

# Hochfrequentes Neigungsmonitoring mit Distanzsensoren

Stand: Oktober 2012

## High-Frequency Inclination Monitoring using Distance Sensors

Update: October 2012

**Robin Ullrich; Matthias Fuhrland; Marco Riese; Michael Möser**

Zur Beweissicherung von Neigungsänderungen hoher Bauwerke wurde bislang auf eine Vielzahl von Messverfahren zurückgegriffen, welche aufgrund hoher Kosten oder aufwändiger Datenauswertung jedoch nicht dauerhaft eingesetzt werden konnten. Der folgende Artikel beschreibt ein Systemkonzept zum Neigungsmonitoring von Türmen und Windkraftanlagen unter Verwendung von Distanzsensoren, welche dauerhaft installiert werden und Schwingungsamplituden bis in den Meterbereich hochfrequent erfassen können.

Schlüsselbegriffe: Neigungsbestimmung, Monitoring, Distanzsensoren, Refraktion, Bauwerksüberwachung

### 1 Einleitung

Besonders wichtige ingenieurgeodätische Aufgabenfelder stellen Überwachungsmessungen von Staumauern, Verkehrsbauwerken, Hallendächern und Turmbauwerken dar. Diese Messobjekte können nicht als starr betrachtet werden, sondern bewegen oder verformen sich in unterschiedlichen Zeitskalen. Die geometrischen Veränderungen der Bauwerke werden anhand ausgewählter Messpunkte dokumentiert und repräsentieren das aktuelle Bauwerksverhalten. Zum Zwecke der Beweissicherung, Schadensfrüherkennung und Werterhaltung werden vermehrt Monitoringsysteme eingesetzt, welche jeweils an die örtlichen Gegebenheiten (Bauwerkskonstruktion, meteorologische Parameter, funktechnisch bedingte Einschränkungen) angepasst sind und die Bauwerksbewegung kontinuierlich aufzeichnen. Als Folge dessen kann auf keinerlei Standardkonzept verwiesen werden, welches sämtliche Messaufgaben erfüllt.

Insbesondere zur Beweissicherung der entscheidenden Messgrößen an Turmbauwerken (Neigungsänderungen, hervorgerufen durch Windlasten oder einseitige Sonneneinstrahlung) wird bislang auf eine Vielzahl verschiedener Sensoren und Messverfahren zurückgegriffen. Eingesetzt werden u. a. biaxiale Neigungssensoren, Beschleunigungsmesser, zielverfolgende Tachymeter oder Verfahren der Photogrammetrie. Wegen zu geringer Takraten, hoher Kosten oder aufwändiger Datenauswertung wird jedoch zumeist von einer dauerhaften Installation der Sensoren abgesehen. Bei Funktürmen und Windkraftanlagen sind Schwingungen mit Frequenzen größer als  $f = 0,5 \text{ Hz}$  und Amplituden im Dezimeterbereich keine Seltenheit (*Möser, et al 2000*). Am Funkturm auf dem Brocken wurden bereits Bewegungen von  $\pm 1,5 \text{ m}$  beobachtet (*FALKNER 2008*).

In order to preserve the evidence of inclination variations of high structures a lot of measurement methods have been used. Because of high costs and extensive data evaluation none of these methods could be installed long-lasting. The following article describes a concept for an inclination monitoring system of towers and wind turbines using distance sensors which could be installed on a sustained basis detecting oscillations greater than 0,5 Hz.

Keywords: Inclination Monitoring, Distance Sensors, Refraction, Structural Monitoring

Aufgrund dieser hohen Bewegungsdynamik kann auch im Bereich der Lotung auf kein Standardverfahren zurückgegriffen werden. Bei Funkmasten wird die Sicherheit der Daten zusätzlich durch die hohen Feldstärken (insbesondere bei Digitalfunk) beeinträchtigt und im Extremfall die Funktionsfähigkeit der Sensoren gefährdet. Zudem kommt es speziell in den Sommermonaten häufig zu Blitzeinschlägen, die nicht immer durch bestehende Blitzableitersysteme abgefangen werden können und eingebaute Sensoren zerstören. Die Sensorik zur Neigungsbestimmung sollte deshalb zweckmäßig in Bodennähe angesiedelt werden.

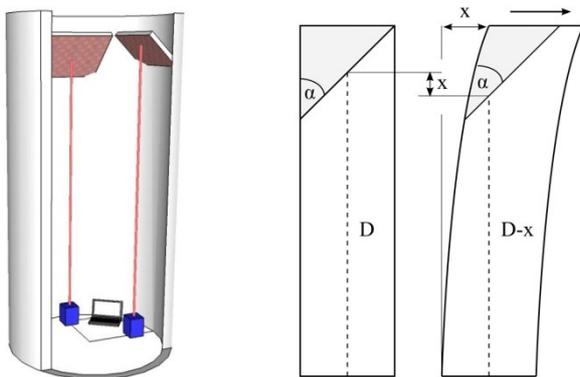
Am Geodätischen Institut der TU Dresden wurde auf dieser Basis ein Konzept zum Einsatz von Distanzsensoren zur Realisierung eines Monitoringsystems bei Fernseh- und Funkmasten sowie Windkraftanlagen entwickelt, was in diesem Beitrag vorgestellt wird. Neben dem innovativen Messprinzip wird auf die Beschaffenheit der Reflektoren und die Ergebnisse der Versuchsdurchführungen eingegangen. Abschließend werden eine Genauigkeitsuntersuchung des Systems durchgeführt und alternative Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt.

