt 2.1 ausführlich diskutiert wird. In Abschnitt 2.2 wird gezeigt, wie die Abtastunsicherheit des terrestrischen Laserscannings bestimmt werden kann, wobei stochastische Einflüsse des eingesetzten Sensors auf das Ergebnis in Abschnitt 2.3 Berücksichtigung finden.

2.1 Bestimmung von Korrespondenzen

Das Schlüsselproblem bei der Verarbeitung von Laserscans ist die Bildung von Korrespondenzen, da die von Laserscannern erfassten Punkte nicht wiederholt angemessen werden. Folglich haben sich verschiedene Konzepte durchgesetzt, mit der das gestellte Problem näherungsweise gelöst werden kann. Die einfachste Lösung ist die Bildung von Punkt-zu-Punkt-Korrespondenzen (P2P), bei welcher Punktpaare mit minimalem Abstand zwischen zwei Punktwolken

gebildet werden. Beispiele hierfür liefern /Besl & McKay 1992/ im Kontext der Registrierung von Punktwolken und /Girardeau-Montaut et al. 2005/ für die Deformationsmessung in Laserscans. *Abb. 1* illustriert diesen Sachverhalt, wobei Punkte einer Referenzepoche in grün hervorgehoben sind. Im linken Teil der Abbildung kennzeichnet der rote Punkt Daten aus einer Folgeepoche, die vom abgebildeten Scanner aus erfasst wurden. Der nächstgelegene Punkt zwischen Referenz- und Folgeepoche wird als korrespondierender Punkt gedeutet, der im mittleren Teil der Abbildung in Gelb hervorgehoben wurde. Der Vektor zwischen den korrespondierenden Punkten wird als aufgetretene Deformation interpretiert, die im rechten Teil der Abbildung in Form einer gelben Verbindung zu sehen ist. Das wesentliche Problem dieser Vorgehensweise ist, dass das Ergebnis der Deformationsmessung basierend auf Punkt-zu-Punkt-Korrespondenzen direkt von der unterschiedlichen Punktverteilung der beteiligten Punktwolken und somit auch zur vorliegenden Auflösung abhängt. Des Weiteren weicht die Beobachtungsrichtung, wie im rechten Teil der Abbildung zu sehen ist, deutlich von der Wirkungsrichtung der Deformation ab. Dieser Aspekt ist insbesondere im Kontext der stochastischen Modellierung des eingesetzten Scanners von großer Wichtigkeit, wie später zu sehen sein wird. Ein weiterer Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass keine Unterscheidung bezüglich des Vorzeichens getroffen werden kann. Dies bedeutet in der Praxis, dass zwar geometrische Unterschiede zwischen Epochen sichtbar gemacht werden können, jedoch nicht klar ist, ob es sich zum Beispiel um einen Materialauftrag- oder Verlust handelt.

Um der direkten Abhängigkeit von der lokalen Auflösung der Punktwolke zu begegnen, bilden /Chen & Medioni 1992/ zur Registrierung und /Cignoni et al. 1998/ in der Deformationsmessung basierend auf Punktwolken Punkt-zu-Dreieck-Korrespondenzen, wie in *Abb.* 2 zu sehen ist. Die dargestellte Szene ist geometrisch gesehen identisch zu *Abb. 1*, jedoch wurde die Referenzepoche trianguliert, wie im linken Teil zu sehen ist. Die Korrespondenzbildung erfolgt, wenn ein Punkt aus einer Folgeepoche auf ein Dreieck der Referenzepoche projiziert werden kann. Als Deformation wird der Vektor zwischen Fußpunkt und dem Punkt aus der Folgeepoche interpretiert, der in der mittleren Abbildung als gelbe Gerade zu sehen ist. Dass diese Vorgehensweise neue Probleme mit sich bringt, zeigt der Fall im rechten Teil der Abbildung. Zum vorliegenden Beispiel wurde ein weiterer Punkt hinzugefügt, der folglich zu einem weiteren Dreieck führt. Da der Punkt aus der Folgeepoche auf beide Dreiecke projiziert werden kann, ergibt sich eine Mehrdeutigkeit, da eine Zugehörigkeit nicht zweifelsfrei geklärt werden kann. Zwar kann bei dieser Strategie der Korrespondenzbildung der Einfluss der unterschiedlichen Auflösung der Punktwolken weitestgehend kompensiert werden, jedoch weicht die interpretierte Wirkungsrichtung der Deformation auch in diesem Fall von der Beobachtungsrichtung ab. Die Einführung der Normalenrichtung ermöglicht es, Unterschiede bezüglich des Vorzeichens einer Deformation zu treffen, also ob es sich um eine positive oder negative Veränderung handelt. Liegt ein Punkt etwa auf der Seite, in welche die Normale zeigt, so erhält dieser ein positives Vorzeichen und könnte somit etwa als Materialauftrag interpretiert werden.

