

# Vollautomatische Setzungsmessungen an Ingenieurbauwerken mit Hilfe von Rotationslasern

Boris RESNIK und Norbert SCHIEFELBEIN

Beuth Hochschule für Technik, Berlin, [resnik@beuth-hochschule.de](mailto:resnik@beuth-hochschule.de)

Gesellschaft für Informations-Management mbH, [schiefelbein@gim-vermessung.de](mailto:schiefelbein@gim-vermessung.de)

## Zusammenfassung

Für die stark beanspruchten tragenden Konstruktionen von modernen Ingenieurbauwerken ist eine effektive Qualitätskontrolle von entscheidender Bedeutung. Die vertikalen Bewegungen von einzelnen Bestandteilen dieser Konstruktionen infolge der starken Belastung bzw. Änderung der Stützbedingungen im Laufe des Betriebes müssen bei den besonders gefährdeten Objekten oftmals kontinuierlich kontrolliert werden. In den letzten Jahren wurden von den Autoren ein Messsystem und völlig neuartige Algorithmen der Datenauswertungen für solche Setzungs- bzw. Neigungsmessungen auf der Basis eines Rotationslasers und den etwa kreisförmig platzierten Funkempfängern entwickelt und inzwischen erfolgreich für Monitoring eingesetzt.

## 1 Messsystem für Kontrolle von WKA-Fundamenten

In den letzten Jahren hat sich angesichts vermehrt auftretender Fundamentschäden an den modernen Windkraftanlagen (WKA) gezeigt, dass im Bereich der Turmeinbindung im Fundament ein spezifischer kritischer Punkt der gesamten Bauwerkskonstruktion vorliegt (Resnik & Schiefelbein 2013). Die Ursache für diese Schäden sind zumeist irregulär große Bewegungen der Fundamenteinbauteile (FET), die z. B. aufgrund verdeckter Baumängel bei der Fundamentherstellung hervorgerufen worden sein können. Da der eigentliche Ort des Geschehens im Fundament messtechnisch nicht erreichbar ist, müssen die Messungen zur Beurteilung der Verbindung auf seiner Oberfläche und dem Turm durchgeführt werden (Abb. 1). Die Erfassung von den relativen vertikalen Bewegungen an diesen Stellen kann mit unterschiedlichen messtechnischen Mitteln wie z.B. mit Beschleunigungs- und Neigungssensoren, vertikal gerichteten Laser oder auch mit zielverfolgenden Tachymetern (vgl. Resnik & Schiefelbein 2014) usw. erreicht werden.

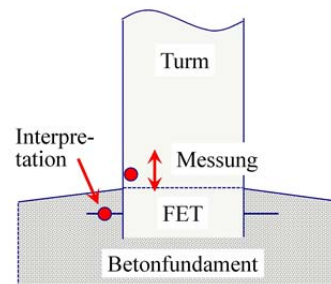
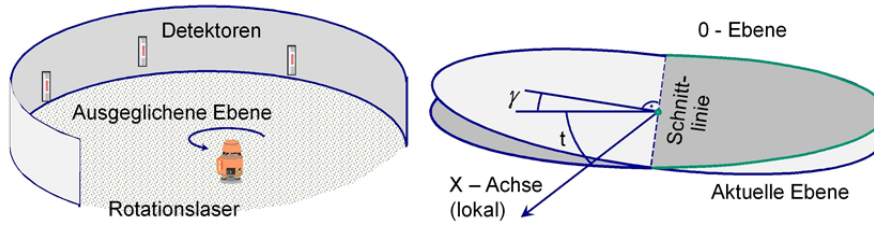


Abb. 1: WKA-Kontrolle

In den letzten Jahren wurden von den Autoren für die Lösung der oben genannten Aufgaben ein neuartiges Messsystem auf der Basis eines Rotationslasers und mehreren kreisförmig (im behandelten Beispiel an der Wand des Turmes) angeordneten Funkempfängern (Abb. 2, links) konzipiert und entwickelt. Durch eine Rotation des Laserstrahls in der Mitte dieses Systems kann praktisch eine unbegrenzte Anzahl von Detektoren ausschließlich höhenmäßig mit einer Genauigkeit im Submillimeterbereich und einer Abtastrate von bis zu 4-5 Hz abgelesen werden. Die Messergebnisse werden jeweils kabellos in die zentrale

