

## Condition Monitoring für Fundamente an Windenergieanlagen

### 1 Einleitung

Betonfundamente von Windenergieanlagen (WEA) unterliegen einer starken dynamischen Beanspruchung, die aus starken Windlasten und vielen Lastwechseln während des Betriebes resultieren. Die entstehenden Kräfte werden über Turm und Fundament in den Baugrund abgeleitet. Die Fundamentierung von WEA wurde bisher nicht überwacht.

Zunehmend werden aber bei den in Nutzung befindlichen WEA Schäden an den Fundamenten registriert. Sie weisen Risse, schollenförmige Betonabplatzungen (Bild 1), Ausblühungen und Korrosionserscheinungen auf.



Bild 1: Keilförmige Abplatzung am Fundament durch Bewegung des Turmes

Die IAB Weimar gGmbH entwickelte daher gemeinsam mit der Firma HERMOS Gesellschaft für Steuer- Meß- und Regeltechnik mbH ein Condition-Monitoring-System (Bild 3) zur Erfassung kritischer Zustände an WEA-Fundamenten.

Dieses kostengünstige System kann sowohl zur Erstausrüstung, als auch zur Nachrüstung bestehender Anlagen eingesetzt werden. Es erfolgt eine kontinuierliche Aufzeichnung von Messwerten, die bewertet und komprimiert abgespeichert werden. Im normalen Betriebsfall wird nur in regelmäßigen Abständen eine Funktionsmeldung übermittelt. Erst bei Unregelmäßigkeiten kommen Meldungen über Änderungen zum Anlagenzustand im Fundamentbereich, die dank der gespeicherten Werte auch nachträglich im Trend ausgewertet werden können. Die Funktion wird nachfolgend näher beschrieben.

## 2 Lösung

Die Türme von Windenergieanlagen werden an Land vorwiegend auf massiven Stahlbetonfundamenten gegründet. Der meist stählerne Turm wird dabei über ein vorgefertigtes Stahleinbauteil mit dem Fundament verbunden, da dies positive Auswirkungen auf den Bauablauf hat: der Turm kann nach Aushärten des Betons gestellt werden. An dieser definierten Schnittstelle müssen jedoch auch alle Einwirkungen übertragen werden.

Das Fundament bildet das Bindeglied zwischen Turm und Baugrund, der letztendlich die Belastungen aufnehmen muss. Die Konstruktion des Fundamentes hängt also maßgeblich von den einwirkenden Lasten und von der Beschaffenheit des Baugrundes (aufnehmbare Kräfte) ab [1]. Eine vereinfachte Darstellung des Lastabtrags zeigt Bild 2.

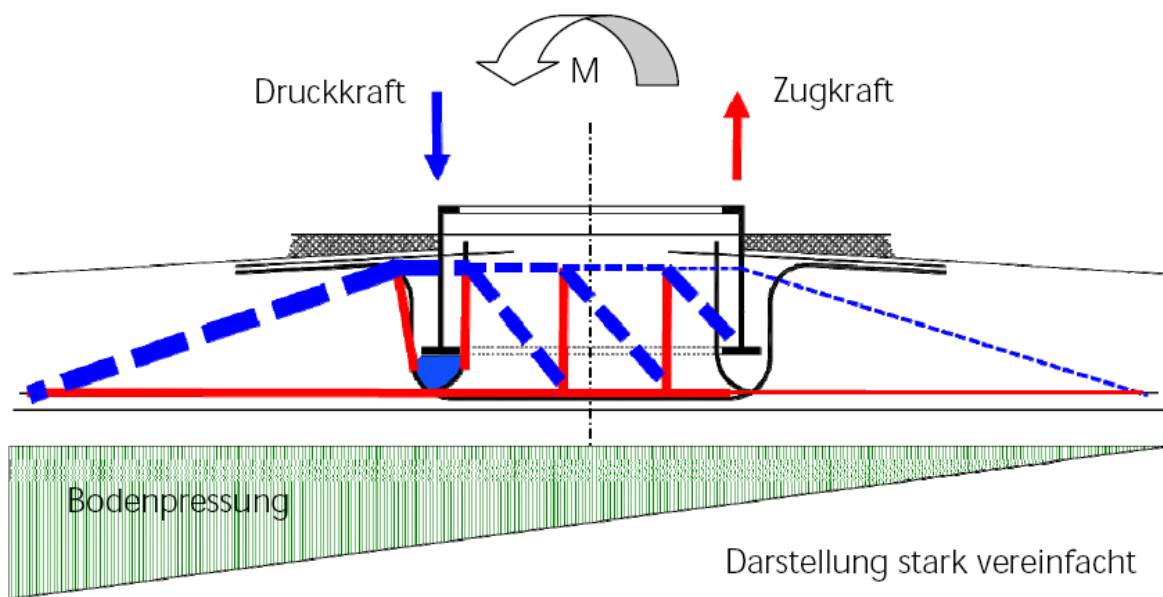


Bild 2: Vereinfachte Darstellung des Lastabtrags mit Einzelflansch [1]

