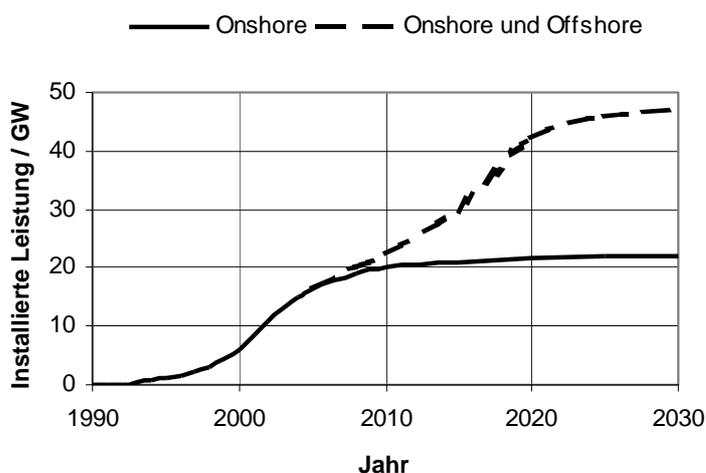


## Unterstützung der Primärregelung durch Windkraftanlagen

Fred Prillwitz, Axel Holst, Harald Weber

### Einleitung

In der Bundesrepublik ist auch in den nächsten Jahren weiterhin mit einem starken Ausbau der Windenergienutzung zu rechnen [1], siehe **Bild 1**. Besonders im Offshore-Bereich sind zahlreiche Windparks geplant. Die Anschlussleistungen der Windparks liegen im Bereich von wenigen 100 MW bis zu einigen GW und damit in der Größenordnung konventioneller Kraftwerke. Diese „Windkraftwerke“ fallen nicht mehr in den Bereich der „Dezentralen Energieerzeugung“. Die Planungen bringen jedoch eine Reihe von derzeit noch ungelösten technischen und physikalischen Problemen mit sich. Die zentralen und leistungsstarken Einspeisungen erfolgen vorwiegend in das norddeutsche Höchstspannungsnetz und sind damit lastfern, d.h. es sind Leistungstransporte über längere Strecken zu den Verbraucherzentren notwendig, was zu einem Ausbau des Höchstspannungsnetzes führen muss. Auf Grund der Windabhängigkeit sind die Einspeisungen diskontinuierlich und besitzen eine große Schwankungsbreite im Sekunden-, Minuten- und langfristigen Bereich. Die Windeinspeisungen korrelieren zeitlich nicht mit dem Verlauf der Netzlast. Dadurch entsteht ein hoher zusätzlicher Bedarf an Regelleistung zur Frequenz- und Spannungshaltung im Netz. Da durch den Einsatz der „Windkraftwerke“ konventionelle Kraftwerksleistung verdrängt wird, würden die verbleibenden Kraftwerke mehr und mehr zu reinen Regelkraftwerken umfunktioniert mit allen negativen Folgen für deren Wirtschaftlichkeit. In der Vergangenheit wurden Windkraftanlagen unter relativ geringen netztechnischen Auflagen genehmigt. Die Betriebsführung verfolgte ausschließlich das Ziel der maximalen Energieausbeute. Der geplante Ausbau der Windenergienutzung erfordert heute jedoch ein Umdenken. Für einen zukünftigen sicheren Netzbetrieb und eine gerechte Lastenverteilung zwischen Kraftwerks-, Übertragungsnetz- und Windparkbetreibern ist es notwendig geworden, dass die „Windkraftwerke“ im Rahmen ihrer Möglichkeiten neue Aufgaben übernehmen. In [2] sind bereits durch einen Übertragungsnetzbetreiber neue verbindliche Netzanschlussregeln für Windkraftanlagen definiert worden. Es sind dort neue Bedingungen hinsichtlich des Einschaltens, der Blindleistungs- und Wirkleistungsabgabe sowie des Verhaltens bei Netzstörungen aufgeführt. Es bleibt jedoch weiterhin zu untersuchen, inwieweit „Windkraftwerke“ auch Netzregelaufgaben der durch sie verdrängten konventionellen Kraftwerke mit übernehmen können. Moderne drehzahlvariable Windkraftanlagen werden entweder mit doppelt gespeister Asynchronmaschine oder mit Synchrongenerator und Vollumrichter ausgeführt. Beide Maschinenarten sind hervorragend für eine schnelle Wirk- und Blind- bzw. Spannungsregelung geeignet. Damit besitzen Windparks, die mit diesen Maschinen ausgerüstet sind, grundsätzlich gute Voraussetzungen für die Übernahme von Netzregelaufgaben [3]. Im vorliegenden Beitrag wird die mögliche Teilnahme an der Primärregelung am Beispiel einer drehzahlvariablen Windkraftanlage mit Pitchregelung untersucht. Das setzt das Vorhandensein sowohl einer positiven als auch negativen Leistungsreserve voraus, die bei Netzfrequenzänderungen sehr schnell aktiviert werden kann. Mit der bisherigen und allgemein üblichen Betriebsführung kann jedoch durch Verstellen des Pitchwinkels nur eine Verringerung der Leistung, etwa bei Starkwind oder zu hoher Netzfrequenz,