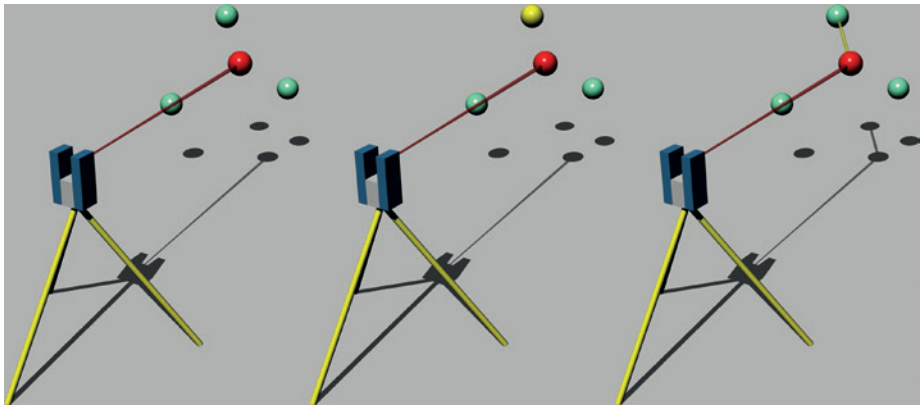

Abb. 1 | Konzept der Punkt-zu-Punkt-Korrespondenz

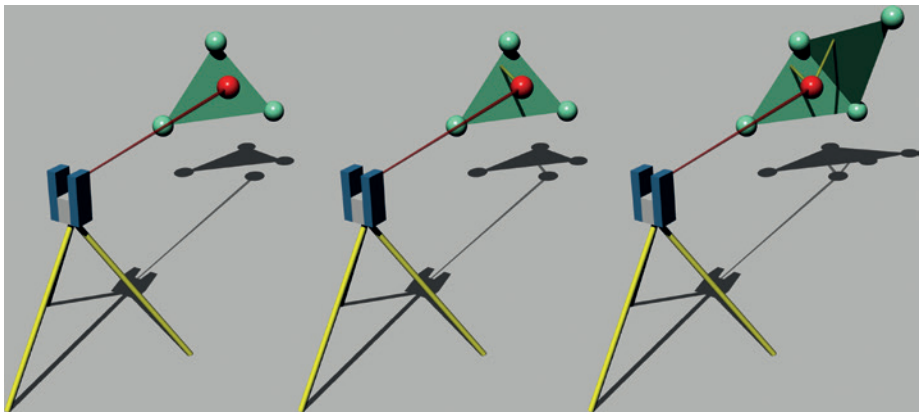

Abb. 2 | Konzept von Punkt-zu-Dreieck-Korrespondenzen

Da Informationen bezüglich der Aufnahmekonfiguration durch die in der Regel durchgeführte Registrierung aller Punktwolken und der Vereinigung zu einem gemeinsamen Datensatz verloren gehen, kommt es normalerweise zu einer beliebigen Ausrichtung der Flächennormalen. Die wesentliche Information, ob es sich um ein Areal mit Zuwachs oder Verlust handelt, kann daher nur durch Expertenwissen erfolgen.

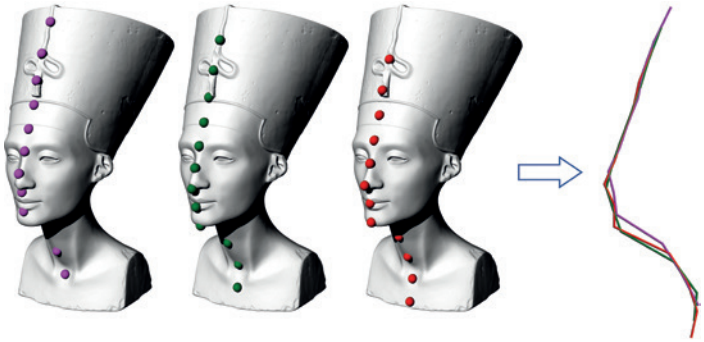

Abb. 3 | Entstehung von Scheindeformationen durch Unterschiede der Punktverteilung

2.3 Modellierung der Abtastunsicherheit

Wie bereits erwähnt, variiert die Punktverteilung in terrestrischen Laserscans in Abhängigkeit zur Aufnahmekonfiguration, den gewählten Sensoreinstellungen sowie internen Diagnoseprozessen, wie etwa der gewählten Abtastgeschwindigkeit oder dem Abgriff einer Inklinometermessung. Jede Erfassung eines Objekts mit einem TLS kann somit als in sich stimmige geometrische Beschreibung interpretiert werden – ein direkter Vergleich mit anderen Beschreibungen desselben Objekts führt jedoch in der Regel zu Scheindeformationen. Dies ist an einem Beispiel in *Abb. 3* dargestellt. Im linken Teil der Abbildung sind drei verschiedene geometrische Beschreibungen eines Objekts dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde je ein einzelnes Profil der Punktwolken dargestellt. Trianguliert man nun die Punktwolken und schaut seitlich auf die Profile, so zeigen sich insbesondere in unsteten und schlecht aufgelösten Bereichen Scheindeformationen. Das terrestrische Laserscanning kann daher als polymorphes Messverfahren interpretiert werden. Diese Charakteristik gilt es nun zwingend bei der Bestimmung von stochastischen Größen als wesentliche Grundlage einer strengen Deformationsmessung zu berücksichtigen.

Aufgrund der in Abschnitt 2.1 aufgeführten Probleme der etablierten Strategien zur Korrespondenzbildung wird eine alternative Lösung vorgeschlagen. Die Grundidee ist dabei, die Aufnahmekonfiguration nachzustellen, die in den beiden Epochen vorlag. Dies lässt sich durch die Funktionsweise von terrestrischen Laserscannern begründen. Die aktive Erfassung des Objektraums erfolgt durch Nutzung eines reflektorlos messenden Distanzmessers. Unter der vereinfachten Annahme eines festen Standpunkts über mehrere Epochen hinweg wird ersichtlich, dass dieser nur Veränderungen in Beobachtungsrichtung ermitteln kann. Im linken Teil von *Abb. 4* wird das Konzept der Korrespondenzbildung entlang der Beobachtungsrichtung für die bereits zuvor beschriebene Aufnahmekonfiguration illustriert. Die Grundlage dafür bildet eine polar triangulierte Punktwolke. Dabei werden nur dann Dreiecke gebildet, für die polar gesehen direkte Nachbarn vorliegen.