Problematisch ist die Lastübertragung vom Turm zum Fundament. Oft vergrößert sich das Spiel zwischen Turm und Fundament mit zunehmendem Alter des Turms und es bedarf einer regelmäßigen Kontrolle und gegebenenfalls Sanierung.

Wegen der Grenzwertproblematik und einer fehlenden Überwachung geschehen Sanierungen bisher aber eher sporadisch. Es besteht seitens der Anlagenbetreiber große Unsicherheit in der Frage, zu welchem Zeitpunkt eine Sanierung oder gar die Abschaltung der Anlage zwingend notwendig wird.

Geschehen solche Abschaltungen außerplanmäßig und unvorbereitet, dann ist dies mit einer längeren Abschaltdauer verbunden, da der für die Koordinierung der Sanierungsarbeiten notwendige zeitliche Vorlauf fehlt.

Für die Betreiber der Anlagen stellt sich deshalb das dringende Erfordernis, den Zustand des Turmspiels aktuell zu kennen, um notwendige Sanierungen rechtzeitig planen zu können. Als Indikator für sich anbahnende Probleme im Fundamentbereich standen den Betreibern von WEA bisher lediglich optisch zu beurteilende Risse in den Betonfundamenten zur Verfügung.

Die Lösung liegt in der Anwendung eines Condition Monitoring für Fundamente an Windenergieanlagen.

## 2.1 Anforderungen

Bei der Entwicklung des Systems zur Beobachtung des Fundamentzustandes wurden eine Reihe von Anforderungen berücksichtigt:

1. Das Messsystem ist für den stationären Betrieb in einer Windenergieanlage vorgesehen. Damit sollen Diebstahl und Vandalismus vorgebeugt werden.
2. Zielstellung war eine Verwendbarkeit für Neu- und Altanlagen gleichermaßen. Es entstanden drei Varianten mit gleicher Basis:
  - a. Eine in die Steuerung integrierte Softwareversion, bei der die Signalbearbeitung von der zentralen CPU bearbeitet wird. Die softwareseitige Umsetzung erfolgt mit der auf CoDeSys basierenden Entwicklungsumgebung Beckhoff TwinCAT.  
Diese Variante ist einsetzbar bei Neuanlagen, deren Steuerungsprogrammierung kompatibel mit der Monitoringprogrammierung ist.
  - b. Eine im Schaltschrank integrierte separate CPU bearbeitet die Messsignale und übergibt sie binär über potentialfreie Kontakte an die Anlagensteuerung. Optional möglich ist auch die Kommunikation über Standard-Bussysteme. Diese Version ist einsetzbar bei Inkompatibilität von Steuerungsprogrammierung und Monitoringprogrammierung und auch als Nachrüstversion.
  - c. Eine gemäß Bild 3 absolut autark arbeitende Einheit, die verwendet werden kann, wenn kein Eingriff in die Anlagensteuerung gewünscht ist. Diese ist für neue und bestehende Anlagen einsetzbar.
3. Die Bewegungen sollen über Jahre hinweg erfasst und ausgewertet werden können. Insbesondere langfristige Veränderungen über die Betriebszeit der Anlage können damit gegenübergestellt werden.
4. Robustheit und Langlebigkeit der verwendeten Komponenten sind dafür Voraussetzung. Verwendet werden ausschließlich erprobte Industriekomponenten, bei denen durch höhere Stückzahlen in der Fertigung gleichbleibende Qualität und enge Fertigungstoleranzen sichergestellt sind.
5. Gleichzeitig sind damit eine langfristige Lieferbarkeit und Ersatzteilversorgung gewährleistet. Auch nach Ablauf der geforderten Vorhaltungszeit sind im Industriebereich üblicherweise kompatible, meist höherwertige Nachfolgekomponten erhältlich.
6. Bei der Entwicklung des Systems wurde auf die Einhaltung von Industriestandards geachtet bezüglich:
  - a. Betriebsspannungen
  - b. Signalpegeln
  - c. Bauformen
7. Die Komponenten erfüllen Anforderungen für einen internationalen Einsatz. Dies betrifft sowohl Zertifizierungen, als auch Verfügbarkeit.

