



Kommunikation und Fehlerfrüherkennung in Windenergieanlagen: 10 Jahre Forschung am Institut für Solare Energieversorgungs- technik

P. Caselitz, J. Giebhardt
Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V.
Königstor 59, 34119 Kassel
Tel.: (0561) 7294-343, Fax: (0561) 7294-100
e-mail: dce@iset.uni-kassel.de

1 Einleitung

Die momentan durchgeführte Erschließung von Offshore Standorten für die Errichtung von Windparks stellt völlig neue Anforderungen an die Kommunikations- und Überwachungstechnologien in Windenergieanlagen. Mit Entfernungen zur Küste von z.T. mehr als 100 km müssen für diese Technologien völlig neue Lösungen entwickelt werden. Das Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) beschäftigt sich seit mehr als 10 Jahren mit der Forschung und Entwicklung im Bereich der Kommunikation und Fehlerfrüherkennung bzw. Fehlervorhersage für Windenergieanlagen.

In dieser Zeit wurden mehrere Projekte durchgeführt, bei denen zunächst die Grundlagen für die technische Integration von Kommunikation und Fehlerfrüherkennung geschaffen wurden. Die daraus resultierenden technischen Entwicklungen wurden dann an verschiedenen Windenergieanlagen im Rahmen eines Feldtests über mehrere Jahre erprobt. Im Folgenden verlagerte sich der Schwerpunkt der Arbeit in Richtung der Integration von Kommunikation und Fehlerfrüherkennung in die Steuerungen von Windenergieanlagen und in die Einbindung in übergeordnete Windpark Management Systeme. Die aktuellen Forschungen beschäftigen sich mit der Übertragung der Ergebnisse auf den Bereich der Offshore Windenergieanlagen, wobei der Schwerpunkt insbesondere auf der Entwicklung neuer Wartungsstrategien liegt.

Der nachfolgende Bericht gibt einen Überblick über die Forschungsarbeiten des Instituts für Solare Energieversorgungstechnik während der letzten 10 Jahre und präsentiert die erzielten Ergebnisse. Außerdem erfolgt ein Ausblick über zukünftig erforderliche Arbeitsschwerpunkte für die Weiterentwicklung von Systemen zur Kommunikation und Fehlerfrüherkennung, insbesondere von Offshore Windenergieanlagen.



2 Forschungsprojekte „Kommunikation und Fehlerfrüherkennung“

2.1 Online Messdaten aus dem WMEP-Fernmessnetz

Mit dem Fernmessnetz des „Wissenschaftlichen Mess- und Evaluierungsprogramms“ (WMEP) steht seit dem Jahr 1992 ein System zur Datenerfassung an Windenergieanlagen zur Verfügung. Mit Hilfe von Datenerfassungsgeräten können die Messgrößen Wirkleistung, Windrichtung und Windgeschwindigkeit sowie die Netzkopplung als Statusinformation erfasst werden. Alle Messgrößen werden mit einer Frequenz von 10 Hz abgetastet und zu 5 min-Mittelwerten weiterverarbeitet. Zusätzlich stehen die 10 Hz-Werte auch für trigger-gesteuerte Ereignismessungen und Online-Messungen beliebiger Dauer zur Verfügung. Die Fernmessnetzstandorte sind mit einem Telefonschluß ausgestattet und via MODEM von der Zentrale im ISET anwählbar.

Um erste Untersuchungen zum Schwingungsverhalten von Windenergieanlagen durchführen zu können, wurden im Jahr 1993 über das Fernmessnetz per Modem regelmäßig die 10 Hz Rohdaten der Datenerfassungsgeräte abgefragt. Dabei wurde ein repräsentativer Querschnitt der damalig modernsten Anlagentypen ausgewählt. Die Rohdaten wurden mit verschiedenen Verfahren der elektronischen Datenverarbeitung analysiert, z.B. durch Bildung von statistischen Kenngrößen (Mittelwert, Standardabweichung usw.) oder durch die numerische Spektralanalyse.

2.2 Das Projekt „Fehlerfrüherkennung in Windkraftanlagen“ (1994/02 - 1999/01)

Anfang des Jahres 1994 begannen die Arbeiten an dem vom Bund, vom Land Hessen und von Industriepartnern geförderten Projekt „Fehlerfrüherkennung in Windkraftanlagen“ (Förderkennzeichen 0329304A). In den 5 Jahren der Projektlaufzeit konnten umfangreiche Untersuchungen zu den Grundlagen der Fehlerfrüherkennung und Zustandsüberwachung von Windenergieanlagen durchgeführt werden. Die Ergebnisse dieser Arbeiten flossen direkt in die Entwicklung des ersten kommerziell verfügbaren Fehlerfrüherkennungssystems für Windenergieanlagen ein, das seit 1998 unter der Produktbezeichnung "VIBRO-IC" auf dem Markt angeboten wird.