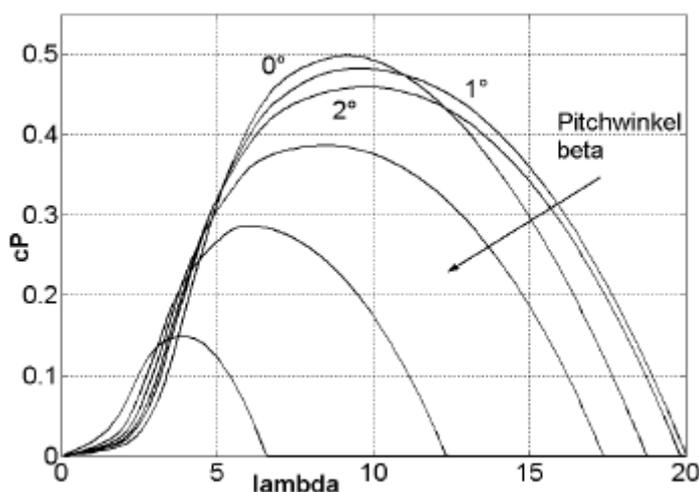


**Bild 1:** Prognose für den Ausbau der Windenergie [1]

würden die verbleibenden Kraftwerke mehr und mehr zu reinen Regelkraftwerken umfunktioniert mit allen negativen Folgen für deren Wirtschaftlichkeit. In der Vergangenheit wurden Windkraftanlagen unter relativ geringen netztechnischen Auflagen genehmigt. Die Betriebsführung verfolgte ausschließlich das Ziel der maximalen Energieausbeute. Der geplante Ausbau der Windenergienutzung erfordert heute jedoch ein Umdenken. Für einen zukünftigen sicheren Netzbetrieb und eine gerechte Lastenverteilung zwischen Kraftwerks-, Übertragungsnetz- und Windparkbetreibern ist es notwendig geworden, dass die „Windkraftwerke“ im Rahmen ihrer Möglichkeiten neue Aufgaben übernehmen. In [2] sind bereits durch einen Übertragungsnetzbetreiber neue verbindliche Netzanschlussregeln für Windkraftanlagen definiert worden. Es sind dort neue Bedingungen hinsichtlich des Einschaltens, der Blindleistungs- und Wirkleistungsabgabe sowie des Verhaltens bei Netzstörungen aufgeführt. Es bleibt jedoch weiterhin zu untersuchen, inwieweit „Windkraftwerke“ auch Netzregelaufgaben der durch sie verdrängten konventionellen Kraftwerke mit übernehmen können. Moderne drehzahlvariable Windkraftanlagen werden entweder mit doppelt gespeister Asynchronmaschine oder mit Synchrongenerator und Vollumrichter ausgeführt. Beide Maschinenarten sind hervorragend für eine schnelle Wirk- und Blind- bzw. Spannungsregelung geeignet. Damit besitzen Windparks, die mit diesen Maschinen ausgerüstet sind, grundsätzlich gute Voraussetzungen für die Übernahme von Netzregelaufgaben [3]. Im vorliegenden Beitrag wird die mögliche Teilnahme an der Primärregelung am Beispiel einer drehzahlvariablen Windkraftanlage mit Pitchregelung untersucht. Das setzt das Vorhandensein sowohl einer positiven als auch negativen Leistungsreserve voraus, die bei Netzfrequenzänderungen sehr schnell aktiviert werden kann. Mit der bisherigen und allgemein üblichen Betriebsführung kann jedoch durch Verstellen des Pitchwinkels nur eine Verringerung der Leistung, etwa bei Starkwind oder zu hoher Netzfrequenz,