## 2.2 Technische Umsetzung



Bild 3: Monitoring-System, hier als kompakte Nachrüst-Einheit

An die kompakte Box werden vier Sensoren angeschlossen, die zerstörungsfrei über eine Klebverbindung (Bild 4) am Turm befestigt werden.



Bild 4: Distanzsensor an geklebter Halterung

Gemessen wird eine Relativbewegung des Turmes gegen das Fundament. Erläutert wird dies am Beispiel eines Flachfundamentes wie in Bild 6.



Bild 5: Flachfundament einer WEA

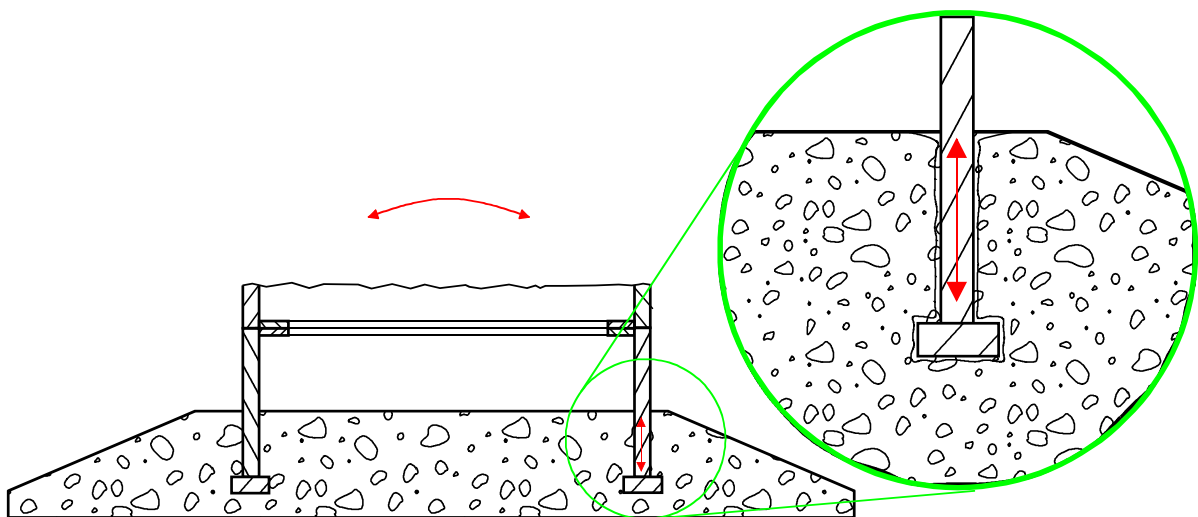


Bild 6: Schema der Bewegungen am Beispiel eines Flachfundamentes

### 2.3 Sensoranordnung

Zur Erfassung einer Relativbewegung zwischen Turm und Fundament wurde eine Sensoranordnung nach Bild 7 festgelegt. Die Sensoren sind im Inneren der WEA in einem Winkel von  $90^\circ$  zueinander zu montieren. Sensor 1 und Sensor 3 werden dabei an der Hauptwindrichtung orientiert, um an dieser Stelle ein Maximum an Auslenkung messen zu können.