Die Firma Bruel&Kjaer Vibro GmbH (früher: Schenck Vibro GmbH), Darmstadt, produziert die Hard- und Firmware des Systems. ISET hat die auf wesentliche Fehlerquellen in Windenergieanlagen abgestimmten Detektionsverfahren erarbeitet und durch Computersimulationen und experimentelle Untersuchungen verifiziert. Durch die Überwachung der Leistungskennlinie und der Turmschwingungsspektren werden z. B. verschiedene Rotorfehler wie Unwucht, Schräganströmung, Eisansatz usw. diagnostiziert.



In einem 1998 durchgeführten Feldtest an einigen Anlagen der 600 kW-Klasse hat das Fehlerfrüherkennungssystem "VIBRO-IC" seine Eignung für den Einsatz an Windenergieanlagen bewiesen. Das modulare Systemkonzept ermöglicht eine problemlose Anpassung an neue Anlagen, z. B. der Multimegawattklasse. Die Installation ist auch nachträglich mit geringem Aufwand möglich. Insbesondere für Offshore Projekte ist dabei eine deutliche Reduktion der Ausfallzeiten und des Aufwands für Wartung und Instandhaltung zu erwarten. Aufgrund seiner Robustheit und Netzwerkfähigkeit ist das entwickelte Fehlerfrüherkennungssystem für den Einsatz in diesen Anlagen besonders geeignet.

2.3 EU-Projekt „CleverFarm“ (2000/04 - 2003/09)

Das Projekt "CleverFarm" wurde gefördert im Rahmen des EU JOULE Programms (ERK6-CT-1999-00006). Ziel war es, ein intelligentes, computergestütztes System zu entwickeln, das verschiedene Managementfunktionen für komplette Windparks integriert und mit Überwachungsfunktionen der einzelnen Anlagen verknüpft. ISET hat dabei die Implementierung des Fehlerfrüherkennungssystems VIBRO-IC für Windenergieanlagen übernommen.

Ein Prototyp des CleverFarm-Systems wird zur Zeit im Windpark Nojsomheds Odde (Lolland, Dänemark) getestet. Nach Abschluss der Installationsarbeiten ist das System vollständig in die Netzwerkstruktur des Windparks Nojsomheds Odde (Lolland, DK) integriert. Das System VIBRO-IC wurde in zwei Anlagen des Windparks installiert. Auf der Basis einer Ethernetverbindung mit TCP/IP Protokoll stehen die Daten im gesamten Netzwerk zur Verfügung. In das System ist ein Embedded-PC mit Webserver integriert. Damit können die Daten mit jedem kommerziellen Internet-Browser visualisiert werden. Als Datenformate werden HTML bzw. XML verwendet.

Die Archivierung erfolgt in einer SQL-Datenbank auf dem zentralen Windpark Linux-server. Über Java Server Pages kann auf die Datenbank interaktiv über Webbrowser zugegriffen werden. Homepage: www.cleverfarm.com

2.4 EU-Projekt „Offshore M&R“ (seit 2003/01)

Im Projekt Offshore M&R sollen die Grundlagen für zustandsabhängige Wartungs- und Instandhaltungsstrategien von Windenergieanlagen in Offshore Windparks entwickelt werden. Als Basis solcher Strategien müssen Systeme zur Zustandsüberwachung und zur Fehlerfrüherkennung in die Technologie von Windenergieanlagen und Windparks integriert werden. Dabei werden sowohl erprobte als auch neu entwickelte Verfahren verwendet. Weiterhin werden Algorithmen zur zustandsabhängigen Wartungs- und Instandhaltungsplanung implementiert. Die geplante Software wird als "Plug-In" für



übergeordnete Produkte ausgelegt, z.B. für Windpark Management Systeme (Cleverfarm).

Das Projekt wird in mehreren Phasen durchgeführt. Zunächst erfolgen die Definitionen für den Datenaustausch, die Hardware, die Überwachungsverfahren und die Wartungsstrategien. Danach werden die entwickelten Komponenten in die Technologie von WEA und Windparks eingebunden. Abschließend erfolgt die funktionelle Erprobung aller Komponenten, zunächst im Labor und später im Rahmen eines Feldtests an Windenergieanlagen in mehreren Windparks.

Partner im Projekt sind Forschungseinrichtungen, Anlagenhersteller, Entwickler von Überwachungssystemen, Windparkbetreiber und Anbieter von Wartungs- und Instandhaltungsdienstleistungen, wodurch eine umfassende und zielorientierte Bearbeitung des Projektthemas gewährleistet ist.