### 2 Messprinzip und Messmittel

Der Grundgedanke des Messprinzips basiert auf dem Einsatz von Distanzsensoren, die in Bodennähe innerhalb des Turmbauwerkes installiert werden und Distanzmessungen zu Reflektortafeln ermöglichen. Zur Bestimmung von Turmneigungen müssen sowohl die Distanzsensoren als auch die Reflektoren wie folgt installiert werden:

Der Distanzsensor wird im Turmschaft derart ausgerichtet, dass der ausgesendete Laserstrahl orthogonal zur

Bewegungsrichtung des Objekts verläuft und an der entsprechenden Messstelle im oberen Bereich des Turmbauwerks durch ein um  $\alpha = 45^\circ$  geneigtes Flächenelement reflektiert wird (Abb. 1, links). Durch diese Neigung spiegelt sich die Objektbewegung identisch in der gemessenen Distanzänderung  $x$  wider. Abbildung 1 (rechts) stellt eine durch die Verbiegung des Turmes hervorgerufene Bewegung des Reflektors um den Betrag  $x$  dar, die eine Verkürzung der gemessenen Distanz um denselben Betrag  $x$  zur Folge hat. Die durch die Biegung des Turmes verursachte Neigungsänderung des Reflektors soll hier zunächst vernachlässigt werden. Bei bekannter Biegelinie des Turmes kann eine rechnerische Korrektur erfolgen.



**Abb. 1: Modell des Messprinzips (links), Skizze zur Berechnung der Turmneigung (rechts)**

Um die Bewegungskomponente des Bauwerkes sowohl in  $X$ - als auch in  $Y$ - Richtung aufzeichnen zu können, muss dieses Systemkonzept in doppelter Ausführung im Messobjekt installiert werden. Dabei ist die geneigte Fläche des zweiten Reflektors  $90^\circ$  verschwenkt (bspw. Nord- Südausrichtung) zum ersten Reflektor (bspw. Ost-Westausrichtung) auszurichten (vgl. Abb. 1, links).

Die Dimensionierung der Reflektoren ist dabei eng verknüpft mit den Anforderungen an das Monitoringsystem, welches Neigungsänderungen mit Schwingungsfrequenzen von bis zu  $0,5 \text{ Hz}$  und Querauslenkungen bis zu  $\pm 1,5 \text{ m}$  mit einer Auflösung von  $1,0 \text{ cm}$  erfassen soll. Aus diesen Vorgaben ergibt sich die Systemanforderung der einzusetzenden Distanzsensoren mit einer Messfrequenz von mindestens  $300 \text{ Hz}$ . Des Weiteren müssen die Sensoren aufgrund der Höhe von Turmbauwerken und Windkraftanlagen für Distanzen über  $100 \text{ m}$  einsetzbar und robust gegen äußere Einflüsse (Temperatur, Luft-

feuchte) sein. Insbesondere die Kombination zwischen der hohen Taktrate und dem großen Messbereich reduziert die Anzahl der potenziell einsetzbaren Sensoren auf ein sehr geringes Maß. Als in Frage kommende Messmittel wurden die Distanzsensoren Leuze AMS 200 und Sick DMT 10-2-1111 gewählt (Abb. 2). Für weniger hohe Ansprüche an die Auflösung des Bewegungsverhaltens und den Messbereich (abhängig von der Bauhöhe des Messobjektes) wurde zudem der Sensor Datalogic S 80 untersucht. Die wichtigsten Parameter der Distanzsensoren (Herstellerangaben) werden in Tabelle 1 dargestellt.

Mit Hilfe dieser Sensorparameter, insbesondere der Laserspotgröße  $S$  und der maximal zu erwartenden Querauslenkung  $Q$ , können nun die Reflektordimensionen (Länge  $L$ , Breite  $B$ ) wie folgt spezifiziert werden:

$$L = B = 2 \cdot Q + S \quad (1)$$

Geht man z.B. von der Spotgröße  $S = 100 \text{ mm}$  für den Leuze AMS bei einer Distanz von  $100 \text{ m}$  aus, muss der Reflektor mindestens mit den Maßen  $L = B = 3,1 \text{ m}$  dimensioniert werden. Entsprechend hoch ist auch der Aufwand an Reflexmaterial, das für die Sensoren der Firmen Leuze und Datalogic auf dem Reflektor aufgebracht werden muss, um Distanzmessungen zu ermöglichen. Aufgrund dieses Sachverhaltes wurde bei der Wahl des dritten Sensors (Sick DMT) bewusst die reflektorlose Messung auf natürliche Oberflächen einbezogen.

