
Deformationsmessungen an Bauwerken mit kinematischem Laserscanning

Prof. Dr.-Ing. Hansjörg Kutterer, Dipl.-Ing. Jens-André Paffenholz, Dipl.-Ing. Harald Vennegeerts, Dr.-Ing. Hans Neuner

Geodätisches Institut, Leibniz Universität Hannover, Nienburger Straße 1, 30167 Hannover

1 Einführung

Das terrestrische Laserscanning (TLS) hat sich seit etwa einer Dekade als neuartiges Verfahren zur schnellen Erfassung der Geometrie von Objektoberflächen etabliert. Es arbeitet unmittelbar dreidimensional, direkt zentrisch und mit hoher räumlicher Auflösung. Zusätzlich werden Oberflächenremissionswerte (oder Intensitätswerte) aufgezeichnet. Die Objekte werden somit in Form von Millionen von einzelnen, räumlich eng benachbarten, grauwertcodierten Punkten, sogenannten 3D-Punktwolken, beschrieben. Die Verbindung von drei wesentlichen Merkmalen kennzeichnet das TLS: die prinzipiell flächenorientierte Objekterfassung, die Aufnahme unzugänglicher bzw. nicht oder schwach texturierter Objekte aufgrund der reflektorlosen Entfernungsmessung und die Objekterfassung in vergleichsweise kurzer Zeit.

Eine eingehende Beschreibung des TLS ist nicht Gegenstand dieses Beitrags; weiterführende Informationen hierzu sind in der einschlägigen Literatur auffindbar (z. B. Wunderlich und Staiger, 2008 sowie Jöckel et al., 2008). In der Ingenieurgeodäsie sind derzeit zwei Anwendungsfelder des TLS 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: Änderungen lassen sich als Differenzen von Zuständen ableiten.

In Bezug auf die in diesem Beitrag betrachteten Deformationsmessungen mit TLS sind zwei Aspekte nennenswert. Zum einen hängt die Qualität der Objekterfassung – im Hinblick auf die Repräsentativität der Momentaufnahme – unmittelbar von dem Verhältnis zwischen Scandauer und Veränderung der Objektgeometrie während dieser Zeitspanne ab. Ist der Scanner hinreichend schnell in Relation zur Änderung des Objektzustands bzw. liegt deren Signal innerhalb des Messrauschens, werden quasi statische Objektzustände erfasst. Zum anderen kommt das TLS weitgehend ohne zusätzliche Signalisierung am Objekt oder im Objektraum aus.

Für das Monitoring stellt die kinematische Nutzung des TLS eine interessante Variante dar. Der Scanner hat dabei eine feste Position, während das Objekt unter Beachtung seines Bewegungsverhaltens in hinreichend hoher zeitlicher Abfolge wiederholt gescannt wird. Der Bezugsrahmen wird meist lokal durch den Scanner selbst (Zentrum und Instrumentenachsen) definiert.

Ziel dieses Beitrags ist es, die Messstrategien des kinematischen terrestrischen Laserscannings (oder kurz: k-TLS) beim Bauwerksmonitoring zu beschreiben und den aktuellen Stand aufzuzeigen. Dabei stehen zwei Anwendungsbeispiele im Vordergrund, die derzeit am Geodätischen Institut der Leibniz Universität Hannover (GIH) bearbeitet werden. Zum einen werden die Ergebnisse der Deformationsmessungen vorgestellt, die an einer Autobahnbrücke während kontrollierter Belastungsversuche durchgeführt wurden. Die Belastung erfolgte durch Fahrzeuge unterschiedlicher Gewichte (25 t, 40 t und 60 t), die die Brücke mit verschiedenen Geschwindigkeiten (4 km/h, 40 km/h und 80 km/h) passierten. Während der Überfahrten blieb der Scanner unter dem Bauwerk fest aufgebaut und erfasste die induzierte Durchbiegung des Überbaus punktuell und entlang eines Längsprofils. Im Beitrag werden die Ergebnisse unterschiedlicher Belastungen und dynamischer Einwirkungen vorgestellt und besprochen.

Im zweiten Anwendungsfall wurden die Turmschwingungen einer Windenergieanlage ebenfalls profilhaft erfasst. Anhand der Messdaten werden die Abhängigkeit des Rauschniveaus von der Klassenbreite und von der Höhe

aufgezeigt, sowie die wesentlichen Frequenzen und die zugehörigen Amplituden mit Verfahren der Zeitreihenanalyse hergeleitet.

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 et al. (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 (vgl. Hesse, 2008). Dies soll hier nicht betrachtet werden. 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.

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.