Ausführliche Informationen zu den oben beschriebenen Projekten stehen auf den folgenden Internet-Seiten zur Verfügung:

- Fehlerfrüherkennung in Windkraftanlagen: www.iset.uni-kassel.de (Suchbegriff „Fehlerfrüherkennung“ eingeben)
- Cleverfarm: www.cleverfarm.com
- Offshore M&R: www.iset.uni-kassel.de/osmr

3 Projektergebnisse

3.1 Auswertung der WMEP Onlinemessungen

Am Beispiel von numerisch berechneten Spektren sollen die Möglichkeiten der Datenauswertung gezeigt werden, die sich aus den Rohdaten der Online Messungen ergeben. **Abb. 1** zeigt eine Wasserfalldarstellung von Spektren der Wirkleistung einer Windenergieanlage HSW250 (Nennleistung 250 kW) über einen Zeitraum von etwa eineinhalb Jahren. Erkennbar ist ein charakteristischer Verlauf, bei dem einzelne Komponenten hervortreten. Diese Komponenten können den wesentlichen Strukturschwingungen der Windenergieanlage zugeordnet werden. Deutlich zu erkennen sind die Peaks der Rotordrehzahl bei 0,5 Hz, der ersten Turmbiegeeigenschwingung bei 1,1 Hz und der Blattpassierfrequenz bei 1,5 Hz mit den jeweiligen Harmonischen.

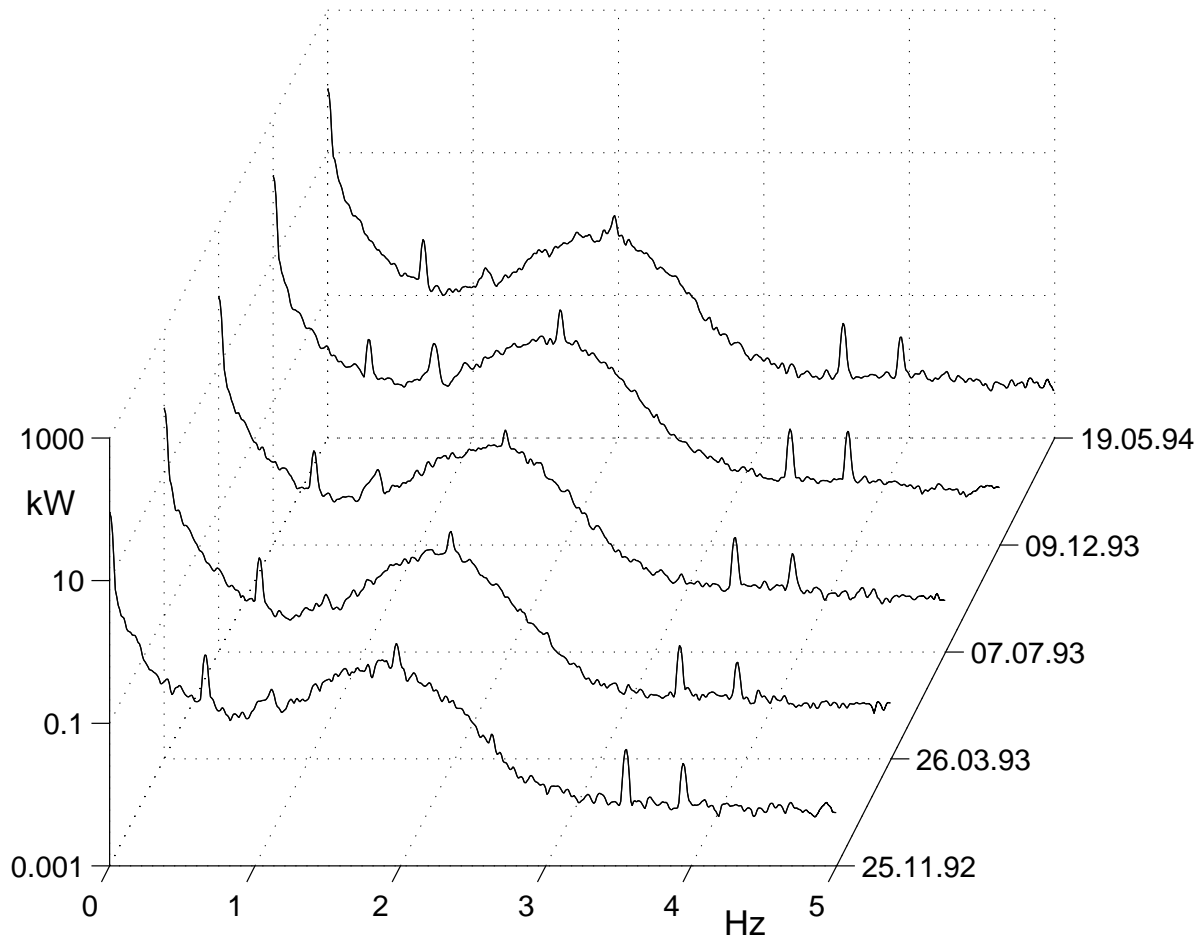


Abb. 1: Wasserfalldarstellung von Spektren der Wirkleistung einer HSW 250

Eine genaue Analyse der Daten ergab, dass zwar erste Kenntnisse über den allgemeinen Zustand einer Windenergieanlage abgeleitet werden konnten. Für die genauere Analyse des Zustands einzelner Komponenten waren die Messdaten aber nur sehr begrenzt geeignet. Insbesondere für die Überwachung der Zustände von Lagern und Getrieben reichte der begrenzte Frequenzumfang von max. 5 Hz der Messungen nicht aus. Im Rahmen des Projekts „Fehlerfrüherkennung in Windkraftanlagen“ wurde daher eine umfassende Konzeption für die Sensorik, Messdatenerfassung und –auswertung erarbeitet, die im folgenden Abschnitt erläutert wird.

