



Wie ein Fisch im Wasser sollen sich auch die Rotorblätter im Wind verhalten – sie sollen beweglich sein und schnell auf Turbulenzen reagieren können.

Foto: Fotolia – Hendrik Schwartz

Mit dem Strom vereint

Die Effizienz der Windturbinen beginnt beim Rotorblatt. Neue Methoden erlauben den Blättern, aktiv auf den Wind zu reagieren.

Die Windenergie hat heute einen festen Platz in der globalen Energieproduktion eingenommen. Aber mit dem Erfolg wachsen auch die Ansprüche an die Windturbinen und der internationale Wettbewerb um den Käufermarkt nimmt zu. Um zukünftig noch konkurrenzfähiger zu werden, müssen die Turbinen an Effizienz gewinnen. Dabei heißt der Schlüsselparame- ter „Kosten pro produzierter kWh“. Um diesen Wert zu optimieren, muss die Leistung der Anlage zunehmen und gleichzeitig die Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten sinken.

Neben betriebswirtschaftlichen Aspekten wird diese Entwicklung auch von rein technischer Seite angetrieben. Moderne Windturbinen erreichen Rotordurchmesser von bis zu 150 Metern. Trotz des heutigen Wissensstandes, der langjährigen Erfahrung der Branche und der Rechenleistung moderner Computer stehen die Ingenieure bei der Anlagenentwicklung stets vor neuen Herausforderungen. Dabei sind auch Aerodynamik und Rotorblattdesign Gegenstand intensiver Forschung. In ihnen liegt der Schlüssel zur Effizienzsteigerung.

Simulationen reizen Rechner voll aus

Die komplizierten aerodynamischen und strukturellen Vorgänge an Windkraftanlagen sind bislang nicht vollständig erforscht. Das Zusammenspiel

komplexer physikalischer Vorgänge macht es schwierig, das Gesamtsystem bis ins kleinste Detail zu beschreiben: Die Anlage operiert in einem sich stetig ändernden, turbulenten Windfeld und die aerodynamischen Kräfte der elastischen Rotorblätter sind stark an die Struktur der gesamten Anlage gekoppelt (Aeroelastizität). Auch ist das Materialverhalten von komplexen Sandwichstrukturen schwer erfassbar. Durch die Rotation der Blätter werden zudem Zentrifugal- und Corioliskräfte erzeugt, die spezielle Strömungsphänomene in Blattlängsrichtung hervorrufen. Eine ganzheitliche und detaillierte Simulation schöpft daher selbst die Rechenleistung moderner Supercomputer schnell aus.

Die Entwicklung eines Rotorblatts, das unter allen Betriebsbedingungen optimal operiert, stellt die Branche vor eine bislang ungelöste Herausforderung. Der Anspruch erhöht sich, wenn die Konstruktion neben den technischen Aspekten weitere Faktoren berücksichtigen muss. Dazu zählen:

- hohe Leistungsfähigkeit
- geringe Kosten
- einfache Fertigung
- Transportfähigkeit
- zuverlässiger Betrieb (auch bei Verschmutzung)
- geringe Geräuschkentwicklung im Betrieb

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, nutzen die Ingenieure moderne Computersoftware zur

Konstruktion und Simulation neuer Rotorblätter. Auch Windkanalversuche unterstützen die Suche nach dem besten Blattdesign. Dennoch stößt man bei den heutigen Blattlängen an die Grenzen des technisch Machbaren. Hauptsächlich das Gewicht verursacht dynamische Lasten, die das Material ermüden lassen und die Lebensdauer des Blattes verkürzen. Verschiedene Forscher und Hersteller arbeiten daran, diese Grenzen zu überwinden. Auch die Firma Smart Blade GmbH entwickelt neue Rotorblattkonzepte jenseits konventioneller Designs.

Die Rotorblätter der nächsten Generation werden über Elemente zur Strömungsbeeinflussung verfügen. Sie lassen sich in zwei große Gruppen einteilen: die passive und die aktive Kontrolle.

Passive Strömungsbeeinflussung

Die passive Strömungsbeeinflussung PFC (Passive Flow Control) umfasst starre, unbewegliche Elemente, die in der Lage sind die Strömung über das Rotorblatt zu verändern. Diese Technik wird in Form von Wirbelgeneratoren (VG = Vortex Generator) schon seit langem an Windkraftanlagen eingesetzt. Wirbelgeneratoren sollen eine Strömungsablösung verhindern, indem sie die Strömung nahe der Blattoberfläche mit frischer Energie versorgen. Hersteller und Betreiber von Windturbinen nutzen Wirbelgeneratoren häufig dazu, die Leistung bestehender Rotorblätter nachträglich zu verbessern.