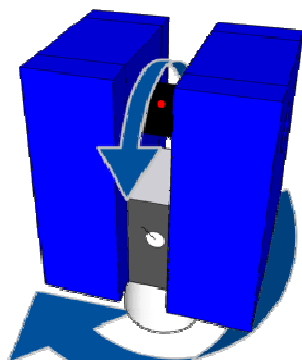
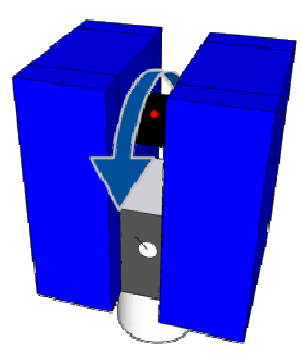
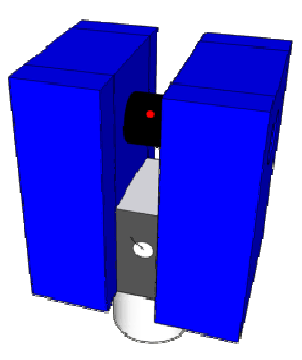
3D-Modus	2D-Modus	1D-Modus
		
Wiederholfrequenz: < 0,03 Hz	Wiederholfrequenz: 10 Hz ... 50 Hz	Wiederholfrequenz: 1 kHz ... 500 kHz
Steuerung: <ul style="list-style-type: none"> • Punktdichte • Messgenauigkeit • Gewählter Ausschnitt 	Steuerung: <ul style="list-style-type: none"> • Horizontalrichtung •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

Abbildung 1: Messmodi terrestrischer Laserscanner (Kutterer et al., 2009)

Grundsätzlich können, sofern der verfügbare Scanner dies zulässt, drei räumliche Messmodi genutzt werden:

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

Der 3D-Modus ist Standard. Die Scandauer 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 Rotation des Scanners um die Stehachse, wobei das Strahlableitungssystem 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 noch das Strahlableitungssystem deaktiviert, so dass fortlaufend die Schrägstrecke in eine fest eingestellte Richtung gemessen wird. In diesem Falle sind 500.000 Einzelmessungen pro Sekunde möglich.

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.

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. Impulslaufzeit-scanner sind derzeit nicht schnell genug, Triangulationsscanner erreichen im angestrebten Entfernungsbereich keine ausreichende Genauigkeit. In der Praxis werden die jeweiligen Anforderungen den sinnvollsten Messmodus definieren.

3 Monitoring von Bauwerksgeometrien mit k-TLS

3.1 Vorbemerkungen

Beim schnellen Scannen eines bewegten Objekts mit einem fest positionierten Scanner ergibt sich die Kinematik aus der beobachteten Objektcharakteristik. In diesem Abschnitt sollen die wesentlichen Aspekte dieses Verfahrens an Beispielen aufgezeigt werden. So wird in Abschnitt 3.2 motiviert und diskutiert, wie lastinduzierte Deformationen an einem Brückenbauwerk mittels k-TLS detektiert werden können. Die nachfolgend dargestellten Messungen wurden im Rahmen von Belastungsversuchen erfasst, wobei verschiedene definierte Lastfälle (Durchfahrten von Belastungsfahrzeugen) im 2D- und im 1D-Modus aufgezeichnet wurden. In Abschnitt 3.3 werden Untersuchungen zu den Schwingungen des Turms einer Windenergieanlage betrachtet. Auch hier werden bei der Aufnahme der 2D-Modus und der 1D-Modus verwendet. Am Beispiel wird gezeigt, wie die sehr hohe Messrate des 1D-Modus zur räumlichen Identifikation von schwer beobachtbaren Objektdetails verwendet werden kann.

Für die nachfolgend dargelegten Messungen wurde mit einem Scanner vom Typ 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).

3.2 Brückenbauwerk

Das in diesem Abschnitt betrachtete Objekt wurde in Kooperation mit dem Institut für Massivbau der Leibniz Universität Hannover untersucht; siehe hierzu auch Paffenholz et al. (2008). Für die Belastungsversuche standen drei Fahrzeuge mit Gewichten von 25 t, 40 t und 60 t zur Verfügung. Jedes Fahrzeug überquerte mehrfach die Brücke mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten: stop-and-go, 4 km/h, 40 km/h und 80 km/h. Die nachfolgend besprochenen Messungen beziehen sich auf die Überfahrten eines einzelnen Fahrzeugs. Gleichzeitige Belastungen durch mehrere Fahrzeuge werden hier nicht untersucht.

Bei den stop-and-go Durchfahrten ist der induzierte Deformationsprozess infolge der langsamen Belastung der Brücke quasi-statisch. Dadurch ist die Erfassung der Durchbiegung des Brückenüberbaus im 3D-Modus möglich. Hierfür wurde mit dem unter der Brücke aufgebauten Scanner ein rechteckiger Untersuchungsbereich wiederholt gescannt, während das Fahrzeug an unterschiedlichen Stellen auf der Brücke hielt. Die Ergebnisse zu den Auswertungen dieser Messungen sind von Paffenholz et al. (2008) detailliert vorgestellt worden.

Die hier präsentierten Datenbeispiele wurden durch Messungen im 2D-Modus gewonnen. Dabei wurden fortlaufend Vertikalprofile in Längsrichtung der Brücke gemessen. Abbildung 2 zeigt den Aufbau des Scanners unterhalb der Brücke.