Nichtsdestotrotz beanspruchen beide Reflektortypen einen großen Platzbedarf. Der uneingeschränkte Sichtkontakt innerhalb des Turmes kann durch Leitern und Einbauten nicht immer gewährleistet werden. Im Fall von Abschattungen kann das Messsystem als gestaffelte Variante eingesetzt werden, wobei die Neigungsbestimmung für jeden Abschnitt dem vorab beschriebenen Messprinzip entspricht und die Gesamtneigung als Summe der partiellen Neigungswerte errechnet wird (Abb. 3). Dadurch werden zwar die Abmaße der Reflektoren reduziert, da für die Abschnitte geringere Neigungswerte zu erwarten sind, die Anzahl der einzusetzenden und zu synchronisierenden Sensoren steigt jedoch. Für das jeweilige Messobjekt ist der Parameter der maximalen Querauslenkung somit maßgebend für die Dimensionierung der Reflektoren und die Anzahl einzusetzender Distanzsensoren.

Neben der grundlegenden Messtechnik kommt ein GSM-Modem der Firma Cinterion (Abb. 2) zum Einsatz, wel-



**Abb. 2: Systemkomponenten (v.l.n.r.): Datalogic S80, Leuze AMS 200, Sick DMT 10-2-111, Cinterion MC52**

ches in bauwerkskritischen Situationen zum Versand von Alarmbenachrichtigungen eingesetzt wird. Ist im Messraum eine Internetverbindung vorhanden, kann die Alarmerung zusätzlich oder auch ausschließlich durch Emails realisiert werden.

### 3 Messablauf

Die Distanzsensoren werden im unteren Teil des Bauwerkes bspw. auf Pfeilern oder Konsolen montiert. Da der Laserstrahl orthogonal zur Bauwerksbewegung (X-Y-Ebene) verlaufen muss, sind die Sensoren auf passende Vorrichtungen zu montieren oder der Laserstrahl durch ein Spiegelsystem in die entsprechende Lage umzulenken (Abb. 4).

An den Messstellen im oberen Bereich des Bauwerkes werden die Reflektoren  $45^\circ$  geneigt und für die jeweilige Achskomponente angebracht und ausgerichtet. Da der Laser-Spot der Sensoren für große Distanzen am Reflektor nur sehr schwer bzw. bei Messungen im infraroten Bereich nicht sichtbar ist, sollte die Ausrichtung der Reflektoren bezogen auf die Sensorposition im Turmschaft durch Zenitlote unterstützt werden. Nach der Montage der Systemkomponenten werden die Distanzsensoren und das Alarmmodul mit dem Steuerrechner verbunden. Dabei wird die Netzverfügbarkeit des GSM-Modems mithilfe einer Außenantenne sichergestellt. Zur Steuerung des Messablaufes wurde eine Software entwickelt, die die Daten der Distanzsensoren aufzeichnet und filtert, in Echtzeit darstellt sowie die Möglichkeit zur Sendung von Alarm- und Statusmeldungen realisiert. Die Kommunikation zwischen den Sensoren und der Steuersoftware erfolgt über serielle Schnittstellen (RS232).

Wie in Abschnitt 2 beschrieben wurde, werden die Koordinatenachsen durch orthogonal zueinander ausgerichtete Reflektoren definiert. Befindet sich ein Bauwerk in Ruhe, variieren die dann gemessenen Distanzen ausschließlich im Bereich des Messrauschens der Distanzsensoren. Die Kenntnis der Distanzen in Ruhelage, im Folgenden als Nullpunktdistanz  $D$  bezeichnet, ist zur Bestimmung der absoluten Bauwerksauslenkung zwingend nötig. Da im allgemeinen Fall jedoch davon auszugehen ist, dass das Bauwerk während der Einrichtung der Sensoren zumindest kleinere Bewegungen ausführt, wird die Nullpunktdistanz durch den Mittelwert einer Messreihe definiert

(Schwingungsanalyse). Die Dauer der Messreihe ist dabei abhängig vom aktuellen Schwingungsverhalten und sollte zumindest Messdaten einer vollständigen Periode beinhalten. Im Allgemeinen sollten die Erstinstallation und Ausrichtung vorzugsweise bei Windstille und bedecktem Himmel, d. h. bei möglichst kleinen Schwingungen des Turmes, erfolgen, sodass die Nullpunktdistanz möglichst genau und unabhängig vom mathematischen Berechnungsvorgang messtechnisch bestimmt werden kann. Da die Datenreihe durch sensorbedingte Ausreißer verfälscht wird, kommt zusätzlich ein Ausreißertest ( $3\sigma$ ) zur Anwendung, welcher die Zuverlässigkeit des Mittelwertes sicherstellt. Ist die Nullpunktdistanz bekannt, errechnet sich die Bauwerksauslenkung  $x$  für jede Koordinatenrichtung aus der Differenz der Nullpunktdistanz zur aktuell gemessenen Distanz  $D_i$ .