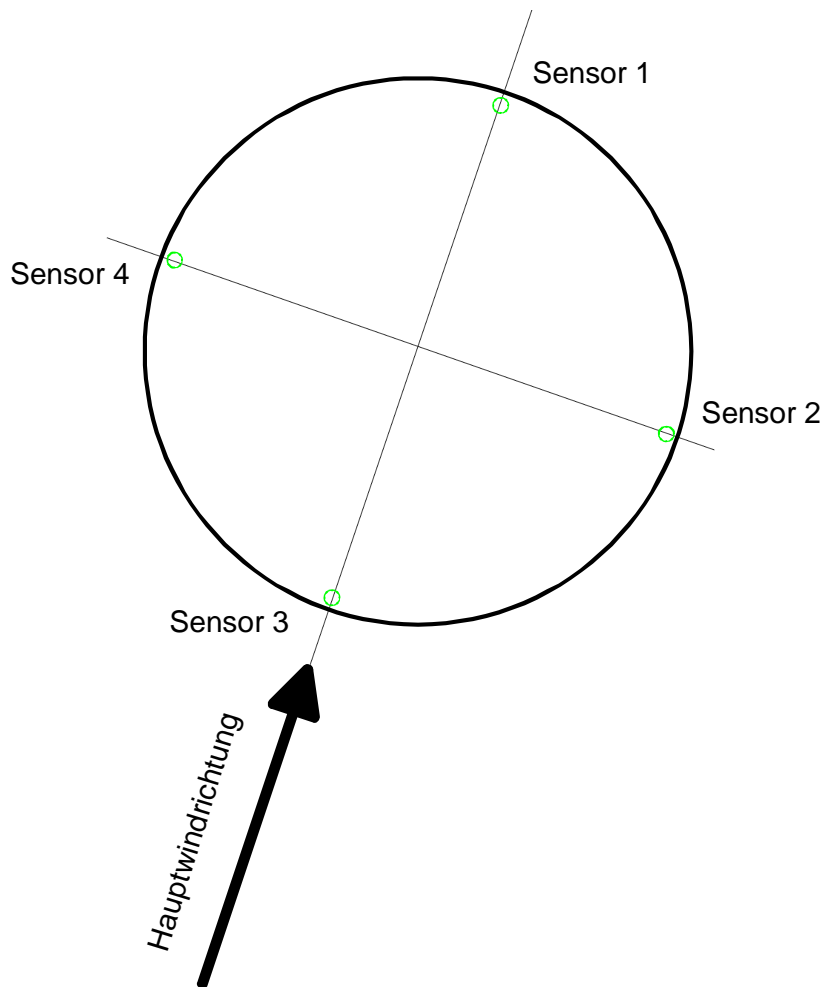


Bild 7: Sensoranordnung nach Hauptwindrichtung

Die Sensorkalibrierung erfolgt grob mit einfachen Messmitteln. Eine Feinkalibrierung ist ohne zusätzliche Hilfsmittel über die integrierte Kalibrierfunktion möglich. Nur für diesen kurzen Zeitraum ist ein Stillstand der Anlage erforderlich, um Stör-Einflüsse durch Windlast zu reduzieren.

Im Kalibriermodus wird der 30-Sek-Mittelwert jedes Kanals auf die Position in der Messbereichsmitte überwacht. Auf den 4 den Kanälen zugeordneten LEDs wird dies durch unterschiedliche Blinkgeschwindigkeiten visualisiert.

Ist der Sensor genau in der Mitte des Messbereiches platziert, leuchtet die LED des zugehörigen Kanals dauerhaft. Sind die Messungen des Kanals ungültig, ist die jeweilige LED dauerhaft aus. Sonst gilt für die Blinkgeschwindigkeit: Je mehr sich mit der Ausrichtung der Mitte des Messbereiches annähert wird, desto schneller blinkt die jeweilige LED.

Der Zustand (Blinkgeschwindigkeit) wird alle 30 Sekunden neu bewertet, d.h. nach dem Verstellen der Sensorposition ist die Bewertung der neuen Position erst nach Ablauf der 30 Sekunden ersichtlich. Leuchten alle 4 LEDs dauerhaft, sind alle Sensoren perfekt in der Mitte ihres Messbereiches angeordnet.

Die prinzipiellen Bewegungsverläufe an einem Turmfuß sind aus vorangegangenen Untersuchungsergebnissen bekannt (Bild 8).

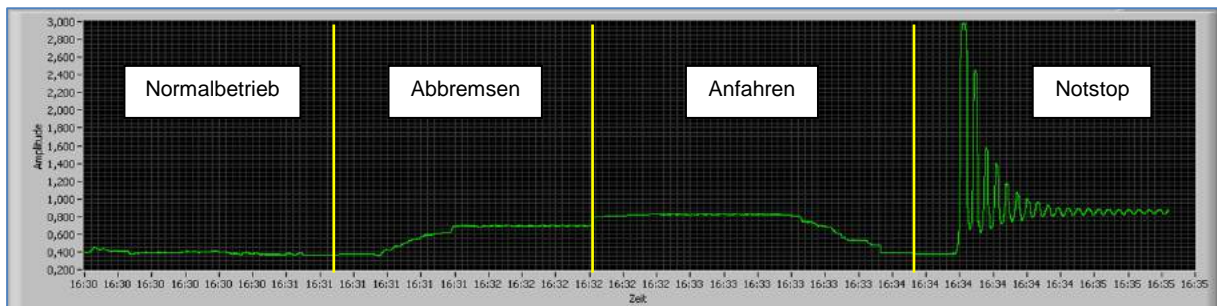


Bild 8: Darstellung von Messergebnissen (Amplitude / Zeit) verschiedener Betriebszustände an einem Sensor mit hoher Relativbewegung (Sensor in Windrichtung)

