

Beobachtung der Bewegung von Windgeneratortürmen

Technische Universität Wien, Inst. f. Geodäsie u. Geophysik
Abteilung Angewandte Geodäsie u. Ingenieurgeodäsie
Johannes Fabiankowitsch

Zusammenfassung: Bauwerksbewegungen an hohen schlanken Windgeneratortürmen werden durch eine Kombination von Beschleunigungssensoren und der Positionsbestimmung mittels Satellitenverfahren (RTK-GPS) kontinuierlich und automatisiert erfasst. Von besonderem Interesse sind die Turmbewegungen während des Hochlaufes (Bremsens) des Rotors und während des Vollbetriebes.

1 Einleitung

Die Nutzung von Windkraft ist seit Jahrhunderten bekannt. Üblich war früher die Nutzung mechanischer Energie in Form von Windmühlen, heute steht ausschließlich die Gewinnung elektrischer Energie im Vordergrund. Diese natürliche Energiequelle Wind hat in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen und wird überall dort ausgenutzt, wo konstante Windvorkommen vorherrschen.

Auf Grund ihrer schlanken Form, ihrer Höhe und der meist exponierten Lage sind diese Türme extremen Einflüssen ausgesetzt, die entweder durch den Betrieb selbst (drehender Rotor) oder durch Umweltbedingungen (Wind, Sonne) hervorgerufen werden. Ursachen und Auswirkungen von induzierten Turmbewegungen von Windkraftanlagen sind bisher noch wenig erforscht.

Der untersuchte Windgeneratorturm hat eine Höhe von 60 Meter (Abb. 1). Die Rotorblätter haben eine Länge von 27 Meter, Rotor samt Rotorblättern wiegt 25 Tonnen. Die drehbare Gondel, welche der Aufnahme aller in der Mastspitze auftretender Kräfte und Momente dient, wiegt 38 Tonnen.

Die Rotorblätter entsprechen der sogenannten „Active Stall“-Bauart, was bedeutet, dass sie sich entsprechend dem Strömungsabriss des Windes einstellen lassen. Dies ermöglicht eine gleichmäßige Drehung des Rotors bei schwankenden Windverhältnissen. Die Gondel, welche baulich vom Turm getrennt ist, kann der

Windrichtung nachgeführt werden. Dies erfolgt immer dann, wenn die Windrichtung im Mittel einer Minute mehr als zehn Grad von der Richtung der Rotorachse abweicht.



Abb.1 Windgeneratorturm 4 Leitzersdorf

2 Aufgabenstellung

Bei der Erfassung von Vibrationsspektren einer Windkraftanlage sind streng genommen verschiedene Betriebsphasen zu unterscheiden.

Die **Phase 1** ist gekennzeichnet durch den Stillstand der Rotorblätter und bedeutet, dass die durch äußere Einflüsse (Sonne, Wind) hervorgerufenen Turmbewegungen gemessen werden können. Es sollen vor allem die kurzperiodischen Schwingungen auf Grund von Windeinflüssen erfasst werden.

Die **Phase 2** ist gekennzeichnet durch drei verschiedene Manipulationen im Betrieb der Anlage: das Abschalten oder das Hochlaufen des Rotors und während des Betriebes (Phase 3) das Nachführen der Gondel in eine neue Windrichtung.

Die **Phase 3** betrifft den Arbeitsbetrieb. Durch die drehenden Rotorblätter ist eine Vielzahl von Vibrationen nachweisbar, diese meist hochfrequenten Schwingungen überlagern sich der Eigenschwingung des Turmes.

Eine Kombination von Beschleunigungssensoren und die Positionsbestimmung mit Satellitenverfahren (RTK-GPS) wird eingesetzt.

3 Messkonzept

Die Verwendung verschiedener Sensoren macht eine zentrale Steuerelektronik notwendig. Die Positionsdaten der Satellitenempfänger müssen zeitlich mit den

Daten der anderen Sensoren synchronisiert werden. Als Steuerelektronik wird die PC-Messelektronik Spider 8 der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik (kurz HBM) eingesetzt. Vier digitale Messverstärker in 4,8kHz- Trägerfrequenz-technik übernehmen die gesamte Signalkonditionierung. Darunter versteht man die Speisung der Sensoren, die Verstärkung der Eingangssignale, die Anschluss-technik für maximal acht Kanäle, ein Rechnerinterface und die Digitalisierung. Diese A/D Wandler sind untereinander synchronisiert.