$$x = D - D_i \quad (2)$$

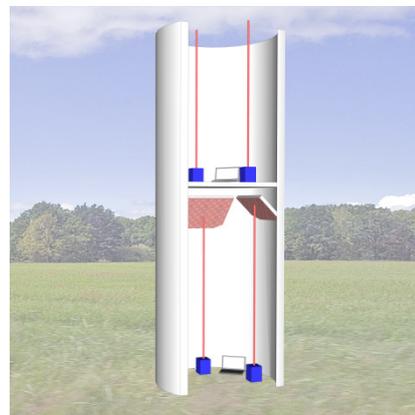


Abb. 3: Gestaffelter Aufbau des Messsystems



Abb. 4: Spiegelsystem zur Umlenkung des Laserstrahls (links), Vorrichtung zur Messung in Zenitrichtung (rechts)

Tab. 1: Spezifikationen der Distanzsensoren (Herstellerangaben)

Parameter	Leuze AMS 200	Sick DMT 10-2-1111	Datalogic S 80
Messbereich	0,2 bis 200 m	0,5 bis 155 m	0,3 bis 100,30 m
Maximale Messfrequenz	625 Hz	1000 Hz	66 Hz
Wellenlänge	650 bis 690 nm	905 nm	655 nm
Standardabweichung einer Einzelmessung	1 mm (bei 625 Hz)	1 mm (bei 4 Hz)	10 mm (bei 44 Hz)
Digitale Auflösung	0,01 mm	1 mm	10 mm
Spotdurchmesser (auf 100 m)	100 mm	520 mm	662 mm
Reflektorlose Messung	nein	ja	nein

Neben der Darstellung der absoluten Auslenkung kann die Nullpunktdistanz zur Definition des Messbereiches dienen. Der gültige Messbereich  $M$  kann aus den Statikdaten des Bauwerks gewonnen werden, welche die Grenzen einer maximalen Bewegung  $\Delta_{max}$  ausgehend von der Bauwerksachse definieren (Kollaps des Bauwerkes). Der gültige Messbereich lässt sich demnach folgendermaßen ausdrücken:

$$M = x \pm \Delta_{max} = D - D_i \pm \Delta_{max} \quad (3)$$

Durch die Annahme dieses Messbereiches können die Sensordaten in Echtzeit gefiltert werden. Gemessene Distanzen außerhalb des gültigen Bereiches werden als Fehlmessungen bewertet und eliminiert. Diese Datenfilterung ist enorm wichtig für die zuverlässige Funktionsweise des Alarmmoduls. Innerhalb der Software ist ein Alarmwert  $\Delta_a$  (zulässige Bauwerksauslenkung) definiert, bei dessen Überschreitung eine Meldung durch das Alarmmodul versendet wird ( $\Delta_a < \Delta_{max}$ ). Sensorbedingte Ausreißer, welche außerhalb des gültigen Messbereiches liegen, würden demnach eine Meldung auslösen und einen kritischen Zustand des Bauwerks vortäuschen. Dieses Szenario wird mithilfe der Festlegung des Messbereiches vermieden.

Neben der Sicherstellung zur Detektion ausreißerfreier Messwerte ist der Prozess der Datensicherung bei einem System mit einer derartig hohen Messfrequenz von besonderer Bedeutung. Die Distanzdaten der Sensoren werden zeitsynchron (millisekundengenau) als komprimierte Binärdaten gesichert und mit einem Zeitstempel versehen. Der Vorteil einer speichereffizienten Datensicherung im Binärformat mit anschließender Komprimierung geht deutlich aus Tabelle 2 hervor. Im Vergleich zur Speicherung bspw. im komprimierten Textformat kann das Datenvolumen um bis zu 33% reduziert werden. Zur Komprimierung der Daten kommt dabei der Lempel-Ziv-Markow-Algorithmus zur Anwendung (/ZIV, LEMPEL 1977). Somit werden die Ressourcen des Systems geschont und zugleich die maximale Laufzeit des Monitorings, welche allein durch das Speichervolumen des Steuerrechners begrenzt ist, gesteigert. Bei Anwendungen mit weniger hohen Ansprüchen an die zeitliche Auflösung der Daten kann die Datenaufzeichnungsrate im Softwaremenü unabhängig von der tatsächlichen Messfrequenz der Sensoren herabgesetzt werden (10 bis 500 Hz).