Normalbetrieb: konstante mittlere Amplituden

Reduzierung der Windlast: Bewegung des Turmes entgegen der Windrichtung

Erhöhung der Windlast: Bewegung des Turmes in Windrichtung

plötzliches Bremsen der Anlage: deutliches Überschwingen des Turmes in Windrichtung

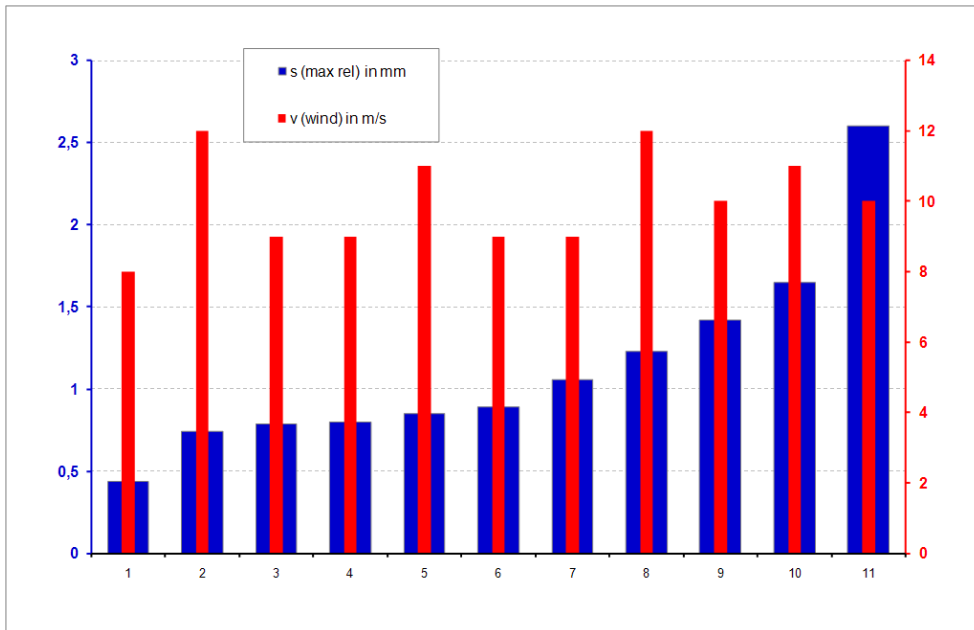


Bild 9: Gegenüberstellung von maximaler Relativbewegung (blau) bei Notstop mit Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit (rot) an 11 vergleichbaren Anlagen

Bild 9 zeigt die Ergebnisse von Relativmessungen an 11 vergleichbaren Anlagen bei Notstop mit den dazugehörigen Windgeschwindigkeiten,

z.B. Anlage 2: 0,74 mm bei 12 m/s (Anlage stabil)

z.B. Anlage 11: 2,60 mm bei 10 m/s (Anlage sanierungsbedürftig)

## 2.4 Auswertung

Das Condition Monitoring System überwacht Relativbewegungen zwischen Turm und Fundament. Diese werden mit entsprechender Sensorik erfasst und ausgewertet. Dafür werden Grenzwertüberschreitungen in Abhängigkeit von Art und Häufigkeit einbezogen.

Die Vielzahl von Typen zu Fundament, Turm und Rotor/Generator erfordert eine angepasste Grenzwertdefinition für die jeweilige Anlagenkombination. Für die Parametrierung des Condition Monitoring Systems haben Einfluss:

- Nabenhöhe
- Anlagengröße
  - Masse der Gondel
  - Rotordurchmesser
- Fundamentart
  - Flachfundament
  - Hybridfundament
- Flanschart
  - Fundamenteinbauteil
  - Ankerkorb
- Turmgestaltung
  - zylindrisch
  - parabelförmig
- Material
  - Stahl
  - Beton
- Turmdurchmesser

Diese Angaben werden über ein Formblatt abgefragt und in ein Rechenmodell übertragen. Anhand der damit berechneten zulässigen Verformungen im fehlerfreien Betrieb können dann Grenzwerte für Anlagenkombinationen definiert werden.

Optional möglich ist die Beobachtung der Bewegung des gesamten Fundamentes gegenüber dem Baugrund (Bild 10).



