

Smarte Windenergieanlagen und -parks brauchen Digitalisierung



Fraunhofer IWES
Prof. Dr. Jan Wenske
jan.wenske@iwes.fraunhofer.de

DLR
Dr. Manfred Imiela
manfred.imiela@dlr.de

Fraunhofer IEE
Berthold Hahn
berthold.hahn@ee.fraunhofer.de

Bei der Entwicklung von Windenergieanlagen (WEA) neuester Generation ist ein ungebrochener Drang bezüglich Größenwachstum zu beobachten, d. h. größere Rotordurchmesser, Nabenhöhen sowie höhere Nennleistungen. Das Versprechen der Hersteller und Betreiber lautet hierbei, eine weitere Verringerung der spezifischen Kosten pro eingespeister kWh zu erreichen. Ob das Versprechen in dieser Form einlösbar sein wird, hängt jedoch weniger von einer bloßen Skalierung bisheriger Anlagentechnik ab, sondern vielmehr vom verstärkten Einsatz neuer Technologien, um bestehende Optimierungspotenziale zu heben.

Mögliche Ansatzpunkte sind vielfältig und umfassen die gesamte Wertschöpfungskette im Bereich der Windenergienutzung und den kompletten Lebenszyklus von WEAs und Windparks, d. h. Planung, Design, Herstellung, Installation, Betrieb und Entsorgung. Die überwiegende Mehrzahl der Optimierungsansätze basiert eindeutig auf dem konsequenten Einsatz von „smarten“ Technologien unter umfassender Nutzung (Erhebung und Verknüpfung) von verschiedensten Daten- und Informationsquellen, um den individuellen Zustand und die wirksamen Umwelteinflüsse auf die einzelnen Anlagen kontinuierlich zu bestimmen und für deren Betrieb nutzbar zu machen. Eine Analyse des aktuellen Ist-Zustands offenbart speziell hier noch erhebliche Defizite.

Das Idealbild einer „smarten“ Windenergieanlage und damit auch entsprechender Parks oder Cluster ist das eines sich möglichst selbsttätig anpassenden, optimierenden Systems. Wobei die Anpassungsfähigkeit wiederum eine große Bandbreite von möglichen und zeitlich veränderlichen Umwelt- und Umgebungseinflüssen abdecken sollte. Das heißt für Windenergieanlagen im einfacheren Fall zeitlich veränderliche, standortspezifische Windbedingungen und im komplexeren Fall die selbsttätige Betriebsanpassung u. a. unter Berücksichtigung von aktuell verfügbaren Servicere Ressourcen, des individuellen Anlagenzustands und von Marktbedingungen bzw. Geschäftsmodellen des Betreibers.

Es ist offensichtlich, dass diese Vision einer „smarten“ Anlagentechnik ein Mehr an Digitalisierung in jeder Phase des Entwicklungs- und Produktlebenszyklus bedarf. Beispielhaft soll dies für einige der wichtigsten Phasen andiskutiert werden. Es zeigt sich,

dass alle Detailverbesserungen auf einer umfassenden und effizienten Nutzung von Datenquellen basieren. Damit ergibt sich übergreifend die Notwendigkeit weiterer Standardisierungen bei Datenformaten, Daten- und Prozessmodellen, Datenbanken, Schnittstellen und Verknüpfungen.

Beispiel WEA-Designprozess

Der aktuelle Designprozess von Windenergieanlagen basiert auf einer relativ groben Klassifizierung von Umgebungsbedingungen und deren Unsicherheiten. Diese Eingangsgrößen werden mit Hilfe der digitalen Simulation mit verschiedenen Softwaretools verarbeitet und designabhängig in Lastverläufe umgerechnet, welche wiederum mittels Klassifizierungsverfahren für Betriebsfestigkeitsbetrachtungen verdichtet werden.

Aus den Häufigkeitsverteilungen der Lastzyklen und den verschiedenen Materialkennwerten werden im Anschluss, unter Berücksichtigung einer Vielzahl von teilweise pauschalen Sicherheitsfaktoren, Festigkeitsnachweise bzw. Designoptimierungen durchgeführt. Dieser aktuelle Design- und Entwurfsprozess berücksichtigt die jeweiligen Unsicherheiten und Ungenauigkeit nur pauschal und nicht durchgehend probabilistisch (berücksichtigt also nicht ihre Wahrscheinlichkeit). Dies führt i. d. R. zu sehr konservativen Designs, welche speziell für große WEA zunehmend unwirtschaftlich werden und damit im Widerspruch zum oben genannten Versprechen einer weiteren Kostensenkung stehen.

