

# Kinematisches terrestrisches Laserscanning\*

Hansjörg Kutterer, Jens-André Paffenholz und Harald Vennegeerts

## Zusammenfassung

Beim kinematischen terrestrischen Laserscanning (k-TLS) werden Anwendungen betrachtet, bei denen die Zeit eine wesentliche Rolle spielt. Dies betrifft zum einen das geodätische Monitoring, das sich mit der schnellen Bewegung oder Verformung von Messobjekten befasst, und zum anderen das Mobile Mapping, bei dem geometrische Umgebungsinformation von einer bewegten Plattform aus erfasst wird. Der Beitrag diskutiert zunächst verschiedene Messstrategien im Hinblick auf die Geschwindigkeit der Objekterfassung. Anschließend werden beide Varianten des k-TLS an beispielhaften Anwendungen veranschaulicht. Der Schwerpunkt der Darstellungen liegt auf der Nutzung des k-TLS für Monitoringaufgaben.

## Summary

*Kinematic terrestrial laser scanning (k-TLS) is concerned with applications which essentially depend on time. On the one hand this refers to geodetic monitoring tasks which aim at the determination of fast motions or deformations of the objects of interest. On the other hand mobile mapping applications are considered where three-dimensional geometric information of extended objects such as road scenes is captured. In this contribution various observation strategies of k-TLS are discussed. Both fields of application of k-TLS are illustrated exemplarily with the main focus on geodetic monitoring.*

## 1 Einführung

Das terrestrische Laserscanning (TLS) gestattet die schnelle, unmittelbar dreidimensionale und direkt zentrische Erfassung der Geometrie von Objektoberflächen mit hoher räumlicher Auflösung. Zusätzlich zu den geometrischen Informationen werden Oberflächenremissionswerte (oder Intensitätswerte) aufgezeichnet. Typische Ergebnisse einer Scanaufgabe sind 3D-Punktwolken, die das Objekt je nach Anwendung anhand von Millionen grauwert-codierter, räumlich eng benachbarter Einzelpunkte beschreiben.

Im Vergleich zu etablierten Verfahren zeichnet sich das TLS vor allem durch die Verbindung von drei wesentlichen Merkmalen aus. Zum einen ist die Objekterfassung prinzipiell flächenorientiert; Einzelpunkte sind von nachgeordneter Bedeutung, da sie nur unter bestimmten Voraussetzungen in wiederholten Scans identifiziert wer-

den können. Zum anderen ist das TLS aufgrund der reflektorlosen Entfernungsmessung auch für die Aufnahme unzugänglicher bzw. nicht oder schwach texturierter Objekte geeignet. Schließlich ist die Objekterfassung aufgrund der hohen Messgeschwindigkeit in vergleichsweise kurzer Zeit möglich.

Eine eingehende Beschreibung des TLS ist nicht Gegenstand dieses Beitrags; weiterführende Informationen findet man inzwischen in vielfältiger Form in der einschlägigen Literatur. Beispielhaft seien (Wunderlich und Staiger 2008) sowie (Jöckel u.a. 2008) genannt. Für technische Spezifikationen der aktuellen Geräte sei auf die Internetauftritte der Anbieter von Laserscannern verwiesen.

In der Ingenieurgeodäsie sind zwei Anwendungsfelder des TLS derzeit besonders relevant, die Dokumentation und das Monitoring von Objektgeometrien. Definierte Objektzustände werden für Dokumentationszwecke direkt auf Ebene der Koordinaten in Form von geometrischen Momentaufnahmen erfasst. Die wiederholte Erfassung eines Objekts ermöglicht entsprechend ein Monitoring: Zustandsänderungen werden als Differenzen von Zuständen erhalten. Es sei angemerkt, dass zeitliche Ableitungen auch direkt beobachtet werden können, wenn relative Sensoren wie z.B. Beschleunigungsmesser eingesetzt werden; die indirekte Erfassung aus Zustandsdifferenzen lässt sich so umgehen. Dies wird im Folgenden jedoch nicht betrachtet, da sich die hier interessierenden Zustandsänderungen auf die Form des Objekts und (im Sinne von Starrkörperbewegungen) auf dessen absolute Position und Orientierung beziehen sollen.

In den vergangenen Jahren hat sich gezeigt, dass das TLS für die genannten Anwendungsfelder gut geeignet ist, wobei es in einer gewissen Konkurrenz zu etablierten Verfahren steht. So sind die Objektaufnahme und das darauf aufbauende Monitoring mit tachymetrischen oder photogrammetrischen Verfahren seit langem üblich. Im Vergleich mit der Tachymetrie zeichnet sich das TLS durch einen deutlich höheren geometrischen Detailgrad am Objekt (Level of Detail) aus, erreicht aber, zumindest im Hinblick auf die Einzelpunkte, eine geringere Genauigkeit. Werden die Positionen benachbarter Punkte eines Scans gefiltert bzw. in Form von Blockmittelwerten aggregiert, lässt sich das Messrauschen beim TLS jedoch deutlich vermindern.

Es ist zu beachten, dass bei der Tachymetrie die Definition eines hochgenauen, konsistenten, räumlichen Bezugssystems durch die Messungen in geodätischen Netzen verfahrensimmanent ist, während es beim TLS indirekt über Passpunkte oder Objektmerkmale eingeführt werden muss. Aus diesem Grund liegt der kombinierte Einsatz von TLS und Tachymetrie nahe, wenn nicht nur die lokale

\* Überarbeitete Fassung des gleichnamigen Vortrages beim 79. DVW-Seminar »Terrestrisches Laserscanning (TLS 2008)« am 6. und 7. November 2008 in Fulda. Die Seminarbeiträge sind als Band 54 in der Schriftenreihe des DVW erschienen und können beim Wißner-Verlag bestellt werden.

Situation eines einzelnen Scans interessiert, sondern eine hohe Gesamtgenauigkeit für das Objekt angestrebt wird.

Im Vergleich mit der Photogrammetrie ist festzuhalten, dass das TLS die räumliche Information bei etwas geringerer Auflösung direkt liefert, unabhängig von der Textur der Objektoberfläche. Die Farb- oder Grauwertinformation der digitalen Kameras ist besser als die der gemessenen Intensitätswerte beim TLS; 3D-Punktwolken können aber optional mithilfe von digitalen Fotos eingefärbt werden. Der im Hinblick auf die geometrische Erfassung wesentliche Vorteil der Photogrammetrie liegt in der instantanen Aufnahme eines kompletten Bildes; dagegen wird das Objekt beim TLS – wenn auch sehr schnell – in Einzelpunktaufnahmen sequentiell abgetastet. Auch sind bei der Photogrammetrie deutlich höher frequente Bildfolgen möglich als beim TLS.