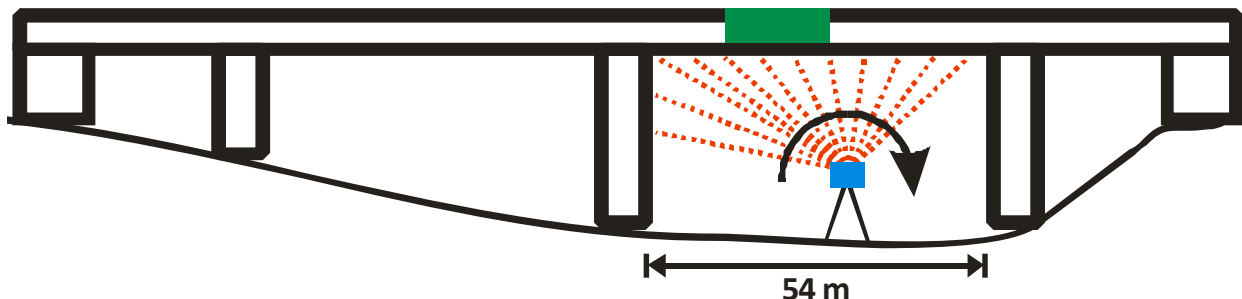


Abbildung 2: Aufbau des Scanners unterhalb der Brücke. Die Durchbiegungen beziehen sich auf den grün gekennzeichneten Bereich.

Die Länge des hier betrachteten Brückenausschnitts beträgt ca. 10 m. Dieser in Abbildung 2 grün gekennzeichnete Bereich wurde in zehn Klassen mit einer Länge von je 1 m unterteilt, wobei sich die erste Klasse unmittelbar über dem Standpunkt des Scanners befindet. In jedem gemessenen Profil wurden die Koordinaten der zur gleichen Klasse gehörenden Punkte gemittelt und Koordinaten der Klassenschwerpunkte hergeleitet. Die zeitliche Abfolge der Profile führte zu Koordinatenzeitreihen der Klassenschwerpunkte. Nachfolgend wird die zeitliche Variation der Z-Koordinate in Richtung der Stehachse des Scanners betrachtet, die die Hauptverformungsrichtung weitestgehend repräsentiert.

Die Messrate im 2D-Modus betrug unabhängig von der Geschwindigkeit der Belastungsfahrzeuge 12,5 Profile pro Sekunde. Dadurch variieren die Längen der entstehenden Koordinatenzeitreihen zwischen ca. 140 Werten bei Überfahrten mit 80 km/h und 1800 Werten bei Überfahrten mit 4 km/h.

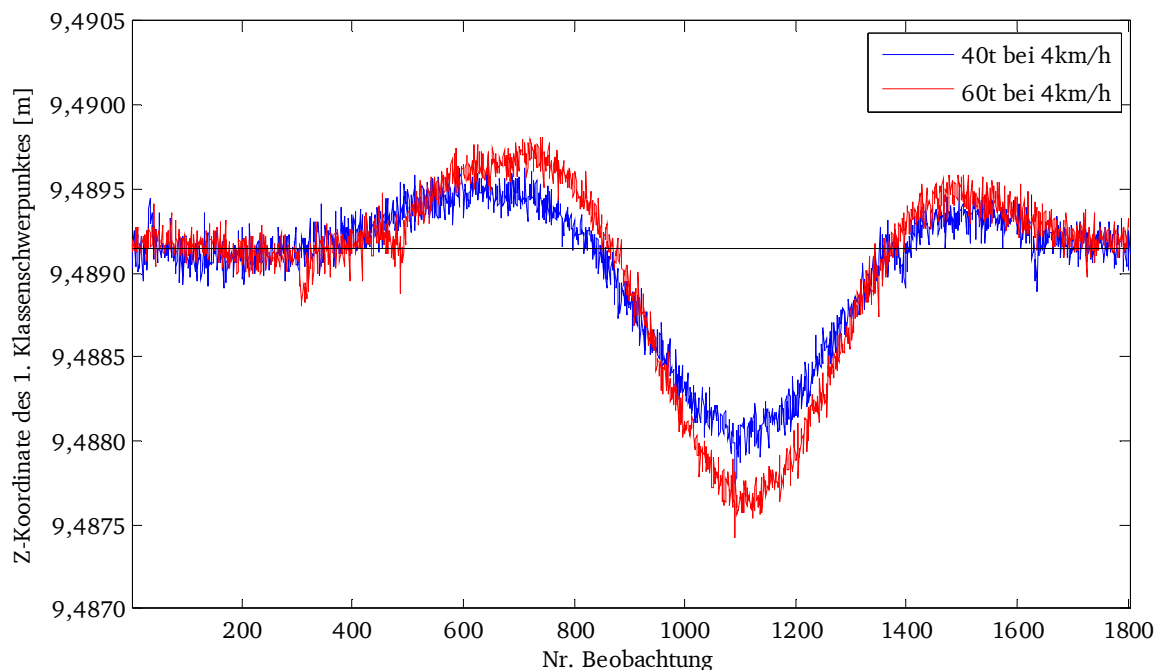


Abbildung 3: Durchbiegung der Brücke bei verschiedenen Belastungen mit gleicher Überfahrtsgeschwindigkeit