#### 4 Refraktion

Wie bei vielen geodätischen Messverfahren wird auch bei Laserdistanzmessungen die gemessene Distanz durch atmosphärische Einflüsse beeinträchtigt. Dabei spielen insbesondere der horizontale und der vertikale Temperaturgradient als auslösender Faktor für Refraktionserscheinungen eine entscheidende Rolle. Aufgrund des Temperaturgradienten, welcher modellhaft als parallele Anordnung von Luftschichten gleicher Temperaturen interpretiert werden kann, verlaufen die Laserstrahlen nicht auf geradlinigem Weg zur Messstelle sondern be-

schreiben eine gekrümmte Raumkurve (Refraktion). Die durch diese Krümmung resultierende Abweichung der Position des Laserspots auf dem Reflektor zur Sollposition kann durch den Refraktionswinkel  $\delta$  beschrieben werden (/BROCKS 1939/)

$$\delta = -\frac{1}{S} \int_0^S (S-s) \frac{1}{n} \frac{dn}{dZ} \sin \alpha_z ds \quad (4)$$

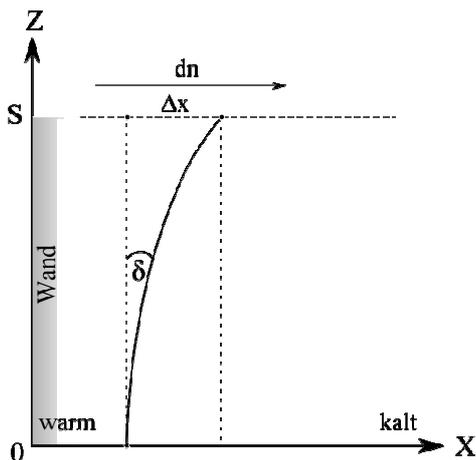
Dabei beschreibt  $S$  die Distanz zur Messstelle,  $s$  die aktuelle Integrationsstelle,  $n$  den Brechungsindex der Luft,  $dn/dZ$  den Brechungsindexgradienten und  $\alpha_z$  den Zenitwinkel der Beobachtungen.

Im Allgemeinen lassen sich durch diese Berechnungsvorschrift zwei Phänomene betrachten: Eine mögliche Abweichung der Laserspotposition, verursacht durch einen horizontalen- oder durch einen vertikalen Temperaturgradienten. Da die Beobachtungen parallel zur Bauwerksachse, also unter einem Zenitwinkel von  $\alpha_z = 0$  gon stattfinden, wirken keine refraktiven Einflüsse ( $\delta = 0$ ) auf die Distanzmessung, bedingt durch einen vertikalen Temperaturgradienten. Da im Turminneren, bspw. durch eine einseitige Sonneneinstrahlung auch horizontale Temperaturgradienten zu erwarten sind, ist zumindest hier von einem Einfluss auf die Distanzmessungen auszugehen. Um die Größenordnung des Refraktionswinkels abschätzen zu können, wird der vertikale Brechungsindexgradient aus Gleichung 4 durch den horizontalen Brechungsindexgradient  $dn/dX$  ersetzt, wobei die Laserstrahlen jetzt orthogonal ( $\alpha_z = 100$  gon) zur Richtung des Brechungsindexgradienten verlaufen und somit an den Grenzflächen der partiellen Brechungsindizes abgelenkt werden (Abb. 5).

Über das Temperaturverhalten innerhalb von Türmen stehen fast keine Untersuchungsergebnisse zur Verfügung. Aus Untersuchungen am Heinrich-Hertz-Turm in Hamburg (/FAHLAND, SCHULZ 2006/) und der himmelsrichtungsabhängigen Erfassung der Mauerwerkstemperaturen am Fernsehturm Dresden kann jedoch von horizontalen Temperaturgradienten kleiner  $1K/m$  ausgegangen werden. Für Temperaturgradienten im angegebenen Bereich ergeben sich Refraktionswinkel  $\delta = 0,17$  mgon, was bezogen auf eine Distanz von  $100$  m einer Ablenkung  $\Delta x = 0,27$  mm (vgl. Abb. 5) entspricht. Für die verwendeten Sensoren der Firmen Datalogic und Sick verschwindet der Einfluss der Refraktion damit im Messrauschen und kann nicht aufgelöst werden. Einzig und allein der Leuze AMS hat das Potenzial zur Auflösung entsprechender Distanzänderungen (Messungen auf statisches Ziel), was jedoch auch hier nicht deutlich vom Messrauschen zu separieren ist (Standardabweichung der

**Tab. 2: Speicherbedarf verschiedener Dateiformate (Aufzeichnungsdauer 1 Tag bei 500 Hz)**

Dateiformat	Rohdaten	Komprimiert
Textdatei (*.txt)	812 MB	115 MB
Binärdatei (*.bin)	246 MB	34 MB



**Abb. 5: Refraktion in Turmbauwerken**

Einzelmessung). Prinzipiell kann der Einfluss der Refraktion durch ein System mit Anforderungen im Zentimeterbereich vernachlässigt werden, da erst ab Temperaturgradienten von  $4K/m$  Ablenkungen im Zentimeterbereich auftreten. Entsprechend hohe Gradienten sind in potenziellen Messobjekten kaum zu erwarten.