Aus dieser kurzen Gegenüberstellung lassen sich zwei wesentliche Schlüsse ziehen. Erstens hängt die Qualität der Objekterfassung beim TLS – im Hinblick auf die Repräsentativität der Momentaufnahme – unmittelbar von dem Verhältnis zwischen Scandauer und Veränderung der Objektgeometrie während dieser Zeitspanne ab. Dabei schneidet das TLS auf den ersten Blick schlechter ab als die photogrammetrische Aufnahme mit synchronisierten Mehrkamerasystemen. Ist der Scanner jedoch hinreichend schnell im Hinblick auf die Änderung des Objektzustands bzw. liegt deren Signal innerhalb des Messrauschens, werden quasi statische Objektzustände erhalten. Dann ist das TLS gerade bei schwach texturierten Objekten klar im Vorteil. Es sei angemerkt, dass es bei hinreichender Genauigkeit hinsichtlich Geschwindigkeit und räumlicher Auflösung immer besser geeignet ist als die automatische Tachymetrie.

Zweitens kommt das TLS weitgehend ohne zusätzliche Signalisierung am Objekt oder im Objektraum aus und kann deshalb deutlich einfacher als die Tachymetrie und die Photogrammetrie beliebige Objekte dreidimensional erfassen. Bei Bedarf muss ein extern definierter räumlicher Bezugsrahmen in das Verfahren importiert werden. Dies wird im Folgenden an entsprechenden Stellen wieder aufgegriffen und vertieft. Insgesamt ist der Genauigkeitsvorbehalt zu beachten, d. h. die Arbeiten müssen in einem für Laserscanner günstigen Entfernungs- und Genauigkeitsbereich liegen.

An dieser Stelle setzen die kinematischen Varianten des terrestrischen Laserscannings an. Der erste Fall führt in den Bereich des sogenannten schnellen statischen Scannens, bei dem der Scanner eine feste Position innehat und das Objekt unter Beachtung dessen kinematischen Verhaltens in hinreichend hoher zeitlicher Abfolge wiederholt scannt (siehe hierzu Kap. 3). Der Bezugsrahmen wird hier lokal durch den Scanner selbst definiert. Bei Bedarf ist dessen Stabilität während der Dauer der Messung gesondert zu prüfen.

Der zweite Fall weist Bezüge zum schnellen statischen Scannen auf, zeigt sich jedoch wesentlich klarer beim so-

genannten Mobile Mapping, das in Kap. 4 kurz beleuchtet wird. Bei diesem Verfahren ändern sich der Ursprung und die räumliche Orientierung des scannereigenen Bezugssystems fortlaufend, sodass die benötigten Informationen durch Zusatzsensorik zu erfassen sind.

Ziel dieses Beitrags ist es, aufbauend auf früheren Arbeiten, die Messstrategien des kinematischen terrestrischen Laserscannings (oder kurz: k-TLS) zu beschreiben und zu diskutieren sowie den aktuellen Stand – mit Betonung der Berufspraxis – aufzuzeigen. Dabei stehen Anwendungsbeispiele im Vordergrund, die derzeit am Geodätischen Institut der Leibniz Universität Hannover (GIH) bearbeitet und untersucht werden.

## 2 Messstrategien

Das k-TLS lässt sich in die Gruppe der kinematischen Messverfahren einordnen, da die Zeit eine für den Messvorgang relevante Größe ist. Dies betrifft sowohl Änderungen der absoluten Geometrie in Form von Starrkörperbewegungen als auch die relativen geometrischen Beziehungen zwischen dem Sensor und dem Objekt während der Dauer der Messungen. Wirkende Kräfte werden nicht berücksichtigt. Zur Vermeidung von Missverständnissen wird deshalb im Folgenden auf den Begriff des dynamischen Laserscannings verzichtet, der bisweilen synonym in der Literatur verwendet wird. Dies ist auch im Sinne der Ausführungen in (Foppe u. a. 2004).

Die Messstrategien für das terrestrische Laserscanning lassen sich klassifizieren, wenn das eingesetzte Verfahren jeweils auf den Objektzustand bezogen wird (Staiger und Wunderlich 2007, Abb. 1). Das k-TLS hat stets eine zeitabhängige, bewegungsbezogene Komponente. Dieser kinematische Anteil kann sowohl sensorbezogen als auch objektbezogen interpretiert werden. Sensorbezogen bedeutet, dass der Scanner auf eine bewegte Plattform montiert wird. Er kann z. B. im Profilmodus betrieben werden, wobei sich die dritte Dimension aus der Bewegung des Scanners ergibt. In Kap. 4 wird dargelegt, wie die Bewegung des Scanners im Raum mit hinreichender Genauigkeit zu erfassen ist.

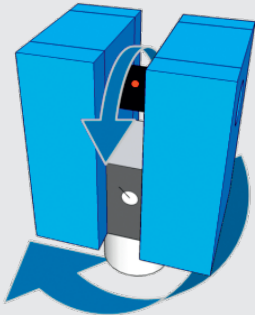
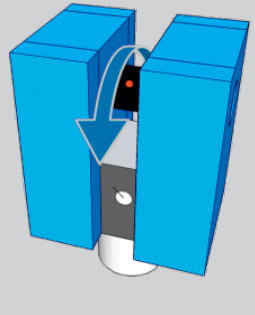
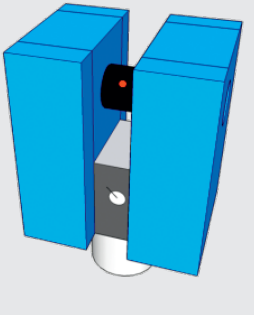
Eine Ausnahme bildet der Stop & Go-Modus, bei dem grundsätzlich statisch, also mit fester Position und Orientierung des Scanners, dann aber dreidimensional gescannt wird. Der Wechsel der Positionen ist durch die Montage des Scanners auf einem Messfahrzeug sehr schnell möglich. Die Registrierung der einzelnen Scans kann vollständig auf geometrischen Informationen aus dem Objektraum beruhen. Beispielhaft sei das CityGRID-System genannt (Haring 2007). Es ist zu beachten, dass der Stop & Go-Modus im engeren Sinne kein kinematisches Messverfahren ist, da die relative und die absolute Geometrie während der einzelnen Scans erhalten bleiben und die Zeit keine relevante Größe darstellt.

Bewegt sich das Objekt während der Messung gegenüber einem festen Scanner, so kann immer von einem kinematischen Messverfahren oder auch von objektbezogener Kinematik gesprochen werden. Es wird aber in Kap. 3.2 am Beispiel von Überwachungsmessungen an einer Brücke gezeigt, dass die begriffliche Trennung nicht in letzter Konsequenz und Schärfe möglich ist, da die Än-

Der 3D-Modus kann als Standardeinstellung betrachtet werden. Die Dauer eines solchen Scans hängt von mehreren Parametern ab, z. B. dem gewählten Ausschnitt und der gewünschten räumlichen Auflösung; sie kann bei heutigen Scannern weniger als eine Minute, aber auch über eine halbe Stunde betragen.