Das Messkonzept beinhaltet zwei verschiedene Sensortypen. Zum einen werden zwei Beschleunigungsaufnehmer der Serien B12 von HBM, deren Messsystem auf dem Prinzip der Induktion beruht, verwendet. Sie stellen mechanisch betrachtet ein hochabgestimmtes Feder-Masse-System dar.

Als zweiter Sensor wird der Beschleunigungsaufnehmer ISOTRON MODAL-63A-500 der Firma ENDEVCO (USA) eingesetzt, welcher nach dem piezoelektrischen Wirkungsprinzip arbeitet. Er zeichnet sich vor allem durch die Fähigkeit aus, in drei zueinander orthogonalen Achsen Beschleunigungen gleichzeitig zu erfassen.

Diese drei Sensoren wurden zusammen auf eine Plattform montiert (Abb. 2). Die Plattform mit den Sensoren, der Messverstärker für den ISOTRON 63A-500, die Messelektronik Spider 8 und der Laptop sind in der letzten Kammer des Turmes unterhalb der drehbaren Gondel aufgebaut worden.

Mit dem RTK-GPS-System 530 der Firma Leica werden drittens gleichzeitig absolute Positionsbestimmungen durchgeführt. Dazu sind zwei Empfänger am Dach der drehbaren Gondel montiert (Abb.3), ein fester Referenzpunkt wurde in der Nähe des Windgeneratorturmes geschaffen.

Ein großer Vorteil liegt in der Tatsache, dass besonders tiefe Frequenzen, wie etwa die Eigenschwingung des Bauwerkes ohne Phasenverschiebung aufgezeichnet werden können. Eine Synchronisation zwischen CPU-Zeit und Atomzeit wurde mit dem Programm „*Atomsync 115*“ durchgeführt.

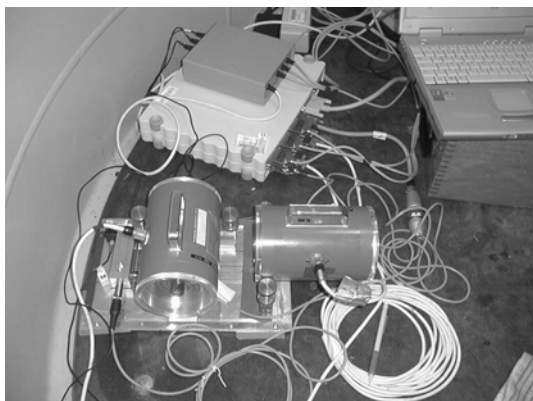


Abbildung 2: Messsystem in der Gondel



Abbildung 3: GPS-Empfänger am Dach der Gondel

4 Messergebnisse

4.1 Messungen mit dem RTK-GPS-System

Während des Stillstandes der Rotorblätter sind Abschattungen und/oder Mehrwegausbreitungen unproblematisch, während ihrer Bewegung aber nicht. Die Abbildung 4 zeigt eine Grundrissdarstellung der Turmschwingung, in der erkennbar ist, dass die Fläche der Bewegung in etwa 1 cm^2 umschließt und eine elliptische Form hat. Letzteres liegt in der vorherrschenden Windrichtung aus Südosten begründet. Die Abbildung 5 zeigt die Drehung der Gondel vom Zeitpunkt des Stillstandes bis zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Windkraftanlage, was in etwa einem Zeitraum von 50 Minuten entspricht. Erst in den letzten 2,5 Minuten beginnt sich die Gondel in die Windrichtung zu drehen, um den Betrieb wieder aufzunehmen. In Abbildung 6 werden die Lagefehler der in Abbildung 5 dargestellten Kanzel-drehung, welche mit den GDOP-Werten errechnet wurden, wiedergegeben. In Phase 1 weisen Lagepositionen eine Genauigkeit von etwa 5 mm aus. Ab 16:02 Uhr vermindert sich die Lagegenauigkeit. Ein Grund dafür könnte eine Abschirmung der Satellitensignale durch ein stillstehendes Rotorblatt sein. Um 16:04 Uhr erreichen die Abweichungen der Lagegenauigkeiten zwischen den beiden Rovern ein Maximum. Um etwa 16:08 Uhr beginnt sich die Gondel in die Windrichtung zu drehen, um den Betrieb wieder aufzunehmen. Die Lagegenauigkeiten der beiden Rover wechseln einander rasch ab und verschlechtern sich zusehends. Durch die ständige Zunahme der Rotordrehung werden die Intervalle zwischen Signalempfang und Unterbrechung immer kürzer. Ab ca. 16:11 Uhr können die beiden Rover die Phasenmehrdeutigkeiten nicht mehr bestimmen, bei weniger als vier Satelliten ist eine Positionsbestimmung nicht möglich.