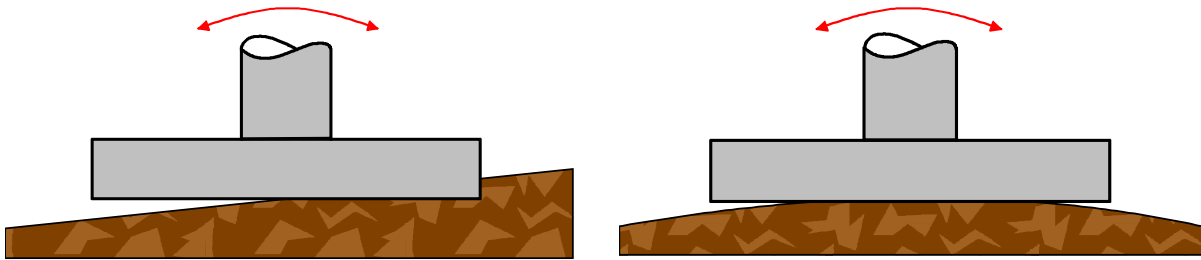


Bild 10: Fundamentbewegung gegenüber dem Baugrund

Hierzu werden zusätzlich Beschleunigungssensoren eingebunden, die Bewegungen des Fundamentes selbst überwachen.

Das System wird dementsprechend anlagenspezifisch vorkonfiguriert ausgeliefert.

Die Auswertung wird für eine möglichst einfache Ausgabe auf drei wesentliche Bereiche der dynamischen Bewegung reduziert:

Normalbereich „GRÜN“	übliche Bewegungen, kein Handlungsbedarf
Planungsbereich „GELB“	überdurchschnittliche Bewegungen, Sanierung in Planung aufnehmen
Handlungsbereich „ROT“	extreme Bewegungen, kurzfristiger bzw. sofortiger Handlungsbedarf, gegebenenfalls Risikoabschaltung

In der Box erfolgen die Messwernerfassung, Auswertung, Speicherung und Ergebnisausgabe (Bild 11).

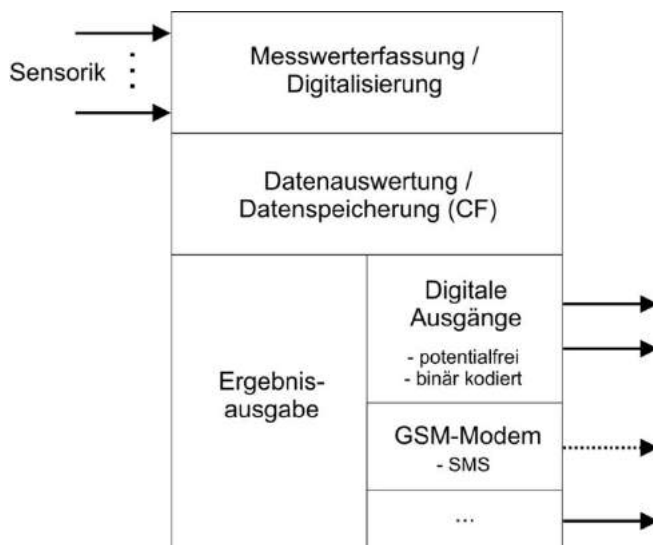
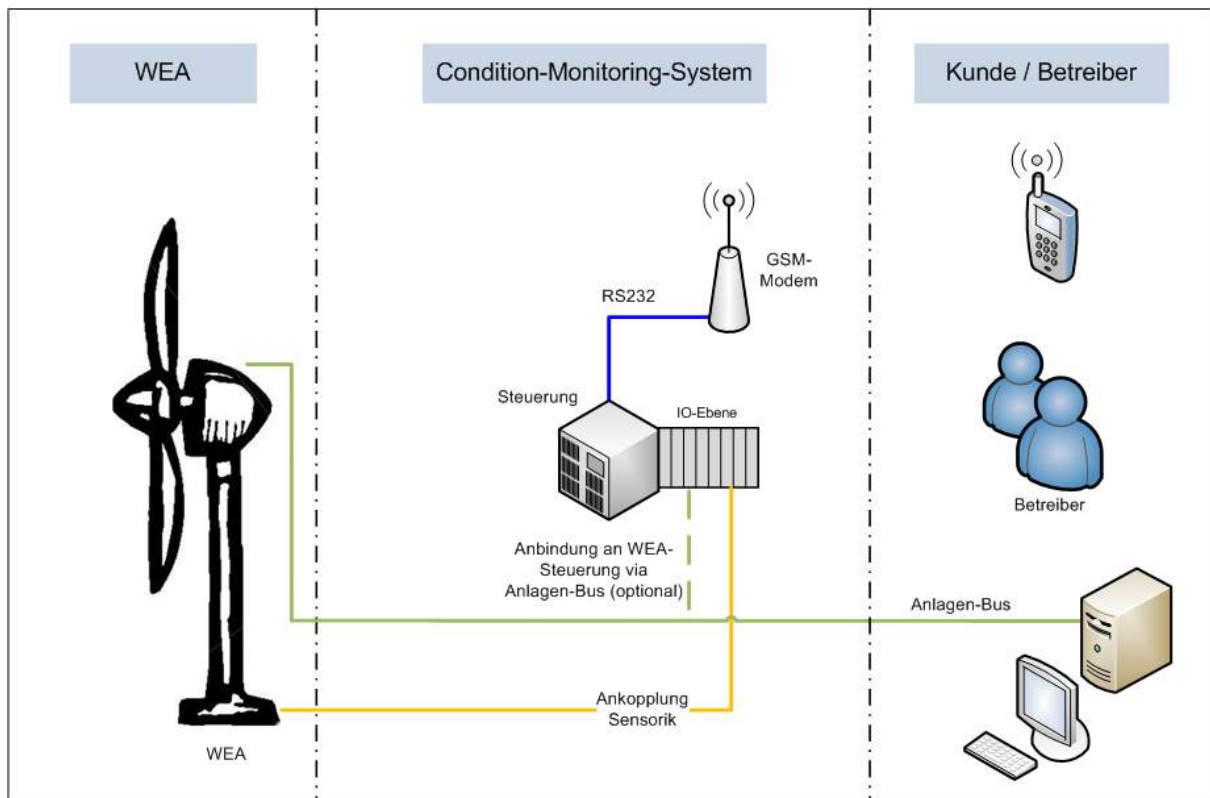