Eine weitere vielversprechende Lösung zur Leistungssteigerung moderner Rotorblätter ist der Einsatz eines starren Vorflügels. Das Konzept hat seinen Ursprung in der Luftfahrt, wo es – meist ausfahrbar – als Start- und Landehilfe eingesetzt wird. Kürzlich durchgeführte numerische und experimentelle Untersuchungen der Firma Smart Blade GmbH versprechen dem Vorflügel großes Potenzial für den Einsatz an Windkraftanlagen. Dort kann er die Strömungsablösung verzögern. Gerade im Blattinnenbereich nahe der Nabe, wo das Rotorblatt unter hohen Anstellwinkeln arbeitet, kann ein Vorflügel die Rotorleistung steigern.

Zu den interessantesten PFC-Konzepten zählt auch die „Gurney Flap“. Dieses Element wurde in den späten 1930er Jahren für die Luftfahrtindustrie entwickelt und später von Dan Gurney für den Einsatz in der Formel 1 wiederentdeckt. Schließlich gelangte die Methode zur Steigerung des aerodynamischen Auftriebs zur Windenergiebranche, wo sie zur Leistungsoptimierung genutzt wird. Smart Blade hat mehrere CFD-Simulationen und Windkanalversuche durchgeführt, um die Entwicklung maßgefertigter Gurney Flaps für Windkraftanlagen zu unterstützen. Dadurch lässt sich der Auftrieb am Blatt steigern und die Widerstands- und Geräuschcharakteristik verbessern.

Neben der absoluten Leistungsfähigkeit des Rotorblatts gibt es einen weiteren ausschlaggebenden Faktor, der die Wirtschaftlichkeit einer Anlage bestimmt. Dieser besteht im Lastmanagement des Rotorblatts. Durch die stochastische Natur des Windes und die Drehung des Rotors durchlaufen die Rotorblätter innerhalb ihrer Lebenszeit mehrere Millionen Lastzyklen. Die dadurch auftretenden Beanspruchungen summieren sich und können auf die Dauer zu Ermüdungserscheinungen führen.

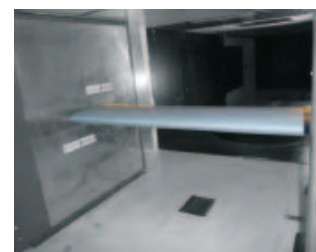
Aktive Strömungsbeeinflussung

Die aktive Strömungsbeeinflussung AFC (Active Flow Control) kann die Ermüdungsbeanspruchungen auf die Rotorblattstruktur reduzieren und das Blatt vor ernststen Schäden bewahren. Im Gegensatz zu den passiven Elementen benötigt die AFC Energie. Dazu sind Sensoren und Aktuatoren nötig, die mit der Steuerung eine Regelstrecke bilden. Damit kann das Rotorblatt aktiv auf sich ändernde Strömungsbedingungen reagieren. Jedoch ist die Komplexität solcher Systeme wesentlich größer als bei der passiven Strömungsbeeinflussung.

Viele Windturbinenhersteller und Forschungsinstitute untersuchen derzeit geeignete AFC-Konzepte. Ziel ist das „smarte“ Rotorblatt, eine Zukunftstechnologie, die die Unternehmen durch verschiedenen Lösungsansätze erreichen wollen:



Sogenannte Wirbelgeneratoren kommen seit längerer Zeit an Rotorblättern zum Einsatz. Sie reduzieren die Gefahr eines Strömungsabrisses.
Foto: Wikipedia, Williamborg



Einer der Testflügel von Smart Blade ist im Windkanal montiert und fertig für die Messung. Trotz aufwändiger Simulationen bleiben reale Prüfung notwendig.
Foto: Smart Blade GmbH

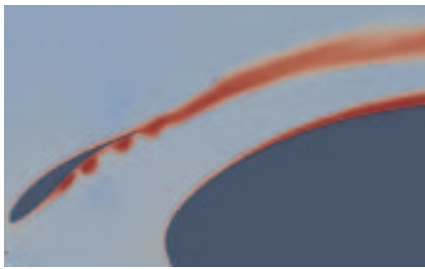
PCS Green Line
Flexible Umrichter mit System.