Abbildung 3 zeigt die zeitliche Variation der Z-Koordinate des 1. Klassenschwerpunktes bei den Überfahrten des 40 t und 60 t Belastungsfahrzeuges mit der Geschwindigkeit von 4 km/h. Das induzierte Signal ist deutlich erkennbar, ebenso wie das durch die Mittelung resultierende geringe Rauschen. Die Absolutwerte der Abweichungen gegenüber dem unbelasteten Zustand liegen bei wenigen Millimetern. Die Differenz zwischen den Durchbiegungen aufgrund des Gewichtsunterschiedes von 20 t beträgt in etwa 0,5 mm. Zusätzlich zur Deformation bei unmittelbarer Belastung innerhalb des angezielten Bereichs ist auch die Anhebung bevor und nachdem das Belastungsfahrzeug diese Stelle passiert hat erkennbar. Hier zeigt sich die erwartete Ausgleichsbewegung.

Zur Veranschaulichung einer möglichen dynamischen Komponente der auftretenden Deformationen werden in der Abbildung 4 beispielhaft die zeitlichen Änderungen des 1. Klassenschwerpunktes bei Überfahrten des 60 t Belastungsfahrzeuges mit Geschwindigkeiten von 4 km/h, 40 km/h und 80 km/h dargestellt. Aus bereits erläuterten Gründen haben die drei Zeitreihen unterschiedliche Längen. Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse war es deshalb erforderlich, die Abszisse der kürzeren Zeitreihen entsprechend zu skalieren. Dadurch scheinen - entgegen der Erwartungen - die Zeitreihen, die höheren Geschwindigkeiten entsprechen, glatter zu verlaufen. Auf eine Beschriftung der Abszisse wird in Abbildung 4 zur Vermeidung von Missverständnissen verzichtet. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass kein wesentlicher Einfluss der Geschwindigkeit auf den Betrag der Deformation nachgewiesen werden konnte. Der Betrag der Durchbiegung gegenüber dem unbelasteten Zustand ist in allen drei Kurven gleich.

Für die 1D-Messungen wurde ein Punkt oberhalb des Scanners fest angezielt. Die Messentfernung betrug ca. 9,5 m. In Abbildung 5 sind die Messungen im 1D-Modus dargestellt. Die zeitliche Auflösung ist mit etwa 62.000 Punkten je Sekunde deutlich höher als im 2D-Modus. Hier bietet sich eine zeitliche Filterung an; für die Darstellung wurde mit einem gleitenden Mittelwert mit einer Fensterlänge von 1.000 Werten gearbeitet. Auch hier ist ein deutliches Signal bei gleichzeitig extrem geringem Rauschen zu erkennen. Infolge der geringeren Belastung durch das 25t-Fahrzeug liegen die Signalwerte im Submillimeterbereich.

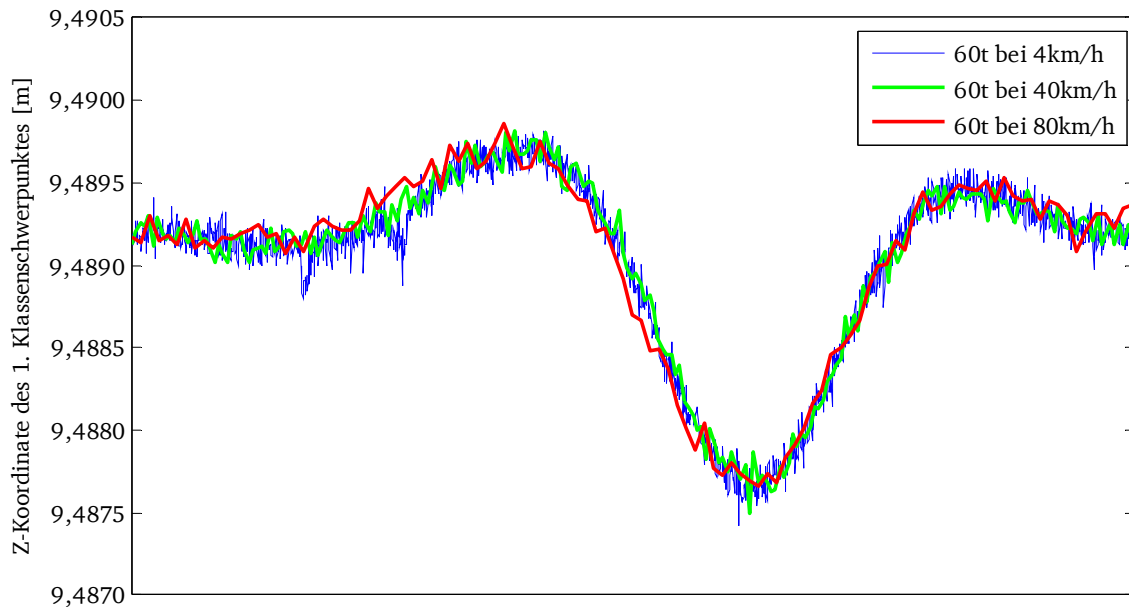


Abbildung 4: Durchbiegung der Brücke bei Überfahrten des 60 t Belastungsfahrzeuges mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten

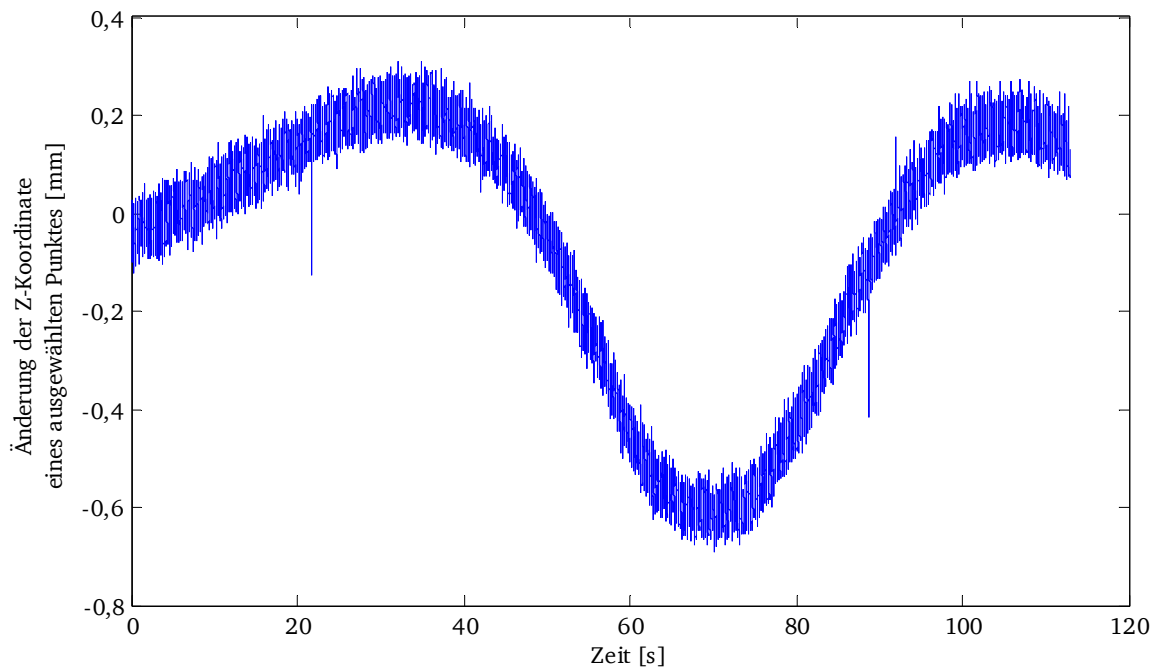


Abbildung 5: Punktuelle Erfassung (1D-Modus) der Durchbiegung bei Überfahrt des 25 t Belastungsfahrzeuges

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

3.3 Windenergieanlage

Windenergieanlagen (WEA) sind aus verschiedenen Gründen äußerst interessante Testobjekte für das Monitoring mit dem k-TLS. Sie sind ortsfest und können deshalb hervorragend mit einem fest installierten Laserscanner über einen längeren Zeitraum beobachtet werden. Sie weisen 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. WEA haben aufgrund des stochastischen Charakters der Windeinwirkungen und den mit der Optimierung der Energiegewinnung verbundenen Regelungsprozessen (Orientierung der Gondel, Neigung der Rotorblätter) eine hoch komplexe Dynamik.

Die betrachtete WEA vom Typ Tacke 1.5 S befindet sich im Süden von Hannover; die Anlage wurde bereits in Kutterer und Hesse (2006) beschrieben. Der Turm 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 (Abbildung 6) und im 1D-Modus in Windrichtung durchgeführt.



Abbildung 6: Z+F Imager 5006 Scanner während der Aufnahme des Turms einer Windenergieanlage

Bei der Auswertung der 2D-Profilmessungen wurde in ähnlicher Weise verfahren, wie im vorangegangenen Anwendungsfall aus Kapitel 3.2. Im Unterschied dazu wurden hier vertikale Klassen „entlang“ des Turms gebildet und die Punkte innerhalb der Klassen durch Mittelung aggregiert. Auf diese Weise resultierten aus der zeitlichen Abfolge der Profile Zeitreihen, die die Deformationen des Turms in verschiedenen Höhen widerspiegeln.

Zur Untersuchung der Abhängigkeit der ermittelten Parameter des Turms von der Klassenbreite werden nachfolgend zwei Klassen mit der Breite von 0,1 m und 1 m näher betrachtet. Beide Klassen sind um den gleichen Punkt zentriert. Durch die Mittelung der Punkte innerhalb der jeweiligen Klasse entstanden zwei Zeitreihen, die die Deformation des gleichen Punktes repräsentierten. Die unter Anwendung der Fourier-Transformation hergeleiteten Amplitudenspektren sind in der Abbildung 7 dargestellt. Darin ist sofort ersichtlich, dass für beide Klassenbreiten die erste Eigenfrequenz des Turms von 0,29 Hz zuverlässig aufdeckbar ist.