3.2 Sensorik und Messtechnik zur Fehlerfrüherkennung

Bei den Untersuchungen und Recherchen zu den Verfahren, die zur Zustandsüberwachung und Fehlerfrüherkennung in Windenergieanlage eingesetzt werden konnten,

zeigte sich schnell, dass auf die zusätzliche Installation von Sensorik und Messtechnik nicht verzichtet werden konnte. Als Ergebnis dieser Arbeiten ergab sich eine messtechnische Konzeption, die sowohl die Analyse der niederfrequenten Strukturschwingungen einer Windenergieanlage als auch die Überwachung von Vibrationen der Lager und Getrieberäder erlaubte. Das Prinzip dieser Konfiguration ist in **Abb. 2** dargestellt.

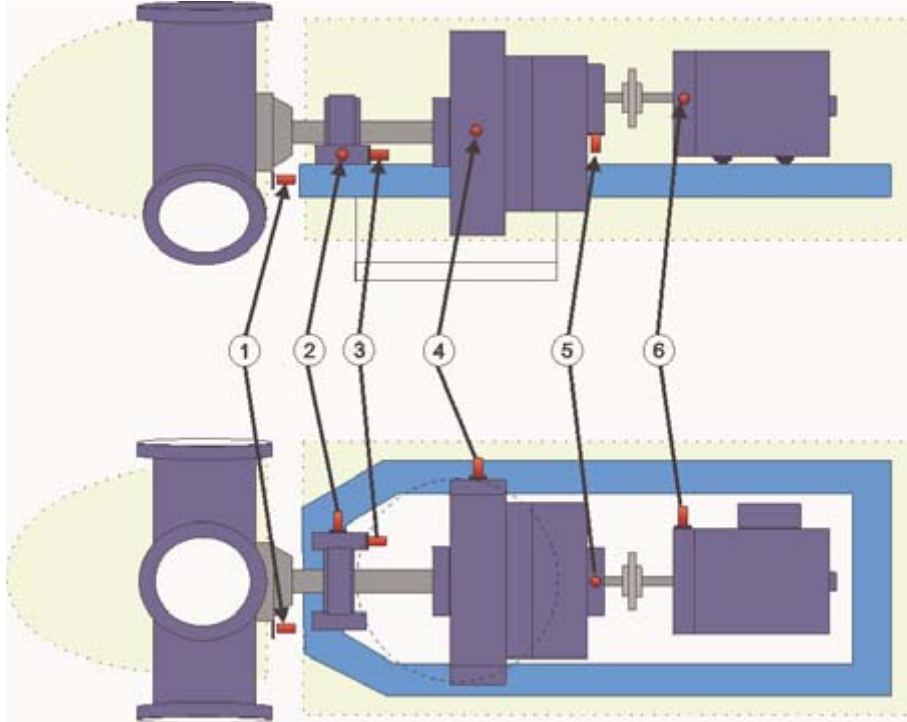


Abb. 2: Typische Sensorkonfiguration zur Fehlerfrüherkennung in Windenergieanlagen

Hierbei dient ein induktiver Näherungssensor (Pos. 1) zur Bestimmung der absoluten Rotorposition für die Analyse Rotordrehwinkel abhängiger Strukturschwingungen. Die Pos. 2,3 und 4 zeigen niederfrequente Beschleunigungssensoren, mit denen die Gondelschwingungen im Frequenzbereich von 0,2 Hz bis zu 10 Hz erfasst werden. Sensor 3 ist in Richtung der Rotorachse orientiert. Die Sensoren 2 und 4 sind quer zur Rotorachse angeordnet. Diese Sensoren erlauben gleichzeitig die Erfassung von Lagervibrationen bis zu ca. 500 Hz. Die Pos. 5 und 6 zeigen Sensoren zur hochfrequenten Vibrationsmessung (bis 20 kHz) an schnell drehenden Lagern und Getrieberädern. Für die relativ kompakten Getriebe der Feldtestanlagen mit Leistungen bis 600 kW war die Verwendung von zwei Sensoren ausreichend. Bei den wesentlich größeren Getrieben von Windenergieanlagen der Multimegawatt-Klasse empfiehlt sich der Einsatz weitere Vibrationssensoren.