Bild 11: Blockschaltbild des Monitoring-Systems

Die Ergebnisausgabe der Überwachung und Alarmierung erfolgen diskret digital und/oder nach Kundenwunsch. Ein integrierbares Funkmodem ist in der Lage, bei Netzkompatibilität über eine dazugehörige externe Antenne Nachrichten per SMS zu versenden.

Der Betreiber der Windenergieanlage erhält regelmäßig eine leicht zu bewertende Information über den Zustand am Fundament.



Eine Auswahl möglicher Meldungen per SMS sind z.B.:

- Wiederanlauf des Geräts / Spannungswiederkehr
- Ende Initialisierungs- und Kalibriermodus / Beginn Normalbetrieb
- Sensorfehler / Plausibilitätsalarm (Über-/Unterlauf) je Kanal
- wöchentliches Watchdog-Signal („I am alive“)
- definiert wiederholte Grenzwertüberschreitungen ... u.a.

Standardmäßig können als Schnittstelle zu Anlagensteuerungen vier potentialfreie Kontakte herausgeführt werden, die jeweils paarweise vier Zustände signalisieren:

- |  | Sofortmeldung   | Wiederholungsmeldung  |
|--|---|---|
| - Initialisierung / Fehler (binär 0-0)           | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>                       | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>                       |
| - Anlagenzustand gut (binär 1-1)                 | <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> |
| - Anlagenzustand beobachtungswürdig (binär 0-1)  | <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>            |
| - Anlagenzustand mit Handlungsbedarf (binär 1-0) | <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>            |

Zwei Kontakte geben eine Sofortmeldung für einzelne Ereignisse und zwei Kontakte reagieren auf definiert wiederholte Grenzwertüberschreitungen, um eventuelle Einzelereignisse von relevanten Überschreitungen unterscheiden zu können. Erstere werden kurzfristig und Letztere wöchentlich zurückgesetzt.

Die Ergebnisse werden auf einer Speicherkarte abgelegt, so dass auch nachträglich Informationen verfügbar sind. Durch eine komprimierte Ablage sind Ereignisse über mehrere Jahre hinterlegbar. Diese Daten können extern über einen handelsüblichen CF-Cardreader ausgelesen werden. Momentan kommen als Speichermedien 2-GB-Compact-Flash-Karten (Industrial Grade) zum Einsatz.

Das anfallende Datenaufkommen nach oben abgeschätzt ergeben ca. 3 MB Daten pro Woche an anfallenden Daten, auf jeden Fall also nicht mehr als 200 MB pro Jahr. Daraus ergibt sich eine theoretische kontinuierliche Aufzeichnung über einen Zeitraum von 10 Jahren, ohne das Daten gelöscht werden müssen.

