

# Betrieb und Planung von Netzen mit hoher Windenergieeinspeisung

Matthias Luther, E.ON Netz GmbH, Bayreuth, Deutschland

Uwe Radtke, E.ON Netz GmbH, Lehrte, Deutschland

## Kurzfassung

Im Zuge der politischen Förderung und insbesondere nach Inkrafttreten des „Erneuerbare Energien Gesetz“ (EEG) hat die Einspeisung aus Windenergie drastisch zugenommen. Die aktuelle Situation in Verbindung mit der absehbaren Entwicklung im Off-Shore-Bereich im Nord- und Ostseeraum erfordert zusätzliche Maßnahmen auf Seiten des Netzbetreibers, um den Anforderungen an die Versorgungsqualität auch künftig gerecht zu werden. Der Beitrag gibt einen Überblick über die aktuelle Betriebssituation innerhalb der Regelzone von E.ON Netz, die derzeit eine installierte Windenergieeinspeisung von 3.500 MW aufweist. Planerische und betriebliche Lösungen werden vorgestellt und hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit bewertet, um der künftigen Entwicklung der Windenergie Rechnung zu tragen.

## 1 Gegenwärtiger Stand der Windenergienutzung in Deutschland

Ein Blick in die Statistik der Windenergienutzung in Deutschland gibt einen Überblick über den Stand der Nutzung dieser regenerativen Energiequelle und die Dynamik ihrer Entwicklung.

Waren es im April des vergangenen Jahres noch 4.667 MW, die in insgesamt 8.004 Anlagen erzeugt wurden, so stieg bis zum 30. April 2001, also innerhalb eines Jahres, die installierte Leistung auf 6.409 MW und die Anlagenanzahl auf 9.515.

Der Zuwachs innerhalb eines Jahres beträgt also ca. 1.740 MW, die in 1.511 Anlagen erzeugt werden und im letzten Jahr an Mittelspannungsnetze sowie an Hoch- und Höchstspannungsnetze angeschlossen wurden.

	Anzahl der WEA am Netz	Installierte Leistung in MW
April 1999	6.419	3.125
April 2000	8.004	4.667
April 2001	9.515	6.409

**Tabelle 1** Entwicklung der Windenergienutzung in Deutschland

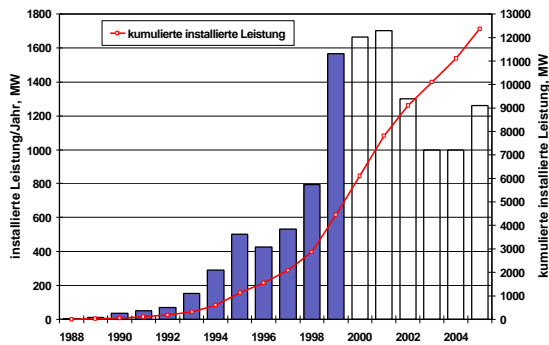
Damit ist bis zum April 2001 eine Steigerung, bezogen auf die installierte Leistung im April 2000, von 37 % erzielt worden (siehe Tabelle 1). Die Steigerungsrate der installierten Leistung vom April 2000, bezogen auf April 1999, betrug dagegen 49 %.

Nach neuesten Prognosen kann davon ausgegangen werden, dass diese Steigerung der installierten Leistung auch über das Jahr 2001 anhalten wird.

Für die Jahre 2003 und 2004 wird eine deutliche Verringerung des Zuwachses der installierten Leistung auf ca. 1.000 MW pro Jahr erwartet. Verantwortlich dafür ist ein Sättigungseffekt, der durch die begrenzte Größe der für die Windenergienutzung ausgewiesenen Flächen gegeben ist.

Ab 2005 wird mit weiteren Zuwachskomponenten in der Windenergienutzung gerechnet. Zum einen wird es die beginnende Off-Shore-Windenergienutzung sein und zum anderen wird mit einer intensiveren Ausnutzung der bereits erschlossenen Windflächen durch Windenergieanlagen (WEA) mit höherer Leistung (Repowering) gerechnet. Bild 1 zeigt die Entwicklung und Prognose für die Windenergienutzung in Deutschland.

### 3 Betriebsführung und Engpassmanagement



**Bild 1 Entwicklung der Windenergie in der Vergangenheit und Prognose bis 2005 [1]**

## 2 Windenergieanlagen in der Regelzone von E.ON Netz

In der Regelzone von E.ON Netz wird Kraftwerksreserveleistung zur Ausregelung von Erzeugung und Verbrauch für die Bundesländer Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Hessen und Bayern sowie für einen geringen Teil von Nordrhein-Westfalen bereitgestellt. Gegenwärtig sind in der E.ON-Regelzone WEA mit einer installierten Leistung von ca. 3.500 MW am Netz. Der überwiegende Teil der Anlagen befindet sich in den Bundesländern Schleswig-Holstein und Niedersachsen. Für dieses nördliche E.ON-Netz wird bis 2005 eine installierte WEA-Leistung von ca. 5.000 MW erwartet, wobei ein zunehmender Anteil der On-Shore-Windparks in die 380/220-kV-Ebene einspeisen wird.

Aus den bei E.ON Netz eingegangenen Anfragen zum Anschluss von Off-Shore-Windparks geht hervor, dass WEA mit einer Leistung von insgesamt ca. 6.000 MW küstennah angeschlossen werden wollen. Wie hoch die installierte Leistung tatsächlich sein wird, ist aus heutiger Sicht schwer einzuschätzen und von der Realisierbarkeit der einzelnen Off-Shore-Projekte abhängig. Mit einer ebenso großen Unsicherheit sind die Aussagen zum Umfang und zur Entwicklung des Repowerings der On-Shore-Windparks in der E.ON-Regelzone behaftet.

Um den künftigen Anforderungen an die Entwicklung des 380/220-kV-Netzes und der unterlagerten 110-kV-Netze gerecht zu werden, müssen eine Reihe von Aufgaben gelöst werden, die mit einer erheblichen Planungsunsicherheit hinsichtlich der Realisierungszeiträume und der anzuschließenden WEA-Leistungen verbunden sind.

Eine Besonderheit der Windenergienutzung ist die stark eingeschränkte Vorhersehbarkeit der Windenergieerzeugung bedingt durch die Unsicherheiten der Wettervorhersage. Trotz existierender Wetterprognoseverfahren ist die Genauigkeit der Vorhersage, insbesondere hinsichtlich ihrer zeitlichen Entwicklung für die Betriebsführung des Netzes unzureichend.

Die Betriebsführung von E.ON Netz stützt sich dabei auf ein Windprognoseverfahren, das die Wettervorhersage des Deutschen Wetterdienstes nutzt, um im erforderlichen Maße Regelleistung bereitzustellen und gegebenenfalls Maßnahmen des Engpassmanagements einzuleiten. Neben den Daten der Wettervorhersage werden vom Windprognosesystem On-Line-Messdaten der eingespeisten Windleistung von ausgewählten Referenzanlagen genutzt. Das Verfahren selbst wird kontinuierlich weiterentwickelt, um den Einfluss der eingangs beschriebenen Unsicherheitsfaktoren zu reduzieren.

Ziel der Betriebsführung ist es, den gegenwärtigen und zukünftigen Anforderungen, die dem Netz aus der Windenergienutzung erwachsen, so gerecht zu werden, dass das derzeitige Niveau der Versorgungszuverlässigkeit nicht verlassen werden muss. Temporäre Engpässe durch den Transport der zusätzlichen Leistung aus WEA können dabei zunächst durch ein koordiniertes Engpassmanagement behoben werden.

Das Engpassmanagement erfolgt durch Schaltzustandsänderungen und zunehmend durch Redispatching, d. h. durch Reduzierung oder Verlagerung der Einspeisung aus Großkraftwerken beim Erreichen von Grenzwerten infolge plötzlich zunehmender Windeinspeisung.

Grenzwertverletzungen können unerwünschte Folgemaßnahmen auslösen, die die Versorgungszuverlässigkeit reduzieren und Gefährdungen von Betriebsmitteln und Personen zur Folge haben, die in jedem Fall zu vermeiden sind.

Neben dem Engpassmanagement wird insbesondere an die Bereitstellung von Kraftwerksreserve zusätzliche Anforderungen gestellt. Diese zusätzliche Kraftwerksreserve ist notwendig, um die Abweichung der tatsächlichen Windeinspeisung von der prognostizierten Windeinspeisung auszugleichen.

## 4 Netzentwicklung und Anforderungen an Windenergieanlagen

Die beschriebene Entwicklung der Windenergie führt mit der derzeitigen Netzinfrastruktur zu technischen Grenzen für die WEA-Einspeisung. Folgende netztechnische Kriterien sind maßgeblich für das Erreichen der technischen Grenzen:

- Thermische Belastung
- Blindleistungsregelung und Spannungsstabilität
- Frequenzstabilität.

Vorrangige Aufgabe der Systemführung und der Netzausbauplanung ist die Einhaltung der Kriterien, um auch künftig die Netzsicherheit, Versorgungsqualität und Versorgungszuverlässigkeit zu gewährleisten.

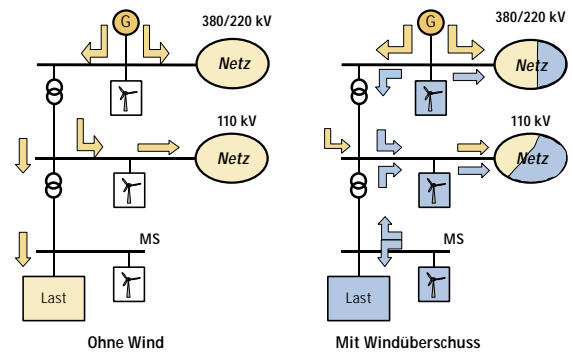
Der verstärkte Zuwachs an Windenergienutzung führt mit der bestehenden Netzinfrastruktur in erster Linie zur thermischen Überlastung von Betriebsmitteln. Die derzeit zumeist an die Mittelspannungsnetze angeschlossenen WEA erzeugen ein Vielfaches der Leistung, die lokal verbraucht werden kann. So entsteht insbesondere zu Schwachlastzeiten ein beachtlicher Leistungsüberschuss, der durch Rückspeisung zu Grenzwertverletzungen in der übergeordneten 110-kV-Ebene führt. Dieser Effekt wird noch dadurch verstärkt, dass in zunehmendem Maße Windparks auch an die 110-kV-Ebene angeschlossen werden.

Bild 2 zeigt den Vergleich zweier Zustände des Netzes: Starklast ohne Windeinspeisung und Schwachlast mit starker Windeinspeisung. Engpässe im Netz werden durch den Schwachlastfall mit starker Windeinspeisung hervorgerufen. Dieser Zustand belastet das 110-kV-Netz stärker als der für die Dimensionierung dieser Netze unterstellte Starklastfall.

Durch Anzahl und Leistung der in das 110-kV-Netz einspeisenden Windenergieanlagen kehrt sich die Leistungsrichtung im 110-kV-Netz um. Der Windstrom fließt über das 220/380-kV-Netz ab und ruft auch dort in zunehmendem Maße Engpässe hervor.

Kurzfristige Abhilfe, um diese Engpässe zu beheben, schafft ein lokales Erzeugungsmanagement. Bei diesem Verfahren kann die Betriebsführung Einfluss auf die Höhe der eingespeisten Leistung eines Windparks nehmen, indem sie im Fall einer Grenzwertverletzung durch zeitweilige Abschaltung von WEA oder durch andere geeignete Maßnahmen die eingespeiste Leistung verringert.

Windparks müssen sich wie Kraftwerke durch die Betriebsführung in ihrer abgegebenen Leistung zeitweilig begrenzen lassen.



**Bild 2 Lastfluss und Windeinspeisung**

Mittel- und langfristig sind Netzausbaumaßnahmen im Hoch- und Höchstspannungsnetz erforderlich, welche die Engpässe beseitigen. Beispielhaft ist hier die Situation in Schleswig-Holstein zu nennen. E.ON Netz hat für diese Region ein 110-kV-Netzausbaukonzept erarbeitet. Dabei ist allerdings fraglich, ob die Realisierung der Netzausbaumaßnahmen mit der Entwicklung der Windenergie Schritt halten kann.

Die o. a. Entwicklung der Windenergienutzung führt vermehrt zur Entstehung von Großwindparks, deren Größe einen Anschluss an die 220/380-kV-Ebene erfordert. Off-Shore entstehen ebenfalls Großwindparks, deren Erzeugung je nach Höhe der installierten Leistung und Entfernung vom Netzanschlusspunkt durch Drehstrom- oder Gleichstrom-Seekabel und über das Verbundnetz abgeführt werden muss.

Des weitern sind künftig Zusatzanforderungen an WEA zu stellen, die der Netzstützung dienen und die sich an den Anforderungen der Großkraftwerke orientieren.

Durch den zu erwartenden Zuwachs der Energieerzeugung aus Windkraft kann in Verbindung mit der Reduzierung der Kraftwerkseinspeisung unter bestimmten Betriebsbedingungen die Stabilität des Gesamtsystems nur noch eingeschränkt oder gar nicht gewährleistet werden, was im kritischen Fall zu Versorgungsunterbrechungen führen kann.

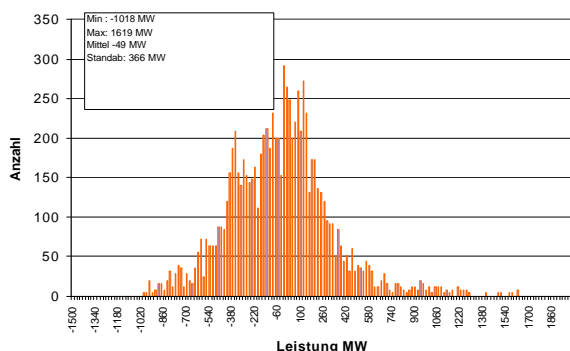
Darüber hinaus ergeben sich in bestimmten Fällen Defizite in der Bereitstellung von Blindleistung, die zu Problemen in der Spannungshaltung führen, insbesondere dann, wenn zeitgleich mit einer hohen Windeinspeisung ein Schwachlastfall vorliegt, bei dem nur noch Grundlastkraftwerke am Netz sind.

Zur Ermittlung der technischen Grenzen führt E.ON Netz zur Zeit umfangreiche Netzuntersuchungen durch. Erste Ergebnisse zeigen, dass insbesondere durch die zu erwartenden Zuwächse im Off-shore-Bereich umfangreiche Netzverstärkungen im Verbundnetz notwendig werden. E.ON Netz befindet sich hierzu im Dialog mit den betroffenen deutschen und europäischen Verbundnetzbetreibern.

#### 4 Vorhaltung von zusätzlicher Kraftwerksreserveleistung

Der Betrieb eines Netzes mit einer hohen Windeinspeiseleistung erfordert die Bereitstellung einer adäquaten Kraftwerksreserveleistung, die in der Lage sein muss, die Abweichungen aus der vorhergesagten Windeinspeisung und der tatsächlichen so auszugleichen, dass das Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch der Regelzone eingehalten wird.

Einen Überblick über Höhe und Häufigkeit der Abweichung von der Prognose und somit auch über den Windausgleichsbedarf vermittelt Bild 3.

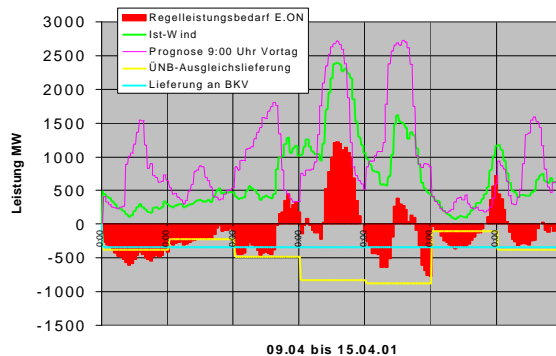


**Bild 3 Häufigkeitsverteilung des Windausgleichsbedarfs März bis Mai 2001**

Der Bedarf an Kraftwerksreserveleistung für den Windausgleich in einer Woche im April diesen Jahres ist in Bild 4 dargestellt. Deutlich wird, dass die EEG-Ausgleichslieferungen an die Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB), die auf der Windprognose des Vortages beruhen, den Bedarf an Kraftwerksreserveleistung deutlich erhöhen kann, wenn der Ist-Wert von der Prognose abweicht. Je größer der Prognosefehler ist, desto stärker wird der Bedarf an Kraftwerksreserveleistung.

Die Höhe der erwähnten EEG-Ausgleichslieferung erfolgt von Übertragungsnetzbetreibern mit Überschuss an Windstrom an die Übertragungsnetzbetreiber, die bezogen auf ihre Last,

wenig Windenergieaufkommen in ihrer Regelzone haben. Die Ausgleichslieferung ist eine konstante Bandlieferung, die sich nicht an der tatsächlich eingespeisten Windleistung orientiert. Sie kann, wie gezeigt wurde, bei großen Abweichungen von der Prognose engpassverschärfend wirken.



**Bild 4 Ausgleichsbedarf für die Windeinspeisung bei E.ON Netz**

Dieses gegenwärtig praktizierte Verfahren der EEG-Ausgleichslieferungen durch Bandlieferungen zwingt den Übertragungsnetzbetreiber mit hohem Windenergieaufkommen, die entsprechende Kraftwerksreserve allein vorzuhalten.

#### 5 Zusammenfassung

Die Förderung der Windenergienutzung führt zu einem deutlichen Anstieg der Windeinspeiseleistung in der Regelzone von E.ON Netz. Der Transport und die Verteilung dieses Stroms stoßen an technische Grenzen und schaffen Engpässe im Netz. Diese Engpässe können durch Anwendung eines lokalen Erzeugungsmanagements für einen Übergangszeitraum umgangen werden. Mittel- und langfristig erfordert die Entwicklung der Windenergie umfangreiche Netzverstärkungen im Hoch- und Höchstspannungsnetz, um den Anforderungen an eine adäquate Versorgungsqualität auch zukünftig gerecht zu werden.

Mit der erheblichen Zunahme an Windeinspeisung steigt der Bedarf an Kraftwerksreserveleistung an, die immer dann eingesetzt werden muss, wenn es zur Abweichung der Ist-Werte der Windeinspeisung von der prognostizierten Windeinspeiseleistung kommt. Die Vorhaltung und der Einsatz dieser Kraftwerksreserve verursachen zusätzliche Kosten beim Übertragungsnetzbetreiber.

## 7 Literatur

- [1] Luther, M.; Neumann, T.; Santjer, F.:  
Technische und betriebliche Aspekte für den  
Netzanschluss von Windenergieanlagen

VDE/SEV/ÖVE-Fachtagung „Netzzugang und  
Netznutzung im liberalisierten Umfeld“

Friedrichshafen, 9. – 10. Mai 2001