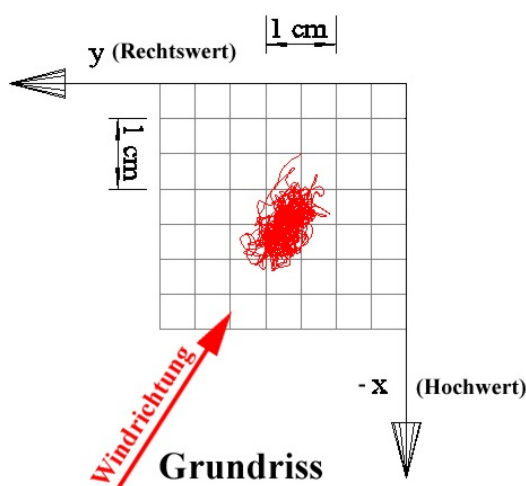


Abbildung 4: Grundrissdarstellung der Turmbewegungen

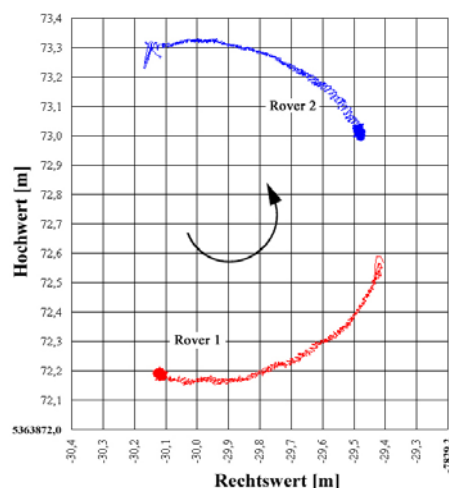


Abbildung 5: Drehung der Gondel Stillstand zur Inbetriebnahme

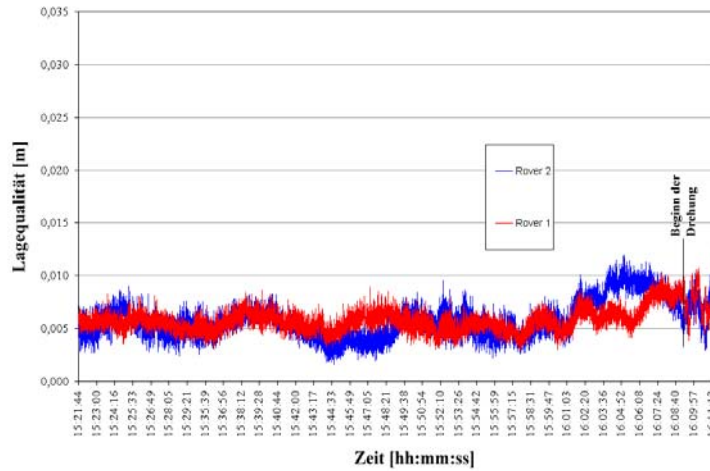


Abbildung 6: Mittlerer Punktlagefehler nach Helmert

Das Amplitudenspektrum der in Abbildung 6 dargestellten RTK-GPS-Daten zeigt die folgende Abbildung 7.

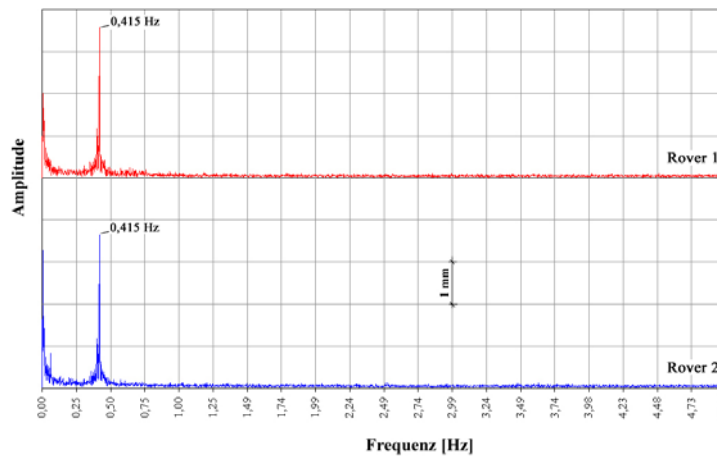


Abbildung 7: Amplitudenspektrum der RTK-GPS-Messungen (Betriebsstillstand)

Beide Rover zeigen eine deutliche Amplitude bis zu 3,6 mm bei einer Frequenz von 0,413 Herz, der sogenannten Eigenfrequenz des Windgeneratorturmes.