Soll eine Aufzeichnung > 10 Jahre erfolgen, können optional größere Speicherkarten eingesetzt (4-GB-Compact-Flash-Karten erfassen theoretisch 20 Jahre Daten) bzw. die Speicherkartendaten zwischendurch ausgelesen und gelöscht werden.

[1] Gutermann, M.: Untersuchung der Schadensentwicklung der Fundamente dynamisch belasteter Windenergieanlagen; Hochschule Bremen; Institut für experimentelle Statik. Bremen : s.n., 2011.

### 3 Zusammenfassung

Betonfundamente von Windenergieanlagen (WEA) unterliegen einer starken dynamischen Beanspruchung, die aus starken Windlasten und vielen Lastwechseln während des Betriebes resultieren. Die entstehenden Kräfte werden über Turm und Fundament in den Baugrund abgeleitet. Die Fundamentierung von WEA wurde bisher nicht überwacht.

Die IAB Weimar gGmbH entwickelte daher gemeinsam mit der Firma HERMOS Gesellschaft für Steuer- Meß- und Regeltechnik mbH ein Condition-Monitoring-System zur Erfassung kritischer Zustände an WEA-Fundamenten.

Dieses kostengünstige System kann sowohl zur Erstausrüstung, als auch zur Nachrüstung bestehender Anlagen eingesetzt werden. Es entstanden drei Varianten mit gleicher Basis:

1. Eine in die Steuerung integrierte Softwareversion, bei der die Signalbearbeitung von der zentralen CPU bearbeitet wird. Die softwareseitige Umsetzung erfolgt mit der auf CoDe-Sys basierenden Entwicklungsumgebung Beckhoff TwinCAT.  
Diese Variante ist einsetzbar bei Neuanlagen, deren Steuerungsprogrammierung kompatibel mit der Monitoringprogrammierung ist.
2. Eine im Schaltschrank integrierte separate CPU bearbeitet die Messsignale und übergibt sie binär über potentialfreie Kontakte an die Anlagensteuerung. Optional möglich ist auch die Kommunikation über Standard-Bussysteme.  
Diese Version ist einsetzbar bei Inkompatibilität von Steuerungsprogrammierung und Monitoringprogrammierung und auch als Nachrüstversion.
3. Eine absolut autark arbeitende Einheit, die verwendet werden kann, wenn kein Eingriff in die Anlagensteuerung gewünscht ist. Diese ist für neue und bestehende Anlagen einsetzbar.

Es erfolgt eine kontinuierliche Aufzeichnung von Messwerten, die bewertet und komprimiert abgespeichert werden. Die Auswertung wird für eine möglichst einfache Ausgabe auf drei wesentliche Bereiche der dynamischen Bewegung reduziert:

Normalbereich „GRÜN“	übliche Bewegungen, kein Handlungsbedarf
Planungsbereich „GELB“	überdurchschnittliche Bewegungen, Sanierung in Planung aufnehmen
Handlungsbereich „ROT“	extreme Bewegungen, kurzfristiger bzw. sofortiger Handlungsbedarf, gegebenenfalls Risikoabschaltung

Die Ergebnisausgabe der Überwachung und Alarmierung erfolgen diskret digital und/oder nach Kundenwunsch über Standard-Bussysteme. Ein integrierbares Funkmodem ist in der Lage, bei Netzkompatibilität über eine dazugehörige externe Antenne Nachrichten per SMS zu versenden.

Angaben für die Systemauslegung

Beschreibung	Wert / Auswahl	Einheit
kundenseitige Kennung der Anlage		
<b>Technische Abfragen</b>		
Nabenhöhe		m
Masse der Gondel		t
Generatorleistung		MW
Rotordurchmesser		m
Flachfundament	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>	
Hybridfundament	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>	
Sockelhöhe Hybridfundament		m
Fundament mit Einbauteil	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>	
Flanschart	Einzel- <input type="checkbox"/> Doppelflansch <input type="checkbox"/>	
Fundament mit Ankerkorb	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>	
Turmform zylindrisch	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>	
Turmform parabelförmig	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>	
Turm aus Stahl	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>	
Turm aus Beton	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>	
Turmdurchmesser über dem Fundament		m
<b>Variantenauswahl</b>		
Variante Softwareintegriert	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>	
Variante Schaltschrankintegriert	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>	
Variante autarke Baugruppe	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>	
<b>Optionen</b>		
Modem		
Netz		
Empfänger-Nummer		Nr.
Häufigkeit der Funktionsmeldung		Wochen
Optionale Anbindung an Bussystem		Typ Bus
Optionale Anbindung Beschleunigungssensoren	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>	