Der 2D-Modus ergibt sich durch Abschalten der Rota-

Tab. 1: Messmodi beim kinematischen terrestrischen Laserscanning

3D-Modus	2D-Modus	1D-Modus
		
Wiederholfrequenz: < 0,03 Hz	Wiederholfrequenz: 10 Hz ... 50 Hz	Wiederholfrequenz: 1 kHz ... 500 kHz
Steuerung: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Punktdichte</li> <li>■ Messgenauigkeit</li> <li>■ Gewählter Ausschnitt</li> </ul>	Steuerung: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Horizontalrichtung</li> <li>■ Rotationsgeschw.</li> <li>■ Punktdichte</li> </ul>	Steuerung: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Horizontalrichtung</li> <li>■ Vertikalwinkel</li> <li>■ Samplingrate</li> </ul>
Messergebnis: Punktwolke	Messergebnis: Vertikalprofil	Messergebnis: Einzelstrecke

derungen der Objektgeometrie primär auf Laständerungen beruhen und quasi statischen Charakter aufweisen. Jedoch führt das Monitoring auf Basis von Momentaufnahmen bei Berücksichtigung deren zeitlicher Abfolge zu einem kinematischen Ansatz, wenn die wirkenden Ursachen nicht betrachtet werden.

Eine wichtige Eigenschaft des k-TLS ist, dass dieses bei bewegten Objekten in unterschiedlichen räumlichen, im Rahmen der technischen Gegebenheiten frei wählbaren Dimensionen erfolgen kann. Auf diese Weise lässt sich die maximale Messgeschwindigkeit steuern, darüber hinaus ergeben sich je nach Fragestellung weitere Möglichkeiten.

Wesentlich auf der Objektseite sind dessen Größe sowie die Geschwindigkeit und Größenordnung der Objektveränderung. Auf der Scannerseite sind der Abstand zum Objekt, die Messgeschwindigkeit und die erreichbare Genauigkeit relevant. Grundsätzlich können, sofern der verfügbare Scanner dies zulässt, drei räumliche Messmodi genutzt werden (vgl. Tab. 1):

- Echte räumliche Scans (3D-Modus),
- Profilmessungen (2D-Modus) und
- Einzelpunktmessungen (1D-Modus).

tion des Scanners um die Stehachse, wobei das Strahlablensungssystem aktiv bleibt. Die so gemessenen Objektpunkte ergeben ein Schnittprofil, da sie in einer Ebene liegen, die durch die Stehachse und die aktuelle Orientierung des Scanners in der zur Stehachse orthogonalen Ebene definiert wird. Eine derzeit typische Größenordnung sind 50 Profile pro Sekunde. Für den 1D-Modus wird schließlich noch das Strahlablensungssystem deaktiviert, sodass fortlaufend die Schrägstrecke in die fest eingestellte Richtung gemessen wird. In diesem Falle sind 500.000 Einzelmessungen pro Sekunde möglich.

Die für das k-TLS wichtige zeitliche Komponente ergibt sich aus der Wiederholungsrate der Messungen. Beim 3D-Modus und beim 2D-Modus bieten sich die Inkremente des gleichförmig rotierenden Strahlablensungssystems als Zeitsignal an. Während beim 2D-Modus die einzelnen Zeitschritte direkt genutzt werden, können beim 3D-Modus – aufgrund der vergleichsweise langen Messdauer bei zu vernachlässigender Zustandsänderung während der Messung – die Scans auch auf die Mitte des jeweiligen Messintervalls bezogen werden. Bei Bedarf kann ein externes Zeitsignal, z. B. von einem Prozessrechner oder – im Außenbereich – von einem GPS-Empfänger, eingeführt werden; siehe auch (Hesse 2008). Beim

1D-Modus wird direkt die Messrate des Lasersystems für die Zeitdefinition genutzt. Die zeitliche Zuordnung zu einem externen System kann durch eine ergänzende Registrierung der Uhr des Lasers oder durch ein externes Zeitnormal für den Laser realisiert werden.

Für die Planung der Messungen, d. h. die Entscheidung für den passenden räumlichen Modus, ist vor allem die geforderte zeitliche Auflösung von Interesse. Dabei ist zu beachten, dass die räumliche Dimension umso höher sein kann, je langsamer sich das Objekt verändert. Bewegt oder verformt sich das Objekt signifikant z. B. erst im Bereich mehrerer Minuten, sollte im 3D-Modus gemessen werden. Bei schnelleren Verformungen, z. B. im Sekundenbereich, bietet sich der 2D-Modus an. Darüber hinaus ist der 1D-Modus einzusetzen.

Mit der steigenden Geschwindigkeit verringert sich der räumliche Informationsgehalt. Wenn aber – im Vergleich zum 3D-Modus – der Übergang auf Profilmessungen gerechtfertigt ist, kann die höhere zeitliche Auflösung auch zur Filterung und Genauigkeitssteigerung herangezogen werden. So reduziert sich das Rauschen (gemessen als Standardabweichung des Mittelwerts) bekanntlich um den Faktor  $\sqrt{n}$  bei Mittelung von  $n$  zeitlich aufeinander folgenden Werten. Dies wird in Kap. 3.3 am Beispiel gezeigt.

Für diese Zwecke geeignete Beobachtungsmodelle sowie fehlertheoretische Aspekte und statistische Auswertemethoden werden derzeit am GIH intensiv untersucht und diskutiert. Neben der Steigerung der bislang erreichten Genauigkeit geht es um die Zuverlässigkeit der Ergebnisse im Hinblick auf systematische Beobachtungsfehler bzw. deren Repräsentativität hinsichtlich der physikalischen Objekteigenschaften.

Es ist zu beachten, dass für die hier betrachteten Aufgaben aufgrund der deutlich höheren Messraten ausschließlich terrestrische Laserscanner in Frage kommen, die nach dem Phasenvergleichsverfahren arbeiten. Impulslaufzeitscanner sind nicht schnell genug, Triangulationsscanner erreichen im angestrebten Entfernungsbereich keine ausreichende Genauigkeit. In der Praxis werden die jeweiligen Anforderungen den sinnvollsten Messmodus definieren. Dies soll in den beiden folgenden Kapiteln in methodischer Hinsicht konkretisiert und an verschiedenen Beispielen veranschaulicht werden.

### 3 Fester Scanner – bewegtes Objekt

#### 3.1 Vorbemerkungen

Das kinematische Scannen eines bewegten Objekts mit einem fest positionierten Scanner kann auch als schnelles statisches Scannen bezeichnet werden; die Kinematik ergibt sich aus der beobachteten Objektcharakteristik. In diesem Kapitel sollen die wesentlichen Aspekte die-

ses Verfahrens an Beispielen aufgezeigt werden. So wird in Kap. 3.2 motiviert und diskutiert, wie lastinduzierte Deformationen an einem Brückenbauwerk mittels k-TLS detektiert werden können. Die nachfolgend dargestellten Messungen wurden im 3D-Modus bei verschiedenen, definierten, statischen Lastfällen vorgenommen. Dazu ist ein kurzzeitiger Stillstand des Belastungsfahrzeugs erforderlich. Im 2D- und 1D-Modus ermöglicht das k-TLS das Monitoring von Durchfahrten.