quenz [2] erreicht werden. Grundsätzlich wird bisher davon ausgegangen, dass die Bereitstellung zusätzlicher Wirkleistung nicht möglich ist, weil die nicht beeinflussbare Windgeschwindigkeit die maximale Leistung vorgibt. Bei gleichzeitig optimal eingestelltem Pitchwinkel, wird ständig die maximal mögliche Leistung erzielt. Wenn die Windkraftanlage jedoch im Normalbetrieb mit nicht optimalem Pitchwinkel betrieben wird, würde sich auch eine positive Reserveleistung ergeben, die mit Hilfe des Pitchwinkels aktiviert werden kann. Das Resultat wäre eine im Normalbetrieb „gedrosselte“ Fahrweise, vergleichbar mit konventionellen Kraftwerken.

## Betriebsweise von Windkraftanlagen mit Pitchregelung

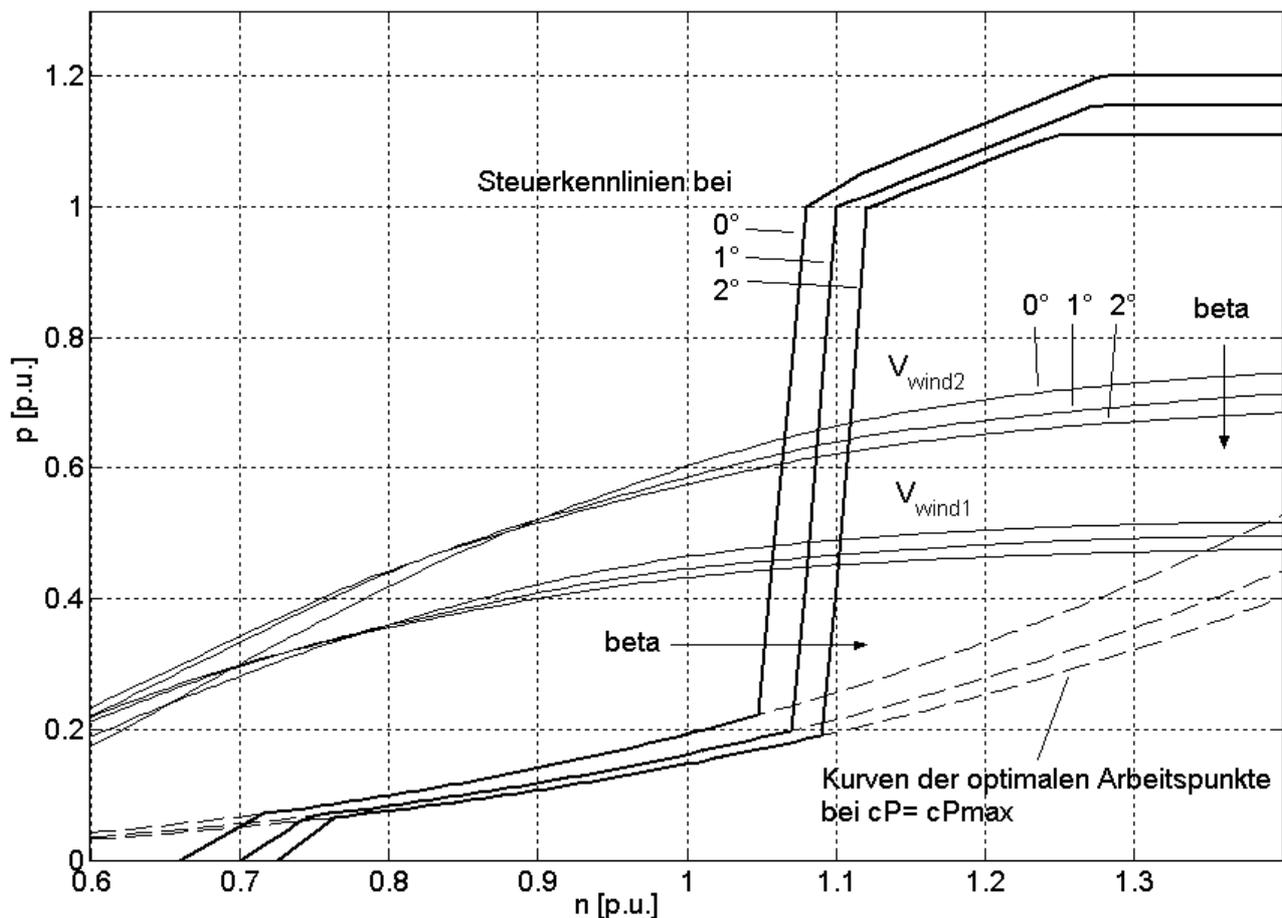


**Bild 2** Leistungsbeiwert in Abhängigkeit von Schnelllaufzahl und Pitchwinkel

In **Bild 2** sind typische Verläufe des Leistungsbeiwertes  $c_P$  von Windkraftanlagen der MW-Klasse dargestellt. Die Verläufe sind keinem bestimmten Flügelprofil eines Herstellers zugeordnet. Ähnlich einem Wirkungsgrad für den Flügel gibt  $c_P$  die dem Wind entnehmbare Leistung an. In **Bild 2** wird deutlich, dass es einen optimalen Pitchwinkel (hier  $\beta = 0^\circ$ ) gibt, bei dem  $c_P$  maximal wird und bei dem zweckmäßigerweise der Normalbetrieb der Anlage erfolgt. Der dauerhafte Betrieb der Anlage bei  $\beta = 0^\circ$  und der entsprechenden Schnelllaufzahl  $\lambda_{opt} = 9.2$  hätte die größte Leistungsausbeute mit  $c_P = 0.5$  zur Folge. Eine Leistungsverringerung aus diesem Arbeits-

punkt heraus kann durch Vergrößerung des Pitchwinkels auf  $\beta > 0^\circ$  erfolgen. Eine Leistungserhöhung dagegen ist nicht möglich. Wenn der Normalbetrieb dagegen leistungsreduziert mit einem größeren Pitchwinkel, beispielsweise  $\beta = 1^\circ$  erfolgen würde, könnte durch Verkleinerung des Pitchwinkels eine Vergrößerung von  $c_P$  und damit der Leistung erreicht werden.