Die gelbe Kugel repräsentiert dabei den Punkt, der dem Durchstoßpunkt (ausgehend von der roten Linie) am nächsten liegt. Im Rahmen der Unsicherheitsmodellierung gilt es nun für jeden Punkt ein sogenanntes Habitat zu bestimmen. Das Habitat beschreibt dabei ein Areal, in dem sich ein Punkt in der Folgeepoche befinden kann – unter der Annahme, dass keine Deformationen auftreten /Wujanz et al. 2016c/. Zur Bestimmung dieses Areals werden für jeden Punkt zunächst dessen direkte Nachbarn bestimmt. Zu diesen Nachbarn werden anschließend vektorielle Verbindungen generiert, die in der Mitte von *Abb. 4* durch cyanfarbene Linien repräsentiert werden. Durch Berechnung der jeweiligen Seitenhalbierenden, die mit gelben Kugeln markiert wurden, wird das Habitat schließlich begrenzt, das im rechten Teil durch die graue Fläche hervorgehoben wird. Liegt ein Punkt einer Folgeepoche außerhalb dieses Areals, kann er keine Korrespondenz mit dem Punkt im Zentrum des Habitats bilden.

Die Unsicherheitsmodellierung wird für jeden Punkt in der Referenzepoche n-mal ausgeführt und entspricht somit einer Reihe von Monte-Carlo-Experimenten /Metropolis & Ulam 1949/. Diese Experimente basieren auf der Generierung von sogenannten virtuellen Punkten, welche die gemessenen Daten der Referenzepoche ersetzen und somit den polymorphen Charakter des terrestrischen Laserscannings nachbilden. Zur Positionierung eines virtuellen Punkts wird zunächst zufällig ein einzelnes Dreieck im Habitat ausgewählt. Im vorliegenden Fall aus dem rechten Teil von *Abb. 4* mit acht angrenzenden Punkten und Dreiecken muss eine gleichverteilte Zufallszahl zwischen 1 und 8 generiert werden. Anschließend werden drei weitere gleichverteilte Zufallszahlen generiert, zwei davon im Zahlenbereich zwischen 0 und 0,5 sowie schließlich im Bereich von 0 und 1. Die ersten beiden Zahlen positionieren temporäre Punkte (hellgraue Kugeln in *Abb. 5*), die auf den Vektoren zwischen dem gemessenen Punkt, der durch eine gelbe Kugel hervor-

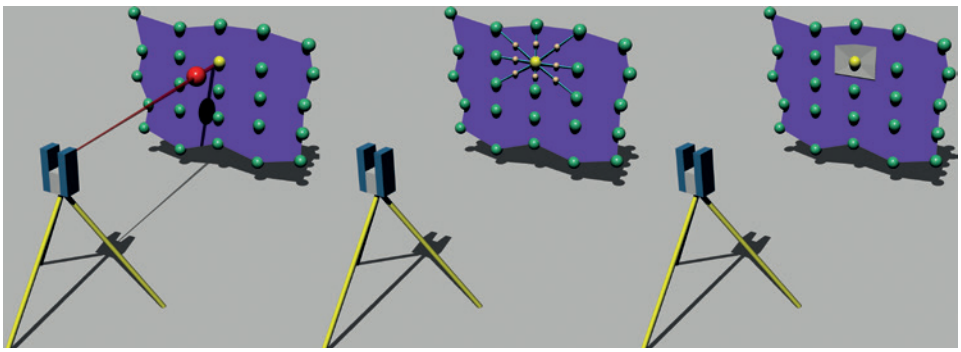

Abb. 4 | Korrespondenzbildung (links), Berechnung der Seitenhalbierenden (Mitte) und Bestimmung eines Habitats (rechts)

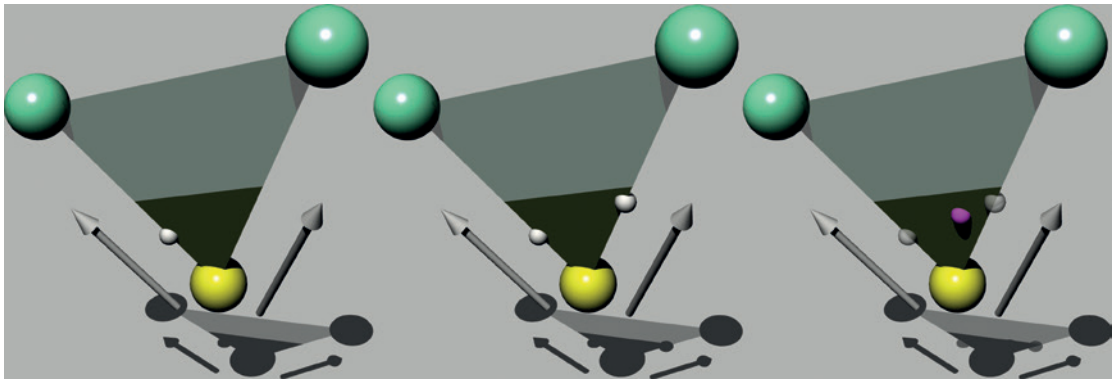

Abb. 5 | Randomisierte Positionierung eines virtuellen Punkts innerhalb des Habitats

gehoben ist, und dessen direkten Nachbarn liegen (markiert durch grüne Kugeln). Durch randomisierte Generierung von Skalaren im vorgegebenen Wertebereich wird sichergestellt, dass die virtuellen Punkte innerhalb des Habitats positioniert werden, die durch die olivgrüne Fläche in *Abb. 5* repräsentiert wird. Schließlich wird ein Vektor zwischen den beiden temporären Punkten gebildet, auf dem wiederum ein Punkt zufällig generiert wird. Dieser beschreibt einen generierten virtuellen Punkt, der in Pink markiert ist.