4.2. Messungen mit den Beschleunigungssensoren

Alle drei Sensoren arbeiten mit einer Samplingrate von 200 Hertz. In den folgenden Abbildungen 8, 9 und 10 sind die Spektren für die verschiedenen Betriebsphasen im Frequenzbereich von Null bis 5 Hertz dargestellt.

In Abbildung 8 wird der gleiche Frequenzbereich wie in Abbildung 6 wiedergegeben. Die maximalen Amplituden liegen bei allen vier Sensoren bei 0.415

Hertz, was der Eigenfrequenz des Bauwerkes entspricht und sehr gut mit den Werten aus Abbildung 7 übereinstimmt.

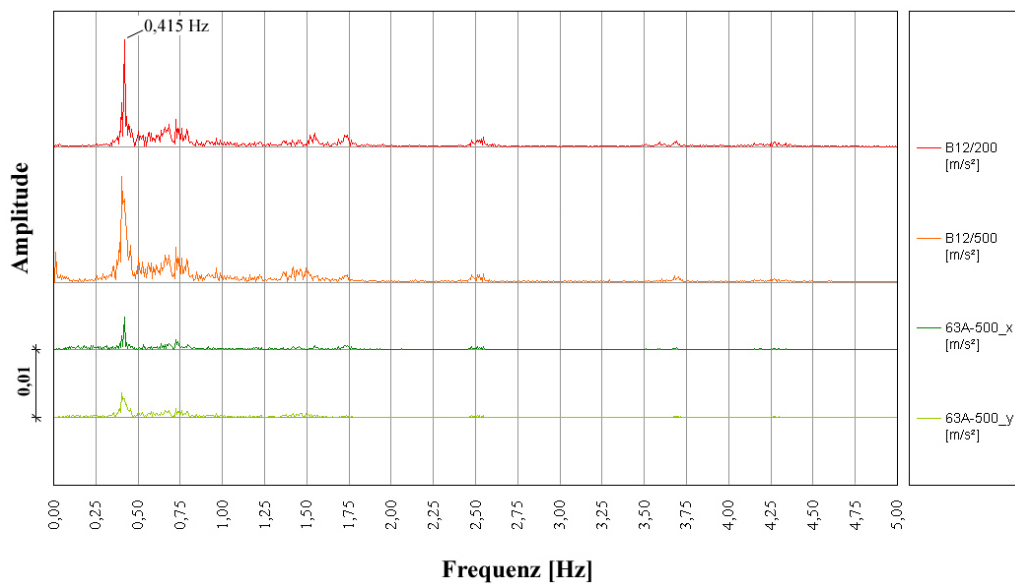


Abbildung 8: Amplitudenspektrum der Sensoren (Betriebsstillstand)

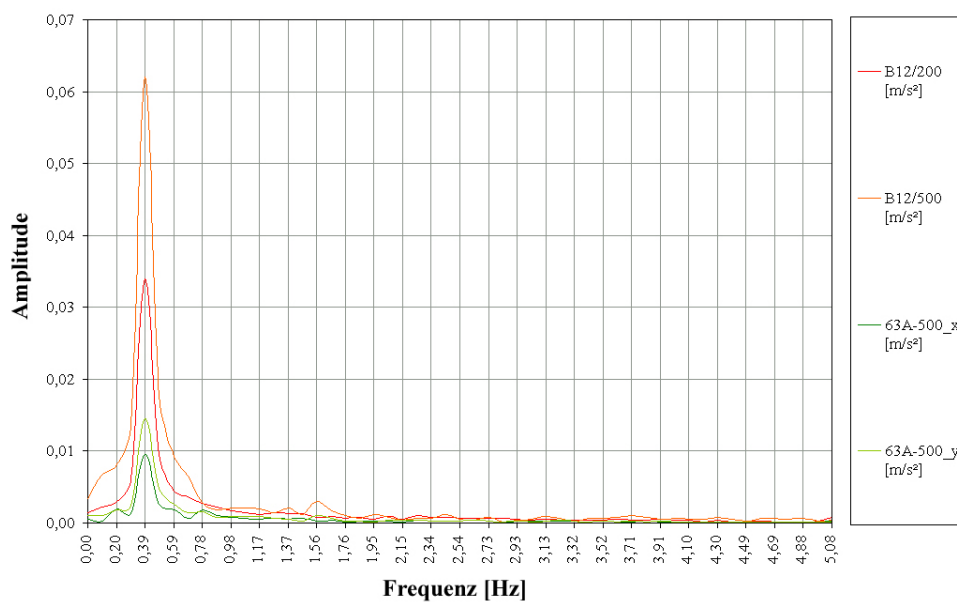


Abbildung 9: Amplitudenspektrum der Sensoren (Gondelbewegung – Bremsvorgang)