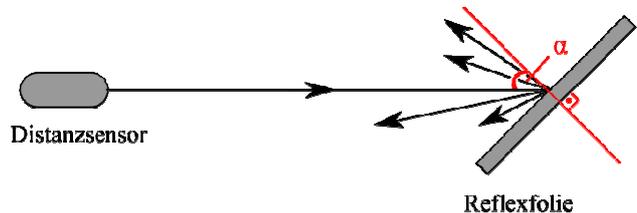
### 5 Praktische Untersuchungen

Durch die Anordnung der Reflektoren erfolgen die Dauermessungen stets unter einem Beobachtungswinkel von  $45^\circ$  auf die geneigte Ebene. Bei der Verwendung von Reflexfolien als Reflektormaterial wird der Laserstrahl durch katadioptrische (spiegelnde und brechende) Elemente nahezu in die Richtung der Sendeeinheit zurückgeworfen. Der Wert der Rückstrahlung (Einheit:  $cd/lx$ ) ist dabei abhängig vom Beobachtungswinkel  $\alpha$  (Abb. 6). Je größer der Beobachtungswinkel ist, desto geringer ist der Rückstrahlwert. Die meisten Hersteller geben eine Reduzierung des Rückstrahlwertes von bis zu 55% für Beobachtungswinkel im Bereich von  $45^\circ$  an (abhängig vom Folientyp). Dies gilt auch für die eingesetzten Reflexfolien 3M und Avery der Firma Reflexia.

Da die Hersteller der Distanzsensoren bei ihren Angaben (Genauigkeit, Messbereich) von einem Maximum des Rückstrahlwertes ausgehen, müssen diese Geräteparameter für  $45^\circ$  geneigte Oberflächen untersucht werden. Im Einzelnen wurden die maximale Messdistanz, die Standardabweichungen für Einzelmessungen, die durchschnittliche Messfrequenz und die Spotgröße auf geneigte Oberflächen untersucht. Die konkreten Untersuchungsergebnisse sind Tabelle 3 zu entnehmen. Insbesondere die

maximalen Messdistanzen bei gleichbleibenden Standardabweichungen weichen von den Herstellerangaben ab. So weisen alle drei Sensoren wesentlich kürzere Maximaldistanzen bei Messungen auf geneigte Ebenen auf (Tab. 3). Eine Ausnahme stellt dabei der Sick DMT bei Messungen auf Reflexfolien dar, für welche keine Herstellerangaben vorliegen. In Bezug zum Messbereich bei Messungen auf natürliche Oberflächen übertrifft der Sensor die Herstellerangaben um ca. 10 m. Messungen für größere Distanzbereiche (getestet bis ca. 190 m) sind zwar möglich, führen jedoch zu einer signifikanten Verschlechterung der Standardabweichungen um den Faktor zwei bis drei und müssen für das Messsystem mit Genauigkeitsansprüchen im Zentimeterbereich ausgeschlossen werden.

Um eine sichere Bestimmung der Nullpunktdistanz gewährleisten zu können, wurden die Sensoren hinsichtlich des Einlaufverhaltens untersucht. Dazu wurden Distanzmessungen auf statische Reflektortafeln unter Laborbedingungen (atmosphärisch stabile Verhältnisse) für eine Dauer von sechs Stunden durchgeführt (Abb. 7 bis Abb. 9). Dargestellt werden die Differenzen  $\Delta D$  zum Mittelwert der Messreihe, aufgetragen als gleitender Mittelwert mit einer Mittelungstiefe von einer Sekunde. Aus Darstellungsgründen wird nicht die gesamte Aufzeichnungsdauer abgebildet, sondern nur das Verhalten bis zur Stabilisation der Messreihe, d.h. die gemessene Distanz bleibt im Rahmen der Standardabweichungen nahezu konstant.



**Abb. 6: Abhängigkeit des Rückstrahlwertes vom Beobachtungswinkel  $\alpha$**

Für den Sensor der Firma Leuze ergibt sich eine Einlaufzeit von ca. 200 Minuten. Die beiden anderen Sensoren benötigen eine weitaus kürze Zeitspanne, um einen stabilen Zustand zu erreichen (Sick: rund 90 Minuten, Datalogic: rund 60 Minuten). Aus den Daten wird ersichtlich, dass die Messsysteme vor dem Beginn des Monitorings gestartet werden müssen. Die Software bietet dazu einen Testmodus mit Timerfunktion. Unter Berücksichtigung des Einlaufverhaltens wurden danach die Standardabweichungen für eine Einzelmessung