In Kap. 3.3 werden Untersuchungen zu den Schwingungen des Pylons einer Windenergieanlage wieder aufgenommen, die seit einiger Zeit am GIH mit verschiedenen Mess- und Auswertansätzen durchgeführt werden. Hier steht der 2D-Modus im Vordergrund. Es wird am Beispiel aber auch aufgezeigt, wie die sehr hohe Messrate des 1D-Modus zur räumlichen Auflösung von schwer beobachtbaren Objektdetails verwendet werden kann.

Für die nachfolgend dargelegten Messungen wurde mit dem Zoller+Fröhlich (Z+F) Imager 5006 gearbeitet, der am GIH verfügbar ist. Bei diesem Gerät handelt sich um einen terrestrischen Laserscanner, dessen Streckenmessung auf dem Phasenvergleichsverfahren beruht. Der eindeutige Messbereich beträgt 79 m. Im 2D-Modus können bis zu 50 Profile pro Sekunde aufgezeichnet werden, im 1D-Modus bis zu 500.000 Punkte pro Sekunde. Für die technischen Details sei auf das Datenblatt des Herstellers verwiesen ([www.zf-laser.com](http://www.zf-laser.com)).

#### 3.2 Beispiel: Brückenbauwerk

Das in diesem Kapitel betrachtete Objekt wurde in Kooperation mit dem Institut für Massivbau der Leibniz Universität Hannover untersucht; siehe hierzu auch (Paffenholz et al. 2008). Das hier vorgestellte Datenbeispiel wurde durch Messungen im 3D-Modus bei verschiedenen Lastzuständen erhalten, die durch ein definiertes Lastfahrzeug in vier vorgegebenen Positionen erzeugt wurden. Insgesamt wurden drei unabhängige Datensätze für jede der vier Positionen des Lastfahrzeugs erfasst (vgl. Abb. 1), wobei die Fahrzeugposition auf wenige Dezimeter zwischen den einzelnen Wiederholungen übereinstimmte. Abb. 1 zeigt die gewählte Messanordnung: Der Scanner wurde etwa unterhalb der Position 3 aufgebaut; ein entsprechender Ausschnitt eines Scans sowie der ausgewählte Untersuchungsbereich ist in Abb. 2 angegeben. Die Messentfernung betrug zwischen 15 und 20 m. Der in Abb. 3 dargestellte Ausschnitt besitzt eine Ausdehnung von 4 m (quer zur Brückenachse) auf 5 m (längs zur Brückenachse).

Durch die Messung wurden für einen Zeitpunkt etwa 117.800 Punkte erhalten. Der rechteckige Untersuchungsbereich wurde für die weitere Analyse in 320 quadratische Flächenelemente mit einer Kantenlänge von 25 cm aufgeteilt. In den einzelnen Flächenelementen befanden sich etwa 360 Punkte, die jeweils hinreichend gut auf einer Ebene lagen. Für die z-Komponente dieser Punkte

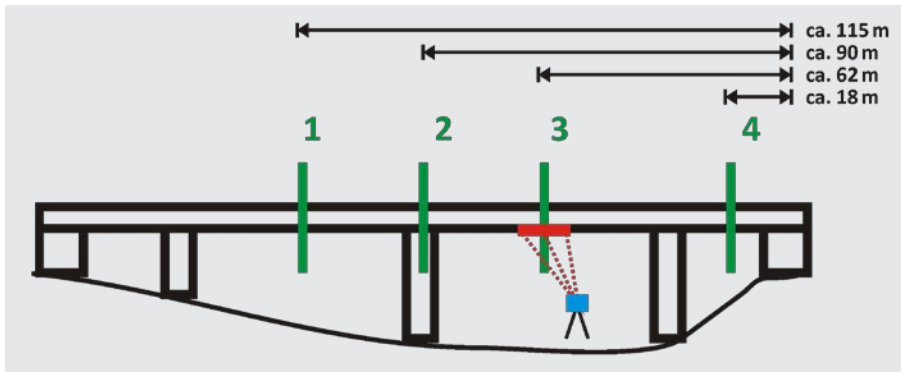


Abb. 1: Aufbau des Scanners unterhalb der Brücke; Bezeichnung der vier Positionen des Lastfahrzeugs mit Angabe des ausgewählten Untersuchungsbereichs



Abb. 2: Gescannter Bereich unterhalb der Brücke und ausgewählter Untersuchungsbereich

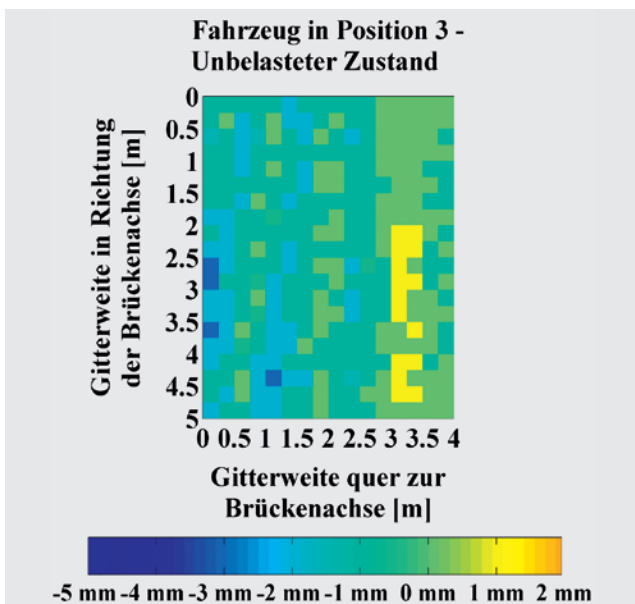


Abb. 3: Verformungen des Untersuchungsbereichs gegenüber dem unbelasteten Zustand bei Fahrzeug in Position 3; blaue Flächenelemente drücken eine Abwärtsbewegung, gelbe Flächenelemente eine Aufwärtsbewegung aus.

wurde je Flächenelement und je Aufnahme der Median als repräsentativer Wert berechnet. Aufgrund der fixen Position und Orientierung des Scanners während der gesamten Messung kann der Bezugsrahmen als hinreichend stabil betrachtet werden.

Abb. 3 zeigt die Differenzen dieser repräsentativen Werte (Median) zwischen den Messungen in Position 3, die einen definierten Lastfall widerspiegeln, und dem unbelasteten Zustand. Es ist deutlich zu erkennen, dass der linke und der mittlere Bereich durch die Last Abwärtsbewegungen (blaue Flächenelemente) im mm-Bereich aufweisen. Der rechte Bereich ist eher durch Aufwärtsbewegungen (gelbe Flächenelemente) in geringerer Größenordnung gekennzeichnet, bevor ganz rechts wieder eine Abwärtsbewegung erscheint. Aufgrund der Gesamtstruktur sind klare Signalanteile zu erkennen. Für die Interpretation ist es hilfreich zu wissen, dass sich das Lastfahrzeug in etwa über dem nach unten weisenden linken Bereich befand. Offensichtlich führte diese Last zu einer Ausgleichsbewegung durch Anhebung im rechten Teil. Die Auswertung der für die Positionen 1, 2 und 4 erhaltenen Scans unterstützt die hier getroffenen Aussagen; auch in diesen Fällen sind Längsstrukturen zu erkennen, deren Amplitude zwar geringer, aber ebenfalls plausibel hinsichtlich der wirkenden Lasten ist.