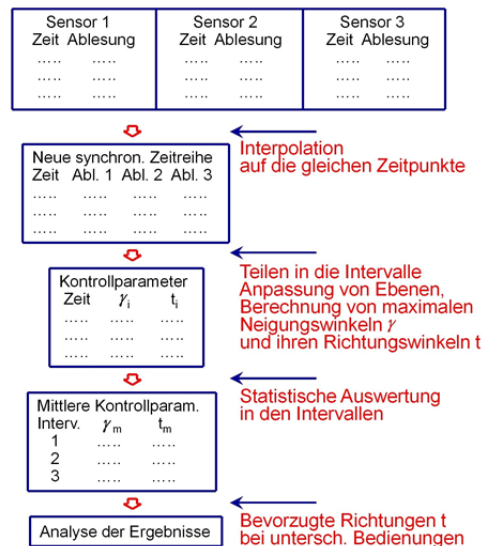
Recheneinheit übertragen, wobei eine folgende Auswertung im Postprocessing oder auch in Echtzeit ermöglicht werden kann.



**Abbildung 2:** Messsystem und Prinzip der Datenauswertung (schematisch)

Die Qualität der Diagnose von Bauwerksschäden und folglich die Wirtschaftlichkeit der Lösung hängt erfahrungsgemäß jedoch weniger von der Messtechnik selber, sondern vor allem von den verwendeten Algorithmen der Datenanalyse ab. Im Laufe des aktuellen gemeinsamen Forschungsvorhabens beider Autoren wurden deswegen auch die speziellen Algorithmen entwickelt, welche eine weitgehend automatische und zuverlässige Bestimmung von signifikanten Abweichungen vom „Normalverhalten“ anhand kontinuierlicher Messungen als Ergebnis liefern können.

Bei der Auswertung von Messergebnissen ist davon ausgegangen worden, dass der Rotationslaser fest mit dem Fundament verbunden ist und die automatische Horizontierung des Zielstrahls abgeschaltet ist. Da die Messungen an den beweglichen Sensoren im Laufe der Rotation des Lasers zu unterschiedlichen Zeitpunkten vorgenommen werden, ist für eine gemeinsame Auswertung zunächst eine Interpolation zwischen den Messungen mit einer vorgegebenen Abtastaterate vorgesehen (Abb. 3). Dabei können sowohl eine einfache lineare Interpolation zwischen Stützpunkten als auch kompliziertere Lösungen wie z.B. die Spline-Interpolation usw. verwendet werden. Im zweiten Schritt werden aus den kontinuierlich erzeugten Messdaten auf allen vorhandenen Sensoren konstante Intervalle wie z.B. eine volle Stunde ausgeschnitten. Durch die Interpolation der Messwerte entstehen Daten zu gleichen Zeitpunkten und es kann folglich für jede einzelne Epoche eine ausgeglichene Ebene aus mindestens drei Punkten berechnet werden. Die Lagekoordinaten ( $x_i$  und  $y_i$ ) der Sensoren werden einmalig nach der Installation des Messsystems in einem lokalen Koordinatensystem ermittelt und bleiben folglich unverändert. Die Höhenablesungen ( $z_i$ ) in Bezug auf die Fundamentoberfläche ändern sich dagegen im Laufe der Zeit. Das entsprechende Gleichungssystem zu jedem Zeitpunkt mit drei oder mehr Gleichungen von der Art



**Abb. 3:** Ablauf der Datenauswertung

Durch die Interpolation der Messwerte entstehen Daten zu gleichen Zeitpunkten und es kann folglich für jede einzelne Epoche eine ausgeglichene Ebene aus mindestens drei Punkten berechnet werden. Die Lagekoordinaten ( $x_i$  und  $y_i$ ) der Sensoren werden einmalig nach der Installation des Messsystems in einem lokalen Koordinatensystem ermittelt und bleiben folglich unverändert. Die Höhenablesungen ( $z_i$ ) in Bezug auf die Fundamentoberfläche ändern sich dagegen im Laufe der Zeit. Das entsprechende Gleichungssystem zu jedem Zeitpunkt mit drei oder mehr Gleichungen von der Art