**Tab. 3: Sensorparameter bei Messungen auf eine  $45^\circ$  geneigte Oberflächen**

Parameter	Leuze AMS200	Sick DMT10-2-1111	Datalogic S80
Maximale Messdistanz (Reflektor / reflektorlos)	115 m / -	164 m / 132 m	75 m / -
Std.-Abw. Einzelmessung (75 m / 100 m)	0,7 mm / 1,5 mm	21,7 mm / 24,2 mm	5,9 mm / -
Std.-Abw. reflektorlose Messung (75 m / 100 m)	- / -	22,5 mm / 25,5 mm	- / -
Spotgröße (optisch geschätzt)	10 cm (100 m)	- (infrarot)	(35 cm) 75 m
Durchschnittliche Messtaktrate	585 Hz	876 Hz	44 Hz

sensorweise auf geneigte Reflektoren bestimmt. Die Ermittlung der Werte erfolgte für Distanzen von 100 m (Leuze, Sick) und 75 m (Datalogic, Leuze, Sick). Die besten Ergebnisse lieferte dabei der Leuze AMS mit Standardabweichungen (Einzelmessung) von unter 2 mm und einer durchschnittlichen Taktrate von 585 Hz. Auch der Datalogic S80 erreicht zufriedenstellende Ergebnisse im Bereich von 6 mm, allerdings bei einer geringen Taktrate von 44 Hz und einem maximalen Messbereich von 75 m. Der Sick DMT zeichnet sich durch eine sehr hohe Messtaktrate von über 870 Hz aus. Die berechneten Standardabweichungen für Einzelmessungen befinden sich im Bereich von 21 bis 25 mm, sind allerdings für Reflektormessungen und Messungen auf lackierte Oberflächen nahezu identisch. Entsprechend den Systemanforderungen mit einer Taktrate von 300 Hz, kann die Standardabweichung für den Sick Sensor durch Mittelung zweier aufeinanderfolgender Messwerte noch gesteigert werden. Dies hat die Reduzierung der tatsächlichen Messtaktrate auf ca. 430 Hz zur Folge und führt zu einer Standardabweichung von ca. 17 mm.

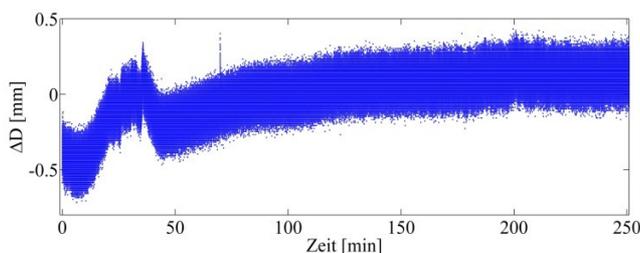


Abb. 7: Einlaufverhalten Leuze AMS

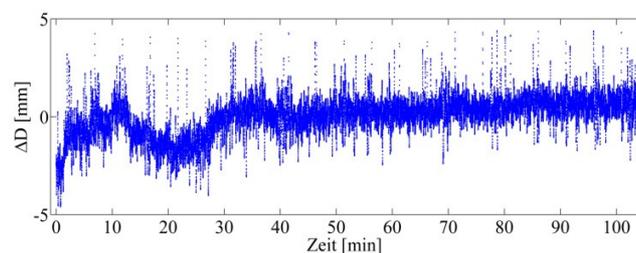


Abb. 8: Einlaufverhalten Sick DMT

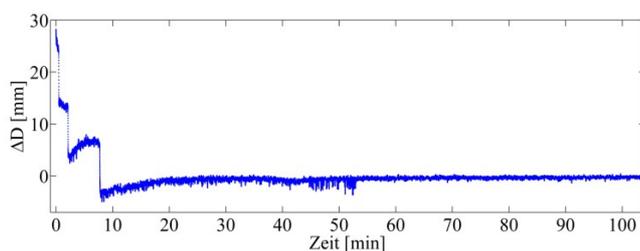


Abb. 9: Einlaufverhalten Datalogic S80

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Wie in diesem Beitrag aufgezeigt wurde, ist es möglich, ein universell einsetzbares Monitoringsystem zur Bestimmung von Neigungswerten zur Verfügung zu stellen. Dieses System zeichnet sich durch eine Sicherheit gegenüber Blitzschlag (Montage der Sensoren in Bodennähe), der Echtzeitdatenauswertung, Alarmierungsfunktionen und die Möglichkeit zum Dauereinsatz aus. Als einzig

limitierender Faktor zum Einsatz des Systems wurde die Reflektorgröße identifiziert. Die Dimensionen der Reflektoren sind direkt abhängig von den zu erwartenden Querauslenkungen des Bauwerkes. Dementsprechend groß ist auch der Aufwand an Reflexmaterial. Die Möglichkeit zur Aufrasterung der Reflexfolie und somit zur Senkung des nötigen Reflexmaterials ist gegeben und wurde bereits erfolgreich getestet. Ein Einfluss auf die resultierenden Distanzgenauigkeiten ist jedoch individuell je nach Rasterweite zu bestimmen.

Des Weiteren ist der stetige Sichtkontakt zwischen Sensor und Reflektor zu garantieren. Einbauten, die zu Abschattungen führen, kann mit einer Staffelung des Systems (Bestimmung partieller Neigungswerte) oder mit einer Außenmontage der Sensoren und Reflektoren begegnet werden. Für die Außenmontage sind die Sensoren zusätzlich witterungsresistent zu installieren.