Zur Klassierung der Beschleunigungs- und Vibrationsmesssignale müssen zusätzliche Messgrößen erfasst werden (z. B. Wirkleistung und Windgeschwindigkeit). Für die Spektralanalyse müssen außerdem die Drehfrequenzen verschiedener Wellen bekannt



sein. Diese Informationen können aus Signalen von Impulsgebern gewonnen werden. Die oben genannten Signale sowie die ebenfalls benötigten Statussignale (z. B. Netzkopplung des Generators) können mit geringem technischen Aufwand aus der Anlagensteuerung ausgekoppelt werden. Durch die Verwendung von Optokopplern ist dabei eine vollständige galvanische Trennung zwischen Windenergieanlage und Fehlerfrüherkennungssystem gewährleistet.

3.3 Analyse von Vibrationen und Strukturschwingungen an Windenergieanlagen

3.3.1 Vibrationen und Körperschall

Zahneingriffsvorgänge in Getrieben und das Abrollen von Wälzkörpern in Lagern von Getrieben und Generatoren erzeugen Körperschall. Dieser Körperschall lässt sich in Form von Vibrationen an der Gehäuseoberfläche detektieren. Als Beispiel für die Analyse von Vibrationssignalen ist in **Abb. 3** das Spektrum des Getriebekörperschalls einer 600 kW Anlage dargestellt. Das obere Diagramm zeigt das Leistungsdichtespektrum. Deutlich zu erkennen ist ein Peak bei ca. 600 Hz und dessen Harmonische. Diese Frequenz korrespondiert mit dem Zahneingriff der dritten Getriebestufe. Um solche periodischen Anteile in einem Spektrum hervorzuheben, eignet sich die Cepstrum-Analyse. Das Cepstrum eines Signals ergibt sich durch die nochmalige Anwendung des FFT-Algorithmus auf den Betrag des Leistungsdichtespektrums. Im unteren Diagramm von **Abb. 3** ist das Cepstrum dargestellt. Die Peaks repräsentieren jeweils periodische Anteile im Spektrum, die zu den Harmonischen verschiedener Zahneingriffsfrequenzen, Überrollfrequenzen und Wellendrehzahlen eines Getriebes gehören.