$$a_k \cdot x_i + b_k \cdot y_i + c_k \cdot z_i - 1 = 0 \quad (1)$$

je nach Anzahl der Sensoren  $i$  wird dabei nach den Regeln der linearen Algebra aufgelöst wobei sich die Koeffizienten  $a_k$ ,  $b_k$  und  $c_k$  einer ausgeglichen Ebene über alle Sensoren zu einer Epoche  $k$  ergeben. Da die Anfangsbedingungen (d.h. die Neigung in einem übergeordneten Koordinatensystem) unbekannt sind, werden bei dem verwendeten Algorithmus des Monitorings nur die Abweichungen von der mittleren Ebene (0-Ebene in der Abbildung 2 rechts) jedes Zeitintervalls ermittelt. Aus diesen Gründen werden statt der ermittelten Ablesungen  $z_i$  im Gleichungssystem (1) die Differenzen zur mittleren Ablesung in einem bestimmten Zeitintervall eingesetzt. Im folgenden Schritt der Datenauswertung wird aus den ermittelten Koeffizienten der maximale Neigungswinkel  $\gamma_k$  zwischen der aktueller Ebene (Epoche  $k$ ) und der 0-Ebene des Zeitintervalls (Senkrecht zur Schnittlinie) sowie seine Orientierung  $t_k$  im lokalen Koordinatensystem berechnet

$$\gamma_k = \arccos(c_k / \sqrt{a_k^2 + b_k^2 + c_k^2}) \quad , \quad (2)$$

$$t_k = \arctan(b_k / a_k) \quad . \quad (3)$$

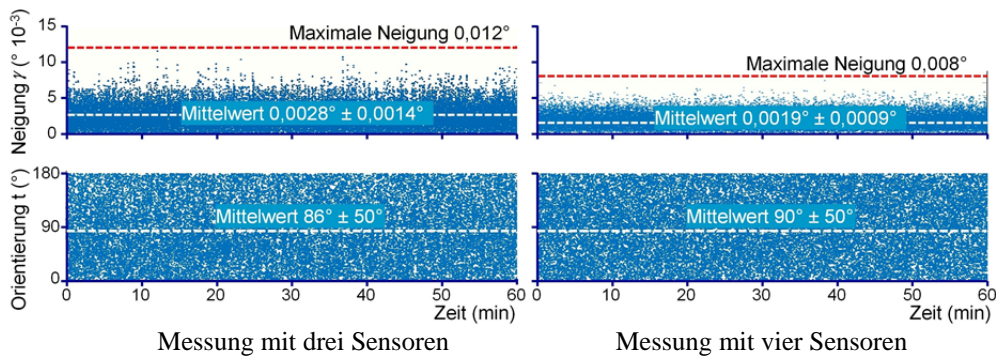
Diese Parameter werden in den Intervallen statistisch (mittlere Werte  $\gamma_m$  und  $t_m$  und die entsprechenden Standardabweichungen) ausgewertet und bei der folgenden Analyse in der Abhängigkeit von den Windverhältnissen analysiert und interpretiert. Die ermittelten Richtungen der maximalen Setzungen, unabhängig von der aktuellen Windrichtung, stellen dabei die vermutlichen Schwachpunkte in der Verbindung zwischen Turm und Fundament dar.

Bei der Verwendung des beschriebenen Algorithmus ohne zusätzlicher Vorkenntnisse und Annahmen besteht grundsätzlich keine Möglichkeit, die absoluten Neigungen des Turmes bzw. seines ersten Flansches in einem übergeordneten Höhensystem zu ermitteln. Stattdessen werden in jeder Epoche die Abweichungen zur fiktiven mittleren Ebene berechnet. Das bringt den Nachteil, dass eine eventuelle Neigung in eine konkrete Richtung rein mathematisch in zwei etwa gleich große Bestandteile mit den positiven und negativen Vorzeichen halbiert wird. Die Richtungswinkel von beiden Bestandteilen unterscheiden sich um genau  $180^\circ$ .