Mit dem in **Bild 2** verwendeten Flügelprofil wurde eine fiktive 5-MW-Windkraftanlage dimensioniert. Für diese Anlage sind in **Bild 3** die Turbinenleistung in Abhängigkeit von der Drehzahl bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten dargestellt. Zusätzlich wird der Einfluss des Pitchwinkels verdeutlicht. Für jede Windgeschwindigkeit ergibt sich entsprechend dem eingestellten Pitchwinkel ( $\beta = 0^\circ, 1^\circ, 2^\circ$ ) eine andere Leistungskurve, wobei die erzielbare Leistung mit steigendem Pitchwinkel abnimmt. Mit Hilfe der eingezeichneten Steuerkennlinien sind die stationären Arbeitspunkte ablesbar. Vom Anlagenbetreiber wird eine optimale Steuerkennlinie für den Normalbetrieb mit maximaler Leistungsausbeute konfiguriert, im vorliegenden Beispiel wäre das bei  $\beta = 0^\circ$ . Wenn eine Teilnahme an der Primärregelung vorgesehen ist, müsste dagegen eine andere, z.B. die Steuerkennlinie bei dem Pitchwinkel  $\beta = 1^\circ$  vorgegeben werden. Dann stellt die Betriebsweise der Anlage bei  $\beta = 1^\circ$  den leistungsreduzierten Normalbetrieb dar. Die beiden anderen Steuerkennlinien ergeben sich dann rein rechnerisch, wenn bei gleicher Windgeschwindigkeit ein bestimmter Anteil Leistung mehr bzw. weniger geliefert werden soll. So wird durch die Steuerkennlinie bei  $\beta = 0^\circ$  die maximale Leistungsausbeute erreicht, vergleichbar mit dem Normalbetrieb der Anlage ohne Primärregelung. Bei der Steuerkennlinie mit  $\beta = 2^\circ$  erfolgt eine verringerte Leistungsausbeute. Die sich ergebenden Steuerkennlinien bei  $\beta = 0^\circ$  und  $\beta = 2^\circ$  sind in **Bild 3** idealisiert dargestellt. Die realen Steuerkennlinien sind dagegen nichtlinear und hängen stark von der Flügelgeometrie ab [3]. Das kann zu einem nachteiligen transienten Übergangsverhalten bei der Aktivierung der Leistungsreserven führen. Für eine zweckrichtige Umwandlung der relativ großen Rotationsenergie sollte eine Leistungserhöhung mit einer Drehzahlverringern verbunden sein und umgekehrt, wie im idealisierten Fall in **Bild 3**