Diesen ersten, bereits recht viel versprechenden Ergebnissen werden weitere Untersuchungen folgen, denen die mit traditionellen Sensoren der Baumesstechnik (u. a. Dehnungsmessstreifen) erhaltenen Aussagen sowie Rechnungen mithilfe von Finite-Elemente-Modellen gegenübergestellt werden.

### 3.3 Beispiel: Windenergieanlage

Windenergieanlagen (WEA) sind aus verschiedenen Gründen äußerst interessante Testobjekte für das Monitoring mit dem k-TLS. Erstens sind sie ortsfest und können deshalb hervorragend mit einem fest installierten Laserscanner über einen längeren Zeitraum beobachtet werden. Zweitens weisen sie wenig Textur auf und können nur schlecht mit Signalmarken versehen werden. Deshalb eignet sich hier besonders das k-TLS im Vergleich zu anderen geodätischen Verfahren. Drittens können relative Messungen, z.B. mit Beschleunigungs- oder Neigungs-

messern leicht im Innern der Anlage durchgeführt werden. Dies erfolgt routinemäßig von Seiten des Betreibers; dort sind auch physikalische Bauwerksmodelle vorhanden. Viertens weisen WEA aufgrund des stochastischen Charakters der Windeinwirkungen und den mit der Optimierung der Energiegewinnung verbundenen Regelungsprozessen (Orientierung der Gondel, Neigung der Rotorblätter) eine hochkomplexe Dynamik auf, die eine große

befand. Die in Abb. 5 gezeigten schwarzen Linien geben die epochenweise berechneten arithmetischen Mittelwerte der 127 Werte an, die sich in der 1 m breiten Klasse befanden. In der Abfolge der Epochen entsteht die nach rechts aufgetragene Zeitreihe der Klassenmittelwerte. Die roten Linien stellen die entsprechenden Mittelwerte dar, die für eine identisch zentrierte Klasse mit einer Breite von 0,1 m (13 Punkte) erhalten werden.



Abb. 4: Scanner während der Aufnahme des Pylons einer Windenergieanlage (2D-Modus)

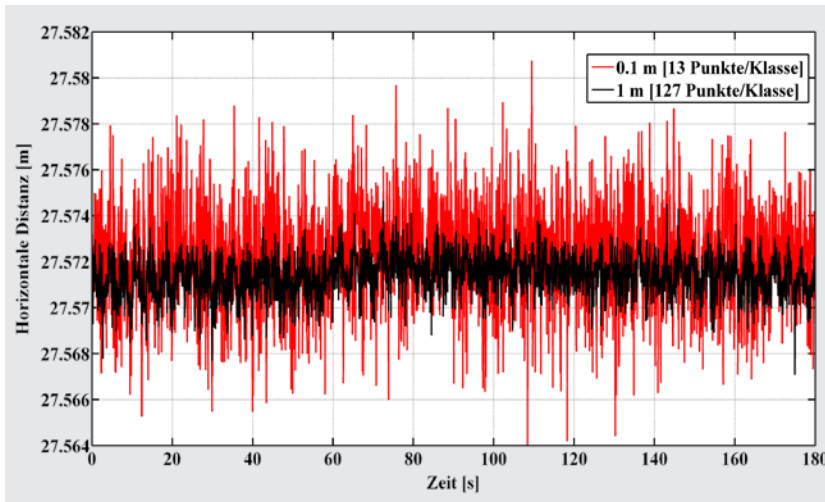


Abb. 5: Vergleich von Mittelwerten zweier unterschiedlicher Breiten von vertikalen Klassen am Pylon einer Windenergieanlage

Herausforderung für die Methodenentwicklung darstellt.

Das GIH befasst sich bereits seit einigen Jahren mit dem Monitoring von WEA unter Nutzung des k-TLS. So konnten (Kutterer und Hesse 2006) Eigenfrequenzen und Rotorfrequenzen des Pylons einer WEA aus Profilmessungen mit dem Leica HDS 4500 signifikant nachweisen. Dazu wurden die gemessenen Punkte je Profil in äquidistante vertikale Klassen eingeteilt und durch Mittelung (Medianbildung) innerhalb der Klassen aggregiert. Auf diese Weise konnten für die einzelnen vertikalen Klassen Zeitreihen aufgebaut werden, die die Deformationen des Pylons widerspiegeln. Im Folgenden werden einige neuere Untersuchungen skizziert, die mit Messungen des Z+F Imager 5006 durchgeführt wurden.

Die betrachtete WEA ist vom Typ Tacke 1.5 S und befindet sich im Süden von Hannover; die Anlage wurde bereits in (Kutterer und Hesse 2006) beschrieben. Der Pylon ist konisch und hat eine Höhe von 77 m. Es handelt sich um eine Stahlkonstruktion, die auf einem Betonsockel aufgebaut wurde. An ihr wurden aktuell Messungen im 2D-Modus senkrecht zur Windrichtung (Abb. 4) und im 1D-Modus in Windrichtung durchgeführt.

Die hier dargestellten Beispiele zeigen den Effekt der gewählten Breite einer vertikalen Klasse auf die Auswertung. Dabei wurde mit zwei verschiedenen Klassenbreiten (1 m, 0,1 m) gearbeitet, wobei sich der betrachtete Bereich in einer Schrägentfernung von etwa 40 m zum Scanner

Der Vergleich der beiden Zeitreihen zeigt deutlich den zu erwartenden Effekt, dass die hochfrequenten Anteile bei einer Mittelung über eine größere Klassenbreite reduziert werden. Es ist auch zu erkennen, dass die beiden Zeitreihen ein ähnliches mittleres Verhalten aufweisen, bei der 0,1-m-Klasse jedoch die Abweichungen zu höheren Werten tendieren. Offenbar kann die Wahl der Klassenbreite das Auswertergebnis in verschiedener Hinsicht beeinflussen; dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse bzw. der weiteren Methodenentwicklung zu berücksichtigen.

Eine weitergehende Betrachtung ist möglich, wenn man die mit der Klassenbildung verbundenen empirischen Standardabweichungen berücksichtigt. Dazu wurden wie oben für jeden Zeitpunkt die Werte innerhalb einer Klasse gemittelt und jeweils die empirischen Standardabweichungen (der Einzelwerte) berechnet. Diese sind in Abb. 6 dargestellt, wobei die Farbwerte wie in Abb. 4 gewählt wurden (Klassenbreite: schwarz: 1 m; rot: 0,1 m). Hier fällt sofort auf, dass sich die Datenreihen im Mittel klar unterscheiden. Aus theoretischer Sicht müssen sie jedoch bei gleicher Grundgesamtheit identisch sein. Diese Annahme wird offensichtlich verletzt. Tatsächlich ist die empirische Standardabweichung abhängig von der Klassenbreite, d. h. je breiter die Klasse, desto größer werden die Werte. Dies weist auf verschiedene, objektseitig nicht modellierte bzw. sensor- und aufnahmebedingte Anteile in den Daten hin, die sich bei kleinerer Breite weniger auswirken.