## 2 Ergebnisse der Testmessungen

Da die Beschreibung von allen Mess- und Auswertungsergebnissen den Umfang des Beitrages sprengen würde, werden hier nur die ausgewählten Testmessungen unter Laborbedingungen und an einer typischen WKA näher behandelt. Um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Messsystems in Bezug auf den entwickelten Algorithmus der Datenauswertung zu untersuchen, wurde eine solche Messung in einem abgeschlossenen Messkeller über mehrere Stunden simuliert. Die Messungen mit einem Rotationslaser in der Mitte und drei bzw. vier kreisförmig verteilten Empfängern in der etwa 2m-Entfernung entsprechen der geplanten Messkonstellation im Keller einer typischen WKA (Abb. 2). Da im Messkeller jedoch keine Deformationen zu erwarten und die klimatischen Bedingungen weitgehend konstant sind, können die ermittelten Neigungen als ein reines Messrauschen betrachtet werden.

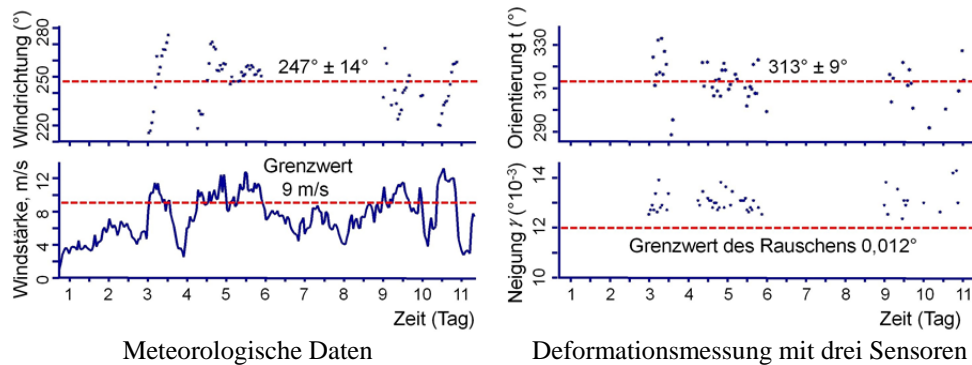
In der Abbildung 4 wird die Auswertung für ein typisches Messintervall von eine Stunde mit drei und vier Sensoren präsentiert. Bei der Interpolation der Messwerten mit einer Abtastrate von 10 Hz ergeben sich in diesem Intervall 36.000 Einzelbestimmungen mit jeweils einer Ebene, einer dynamischen Neigung  $\gamma_k$  in Bezug auf die 0-Ebene des Zeitintervalls und einer Orientierung der maximalen Neigung  $t_k$  im lokalen Koordinatensystem (Richtungswinkel). Auf den präsentierten Grafiken sind die Grenzlinien des Rauschens als eine dreifache Standardabweichung eingetragen, die den Werten von  $0,012^\circ$  ( $0,21 \text{ mm/m}$ ) bzw.  $0,008^\circ$  ( $0,14 \text{ mm/m}$ ) für die beiden verwendeten Konstellationen entsprechen. Die berechneten Orientierungswinkel (unten) sind offensichtlich zufällig im ganzen Intervall zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  verteilt, wie von dem reinen Messrauschen auch zu erwarten wäre. Die Tatsache, dass ein zusätzlicher Sensor und eine Ausgleichung eine solche signifikante Steigerung der Genauigkeit ermöglicht, übersteigt die Erwartungen der Autoren. Benutzung von zusätzlichen Sensoren kann in jedem Fall für die praktische Anwendung empfohlen werden. Die präsentierten Ergebnisse weisen keine statistischen Abweichungen zu den anderen Zeitintervallen dieser Art auf und legen eine Grundlage für die folgende Interpretation von Messungen an den realen Anlagen.