4.-8. April
Halle 27
Stand C14

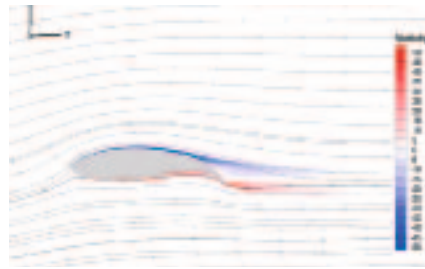
PCS Green Line mit Leistungsklassen von 1000 kW – 3800 kW

Entdecken Sie die neueste Generation von PCS Green Line. Die modular konzipierte Stromrichterfamilie für Windkraftanlagen passt sich souverän an alle Grid Codes an und setzt Standards bei Effizienz und Zuverlässigkeit. Erfahren Sie mehr über Green Line Systems, die Kombination aus Stromrichter, Generator und Transformator: www.pcs-converter.com



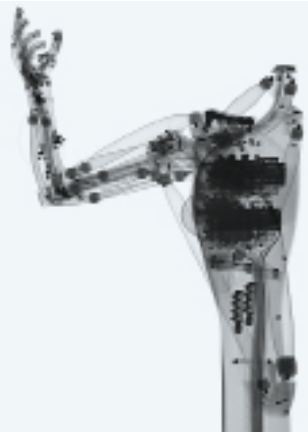


CFD-Simulation eines starren Vorflügels mit Strömungsablösung auf der Druckseite des Vorflügels.



CFD Simulation der flexiblen Hinterkante in beiden Extremposition. Nach unten ausgelenkt, erhöht sich der Auftrieb. Nach oben ausgelenkt, reduziert er sich.

Quellen (3): Smart Blade GmbH



Die Hinterkante des Smart Blade wird von einem pneumatischen Muskel gesteuert. Er stammt von der Firma Festo, die mit der Bionik seit langem Prinzipien der Natur in Technologien überträgt. Auch die Muskeln des „AirArm,, arbeiten pneumatisch.

Foto: Festo AG & Co. KG

- Flexible Hinterkanten
- Flexible Vorderkanten
- Aktive Miniflaps
- Spoiler

Viele dieser Konzepte kommen aus der Luftfahrtindustrie, wie beispielsweise die Spoiler. Auch die Natur liefert Inspirationen, die man im Zuge der Bionik nutzbar macht. Für den Einsatz an Rotorblättern von Windkraftanlagen müssen die Methoden zur aktiven Strömungskontrolle allerdings noch detaillierter analysiert werden. Auch die technische Umsetzung bedarf weiterer Untersuchungen.

Die Konstruktion, Simulation, Integration und Regelung aktiver Elemente ist ein komplexes Vorhaben. Aufgrund der turbulenten Windcharakteristik und der Blattrotation können die Erfahrungen aus der Luftfahrt nicht eins zu eins auf Windturbinen übertragen werden. Die jeweiligen Betriebsbedingungen und der limitierende Kostenfaktor der beiden Anwendungen unterscheiden sich zu stark.

Die Smart-Blade-Ingenieure richten ihren Fokus bei der Entwicklung neuer AFC-Methoden weniger auf einzelne wissenschaftlichen Untersuchungen. Vielmehr gilt es, das System Windkraftanlage in seiner Gesamtheit zu betrachten. Die mechanische Konstruktion der aktiven Elemente ist eng gekoppelt an die aerodynamische Ausle-

gung und die Integrationsfähigkeit in das Rotorblatt. Darüber hinaus werden neue Sensorsysteme und Regelungsstrategien untersucht.

Bessere Dynamik dank Muskelkraft

Smart Blade verfolgt in enger Zusammenarbeit mit der Firma Tembra GmbH die Entwicklung eines AFC-Konzepts. Es handelt sich dabei um eine flexible Hinterkante, die in die Struktur des Rotorblatts eingebracht ist. Die Entwicklung basiert auf den Prinzipien der Biomechanik. Die Natur nutzt das Prinzip formvariabler Strukturen in vielfacher Ausführung: Vögel, Fische und Meeressäugetiere haben Flügel und Flossen, die ihre Form optimal an ihre speziellen Umgebungsbedingungen anpassen.

Die AFC-Entwicklung überträgt die strukturbedingte Flexibilität von Flügeln und Flossen auf ein neues Rotorblattkonzept. Nach diesem Prinzip wurde ein Testflügel entwickelt, der die hinteren 25 Prozent der Flügeltiefe in seiner Form verändern kann. Die Betätigung der flexiblen Hinterkante basiert ebenfalls auf einem bionischen Konzept. Das ermöglichen pneumatische „Muskeln“ der Firma FESTO. Sie imitieren die Funktionsweise natürlicher Muskelfasern, wobei sie Luft als Antriebsme-




Wohlfühlen mit 100% Zukunft

Komfort ja, aber bitte mit Verantwortung für Natur und Umwelt.
 Die Mehrheit der Deutschen wünscht Strom aus Erneuerbaren Energien.
 Wir liefern den Beitrag dazu, dass der Wunsch auch Wirklichkeit wird.
 Seit zwei Jahrzehnten Energie für eine sichere Zukunft:
 Unterechmsgruppen Dezentrale Energie – Dienstleistungen für Wind-,
 Solar- und andere regenerative Energieanlagen, von der Projektierung
 bis zum Betrieb.