Ähnliche Effekte zeigen sich bei der Betrachtung der Fourierspektren der beiden Klassen; siehe hierzu (Paffenholz et al. 2008). Neben den zu erwartenden Eigen- und Rotorfrequenzen, die sehr gut detektiert werden, sind verschiedene kleinere Effekte zu erkennen. Für diese sind verschiedene Ursachen denkbar; als Beispiel sei die zu erwartende Abweichung genannt, die sich aus der Profilmessung eines tatsächlich dreidimensionalen

einem Millimeter. Er spielt zudem bei Frequenzanalysen keine Rolle. Zum anderen wird bei der Analyse nicht mit Einzelwerten, sondern mit Mittelwerten gearbeitet. Da bereits die Standardabweichungen der Einzelmessungen mit 4 mm bzw. 5 mm in der gleichen Größenordnung liegen und bei Verwendung der Mittelwerte noch durch die Wurzel der Anzahl der Klassenwerte zu dividieren ist, werden tatsächlich Standardabweichungen von etwa

1 mm (Klassenbreite: 0,1 m) bzw. 0,5 mm (Klassenbreite: 1 m) erhalten. Weitere Verbesserungen sind möglich, wenn im Hinblick auf die zeitliche Variabilität des Objekts genügend Zeitreihenwerte vorliegen, sodass auch im Zeitbereich gefiltert werden kann.

Abschließend soll kurz das Ergebnis einer Messung im 1D-Modus (Messrate: 62.000 Hz) gezeigt werden. Hier wurde die Richtung der Lasermessungen fixiert und so fortlaufend in gleicher Richtung zum Pylon in einer Schrägentfernung von etwa 69 m angezielt, eine Streckenlänge, die im Grenzbereich des Scanners liegt. Da die Messungen in einem Bereich des Pylons durchgeführt wurden, der von den Rotorblättern überstrichen wird, wurden entsprechende Signale aufgezeichnet. Abb. 7 zeigt einen solchen Rotordurchlauf mit einer Dauer von ca. 25 ms in Form einer ungefilterten Zeitreihe. Dies entspricht einer Punktmenge von ca. 1500 Punkten. Die benötigten Analysen sind mathematisch nicht einfach und erfordern eine ausgereifte Modellbildung.

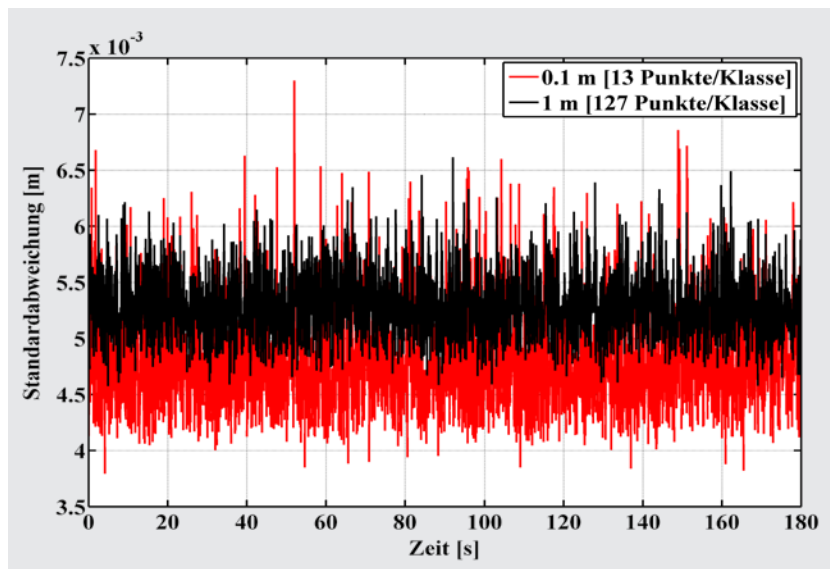


Abb. 6: Vergleich von empirischen Standardabweichungen zweier unterschiedlicher Breiten von vertikalen Klassen am Pylon einer Windenergieanlage

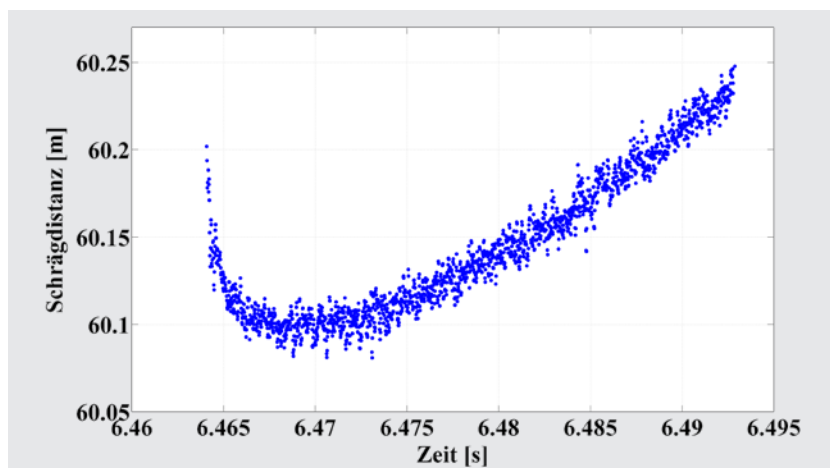


Abb. 7: Beobachtung des Durchgangs eines Rotorblatts der Windenergieanlage im 1D-Modus (Ausschnitt von ca. 25 ms aus einer längeren Zeitreihe)

Effekts aufgrund der räumlichen Bewegung des Pylons ergibt.

Insgesamt gilt es aber zu beachten, dass die eben geführte Diskussion eher akademischen Charakter aufweist. Für den Nachweis der bereits gegebenen Nutzbarkeit des Verfahrens in der Praxis ist ein zweiter Blick auf die Abb. 5 und 6 hilfreich. Zum einen bewegt sich der Unterschied zwischen den Mittelwertzeitreihen bei etwa

sinnvollen Umfang dieses Beitrags sollen einige Aspekte kurz beleuchtet, jedoch nicht vertieft werden. Das Mobile Mapping ist insgesamt ein weites Feld mit einer Vielzahl von Facetten und einer recht umfangreichen Literatur. Selbst eine Beschränkung auf die Systeme, die ausschließlich das TLS für die Objekterfassung verwenden, würde einen umfangreichen eigenen Beitrag erfordern.

Aus diesem Grunde sei auf die aktuelle Dissertation von Hesse (2008) hinsichtlich der Konzeption, Implementierung und Validierung eines straßengebundenen

#### 4 Bewegter Scanner – festes Objekt

Das geometrische Erfassen eines unbewegten Objekts mithilfe eines terrestrischen Laserscanners, der auf einer bewegten Plattform montiert ist, wird als Mobile Mapping bezeichnet. Im Hinblick auf die allgemeine Zielsetzung und einen

Mobile-Mapping-Systems (MMS) einschließlich einer eingehenden Diskussion der Synchronisierung der Systemkomponenten verwiesen. (Glennie 2007) beschreibt ein weiteres straßengebundenes MMS auf k-TLS-Basis, das auch auf kleineren Schiffen eingesetzt werden kann.