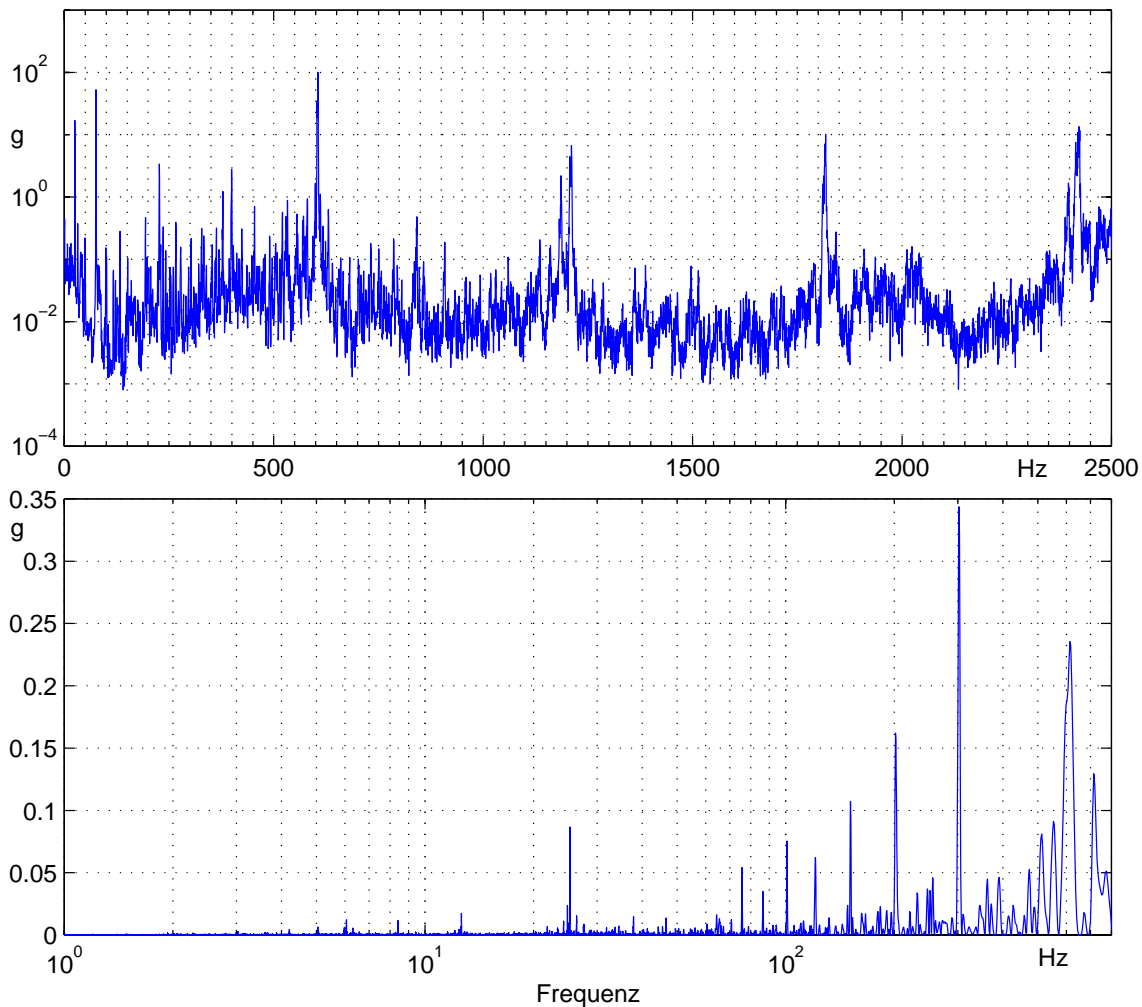


Abb. 3: Leistungsdichtespektrum und Cepstrum des Getriebekörperschalls

3.3.2 Strukturschwingungen der Windenergieanlage

Neben Lagern und Getriebe muss auch die tragende Struktur einer Windenergieanlage überwacht werden. Schäden an der Struktur entstehen durch Schwingungen, die durch die aerodynamischen Kräfte am Rotor induziert werden. Am Beispiel der mit Rotordrehzahl eingprägten Gondelschwingung, der sogenannten 1p-Schwingung, sollen diese Effekte verdeutlicht werden. So wird z.B. durch eine Massenunwucht des Rotors die Gondel zu Schwingungen quer zur Rotorachse angeregt, die über die in Abschnitt 3.2 beschriebenen Beschleunigungssensoren erfasst werden. Aerodynamische Unsymmetrien regen die Gondel dagegen zu Torsionsschwingungen um die Hochachse des Turms an

Um die oben genannten Rotorfehler zu detektieren, werden die Amplituden und Phasen der 1p-Gondelschwingung in einem Polardiagramm dargestellt. **Abb. 4 links** zeigt ein solches Diagramm für die Querschwingung der Gondel einer Megawattanlage. Es liegen weder ausgeprägte Amplituden noch eine konstante Phasenlage vor, so dass



sich keine Hinweise auf eine Massenunwucht ergeben. Die in **Abb. 4 rechts** gezeigten Werte der Gondeltorsionsschwingung zeigen eine Häufung von Amplitudenwerten bei einem Winkel von ca. 30° . Dies deutet auf eine sich entwickelnde aerodynamische Unsymmetrie des Rotors hin. Zur Einschätzung der weiteren Entwicklung der Fehlerausprägung müssen die Langzeittrends von Amplituden und Phasen erfasst und ausgewertet werden.