Zur numerischen Bestimmung der Abtastunsicherheit der Referenzepoche werden schließlich die Strecken zwischen dem Koordinatenursprung des Scanners und den zufällig im Habitat verteilten virtuellen Punkten berechnet. Aus den wiederholt ausgeführten Monte-Carlo-Experimenten wird schließlich die Standardabweichung der virtuellen Strecken ermittelt, welche schließlich die Abtastunsicherheit eines gemessenen Punkts in der Referenzepoche beschreibt. Anders ausgedrückt werden durch die vorgeschlagene Vorgehensweise unterschiedliche Punktverteilungen beziehungsweise Versionen der Referenzepoche unter der Annahme generiert, dass diese geometrisch unverändert bleibt. Darüber hinaus ist anzumerken, dass, obwohl die generierten Zufallszahlen gleichverteilt sind, die resultierende Punktverteilung dies nicht ist, da sie aus einer Kombination mehrerer randomisierter Größen entsteht. Ebenso wäre es denkbar, die virtuellen Punkte auf der äußeren Begrenzungslinie des Habitats zu positionieren, die in *Abb. 5* durch den Übergang zwischen dem grauen und dem darunter liegenden olivgrünen Bereich beschrieben wird. Diese Vorgehensweise hätte den Vorteil, dass die Punktverteilung von nur zwei Zufallszahlen abhinge: einer zur Wahl eines einzelnen Dreiecks innerhalb des Habitats sowie einer weiteren zur Verschiebung auf der jeweiligen Begrenzungslinie. Diese Strategie beschreibt somit ein Worst-Case-Szenario.

2.4 Unsicherheitsmodellierung unter Einbeziehung der Sensorstochastik

Zur Berücksichtigung der stochastischen Eigenschaften des eingesetzten Scanners wird ein intensitätsbasiertes stochastisches Modell verwendet /Wujanz et al. 2017/. Diese Vorgehensweise ermöglicht sowohl die Zuweisung von stochastischen Eigenschaften für die gemessenen als auch die virtuellen Punkte. Dazu werden jedem virtuellen Punkt radiometrische Eigenschaften zugewiesen, die durch streckengewichtete Mittelbildung erfolgt. Dieser Prozess ist im linken Teil der *Abb. 6* zu sehen. Die Punkte der Referenzepoche sind nun in Grau eingefärbt, wobei eine hellere Färbung ein stärkeres Signal repräsentiert. Anschließend wird die Beobachtungsrichtung des virtuellen Punkts bestimmt, die durch eine gelbe Linie ebenfalls im linken Teil der Abbildung repräsentiert wird. Basierend auf der zugewiesenen Intensität und der simulierten Aufnahmekonfiguration können die Wirkungsrichtung des Distanzmessrauschens sowie deren Magnitude bestimmt werden. Diese ist durch zwei pinkfarbene Pfeile in der Mitte der Abbildung hervorgehoben. Im letzten Schritt wird die Präzision der Winkelmessung berücksichtigt.

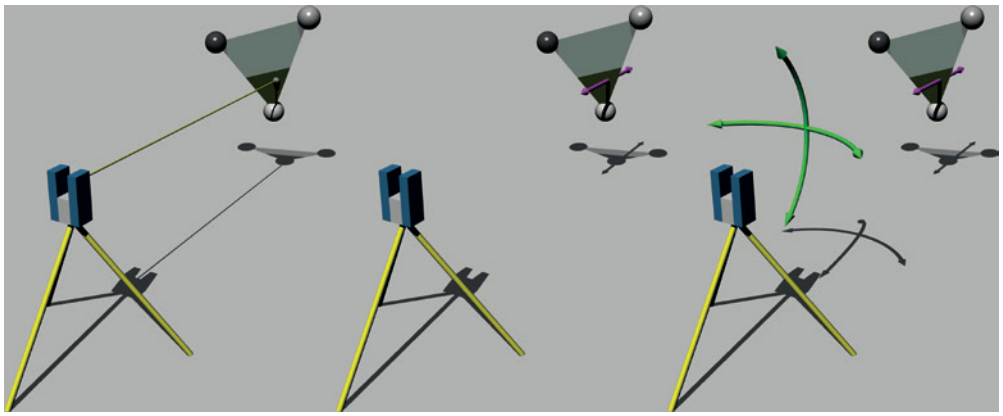

Abb. 6 | Nachbildung der virtuellen Aufnahmekonfiguration (links), resultierendes Messrauschen der Streckenmessung (Mitte) und Einfluss der Winkelmessung (rechts)

Dazu werden die virtuellen Punkte um zufällige Beträge rotiert, die im Rahmen des Messrauschens der Winkel liegen.