Alte Feldstraße 18 | D-31535 Miesteich a. Nbg.
 Tel. +49 (0) 58 34 - 95 91 30 | Fax +49 (0) 50 34 - 95 91 33
www.dezentrale-energie.de

100%   






dium verwenden. Die Zuführung von Druckluft bewirkt eine anisotropische Kontraktion. Ziehen sich die pneumatischen Aktuatoren zusammen, übertragen sie die Kräfte auf die flexible Struktur, wodurch sich die flexible Hinterkante verformt.

Aerodynamisch betrachtet ändert die Verformung des Flügelprofils die Strömungsverhältnisse und damit die aerodynamischen Eigenschaften des Profils. Durch eine ständige Bewegung der flexiblen Hinterkante während des Betriebs ist es möglich, das aerodynamische Verhalten des Rotorblatts kontinuierlich zu optimieren. Atmosphärische Turbulenzen und andere betriebsbedingte Unregelmäßigkeiten werden so schnell und kontrolliert ausgeglichen. Das reduziert die Dauer- und Extrembeanspruchungen des Rotorblattes und mindert die Lasten der gesamten Windkraftanlage.

Durch die geringere Betriebsbeanspruchungen erhöht sich die Systemzuverlässigkeit der Anlage. Die technische Verfügbarkeit steigt, während Häufigkeit und Kosten für Wartung und Reparatur abnehmen. Insbesondere bei Offshore-Anlagen, wo der finanzielle Aufwand für Blattwartungen oder -wechsel sehr hoch ist, kann sich ein AFC-System trotz höherer Anschaffungskosten lohnen.

Das Ende der Blattverstellung

Das oberste Ziel der flexiblen Hinterkante liegt allerdings höher. Es soll nicht nur Lasten reduzieren, sondern auch in der Lage sein, die komplette Leistungsregelung der Anlage zu übernehmen. Das würde das traditionelle Pitch-System heutiger Windkraftanlagen überflüssig machen. Der Verzicht auf das Pitch-System und dessen Lagerung macht den runden Blattnabenanschluss überflüssig. Damit eröffnet sich ein weites Feld neuer Möglichkeiten für die Konstruktion zukünftiger Rotorblätter, aerodynamisch wie strukturell.

Bisher wurden mehrere CFD-Simulationen durchgeführt, die das hohe aerodynamische Potenzial der flexiblen Hinterkante untermauern. Auch Windkanalversuche des pneumatisch betriebenen Testflügels im Großen Windkanal des Hermann-Föttinger-Instituts der Technischen Universität Berlin waren durchweg positiv und bestärken die gewonnen CFD-Simulationsergebnisse [1].

Momentan wird das AFC-System mit Hilfe einer speziellen aeroelastischen Simulationssoftware untersucht, mit der das Verhalten einer gesamten Windkraftanlage mit flexiblen Rotorblatthinterkanten betrachtet werden kann. Darüber hinaus werden neue Regelungsstrategien erarbeitet, die für das Last- und Leistungsmanagement der gesamten Turbine verantwortlich sind.

Die „Smart Blades“ der Zukunft

Mit Sicherheit werden in absehbarer Zukunft „smarte“ Rotorblätter auf den Windenergiemarkt kommen, da sie große Vorteile gegenüber dem klassischen Blattdesign bieten. Mehrere Sensoren und Aktuatoren in den Rotorblättern werden einen intelligenten Betrieb der Anlage sicherstellen. Das erlaubt der Windturbine die unterschiedlich wechselnden Umwelt- und Betriebsbedingungen gleichzeitig zu erkennen und auf sie zu reagieren. Diese Technologie wird dem Windenergiemarkt hohen Nutzen bringen, da sie die Zuverlässigkeit und Energieausbeute der gesamten Anlage verbessert. Auch Smart Blade und Tembra wollen dazu beitragen und ein marktreifes Konzept zur aktiven Strömungsbeeinflussung an Rotorblättern anbieten. ■

[1] G. Pechlivanoglou et al: "Active Aerodynamic Control of Wind Turbine Blades with High Deflection Flexible Flaps". 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando Florida, 04 - 07 January, 2010.



Georgios Pechlivanoglou¹
Forschungsleiter
Smart Blade GmbH

Guido Weinzierl²
Smart Blade GmbH

Jürgen Wagner³
Tembra GmbH