**Bild 3** Leistung und Steuerkennlinien (idealisiert) bei verschiedenen Pitchwinkeln

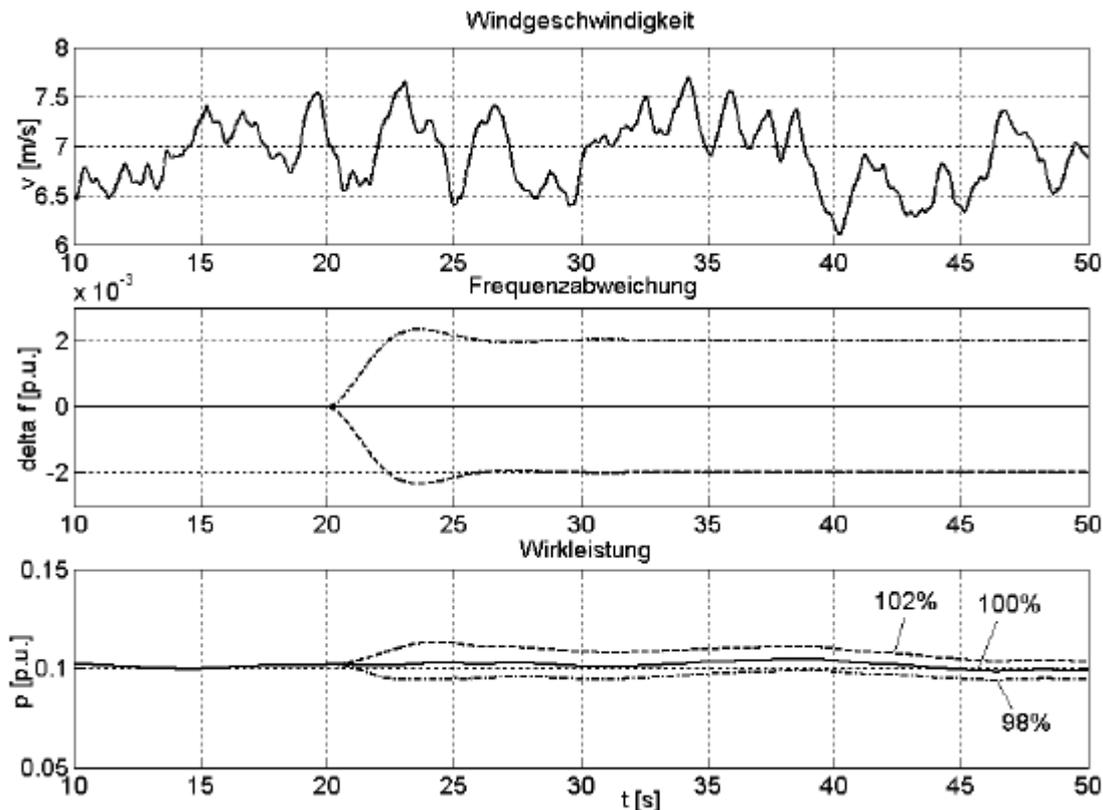
ersichtlich. Mit den derzeit verwendeten Flügelprofilen ist dieses Verhalten nicht für alle Arbeitspunkte gegeben, da Überlegungen zur Leistungsreservehaltung bisher keinen Einfluss auf die Auslegung der Turbinen hatten. Eine Optimierung der Flügelprofile speziell für Aufgaben der Primärregelung könnte hier eine Verbesserung des transienten Verhaltens im gesamten Arbeitsbereich bewirken. Dessen ungeachtet sind die derzeit verwendeten Flügelprofile grundsätzlich für Aufgaben in der Primärregelung geeignet, da sie zumindest stationär die Leistungsanforderungen erfüllen.