3 UNSICHERHEITSABSCHÄTZUNG EINER DEFORMATIONSMESSUNG AM BEISPIEL EINER HISTORISCHEN BOGENBRÜCKE

In diesem Abschnitt wird der vorgestellte Algorithmus zur Abschätzung des Unsicherheitsbudgets einer erfassten Referenzepoche verwendet. Die dafür verwendeten Daten wurden im Rahmen eines statischen Lastversuchs an einer historischen Bogenbrücke mit einem Zoller + Fröhlich IMAGER 5006h erfasst. Weitere Analysen und Details zum Versuch sind in /Burger et al. 2018b/, /Paffenholz et al. 2018/ oder /Wujanz et al. 2018a/ zu entnehmen. *Abb. 7* zeigt im linken Teil das Untersuchungsobjekt während der Vorbereitung der Messkampagne. Im rechten Bereich des Brückenbogens sind drei Stahlstäbe zu erkennen, über die ein mehrstufiger Lasteintrag in die Struktur erfolgte. Der rechte Teil der Abbildung zeigt die resultierenden Vertikaldeformationen nach der Belastung der Brücke, wobei eine asymmetrische Verteilung der Verformungen zu erkennen ist. Bezüglich der Aufnahmekonfiguration ist zu erwähnen, dass der Scanner während und nach dem Lasteintrag nicht unter der Brücke platziert werden konnte, da ein Einsturz der Brücke befürchtet wurde. Stattdessen erfolgte die Platzierung des TLS etwa zwei Meter vom Brückenbogen entfernt, sodass unvorteilhafte Auftreffwinkel unvermeidbar waren. In diesem Abschnitt werden Beiträge der Präzision des eingesetzten Scanners, der Aufnahmeposition und der Abtastunsicherheit zum Unsicherheitsbudget einer Deformationsmessung untersucht.

Zunächst steht der Einfluss der Präzision des reflektorlos messenden Distanzmessers bei der Erfassung der Referenzepoche im Fokus. Dazu wurde mithilfe eines intensitätsbasierten stochastischen Modells /Wujanz et al. 2017/ zunächst das Rauschen der Distanzmessungen bei einer angenommenen Messrate von 127 kHz in Aufnahmerichtung berechnet. Im linken Teil der *Abb. 8* spiegeln sich deutlich die heterogenen radiometrischen Eigenschaften an der Brückenunterseite in der jeweiligen Präzision der gemessenen Distanzen wieder. Dabei liegt die mittlere Präzision bei ~ 0,5 mm und die maximalen Werte um 1,0 mm, die lokal begrenzt durch feuchte Areale zu begründen sind. Für den rechten Teil der Abbildung wurde ein weniger präziser Scanner bzw. eine Messrate von 1,016 MHz angenommen /Wujanz et al. 2017/. Es zeigt sich, dass die zu erwartende Präzision der Distanzmessungen gemäß dem Wurzelgesetz um einen Faktor von ~ 2,8 höher ausfällt, was auf den ersten Blick zu einer deutlich niedrigeren Detektierbarkeit von Deformationen führt.

Ziel der nächsten Simulation ist es, den Einfluss der Aufnahmekonfiguration zu quantifizieren. Dazu wurde die Abtastunsicherheit ohne Berücksichtigung der Scannerstochastik für zwei unterschiedliche Standpunkte des Brückenbogens durch Anwendung des in Abschnitt 2.2 vorgestellten Algorithmus berechnet. Im linken Teil von *Abb. 9* ist eine Punktwolke zu sehen, die von der Mitte des Brückenbogens aus im Vorfeld des Lastversuchs erfasst wurde. Dabei zeigt sich, dass die Unsicherheit direkt über dem Scanner um 0,9 mm liegt, zu erkennen an der blauen Fläche in der Mitte des Brückenbogens. Ebenso ist zu feststellen, dass die Abtastunsicherheit am Brückenbogen radial nach außen hin ansteigt. Ähnliche Effekte sind an den Pfeilern, allerdings aufgrund der vorteilhafteren Auftreffwinkel in abgeschwächter Form, zu erkennen. Im rechten Teil der Abbildung ist die Punktwolke zu sehen, die etwa zwei Meter vom Rand des Brückenbogens aus erfasst wurde. Dies zeigt sich in einer asymmetrischen Ausbreitung der Abtastunsicherheit, die in Querrichtung des Brückenbogens von ~ 1,1 mm bis etwa 15 mm

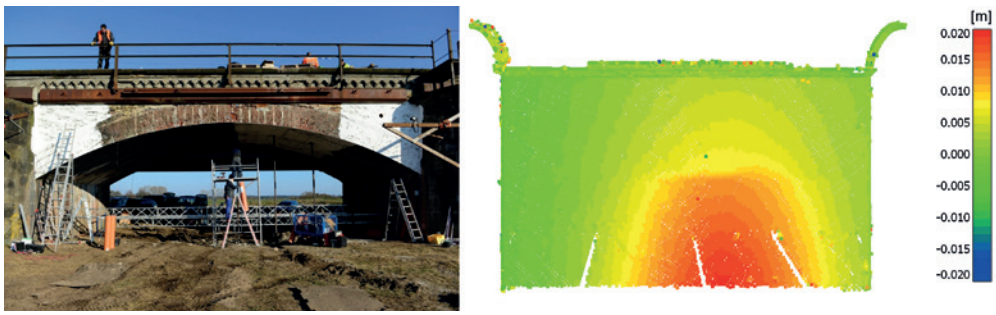

Abb. 7 | Vorbereitung der Messkampagne am Untersuchungsobjekt (links) und vertikale Verformungen infolge des Lasteintrags (rechts)