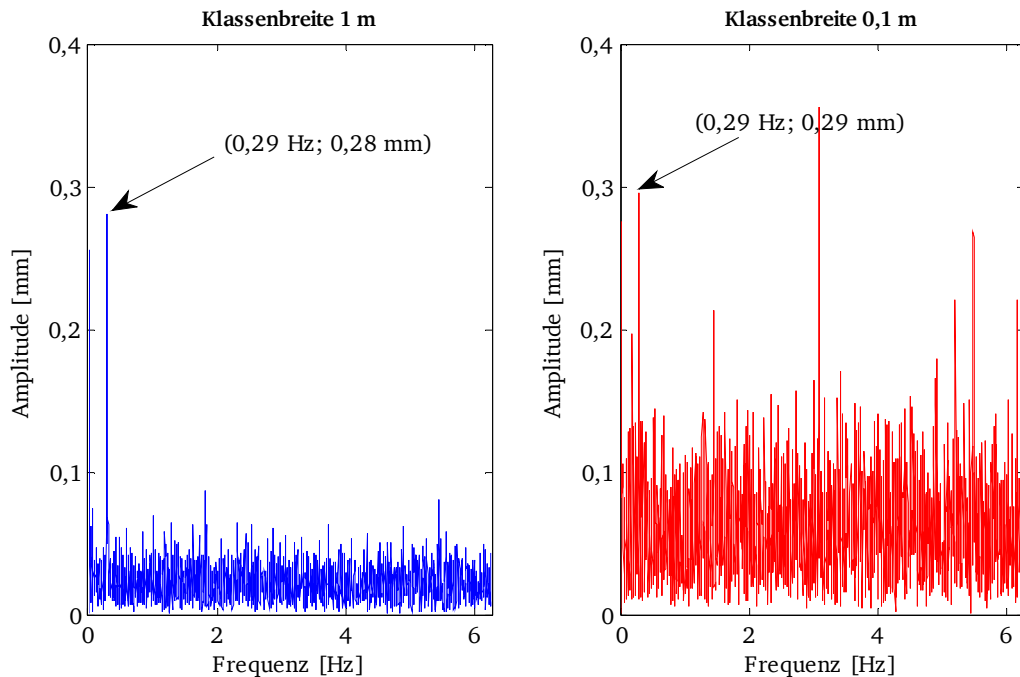


Abbildung 7: Amplitudenspektren der Turmdeformationen hergeleitet aus Klassenbreiten von 1 m (links) und 0,1 m (rechts)

Die Amplituden der periodischen Bewegung mit der Eigenfrequenz von 0,29 Hz unterscheiden sich ebenfalls nur unwesentlich. Darüber hinaus ist auch das höhere Rauschniveau in der Zeitreihe, die aus der geringeren Klassenbreite resultiert, offensichtlich. Dieser Effekt ist durch die stärkere Glättung, die die Mittelbildung innerhalb der größeren Klassenbreite hervorruft, zu begründen. Er verdeutlicht, dass die Wahl der Klassenbreite an die erwarteten und interessierenden dominanten periodischen Effekte zu koppeln ist. Eine zu groß gewählte Klassenbreite kann zur Ausblendung dieser Effekte führen, was sehr gut an den fehlenden Peaks auf den höheren Frequenzen in der linken Grafik im Vergleich zur rechten Grafik aus Abbildung 7 erkennbar ist. Die Abhängigkeit der Klassenbreite von den aufzudeckenden periodischen Effekten ist Gegenstand gegenwärtiger Untersuchungen am GIH.

Zusätzlich zur Wahl der Klassenbreite stellt auch die Betrachtung der erfassten Deformationen in Abhängigkeit der Turmhöhe ein interessantes Untersuchungskriterium dar. Die erwartete Änderung des Betrages der Turmbewegung mit der Höhe wird bei der besprochenen Erfassungsmethode von den Variationen des Auftreffwinkels des Zielstrahls auf den Turm und der Punktzahl innerhalb der Klassen konstanter Breite überlagert. Diese beeinflussen die Unsicherheit des Messergebnisses. Zwar wird die Amplitude der Bewegung mit zunehmender Höhe betragsmäßig größer und dadurch besser auflösbar, gleichzeitig spitzt sich jedoch der Auftreffwinkel zu und beeinträchtigt aufgrund der geringeren Rückstrahlungsintensität das Messergebnis. Zur Veranschaulichung dieser Effekte wurden aus den Zeitreihen der Klassenmittelpunkte in den Höhen $Z = 7,5 \text{ m}$, $26,5 \text{ m}$ und $46,5 \text{ m}$ die Amplitudenspektren berechnet und in Abbildung 8 dargestellt. Die gewählte Klassenbreite betrug 1 m.