Die Alternative einer durchgängig probabilistischen Designmethodik benötigt jedoch eine möglichst erwartungstreue stochastische Beschreibung der jeweiligen Unsicherheiten, Toleranzen und sonstigen Ungenauigkeiten. Diese müssen anschließend in umfangreichen Variantenrechnungen in ein möglichst individuelles, probabilistisches Anlagenmodell transformiert werden. Ein solches WEA-Modell kann dann eine Grundlage für den „smarten“ Betrieb der jeweiligen Anlage an ihrem individuellen Standort mit spezifischen Umweltbedingungen bilden. Hierfür sind aber weitere intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für eine geeignete Modellbeschreibung und Auslegungs- und Berechnungsmethodik von großen Windenergieanlagen notwendig.

Selbstverständlich benötigt eine „smarte“ WEA neben einer geeigneten Auslegungsmethodik auch die inhärente Möglichkeit durch entsprechend erweiterte Aktuatorik, die aus der Windenergienutzung resultierenden parasitären Lasten zu minimieren bzw. zu glätten. Ein Beispiel hierfür ist die Entwicklung von intelligenten Aktuatortechnologien im Rahmen des Smart Blades-Verbundforschungsvorhabens (DLR, ForWind, Fraunhofer IWES).

Speziell die komplexen Zusammenhänge zwischen standortspezifischer Windfeldcharakteristik, Wake-Effekten, Akustik, Aerodynamik, Aeroelastik, optimierten strukturellen Eigenschaften und optimieren Fertigungsprozessen bei zukünftigen, sehr großen Rotordurchmessern (>150m) erfordern im Entwurfs- und Designprozess durchgängige Toolketten mit performanten Schnittstellen, um die Design- und Optimierungsprozesse ressourceneffizient durchführen zu können. Komplexe CFD- und FE-Berechnungen (Computational Fluid Dynamics/ Finite Elemente) müssen für die jeweilige Anwendung angepasst werden, z. B. Detailoptimierung des Rotorblattprofils, Einfluss der Geländetopographie auf das Windfeld oder großskalige meteorologische Prognoserechnungen. Hierfür sind Modellierungsstandards zu entwickeln, um Unsicherheiten und Toleranzen im Auslegungsprozess beschreibbar zu machen.

Ein weiteres Kriterium für die spezielle Modellentwicklung ist die zeitliche Verfügbarkeit der jeweiligen Ergebnisse. Für eine „smarte“ WEA werden verschiedene Modelle für offline-Rechnungen und solche für Echtzeit (oder darüber hinaus beschleunigt) benötigt.

Beispiel WEA-Test und Validierung

Eine Anwendung von Echtzeitmodellen findet sich beispielsweise in der Generierung möglichst realitätsnaher Versuchsbedingungen an WEA-Großprüfständen. Hier wird das Verhalten von physikalisch nicht vorhandenen Systemteile einer WEA z. B. bei der Komponenten- und System-Prüfung bzw. Validierung mit Hilfe von HiL, SiL und MiL-Verfahren (Hardware-, Software-, Modell-in the Loop) durch Prüfstandsaktuatorik berücksichtigt. Forschungseinrichtungen und die Industrie arbeiten mit Hochdruck daran, den Umfang dieser niedrig- oder unskalierten Versuche weiter auszubauen.

Heute existieren bereits Großprüfeinrichtungen für folgende auslegungskritische WEA-Komponenten und Systeme:

- Rotorblätter
- Pitchsysteme

- Großlager (Blattlager, Rotorhauptlagerung)
- Getriebe (u. Getriebelager)
- Kupplung und Bremsen
- Rotorwellen
- komplette Gondeln
- Antriebsstränge
- Generator/Umrichtersysteme