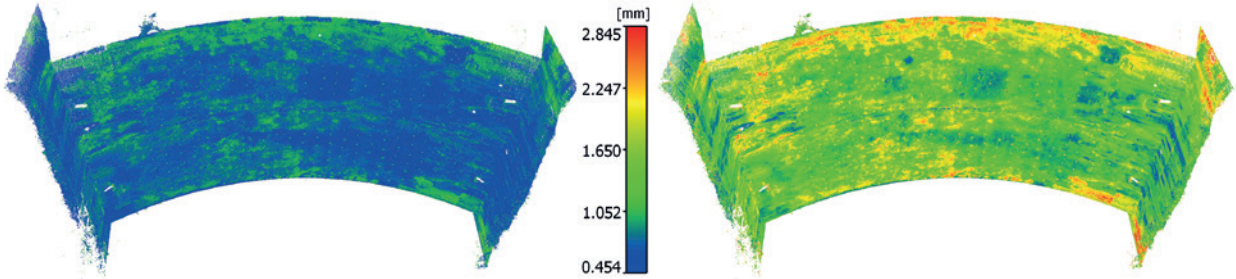

Abb. 8 | Messrauschen der Distanzmessung bei 127 kHz (links) und 1,016 MHz (rechts)

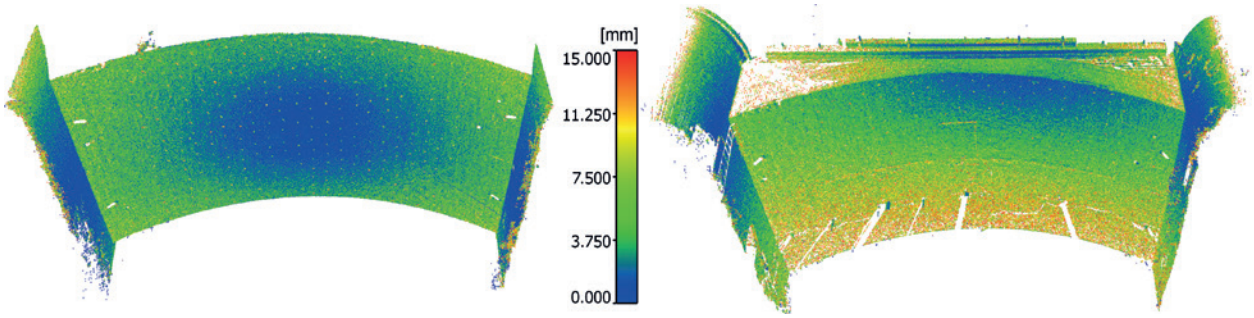

Abb. 9 | Unsicherheit der Abtastung: Scan unter der Brücke (links) und Scan seitlich des Bogens (rechts)

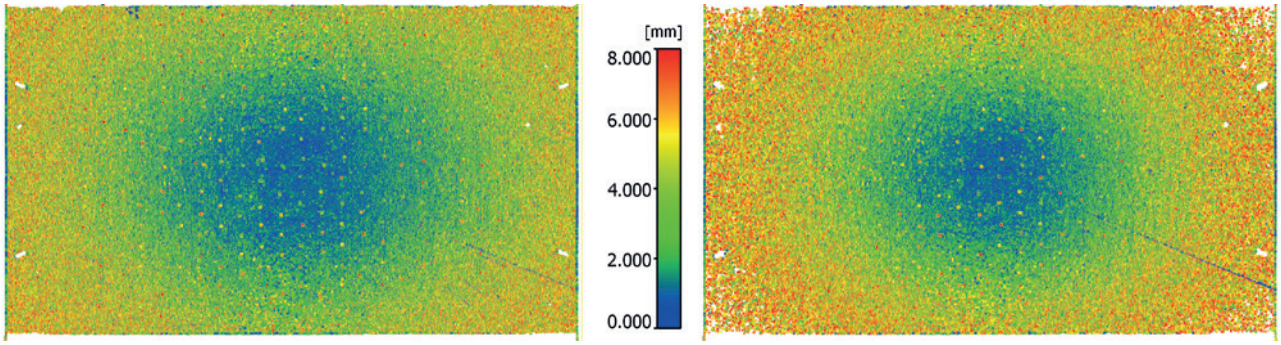

Abb. 10 | Resultierende Unsicherheit im Brückenbogen bei einer Winkelauflösung von 0,100° (links) und 0,166° (rechts)

ansteigt. Dieser Effekt lässt sich durch die widrige Aufnahmekonfiguration erklären, die im hinteren Bereich des Bogens schleifende Auftreffwinkel und eine stark reduzierte Punktauflösung zur Folge hat. Dies hat zur Konsequenz, dass augenscheinlich keine signifikanten Deformationen nachgewiesen werden können.