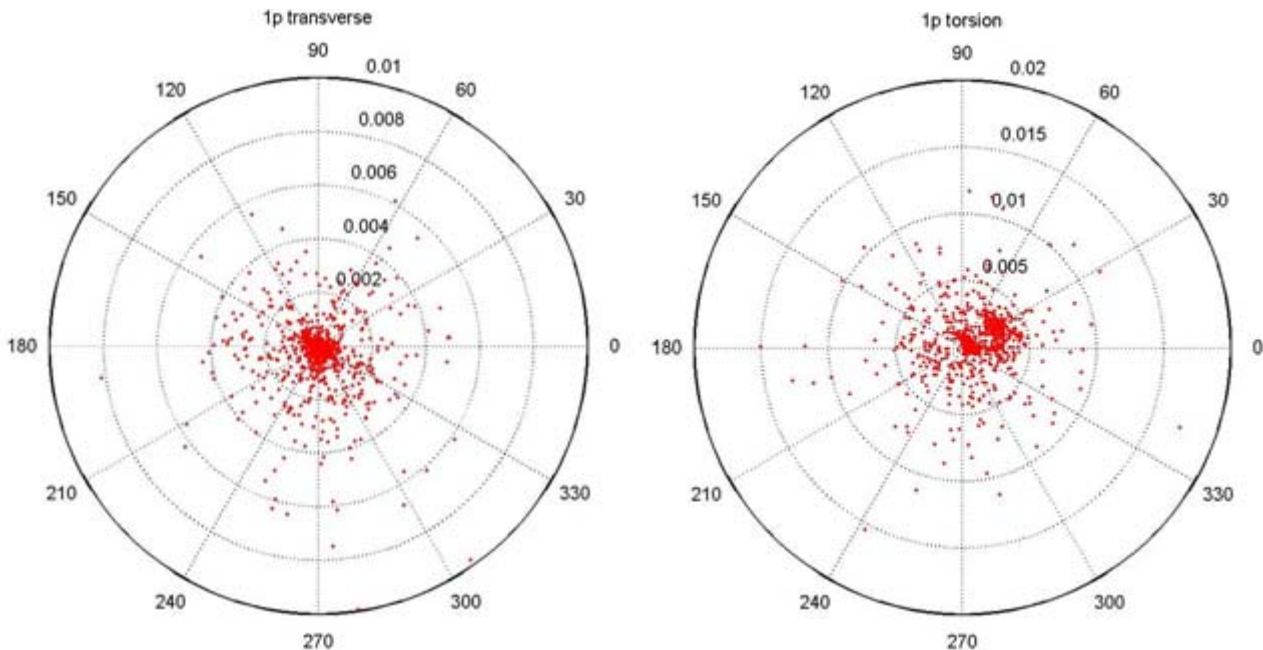


Abb. 4: Polardarstellung der Gondelschwingungen bei Rotordrehfrequenz

3.4 Kommunikationsstrukturen für Windenergieanlagen

Moderne Windparks verfügen heute über leistungsfähige Kommunikationsstrukturen. Dabei hat sich die Verwendung des Netzwerkstandards Ethernet weitgehend durchgesetzt. Für die Überbrückung weiterer Entfernungen und zur Erhöhung der EMV-Verträglichkeit werden dabei optische Übertragungskanäle verwendet (Glasfasern). Damit lassen sich problemlos die heute üblichen Datenraten von 100 Mbit/s realisieren. Außerdem ermöglicht der Einsatz der Glasfaser auch die Verwendung neuer Techniken zur Sprachkommunikation, z.B. „Voice over IP“. Das erlaubt dem Wartungspersonal die sichere Kommunikation, z.B. von einem Offshore Windpark zur Übergabestation an Land.

Abb. 5 zeigt die Netzwerkstruktur eines Windparks mit einem zentralem Server („Farm Server“), wie sie auch im Projekt Cleverfarm realisiert wurde. Die Verwendung von Internet-Technologien (TCP/IP-Protokoll mit HTML bzw. XML Datenformat) ermöglicht

dabei den Zugriff auf die aktuellen Betriebsdaten aller Anlagen sowie auf die Datenbanken des Farm Servers von jedem Punkt des Windparks aus.

Im Farm Server werden auch die Betriebsdaten und Zustandsinformationen der einzelnen Windenergieanlagen in Datenbanken archiviert. Der Datenabruf erfolgt mit einem Internet-Browser über ein Virtual Private Network (VPN) durch Einwahl in einen ISDN Router oder über GSM/GPRS Verbindung. Spezielle Zugangssoftware ist daher nicht erforderlich, der Zugang kann mit jedem Internet fähigen Rechner realisiert werden. Über die gleichen Informationskanäle können auch Alarime an das Wartungspersonal des Windparks gesendet werden, wenn kritische Zustände einzelner Windenergieanlagen dies erfordern.