Die Untersuchung der Distanzsensoren ergab, dass der Leuze AMS200 für das Messsystem am geeignetsten ist. Die geringe Spotgröße für große Distanzen beeinflusst die Reflektorgröße in Bezug auf Querauslenkungen im Meterbereich nur minimal. Die Genauigkeit der Einzelmessungen im unteren Millimeterbereich und die hohe Messtaktrate von über 580 Hz lassen das Bauwerksverhalten präzise und hochauflösend darstellen. Der Sick DMT 10 ermöglicht zudem die Messung auf natürliche Oberflächen, wodurch die Dimensionen der Reflektorelemente zwar nicht verringert werden, aber auf den Einsatz von Reflexmaterial gänzlich verzichtet werden kann. Die resultierenden Genauigkeiten im Bereich von 2 cm sind für Monitoringsysteme mit weniger hohen Genauigkeitsansprüchen ausreichend. Für Bauwerke mit einer Höhe von bis zu 75 m ist der Datalogic S 80 einsetzbar. Die Taktrate der Messung von 44 Hz vermag jedoch Bauwerksschwingungen mit großen Amplituden nicht vollständig aufzulösen. Zudem führt die Spotgröße im maximalen Messbereich zu einer Vergrößerung der Reflektordimensionen. Zur reinen Alarmierung in bauwerkskritischen Situationen ist jedoch auch dieser Sensor einsetzbar.

Letztendlich entscheiden nicht nur die dargestellten Systemparameter über die sinnvolle Einsetzbarkeit eines Sensorsystems. Die Kosten für die Sensoren und Reflexmaterial müssen zusätzlich in Betracht gezogen werden. Für jedes Bauwerk muss aus diesem Grund der Anspruch an Auflösung, Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit überprüft und definiert werden. Aus dieser Analyse ergibt sich die Konfiguration des Gesamtsystems (Sensoren und Reflektoren).

Neben dem Monitoring von hohen Bauwerken kann das Messkonzept bei einer Vielzahl von Messanwendung zum Monitoring von Schwingungen eingesetzt werden. Beispielhaft hierfür ist die Analyse von Brückenschwingungen. Dabei ist der Distanzsensor horizontal auszurichten (Orthogonal zur Schwingungsrichtung) und das 45° geneigte Flächenelement an einer geeigneten Messstelle, bspw. dem Punkt der größten Schwingungsamplituden,

zu montieren. Durch die hohe Taktrate der Messung wird auch in diesem Anwendungsfall bei der Wahl eines geeigneten Sensors die Schwingung präzise und hochauflösend aufgezeichnet und steht zur weiteren Analyse zur Verfügung. Damit kann auch in diesem Bereich des Monitorings ein alternatives Messsystem zur Verfügung gestellt werden, was das Repertoire an bestehenden Messmethoden sinnvoll ergänzt.

Dieses Projekt wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Helmholtzstr. 10, 01062 Dresden  
marcoriese@alice-dsl.net

Prof. Dr. Michael Möser, TU Dresden, Geodätisches Institut  
Helmholtzstr. 10, 01062 Dresden  
Michael.moeser@tu-dresden.de

## 7 Literatur

- Brocks, K. (1939): Vertikaler Temperaturgradient und terrestrische Refraktion, insbesondere im Hochgebirge. In: Veröffentlichungen des Meteorologischen Instituts der Universität Berlin, Hrsg.: A. Defant und H. Hertel, Band 3, Heft 4.
- Fahland, S.; Schulz, A. (2006): Kontinuierliche Überwachungsmessungen am Heinrich-Hertz-Turm in Hamburg, Mitteilung des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik Technische Universität Braunschweig, Messen in der Geotechnik 2006, Heft 82.
- Falkner, B. (2008): Museum und Hotel evakuiert, Mitteldeutsche Zeitung, Wernigerode 15.12.2008. URL: <http://www.mz-web.de/archiv/Museum~/HC-12-15-2008-0820005B2868.htm>, Last visited: 27.10.2012.
- Möser, M., Fundheller, J., Neumann, G. (2000): "35 Jahre Überwachungsmessungen am Funk- und Fernmeldeturm Dresden – das Mess- und Informationssystem", XIII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung München 2000, Vermessungswesen bei Konrad Wittwer Band 33, S. 378 – 385.
- Ziv, J.; Lempel, A. (1977): A Universal Algorithm for Sequential Data Compression, IEEE Transactions on Information Theory, Nr. 3, Vol. 23, S. 337 – 343.

Anschrift der Autoren:

Dipl.-Ing. Robin Ullrich, TU Dresden, Geodätisches Institut  
Helmholtzstr. 10, 01062 Dresden  
mail@robin-ullrich.de

Dr. Matthias Fuhrland, TU Bergakademie Freiberg  
Gustav-Zeuner-Str. 5, 09599 Freiberg  
matthias.fuhrland@tu-freiberg.de

Dipl.-Ing. Marco Riese, TU Dresden, Geodätisches Institut