In (Blug u. a. 2005), (Glaus 2006) und (Riemenschneider 2006) werden schienengebundene Systeme vorgestellt. Es wäre auch ein Vergleich mit luftgestützten Systemen

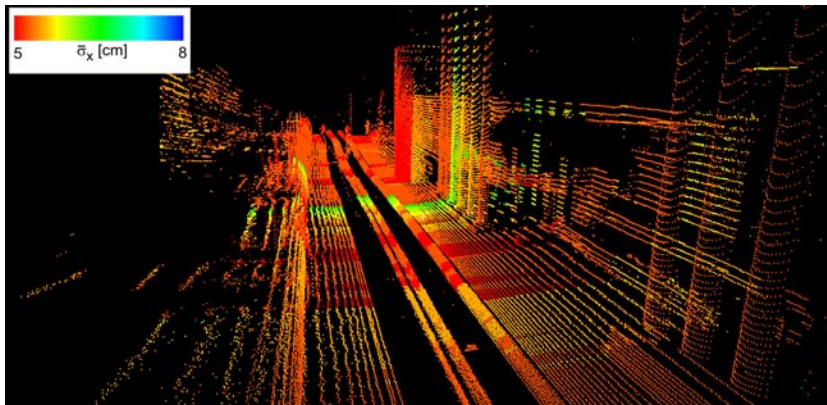


Abb. 8: Stochastische Punktwolke; die Farbcodierung entspricht der mittleren Koordinatengenauigkeit.

möglich; dieser soll hier unterbleiben, da zwar die Sensorik zur Bestimmung der Positions- und Orientierungsparameter recht ähnlich ist, sich aber die Charakteristiken der Trajektorien, die zum Einsatz kommenden Laserscanner und die angestrebten Genauigkeiten unterscheiden.

Gemeinsames Ziel aller MMS ist die Beschleunigung der Objektaufnahme, die im Falle statischer Scans extrem zeitaufwändig werden kann. Dies gilt insbesondere für lang gestreckte Szenen, wie sie längs Straßen, z.B. im Bereich von Innenstädten, anfallen. In solchen Fällen ist die statische Aufnahme aufgrund der vielen erforderlichen Standpunkte und der aufwändigen Vorbereitungsarbeiten für die Verknüpfung und Georeferenzierung der Scans unwirtschaftlich.

Hier bietet sich das Mobile Mapping an. Die Idee hinter diesem Verfahren ist denkbar einfach. Man erfasst die Umgebungsgeometrie, indem ein auf einer beweglichen Plattform montierter Scanner im 2D-Modus eingesetzt wird, d. h. in einer senkrecht (oder schräg) zur geplanten Fahrtrichtung orientierten Ebene Profilmessungen durchgeführt werden. Bewegt sich das Fahrzeug, werden diese Profile zu einer Spirale auseinandergezogen; sie ergeben eine 3D-Punktwolke.

Es ist zu beachten, dass sich mit der Bewegung des Fahrzeugs je gescanntem Punkt die Position und die Orientierung des scannerfesten Koordinatensystems in Bezug auf ein übergeordnetes, absolutes Koordinatensystem ändern. Dies ist der wesentliche Unterschied zwischen der statischen Aufnahme von 3D-Punktwolken und dem Mobile Mapping. Deshalb werden beim Mobile Mapping zusätzliche Sensoren wie z. B. GNSS-Geräte, Inertialnaviga-

tionssysteme, Odometer oder Neigungssensoren benötigt, mit deren Hilfe die entsprechenden Navigationselemente fortlaufend gemessen werden. Dabei ist eine genaue Synchronisation aller Sensoren erforderlich, wofür z. B. ein Prozessrechner eingesetzt werden kann. Mittels passend gewählter Rechenverfahren, z. B. dem Kalman-Filter, können die Navigationselemente integriert und für die Entzerrung der spiralförmigen Punktwolke verwendet werden.

Für detaillierte Ausführungen sei noch einmal auf (Hesse 2008) verwiesen.

Die Genauigkeit der Navigationselemente kann dabei nicht global interpretiert werden, da die Navigationslösungen von der jeweils aktuellen Aufnahme-situation, z. B. von der GNSS-Verfügbarkeit, abhängig sind. In (Vennegeerts et al. 2009) wird vorgeschlagen, die Genauigkeiten der Navigationslösungen für alle gescannten Punkte in den Objektraum fortzupflanzen. Das Ergebnis der Varianzfortpflanzung ist eine farb-codierte Punktwolke, wobei die Einfärbung das Genauigkeitsmaß widerspiegelt (siehe hierzu Abb. 8).

Im Hinblick auf die in Kap. 2 geführte Diskussion zur Messstrategie ist festzustellen, dass der mit der Zusatz-sensorik verbundene Mehraufwand auch Vorteile bietet. Einerseits ist die Effizienzsteigerung augenscheinlich; andererseits wird durch die Integration des TLS in ein hybrides Sensorsystem ein übergeordnetes Bezugssystem nicht nur definiert und realisiert, sondern während der Bewegung auch kontinuierlich aufdatiert.

Die erreichbare Genauigkeit reflektiert die verfügbare Technologie im Zusammenspiel der Systemkomponenten. Sie liegt bei recht hohen Systemkosten im Subzentimeterbereich; mit deutlich geringerem finanziellen Aufwand können Genauigkeiten im Dezimeter- bis Subdezimeterbereich erhalten werden. Die räumliche Auflösung hängt ebenfalls von den technischen Systemeigenschaften ab, in Richtung der Fahrzeugtrajektorie wird sie aber von der Fahrzeuggeschwindigkeit dominiert.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die technischen Systemspezifikationen die zentrale Rolle spielen. Daneben sind die verwendeten bzw. zu entwickelnden Algorithmen von zunehmender Bedeutung. Es ist davon auszugehen, dass sich dieses auch aus wirtschaftlicher Sicht hochinteressante Gebiet in den nächsten Jahren signifikant weiterentwickeln wird.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Seit einigen Jahren ist zu beobachten, dass das terrestrische Laserscanning nicht zuletzt aufgrund der Verfügbarkeit von gut bedienbarer Hard- und Software verstärkt Bedeutung für die Berufspraxis gewinnt. Dabei stellt sich



gerade im freien Beruf die Frage nach den Voraussetzungen, unter denen das Verfahren wirtschaftlich eingesetzt werden kann bzw. es einen kapitalisierbaren Mehrwert bietet, wodurch die Akzeptanz möglicherweise noch gehemmt wird; vgl. hierzu (Petersen 2006).