Mit dem stetigen Größenwachstum neuer Anlagen-generationen speziell im Offshore-Bereich ergibt sich die Forderung nach einem Mitwachsen der Prüfstandsgrößen/-Leistungen. Dies erscheint im Sinne zukünftiger „smarter“ Test- und Validierungsprozesse kein effizienter Weg zu sein, zumal die statistische Verwertbarkeit von quasi Einzelprüfungen an Großprüfständen ohnehin zumindest fragwürdig erscheint. Als zukünftige Lösung zeichnet sich hierbei die zunehmende Virtualisierung von Prüfungen ab. Zwar weiterhin gestützt von Einzeltests an realen Hochleistungsprüfständen, jedoch mit einer größeren statistischen Aussagekraft. Unverzichtbare Grundlage von virtuellen Testverfahren sind ebenfalls Daten, sei es u. a. aus dem Fertigungs- und Qualitätsmanagement-Prozess oder sofern bereits vorhanden, aus dem laufenden Betrieb bzw. O&M-Prozessen (Operations & Maintenance = Betrieb & Instandhaltung).

Ein „Digitaler Zwilling“ einer Komponente könnte es ermöglichen, zu jeder Zeit den jeweiligen individuellen Zustand einer Komponente und damit ihre Restgebrauchsdauer konsistent zu schätzen bzw. unter Annahme von verschiedenen Nutzungs- und Betriebsszenarien zu extrapolieren. Noch ist ein vollständiger digitaler Zwilling entsprechender Güte reines Wunschdenken, Industrie und Forschung arbeiten aber bereits daran zumindest Teilaspekte abzudecken, z. B. innerhalb des binationalen Verbundforschungsprojekts Reliablade (DTU Wind Energy, Forwind, Fraunhofer IWES), und in erste konkrete Anwendungen zu bringen (siehe hierzu den Abschnitt „Zuverlässigkeitsregelung“).

Beispiel Fertigungsprozesse

Wie bereits mehrfach beschrieben, ist eine umfassende Datenerhebung und -nutzung der Schlüssel für „smarte“ WEAs und deren „smarte“ Nutzung. Daten in Form von individuellen Materialkennwerten bzw. Prozessparametern oder -größen sind der Schlüssel für eine individuelle Bestimmung des Komponenten- bzw. Anlagenzustands zum Zeitpunkt $t=0$ der Nutzung. Umgangssprachlich häufig als Qualität eines Produkts beschrieben, sind diese Daten der Schlüssel für das Aufsetzen eines digitalen Abbildes.

Für eine spätere Bestimmung des Anlagenzustands im laufenden Betrieb sind aber weiterhin validierte Schädigungs-, Alterungs- und Fehlermodelle notwendig, um die zeitliche Fortschreibung der Qualität, d. h. die Zuverlässigkeit zu jeder Zeit bestimmen zu können. Die Datengewinnung in der Fertigung (z. B. mittels IIoT = Industrial Internet of Things) sollte aber bereits das Ende der Nutzungsdauer z. B. in Form von digital implementierten Recyclingpässen berücksichtigen. Zusätzliche Sensorik in den Herstellungswerkzeugen und im Produkt selbst sichert nicht nur einfach die Qualität und dient der Fehlervermeidung bei der Herstellung, sondern ermöglicht vielmehr und in zunehmendem Maße eine individuelle Produktcharakterisierung innerhalb der einzelnen Fertigungslose (siehe hierzu DLR-Projekte Smart-Work-Station und Eco-Efficiency Assessment Model).

Ähnliches gilt für die komplexen Logistik-, Transport- und Installationsprozesse bei der Errichtung von Offshore-Windparks. Datenaustausch und Vernetzung von Daten- und Informationsströmen unter Nutzung von Breitband-Echtzeit-Kommunikationskanälen (z. B. 5G) in Verbindung mit der Nutzung historischer Daten (z. B. Wetterdaten) erlauben verlässliche Risikoabschätzungen und verbesserte Planungs- und Optimierungsprozesse bei Großprojekten (siehe hierzu Projekte z. B. Com4Offshore, Offshore TIMES).

Beispiel Optimierung im Betrieb durch Zuverlässigkeitsregelung

Der Wind als primäre Eingangsgröße beeinflusst die Auslegung und Lebensdauer einer WEA maßgeblich. Dies wird während der Entwicklung einer Anlage durch eine Klassifizierung des Standorts in eine der Standortklassen nach IEC61400-1 berücksichtigt (wie bereits oben im Abschnitt „Designprozess“ erläutert). Folglich werden Anlagen innerhalb einer Klasse an stark unterschiedlichen Standorten betrieben, obwohl die Auslegung nur die nominellen Standortbedingungen berücksichtigt. Windenergieanlagen werden daher zumeist überdimensioniert, um immer den widrigsten erwarteten Bedingungen innerhalb ihrer Standortklasse standzuhalten. Die Widerstandsfähigkeit und die real auftretenden Lasten einer jeden Anlage sind real jedoch immer individuell.