**Abbildung 4:** Ergebnisse der Testmessungen in einem Messkeller (exemplarisch)

Um eine optimale Lösung für eine frühzeitige Erkennung von sicherheitsrelevanten Defekten an WKA-Fundamenten auswählen zu können, bedarf es umfangreicher Testmessungen an mehreren Anlagen. Hier werden nur die Testmessungen an einer typischen 2MW-Anlage präsentiert, die seit dem Erstellen vor etwa 13 Jahren nicht gründlich saniert wurde und zahlreiche gut sichtbare ringförmige Risse im Fundament aufweist. Aus den mehrwöchigen Messergebnissen mit dem entwickelten Messsystem werden hier exemplarisch nur 258 Intervalle von jeweils 60 Minuten (insg. etwas mehr als zehn Tage) ausgewählt, um die prinzipielle Vorgehensweise bei der Deformationsanalyse zu erläutern. In diesem Zeitintervall herrschten die abwechselnden Windverhältnisse von der absoluten Stille bis zu sehr starken Windböen. Die links dargestellten Meteodaten (Abb. 5 links) wurden standartgemäß direkt an der WKA gemessen und dann genauso wie die berechneten Neigungen auf die vollen Stunden gemittelt. Da für die Analyse nur die Intervalle mit dem starken Wind und entsprechend großen Deformationen relevant sind, werden bei der Windrichtung nur die Messungen bei der Windstärke ab der  $9 \text{ m/s}$  in einer  $100\text{m}$ -Höhe berücksichtigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich an allen relevanten Messtagen immer die für diese Jahreszeit üblichen Windrichtungen bei etwa  $247^\circ$  (d.h. etwa aus dem Süd-West) herrschten. Anhand der früher beschriebenen Laboruntersuchungen wurden in den präsentierten Daten (Abb. 5 rechts)

nur die mittleren Neigungen ab  $0,012^\circ$  berücksichtigt, um die realen Deformationen vom unvermeidbaren Messrauschen zu trennen. Es ist deutlich zu erkennen, dass für die betrachtete Anlage die berechneten Richtungswinkel dieser maximalen Neigungen in einem geografischen Koordinatensystem konstant etwa  $133^\circ$  bzw.  $313^\circ$  betragen und dabei keinesfalls der Hauptwindrichtung entsprechen. Diese Tatsache wurde auch bei den Messungen mit den abweichenden Windrichtungen bestätigt, was als ein Zeichen der defekten Verbindung zwischen Turm und Fundament in den entsprechenden Sektoren zu betrachten ist. Selbstverständlich dienen die hier behandelten Ergebnisse nur für eine vorläufige Beurteilung, die bei einer Fachexpertise verifiziert und ggf. später bei den entsprechenden Korrekturmaßnahmen berücksichtigt werden müssen.



**Abbildung 5:** Ergebnisse der Testmessungen an einer Windkraftanlage (exemplarisch)

### 3 Ausblick

Durch eine Rotation des Laserstrahls des entwickelten Messsystems kann praktisch eine unbegrenzte Anzahl von Detektoren höhenmäßig mit einer Genauigkeit im Submillimeterbereich und einer Abtastrate von bis zu 4-5 Hz abgelesen werden. Im Vergleich zu der früher von den Autoren entwickelten Lösungen für Kontrolle der WKA-Fundamente auf der Basis von modernen motorisierten Tachymetern (vgl. Resnik & Schiefelbein 2014) erlaubt das Messsystem wesentlich höhere Abtastraten bei einem Bruchteil der Gesamtkosten, was für die behandelte Anwendung und den Massenmarkt der Windenergie von einer übergeordneten Bedeutung wäre. Sowohl das Messsystem als auch die entwickelten Auswertalgorithmen können nach den entsprechenden Anpassungen bei kritischen Baumaßnahmen wie z.B. beim Einsatz von Düsenstrahlverfahren, bei der Schlitzwandherstellung oder Herstellung von Bohrpfählen dicht an vorhandenen Bauwerken eingesetzt werden.

### Literatur

- RESNIK B., SCHIFELBEIN N. (2014): Kontrolle der Schiefstellung von Windenergieanlagen in Rahmen von periodischen Untersuchungen: Ansätze und Erfahrungen. Sonderheft "Messtechnik im Bauwesen". Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, S. 16-20.
- RESNIK B., SCHIFELBEIN N. (2013): Frühzeitige Erkennung sicherheitsrelevanter Defekte an Fundamenteinbauteilen von Windenergieanlagen. In: Hanke/Weinold (Hrsg.) 17. Internationale Geodätische Woche Obergurgl, Wichmann, Heidelberg, S. 183-192.