Es ist aber ohne Zweifel davon auszugehen, dass das TLS in der Praxis der Ingenieurgeodäsie und darüber hinaus bald ebenso selbstverständlich sein wird wie die Nutzung des GNSS oder die moderne Tachymetrie. Dies gilt insbesondere für die statische Erfassung lokaler Punktwolken sowie deren Registrierung, Georeferenzierung und Modellierung. Bei genügender Sorgfalt im Umgang mit dem Verfahren, die auf eingehender fachlicher Kompetenz gründet, und bei weiteren Verbesserungen der Auswertekette kann das TLS erfolgreich mit anderen Verfahren konkurrieren. Nicht zuletzt der hohe Detailgrad am Objekt bietet einen essenziellen Mehrwert.

Die in diesem Beitrag geführte Diskussion geht darüber hinaus. Sie zeigt zwei Wege auf, die auf einer Reihe von gemeinsamen Betrachtungen beruhen. Zum einen ist ein spürbarer Effizienzgewinn möglich, wenn der Scanner auf einer bewegten Plattform betrieben wird. Bei einem reduzierten Genauigkeitsanspruch sind bereits heute praktikable Lösungen verfügbar; hochgenaue Ergebnisse sind ebenfalls möglich, aber mit einem sehr hohen materiellen bzw. finanziellen Aufwand verbunden. In diesem Bereich sind verschiedene Anstrengungen erforderlich, nicht nur in der technologieorientierten Entwicklung, sondern auch in Wissenschaft und Forschung.

Zum anderen eröffnet sich auf dem Gebiet des Monitorings ein Mehrwert. Heute ist eine neue Qualität von Beobachtungen verfügbar, die sich durch schnelle, flächenhafte Geometrieinformationen an weitgehend beliebigen Oberflächen auszeichnet. Zudem werden sich, über die traditionellen Einzelpunktmessungen hinausgehend, die dedizierte Einbindung des TLS in heterogene Messanordnungen und die damit verbundene Komplementarität als gewinnbringend erweisen. Eine Entwicklung in diese Richtung ist beispielsweise die Integration von kinematischem GPS und TLS zur Ableitung von Position und Orientierung eines unbewegten Scanners für die direkte Georeferenzierung (Paffenholz und Kutterer 2008).

Das k-TLS ist ein innovatives Feld; es hat bislang nur wenig Einzug in die Praxis gehalten. Eine Reihe von erfolgreichen Applikationen, die hier beispielhaft gezeigt wurden, weisen die Eignung des Verfahrens und sein Potenzial für eine Vielzahl an neuartigen Aufgabenstellungen zweifelsfrei nach. Es ist jedoch zu beachten, dass sich verschiedene Herausforderungen für die Mess- und Auswerteverfahren des k-TLS ergeben, sowohl in theoretisch-methodischer als auch in anwendungsorientierter Hinsicht. Für diese sind sinnvolle und praktikable Lösungen zu finden. Dies betrifft beispielhaft die fehlertheoretische Aufbereitung des k-TLS im Hinblick auf zweckmäßige Prüfverfahren und die bei der Messung vorliegenden Objekteigenschaften, des Weiteren angepasste und verfeinerte statistische Modellierungs-, Auswerte- und Analy-

semethoden und schließlich die optimale Vernetzung mit Zusatzsensorik, auch außerhalb des Mobile Mapping.

## Literatur

- Blug, A., Baulig, C., Wölfelschneider, H., Höfler, H.: Fast fiber coupled clearance profile scanner using real time 3D data processing with automatic rail detection. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2004: Parma, Italien, 14.–17. Juni 2004. ISBN: 0-7803-8310-9, 658–663, 2005.
- Foppe, K., Schwiager, V., Staiger, R.: Grundlagen kinematischer Mess- und Auswertetechniken. In: Schwiager, V., Foppe, K. (Red.): Kinematische Messmethoden – Vermessung in Bewegung. DVW Schriftenreihe, Nr. 45, 3–18, Wißner, Augsburg, 2004.
- Glaus, R.: Kinematic track surveying by means of a multi-sensor platform. Diss., Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 16547, 2006.
- Glennie, C.: Reign of points clouds – a kinematic terrestrial LIDAR scanning system. InsideGNSS, Fall 2007, 22–31, 2007.
- Haring, A.: Die Orientierung von Laserscanner- und Bilddaten bei der fahrzeuggestützten Objekterfassung. Diss., Technische Universität Wien, 2007.
- Hesse, C.: Hochauflösende kinematische Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern. Diss., Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover, Nr. 268, ISSN 0174-1454, 2008.
- Jöckel, R., Stober, M., Huep, W.: Elektronische Entfernung- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren (5. Auflage). Wichmann, Heidelberg, 2008.
- Kutterer, H., Hesse, C.: High-speed laser scanning for near real-time monitoring of structural deformations. In: Tregoning, P., Rizos, C. (Eds.): Dynamic Planet – Monitoring and Understanding a Dynamic Planet with Geodetic and Oceanographic Tools. IAG Symposia, Vol. 130, Springer, 776–781, 2006.
- Paffenholz, J.-A., Kutterer, H.: Direct georeferencing of static terrestrial laser scans. CD-ROM Proc. FIG Working Week 2008, Stockholm, Schweden, 2008.
- Paffenholz, J.-A., Vennegeerts, H., Kutterer, H.: High frequency terrestrial laser scans for monitoring kinematic processes. CD-ROM Proc. INGeo 2008, Bratislava, Slovakia, 2008.
- Petersen, M. (2006): Ist Laserscanning wirtschaftlich einsetzbar? In: Schäfer, M., Niemeier, W. (Red.): Terrestrisches Laser-Scanning (TLS 2006), DVW Schriftenreihe, Nr. 51, 161–174, Wißner, Augsburg, 2006.
- Riemenschneider, A.: Erfassung der Gleisgeometrie aus Laserscandaten. In: Schäfer, M., Niemeier, W. (Red.): Terrestrisches Laser-Scanning (TLS 2006), DVW Schriftenreihe, Nr. 51, 101–112, Wißner, Augsburg, 2006.
- Staiger, R., Wunderlich, T.: Terrestrisches Laserscanning 2006 – Technische Möglichkeiten und Anwendungen. zfv, 2/2007, 81–86, 2007.
- Vennegeerts, H., Paffenholz, J.-A., Martin, J., Kutterer, H.: Zwei Varianten zur direkten Georeferenzierung terrestrischer Laserscans. In: PFG – Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation Themenheft Terrestrisches Laserscanning 01/2009, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart, in Druck (2009).
- Wunderlich, T., Staiger, R.: »Schneller, weiter, effizienter« – Aktuelle Entwicklungen in der Scannertechnik. In: Niemeier, W., Schäfer, M. (Red.): Terrestrisches Laserscanning (TLS 2008), DVW Schriftenreihe, Nr. 54, 3–14 Wißner, Augsburg, 2008.

## Anschrift der Autoren

Hansjörg Kutterer | Jens-André Paffenholz | Harald Vennegeerts  
 Geodätisches Institut, Leibniz Universität Hannover  
 Nienburger Straße 1, 30167 Hannover  
 kutterer@gih.uni-hannover.de  
 paffenholz@gih.uni-hannover.de  
 vennegeerts@gih.uni-hannover.de