Wird die Gondelachse in eine neue Windrichtung gedreht, so erfolgt abschließend ein deutlich ruckartiger Bremsvorgang. Im Vergleich der Sensoren erkennt man (Abbildung 9), dass für alle vier Typen die maximalen Amplituden bei 0,39 Herz liegen. Am empfindlichsten reagiert der Sensor B12/500 mit 0,062 m/s².

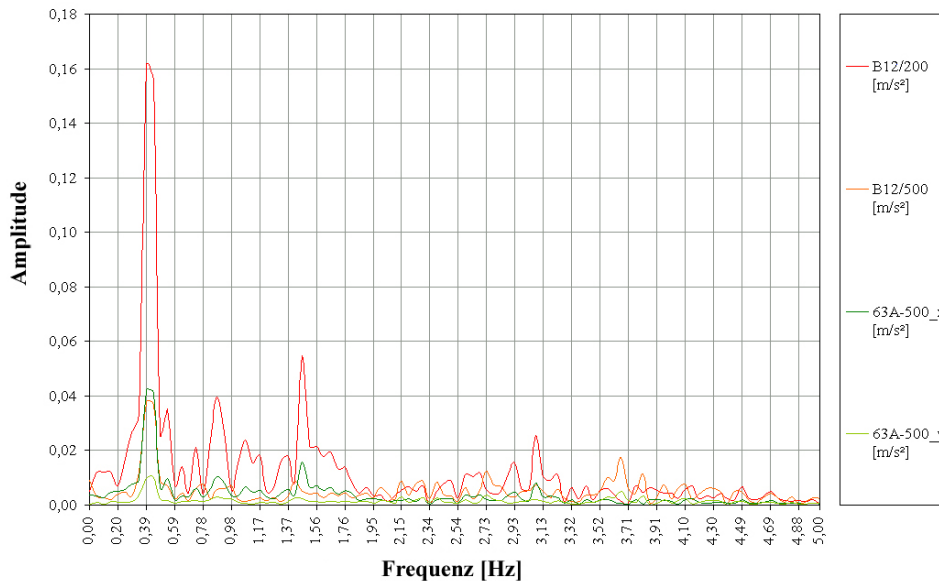


Abbildung 10: Amplitudenspektrum der Sensoren (Hochlauf)

In Abbildung 10 wird ein Ausschnitt des Hochlaufes mit den entsprechenden Amplitudenspektren gezeigt. Der Anteil der höherfrequenten Schwingungen nimmt zu, generell bleiben aber die größeren Amplituden auf den Frequenzbereich unter drei Hertz beschränkt. Ein ähnliches Bild ergibt sich auch für den Vollbetrieb.

5 Zusammenfassung

Der Einsatz des RTK-GPS-Systems für eine derartige Aufgabenstellung ist auf Grund von Abschattungen und Mehrwegsausbreitungen für die Phasen 1 und 2 nur sehr eingeschränkt möglich. Bei still stehendem Rotor aber sind die Bewegungen des Turmes sehr gut erfassbar.

Der triaxiale Beschleunigungsaufnehmer ISOTRON wird üblicherweise eher im hochfrequenten Bereich (bis 2000 Hertz) eingesetzt. Die Messergebnisse haben aber gezeigt, dass er auch im niederfrequenten Bereich (kleiner 5 Hertz) arbeitet, wenn man von der Phasenverschiebung absieht. Die Erfassung der Eigenfrequenz des Turmes und dessen gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der anderen Sensoren belegt dies. Die besten Ergebnisse lieferten die beiden Beschleunigungsaufnehmer B12. Sie sind im untersten Spektrum (nahe 0 Hertz) gut einsetzbar. Dies war auch zu erwarten, da die Größe des Amplitudenfrequenzganges in der Nähe von 0 Hertz gleich 1 ist.

TU Wien, Dipl.-Ing. Dr. Johannes Fabiankowitsch
 Inst. F. Geodäsie u. Geophysik, Abtl. Angew. Geodäsie u. Ingenieurgeodäsie
 Gusshausstrasse 27-29, A-1040 Wien
 jfabian@pop.tuwien.ac.at