In der letzten Untersuchung steht der Einfluss der Abtastunsicherheit sowie der Stochastik des verwendeten Scanners im Vordergrund, wozu die in Abschnitt 2.2 und 2.3 beschriebenen Algorithmen verwendet wurden. Bezüglich der Präzision des Scanners wurde das stochastische Modell bei einer Messrate von 1,016 MHz angenommen. Die Punktwolke wurde zunächst bei einer Winkelauflösung von 0,100° sowie in ausgedünnter Form von 0,166° prozessiert. Der resultierende mittlere Punktabstand benachbarter Messungen beträgt somit im Abstand von 5 Metern 8,7 mm bzw. 14,5 mm. Im linken Teil von *Abb. 10* sind die resultierenden Unsicherheiten bei einer Auflösung von 0,100° zu sehen, wobei diese im Mittel 1,99 mm beträgt. Die regelmäßig vorkommenden kreisförmigen erhöhten Unsicherheiten stammen von kurzen Stahlstäben, die an Fugenkreuzen eingebracht wurden. Der rechte Teil zeigt die entsprechenden Ergebnisse bei einer Auflösung von 0,166°. Dabei zeigt sich, dass das Unsicherheitsniveau aufgrund der geringeren Auflösung deutlich höher ausfällt. Dies zeigt sich zum einen numerisch durch eine mittlere Unsicherheit von 2,95 mm und zum anderen durch die unterschiedliche Farbverteilung in der grafischen Darstellung, beispielsweise durch das verhältnismäßig kleinere blaue Areal im rechten Teil von *Abb. 10*. Zudem zeigt sich eindeutig, dass im vorliegenden Fall die lokale Auflösung der Punktwolke einen maßgeblichen Einfluss auf das resultierende Unsicherheitsbudget des gestellten Problems ausübt, da keine durch die Intensitäten verursachten lokalen Variationen der Unsicherheit sichtbar sind. Die erzielten Ergebnisse stimmen damit prinzipiell mit der Aussage von /Heinz et al. 2018/ überein, die der räumlichen Auflösung einer Punktwolke einen größeren Einfluss auf daraus abgeleitete Parameter zuweisen, als der Präzision der einzelnen Punkte. Ob dieser Aspekt allgemein gültig ist, sollte in weiteren Untersuchungen untersucht werden.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Beitrag wurde erstmals ein Algorithmus zur Unsicherheitsmodellierung für die Deformationsmessung basierend auf Laserscans vorgestellt, der sowohl die gewählte Aufnahmekonfiguration, die Unsicherheit der Punktabtastung als auch die stochastischen Eigenschaften des eingesetzten Scanners berücksichtigt. Am Beispiel eines Lastversuchs an einer Bogenbrücke wurde der Algorithmus getestet. Im Fall der vorliegenden Daten konnte gezeigt werden, dass sowohl die Aufnahmekonfiguration als auch die Wahl der lateralen Auflösung einen maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis bewirken. Zukünftige Studien werden der Frage nachgehen, wie das Unsicherheitsniveau reduziert werden kann. Hierfür stehen prinzipiell drei Stellschrauben zur Verfügung:

- Optimierung der Aufnahmekonfiguration,
- Erfassung präziserer Daten und
- Erhöhung der räumlichen Auflösung der Punktwolke.

Insbesondere der erste sowie der letzte Aspekt scheinen, basierend auf den in diesen ersten Experimenten erzielten Ergebnissen, den größten Einfluss auf die Detektierbarkeit von Deformationen auszuüben. Darüber hinaus ist der vorgestellte Algorithmus um den Einfluss der Registrierung zu erweitern, sodass auch Deformations-

messungen basierend auf Epochen mit mehr als einem Standpunkt und nicht konstanter Aufnahmekonfiguration verarbeitet werden können. Auch wenn der Algorithmus am Beispiel der modellfreien Deformationsmessung motiviert wurde, kann dieser ebenso unverändert für die aktuell im Fokus der Wissenschaft stehenden modellbasierten Variante verwendet werden. Die Unsicherheit der Punktverteilung ist auch bei diesem Deformationsmodell zu berücksichtigen, führt sie doch zu unterschiedlichen Modellparametern.

LITERATUR

Bechtold, S.; Höfle, B. (2016): HELIOS: A multi-purpose lidar simulation framework for research, planning and training of laser scanning operations with airborne, ground-based mobile and stationary platforms. In: ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences 3(2016)3.

Besl, P. J.; McKay, N. D. (1992): Method for registration of 3-D shapes. Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures. In: International Society for Optics and Photonics, 586 – 607.

Burger, M.; Wujanz, D.; Neitzel, F. (2018a): Synergetische Segmentierung und Registrierung von Punktwolken. In: Luhmann, Th.; Schumacher, Ch. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018. Wichmann, Berlin/Offenbach, 130 – 144.

Burger, M.; Wujanz, D.; Neitzel, F.; Lichtenberger, R. (2018b): Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Optische korrelationsbasierte Messtechnik zur lastinduzierten Verformungsmessung. In: Mauerwerk-Kalender 2018 – Brücken, Bauen im Bestand. Ernst & Sohn, Berlin.

Chen, Y.; Medioni, G. (1992): Object modelling by registration of multiple range images. In: Image and Vision Computing 10(1992)3, 145 – 155.

Chen, X.; Yu, K.; Wu, H. (2018): Determination of Minimum Detectable Deformation of Terrestrial Laser Scanning Based on Error Entropy Model. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 56 (2018)1, 105 – 116.

Cignoni, P.; Rocchini, C.; Scopigno, R. (1998): Metro: Measuring error on simplified surfaces. In: Computer Graphics Forum 17(1998)2, 167 – 174.

Eling, D. (2009): Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksübewachung. DGK, Reihe C, 641. Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.

Fey, C.; Rutzinger, M.; Wichmann, V.; Prager, C.; Bremer, M.; Zangerl, C. (2015): Deriving 3D displacement vectors from multi-temporal airborne laser scanning data for landslide activity analyses. In: GIScience & Remote Sensing 52(2015)4, 437 – 461.

Ganz, J. (1914): Die Gipfelbewegung der Rosablanche. SAC-Jahrbuch Nr. 50, 1914/15.

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.

Gojcic, Z.; Zhou, C.; Wieser, A. (2018): Learned compact local feature descriptor for tls-based geodetic monitoring of natural outdoor scenes. In: ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences 4(2018)2.

Gordon, S.; Lichti, D.; Franke, J.; Stewart, M. (2004): Measurement of structural deformation using terrestrial laser scanners. In: 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, Nottingham, England.

Harmening, C.; Neuner, H. (2016): Choosing the Optimal Number of B-spline Control Points (Part 1: Methodology and Approximation of Curves). In: Journal of Applied Geodesy 10(2016)3, 139 – 157.