Um eine effektivere Ausnutzung der Widerstandsfähigkeit zu ermöglichen, bietet sich eine kontinuierliche Adaption des Betriebsverhaltens mittels Zuverlässigkeitsregelung an.

Dies ist ein Verfahren zur automatischen Anpassung des Anlagenbetriebs, welches ohne manuellen Eingriff sicherstellt, dass die Anlage jederzeit maximalen Energieertrag erwirtschaftet und dabei zugleich ihre bestehende Widerstandsfähigkeit (auch Gebrauchsdauer oder „total fatigue budget“) ausschöpft. Dadurch wird die Energieausbeute erhöht, zugleich aber die Gefahr unerwarteter Frühausfälle verringert. Dieses Verfahren hat bereits in anderen ersten aber einfacheren Anwendungen seine Leistungsfähigkeit unter Beweis gestellt, muss aber spezifisch für Windenergieanlagen angepasst und weiterentwickelt werden.

Neben direkten Vorteilen, wie einer besseren Materialausnutzung und daher geringeren Investitionskosten oder einem höheren Energieertrag, können die Stromgestehungskosten auch indirekt durch effizientere Wartungsverfahren und höhere Verfügbarkeit gesenkt werden. Zugleich kann auf dynamisch veränderliche Randbedingungen reagiert werden, z. B. indem bei hohem Strompreis die Leistungsfähigkeit von Anlagen im Rahmen ihres individuellen verfügbaren „fatigue budgets“ vorübergehend erhöht wird.

Zuverlässigkeitsregelung führt demnach zu einer selbstständigen Anpassung einer Anlage an ihren Standort. Schwach dimensionierte Anlagen werden vor permanenter Überlast und somit vor Frühausfällen geschützt. Für ihren Standort überdimensionierte Anlagen können mit erhöhter Leistung betrieben werden. Dadurch wird die Streuung der Ausfallzeiten reduziert und die nutzbare Lebensdauer maximiert. Darüber hinaus ist eine Vorgabe der gewünschten Lebensdauer möglich, die selbstständig von der Anlage über eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit oder eine Reduktion der Schädigung umgesetzt wird. Die geschlossene Regelschleife einer Zuverlässigkeitsregelung besteht dabei aus einer Erfassung des aktuellen Schädigungszustands z. B. mittels echtem Condition Monitoring oder Modellrechnungen, einer Bestimmung der notwendigen Anlagenbetriebsführung durch den Zuverlässigkeitsregler sowie einer entsprechenden Adaption der Anlagenbetriebsführung. Die Zuverlässigkeitsregelung selbst läuft dabei auf einer übergeordneten Ebene und wird vollständig von den zertifizierungsrelevanten Reglern der Windenergieanlage getrennt.

Beispiel „Common Data Space“

Eines der größten Hemmnisse beim Einsatz von Digitalisierungstechnologien im Bereich der Windenergienutzung ist und bleibt der Mangel an einer umfassenden Datenbereitstellung und einem übergreifenden Datenaustausch zwischen allen Akteuren (Hersteller, Zulieferer, Zertifizierer, Betreiber, Serviceprovider, Netzbetreiber, ...). Die Gründe hierfür sind vielschichtig, die Hauptursachen sind jedoch eine mangelnde Bereitschaft unter den Akteuren meist mit dem Verweis auf eigenes IP, keine geeigneten, kommerziellen Plattformen für einen sicheren, transparenten und selbstbestimmten Umgang mit eigenen Daten und mangelnde Standardisierung. Im Rahmen eines großen Verbundvorhabens haben verschiedene Fraunhofer-Institute eine solche allgemein nutzbare Plattform für den industriellen Datenaustausch in Form des „Industrial Data Space“ geschaffen. Anwendungen für und von der Windenergie wurden hier jedoch noch nicht als Referenzanwendungen implementiert und erprobt.