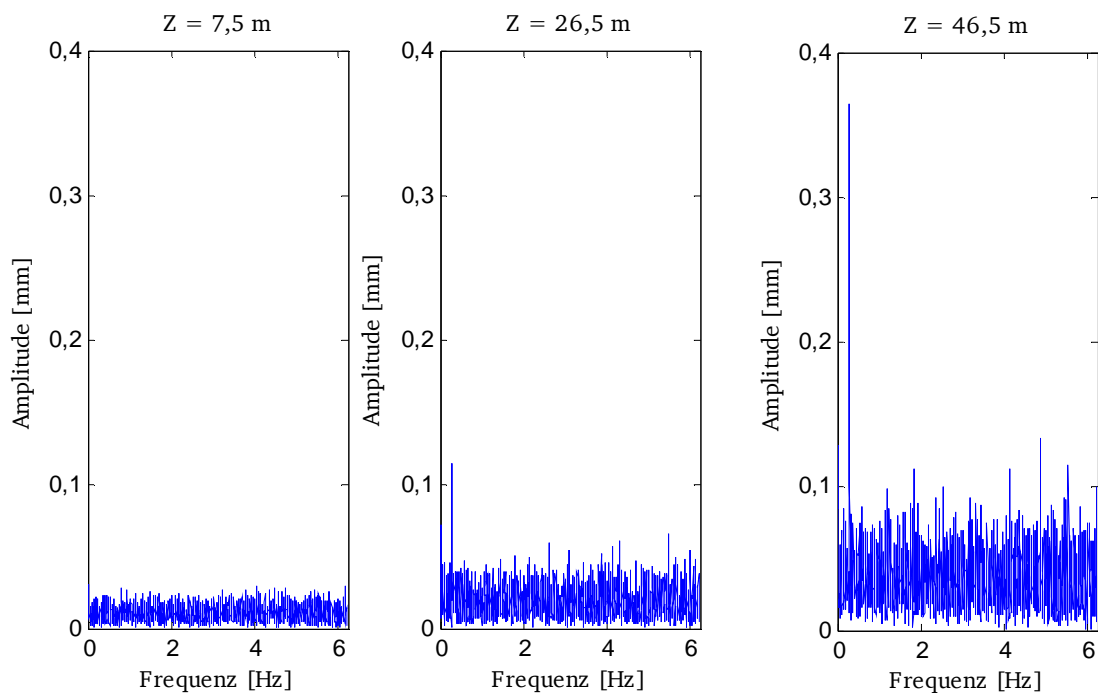


Abbildung 8: Amplitudenspektren der Änderung der Klassenmittelpunkte in unterschiedlichen Höhen

Die beschriebenen Effekte treten in Abbildung 8 deutlich hervor: die Amplitude der periodischen Bewegung mit der Eigenfrequenz von 0,29 Hz nimmt mit steigender Höhe erwartungsgemäß zu. Gleichzeitig ist das Spektrum des höheren Klassenmittelpunktes deutlich verrauschter, was zum einen an der geringeren Anzahl an Messpunkten in den höheren Klassen und andererseits auch an dem abnehmenden Auftreffwinkel liegt. Künftige Forschungsarbeiten am GIH werden u.a. der Trennung zwischen den Auswirkungen der aufgezeigten Unsicherheitsquellen und der tatsächlichen Deformationen gewidmet sein. Dies ist durch die Weiterentwicklung der Prüfverfahren terrestrischer Laserscanner und durch die Gegenüberstellung mit den Ergebnissen strukturmechanischer Berechnungen möglich.

Abschließend soll kurz das Ergebnis einer Messung im 1D-Modus (Messrate: 62000 Hz) gezeigt werden. Hier wurde die Richtung der Lasermessungen zum Turm fixiert und dieser fortlaufend in einer Schrägentfernung von etwa 60 m angezielt. Da die Messungen in einem Bereich des Turms durchgeführt wurden, der von den Rotorblättern überstrichen wird, wurden entsprechende Signale aufgezeichnet. Abbildung 9 zeigt einen solchen Rotordurchlauf mit einer Dauer von ca. 0,03 s in Form einer ungefilterten Zeitreihe. Dies entspricht einer Punktmenge von ca. 1500 Punkten.