### Simulation

Für die im vorangegangenen Abschnitt beschriebene 5-MW-Windkraftanlage wurde ein Modell mit der Software Matlab/Simulink erstellt. In Anlehnung an konventionelle Kraftwerke wurde eine Primärregelleistung von  $\Delta P = \pm 4\%$  bei einer Statik von  $\sigma = 10\%$  eingestellt. Das bedeutet, bei einer Frequenzabweichung im Netz von  $\Delta f = \pm 200$  mHz soll eine Regelleistung von  $\Delta P = \pm 4\%$ , hier bezogen auf die aktuelle Leistungsabgabe, aktiviert werden. **Bild 4** zeigt die Reaktion der Windkraftanlage bei Windverhältnissen um  $v = 7$  m/s und Netzfrequenzänderungen von  $\Delta f = 0$  mHz und  $\Delta f = \pm 100$  mHz. Deutlich sichtbar wird die sehr schnelle zusätzliche Leistungseinspeisung bzw. Leistungsverringerung bei Frequenzeinbruch bzw. -erhöhung.

### Zusammenfassung

Die geplante Errichtung zahlreicher Windparks in der Größenordnung konventioneller Kraftwerke erfordert eine neue Strategie in der Betriebsführung solcher „Windkraftwerke“. Bezüglich der Anschlussbedingungen sollten Windparks den konventionellen Kraftwerken gleichgestellt werden. Die Windparks könnten Aufgaben der durch sie verdrängten konventionellen Kraftwerke übernehmen. Das betrifft insbesondere die Bereitstellung von Netzdienstleistungen, wie die Teilnahme an der Wirk- und Blindleistungsregelung bzw. Spannungsregelung im Netz. Der Beitrag zeigt, dass bei der



**Bild 4** Leistung der Windkraftanlage bei verschiedenen Störfällen

vorgeschlagenen Betriebsweise von Windkraftanlagen die Leistung im Sekundenbereich nicht nur abgeregelt, sondern auch erhöht werden kann. Bei flächendeckender Anwendung dieser Betriebsweise auf alle geplanten Windparks kann sich eine erhebliche frequenzstützende Sekundenreserve ergeben. Vergleichmäßigungseffekte aufgrund der verteilten Aufstellung sowohl der Einzelanlagen als auch der Windparks bewirken weiter, dass sich bei aktivierter Leistungsreserve die mittlere Windleistungseinspeisung im Regelgebiet signifikant erhöht.

## Literatur

- [1] Molly, J. P.: Wind Energy Future – Offshore and Offgrid. DEWI-Magazin Nr. 21, August 2002, S. 51-55
- [2] Ergänzende Netzanschlussregeln für Windenergieanlagen. E.on Netz, 01.12.2001
- [3] Holst A., F. Prillwitz, H. Weber, C. Schmidt: Netzregelverhalten von Windkraftanlagen. VDI/VDE: 6. GMA/ETG-Fachtagung „Sichere und zuverlässige Systemführung von Kraftwerk und Netz im Zeichen der Deregulierung“, 21. – 22. Mai 2003, München

## Verfasser

Dr.-Ing. Fred Prillwitz, Dipl.-Ing. A. Holst, Prof. Dr.-Ing. Harald Weber  
 Universität Rostock, Fakultät für Informatik und Elektrotechnik  
 Institut für Elektrische Energietechnik  
 18051 Rostock

e-mail: fred.prillwitz@etechnik.uni-rostock.de  
 axel.holst@etechnik.uni-rostock.de  
 harald.weber@etechnik.uni-rostock.de