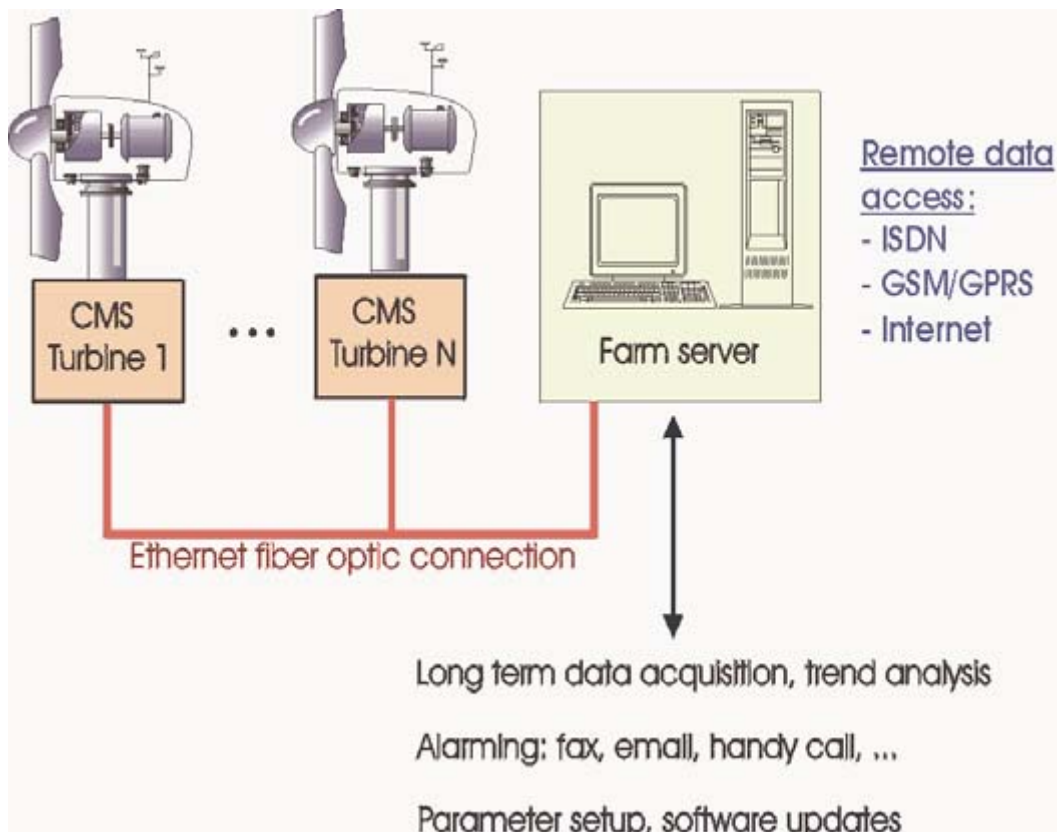


Abb. 5: Netzwerkstruktur in modernen Windparks

4 Zukünftige Entwicklungen im Bereich Kommunikation und Fehlerfrüherkennung

Der wirtschaftliche und technisch sichere Betrieb von Windparks mit Anlagen der Multimegawattklasse erfordert eine leistungsfähige Kommunikationsstruktur und eine effektive Zustandsüberwachung. Dies gilt insbesondere für Offshore Windparks. Das Institut für Solare Energieversorgungstechnik arbeitet daher in verschiedenen Berei-



chen an der Weiterentwicklung und Implementierung solcher Strukturen mit. Im Rahmen des Projekts „Offshore M&R“ werden u. a. die Grundlagen für die Kommunikation zwischen der Steuerung einer Windenergieanlage mit einem Fehlerfrüherkennungssystem erarbeitet. Auch der Informationsaustausch mit einem übergeordneten Farm Server (siehe **Abb. 5**) ist Gegenstand des Projekts. Schließlich werden neue Konzepte für die Archivierung von Daten und die zustandsorientierte Wartung und Instandhaltung von Offshore Windenergieanlagen entwickelt.

4.1 Standardisierung und Normen

Für den Bereich der Kommunikation in Windenergieanlagen wird zur Zeit ein internationaler Standard erarbeitet, die IEC 61400-25 „Communications for monitoring and control of wind power plants“. In die verschiedenen Revisionschritte der Norm ist auch ISET mit einbezogen.

Für Fehlerfrüherkennungs- und Zustandsüberwachungssysteme existieren noch keine offiziellen Normen. Erste Ansätze für eine Standardisierung resultieren in Form von Empfehlungen der Versicherungsgesellschaften Allianz und Gothaer Versicherung. Hier werden Anforderungen an die Funktionalität von Fehlerfrüherkennungssystemen und an Verfahren zur Wartung und Instandsetzung von Windenergieanlagen formuliert. In diese Anforderungen flossen auch Ergebnisse der ISET-Projekte ein.

4.2 Anforderungen an die Hersteller

Zur Gewährleistung einer effektiven und wirtschaftlichen Wartung und Instandhaltung sind die folgenden Anforderungen an die Hersteller von Windenergieanlagen zu formulieren:

Lückenlose Dokumentation aller Komponenten der Anlage, insbesondere der kinematischen Daten von Lagern und Getrieben;

Aktualisierte Wartungsvorschriften, die auch an konstruktive Änderungen der jeweiligen Anlagentypen angepasst werden;

Logbücher über durchgeführte Arbeiten, z.B. den Austausch von Komponenten, den Wechsel von Schmierstoffen usw.;

Um diese Informationen immer aktuell zu halten, bietet sich der Einsatz von elektronischen Datenbank- und Informationssystemen an. Diese werden auf dem zentralen Farmserver installiert und stehen dann in jeder Anlage des Windparks zur Verfügung. Die gespeicherten Informationen können vom Windparkbetreiber oder von Wartungsdienstleistern durch Einwahl in den Farmserver abgerufen und für die Planung der



erforderlichen Arbeiten verwendet werden. Auf gleichem Wege erfolgen dann auch die Updates der oben aufgelisteten Daten durch den Hersteller der Windenergieanlage.

5 Literatur

/1/ P. Caselitz, J. Giebhardt, M. Mevenkamp: Online fault detection and prediction in wind energy converters, Tagungsband EWEC 1994, Thessaloniki, Griechenland

/2/ P. Caselitz, J. Giebhardt, M. Mevenkamp, M. Reichardt: Einsatz von Fehlerfrüherkennungssystemen zur effektiveren Instandhaltung von Windkraftanlagen, Tagungsband DEWEK 1998, Wilhelmshaven

/3/ P. Caselitz, J. Giebhardt, M. Mevenkamp, J. Petschenka, M. Reichardt: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Fehlerfrüherkennung in Windkraftanlagen“, ISET, Kassel 1999

/4/ P. Caselitz, J. Giebhardt: Advanced maintenance and repair for offshore wind farms using fault prediction techniques, Tagungsband “The World Wind Energy Conference and Exhibition”, Berlin, 2-6 July, 2002

/5/ M. Durstewitz, C. Enslin, B. Hahn, M. Hoppe-Kilpper, K. Rohrig: Windenergie Report Deutschland 2001, ISET, Kassel, 2002

/6/ Committee draft of IEC 61400-25, 2003

/7/ T. Gellermann, G. Walter: AZT-Untersuchungsbericht „Anforderungen an Condition Monitoring Systeme für Windenergieanlagen“, München, 2003

/8/ Gothaer Versicherung: Grundsätze zur zustandsorientierten Instandhaltung von Windenergieanlagen, 2002