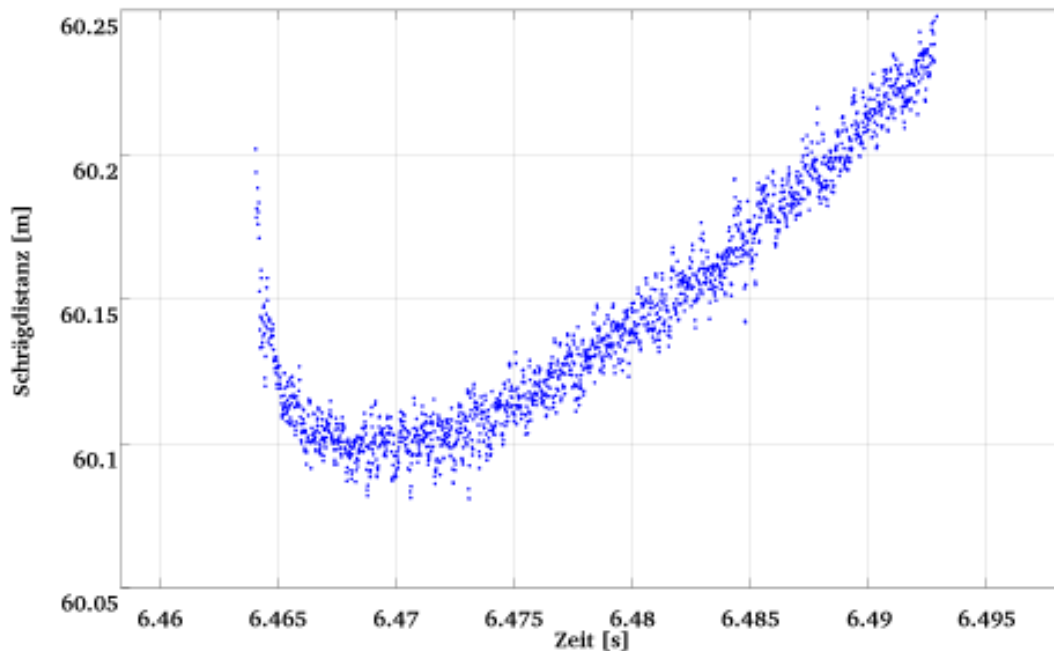


Abbildung 9: Beobachtung des Durchgangs eines Rotorblatts der Windenergieanlage im 1D-Modus

4 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag ist das k-TLS als geeignete Messmethode für die Erfassung von Deformationen an Bauwerken vorgestellt worden. Das große Potential dieses Verfahrens für Deformationsmessungen resultiert primär durch die reflektorlose Distanzmessung, die hohe räumliche Auflösung am Objekt sowie die schnelle Datenerfassung. Diese Merkmale ermöglichen einen Einsatz für die Überwachung verschiedenartiger Strukturen. Die zwei beispielhaft besprochenen Projekte belegen die erreichbare hohe Qualität der Messdaten. Bereits nach der Anwendung einfacher räumlicher und zeitlicher Filterungstechniken lassen sich Deformationsbeträge im Bereich weniger Millimeter und sogar Submillimeter signifikant nachweisen.

In den aufgeführten Anwendungsfällen wurde der terrestrische Laserscanner vordergründig als alleinstehender Sensor betrieben. Weitere Fortschritte sind durch seine Einbindung in heterogene Messsysteme und die damit verbundene Komplementarität zu erwarten. Eine Entwicklung in diese Richtung ist beispielsweise die Integration von kinematischem GPS und TLS zur Ableitung von Position und Orientierung eines unbewegten Scanners (Paffenholz und Kutterer, 2008).

Durch den zunehmenden Einsatzbereich des k-TLS und dessen Konkurrenzfähigkeit zu alternativen Messverfahren ist ein Anstieg der Anforderungen an die Mess- und Auswerteverfahren sowohl in methodischer als auch in anwendungsorientierter Hinsicht absehbar. Die Notwendigkeit einer eingehenden fehlertheoretischen Aufbereitung des k-TLS im Hinblick auf zweckmäßige Prüfverfahren und die bei der Messung vorliegenden Objekteigenschaften wurde bereits in Zusammenhang mit der Überwachung der Windenergieanlage aufgedeckt. Nur dadurch lassen sich systemimmanente Einflüsse und Deformationen aus den Daten sauber und zuverlässig trennen. Mit der Weiterentwicklung und gezielten Anpassung der statistischen Modellierungs- und Auswertemethoden und der optimalen Vernetzung mit Zusatzsensorik seien abschließend zwei weitere Forschungsschwerpunkte genannt, aus denen zukünftige Fortschritte und wissenschaftliche Erkenntnisse zur Etablierung dieses Messverfahrens führen werden.

5 Literatur

- Foppe, K., Schwieger, V., Staiger, R. (2004): Grundlagen kinematischer Mess- und Auswertetechniken. In: Schwieger, V., Foppe, K. (Red.): Kinematische Messmethoden – Vermessung in Bewegung. DVW Schriftenreihe, Nr. 45, 3-18, Wißner, Augsburg.
- Hesse, C. (2008): Hochauflösende kinematische Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern. Diss., Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover, Nr. 268, ISSN 0174-1454.
- Jöckel, R., Stober, M., Huep, W. (2008): Elektronische Entfernung- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren (5. Auflage). Wichmann, Heidelberg.
- Kutterer, H., Hesse, C. (2006): 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.
- Kutterer, H., Paffenholz, J.-A., Vennegeerts, H. (2009): Kinematisches terrestrisches Laserscanning. Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 134. Jahrgang, Heft 2, 79-87.
- Paffenholz, J.-A., Kutterer, H. (2008): Direct georeferencing of static terrestrial laser scans. CD-ROM Proc. FIG Working Week 2008, Stockholm, Schweden.
- Paffenholz, J.-A., Vennegeerts, H., Kutterer, H. (2008): High frequency terrestrial laser scans for monitoring kinematic processes. CD-ROM Proc. INGEO 2008, Bratislava, Slovakia.
- Staiger, R., Wunderlich, T. (2007): Terrestrisches Laserscanning 2006 – Technische Möglichkeiten und Anwendungen. Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 132. Jahrgang, Heft 2, 81-86.
- Wunderlich, T., Staiger, R. (2008): „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.