Heinz, E.; Holst, C.; Kuhlmann, H. (2018): Erhöhung der räumlichen Auflösung oder Steigerung der Einzelpunktgenauigkeit beim Laserscanning? – Analyse der Modellierungsgenauigkeit am Beispiel einer Ebene. In: Luhmann, Th.; Schumacher, Ch. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018. Wichmann, Berlin/Offenbach, 167 – 179.

Holst, C.; Schunck, D.; Nothnagel, A.; Haas, R.; Wennerbäck, L.; Olofsson, H.; Hammargren, R.; Kuhlmann, H. (2017a): Terrestrial Laser Scanner Two-Face Measurements for Analyzing the Elevation-Dependent Deformation of the Onsala Space Observatory 20-m Radio Telescope's Main Reflector in a Bundle Adjustment. In: Sensors 17(2017)8.

Holst, C.; Schmitz, B.; Schraven, A.; Kuhlmann, H. (2017b): Eignen sich in Standardsoftware implementierte Punktwolkenvergleiche zur flächenhaften Deformationsanalyse von Bauwerken? Eine Fallstudie anhand von Laserscans einer Holzplatte und einer Staumauer. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv) 142(2017)2, 98 – 110.

ISO (2008): ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement. International Organization for Standardization, Genf.

Lague, D.; Brodu, N.; Leroux, J. (2013): Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ). In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 82(2013), 10 – 26.

Lambertus, T.; Belton, D.; Helmholz, P. (2018): Empirical investigation of a Stochastic model based on intensity values for terrestrial laser scanning. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 125(2018)3, 43 – 52.

Lichti, D. D.; Jamtsho, S. (2006): Angular resolution of terrestrial laser scanners. In: The photogrammetric record 21(2006)114, 141 – 160.

Lindenbergh, R.; Pfeifer, N. (2005): A statistical deformation analysis of two epochs of terrestrial laser data of a lock. In: Proceedings of the 7th Conference on Optical 3D Measurement Techniques. Wien, Österreich, 61 – 70.

Lindenbergh, R.; Pietrzyk, P. (2015): Change detection and deformation analysis using static and mobile laser scanning. In: Applied Geomatics 7(2015)2, 65 – 74.

Mayr, A.; Rutzinger, M.; Bremer, M.; Oude Elberink, S.; Stumpf, F.; Geitner, C. (2017): Object-based classification of terrestrial laser scanning point clouds for landslide monitoring. In: The Photogrammetric Record 32(2017)160, 377 – 397.

Metropolis, N.; Ulam, S. (1949): The Monte Carlo method. In: Journal of the American Statistical Association 44(1949)247, 335 – 341.

Möser, M. (2004): Skript der Lehrveranstaltung „Monitoring und Deformationsanalyse". Vertiefungsfach Ingenieurgeodäsie am Geodätischen Institut, Technische Universität Dresden.

Ohlmann-Lauber, J.; Schäfer, T. (2011): Ansätze zur Ableitung von Deformationen aus TLS-Daten. In: Terrestrisches Laserscanning – TLS 2011. 106. DVW Seminar, 1. – 2. 12. 2011, Fulda. Wißner, Augsburg, 161 – 180.

Paffenholz, J.-A.; Stenz, U.; Neumann, I.; Dikhoff, I.; Riedel, B. (2018): Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Lasertracking und GBSAR zur Verformungsmessung. In: Mauerwerk-Kalender 2018 – Brücken, Bauen im Bestand. Ernst & Sohn, Berlin, 205 – 219.

Petrović, S. (2003): Parameterschätzung für unvollständige funktionale Modelle in der Geodäsie. DGK, Reihe C, 563. Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.

Soudarissanane, S. S. (2016): The geometry of terrestrial laser scanning; identification of errors, modeling and mitigation of scanning geometry. Doctoral thesis, Delft University of Technology, Niederlande.

Wujanz, D. (2016a): Terrestrial laser scanning for geodetic deformation monitoring. DGK, Reihe C, 775. Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.

Wujanz, D.; Holst, C.; Neitzel, F.; Kuhlmann, H.; Niemeier, W.; Schwieger, V. (2016b): Survey configuration for terrestrial laser scanning. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 123(2016)6, 158 – 169.

Wujanz, D.; Krueger, D.; Neitzel, F. (2016c): Identification of stable areas in unreferenced laser scans for deformation measurement. In: The Photogrammetric Record 31(2016)155, 261 – 280.

Wujanz, D.; Burger, M.; Mettenleiter, M.; Neitzel, F. (2017): An intensity-based stochastic model for terrestrial laser scanners. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 125(2017), 146 – 155.

Wujanz, D.; Paffenholz, J.-A.; Schill, F.; Burger, M.; Stenz, U.; Lichtenberger, R.; Neitzel, F.; Eichhorn, A.; Neumann, I. (2018a): Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Terrestrisches Laserscanning zur Verformungsmessung. In: Mauerwerk-Kalender 2018 – Brücken, Bauen im Bestand. Ernst & Sohn, Berlin, 221 – 239.

Wujanz, D.; Burger, M.; Tschirschwitz, F.; Nietzschmann, T.; Neitzel, F.; Kersten, T. P. (2018b): Determination of intensity-based stochastic models for terrestrial laser scanners utilising 3D-point clouds. In: Sensors 18(2018)7.

Zhao, X.; Kargoll, B.; Omidalizarandi, M.; Xu, X.; Alkhatib, H. (2018): Model selection for parametric surfaces approximating 3D point clouds for deformation analysis. In: Remote Sensing 10(2018)4.

Dr.-Ing. Daniel Wujanz

TECHNET GMBH

Am Lehnshof 8 | 13467 Berlin
daniel.wujanz@technet-gmbh.com

Manuskript eingereicht: 30.09.2018 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet