

Zukunft der Windenergienutzung in Deutschland

# Windenergie – zwischen Ertragsoptimierung und Versorgungssicherheit

Das Energievorkommen der Erde besteht aus Energievorräten und Energiequellen. Die fossil-biogenen Energievorräte gehen in einem absehbaren Zeitraum zur Neige. Der Zeitraum ihres Verbrauchs ist gegenüber dem Zeitraum ihres Entstehens kürzer als ein Wimpernschlag, was objektiv betrachtet der Menschheit in dieser Hinsicht ein höchst irrationales Verhalten bescheinigt. Außerdem erhöht die Umwandlung fossil-biogener Energievorräte die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre mit ungewissen Folgen. Nur die mineralischen Energievorräte zur Kernspaltung mit Brütertechnologie und Kernfusion und die im menschlichen Zeitmaßstab unerschöpflichen Energiequellen, die auch als erneuerbare Energien bezeichnet werden, bieten eine Basis der Energieumwandlung für nachfolgende Generationen. Die in diesem Sinne unerschöpflichen Energiequellen der Erde sind die Sonne, die Erdwärme und die Massenanziehung (Gezeiten). Alle vorhandenen Energiequellen werden bereits weltweit mit unterschiedlicher Intensität genutzt. In Deutschland wird die indirekte Nutzung der Sonne in Form der Windenergie intensiv verfolgt. Die Erwartungen an die Windenergie über ihren möglichen Anteil an der elektrischen Energieversorgung der Zukunft sind stark abhängig von der jeweiligen Interessensgruppe, die sie formuliert,

und deshalb recht heterogen. So gesehen, besteht Klärungsbedarf aus einer objektiv wissenschaftlichen Sichtweise heraus. Dazu soll der vorliegende Aufsatz einen Beitrag leisten.

Die Energiequellen der Erde und damit auch die Windenergienutzung sind örtlich und zeitlich dargebotsabhängig. Das bedeutet, die Nutzung ist vom unbeeinflussbaren örtlichen und zeitlich volatilen Angebot abhängig und kann in erster Linie weder örtlich noch zeitlich am Energiebedarfsprofil, wie bisher üblich, ausgerichtet werden. Die Windenergieanlage (WEA) wandelt die im Wind dargebotene Energie in elektrische Energie um und ist demnach der elektrischen Energieversorgung zugehörig. Da elektrische Energie derzeit nur begrenzt speicherbar ist und immer ausreichend leitungsgebundene Transportkapazität für deren Übertragung vorhanden sein muss, erscheint ein großer Windenergieanteil für die elektrische Ener-

gieversorgung zunächst kontraproduktiv. Stromproduktion und Verbrauch müssen zu jedem Zeitpunkt im Gleichgewicht sein. Übertragung elektrischer Energie über physikalisch unzureichende Übertragungswege erhöht die Verluste und gefährdet die Stabilität des Gesamtsystems.

Erörterungen und Diskussionen über die Rolle der Windenergie werden in Deutschland leider oft emotional geführt. Ein wesentlicher Schritt zur Versachlichung ist die klare Trennung der Kriterien »Energieertrag« und »Versorgungssicherheit« (Bild 1). Diese Unterscheidung spiegelt die unterschiedlichen Interessenslagen der WEA-Betreiber und der Netzbetreiber wieder. Für die Anlagenbetreiber steht verständlicherweise der monetär vergütete Energieertrag und dessen Optimierung im Vordergrund. Die Vergütung ist gesetzlich garantiert, entbehrt jedoch jedweder physikalisch technischer Vorgabe in puncto Versorgungssicherheit. Die öffentliche Diskussion über Windenergie ist häufig allein von der Ertragsoptimierung getragen. Die Netzbetreiber stehen aber in der Verantwortung der Versorgungssicherheit und erheben diese als Maßstab bei der Beurteilung der Windenergie. Die Versorgungssicherheit ist ein weitgehend physikalisch technisches Problem. Werden diese beiden Problembereiche in ihrer Zielsetzung nicht sauber getrennt, entsteht oft ein gegenseitiges Unverständnis.

In Deutschland haben wir uns im internationalen Maßstab an ein

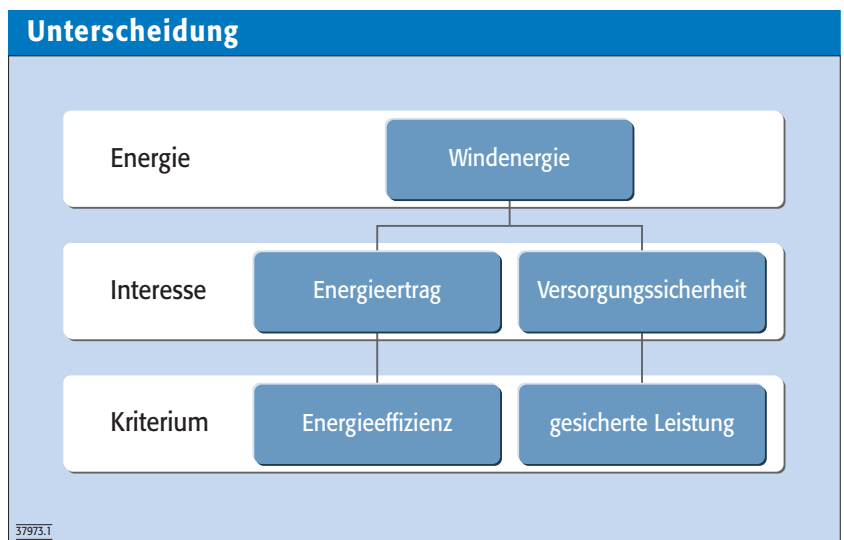


Bild 1. Problemstruktur der unterschiedlichen Interessenslagen der WEA-Betreiber und der Netzbetreiber

Prof. Dr.-Ing. *Johann Jäger* und cand. Ing. *Jochen Fuchs*, Universität Erlangen-Nürnberg; Dipl.-Ing. *Karsten Schuster*, Volta Windkraft GmbH, Ochsenfurt.

Höchstmaß an Versorgungssicherheit und damit an eine unterbrechungsfreie Stromversorgung rund um die Uhr gewöhnt. Dies ist auch ein wichtiger Standortfaktor für die Wertschöpfung in Deutschland, die unseren Wohlstand auf hohem Niveau sichert. Dies verstärkt andererseits in der Gesellschaft einen Bewusstseinsverlust über die Komplexität und die physikalisch technische Problematik der elektrischen Energieversorgung und den Erhalt der Versorgungssicherheit. Oft wird so getan, als ob dies durch reine Marktmechanismen an den Strombörsen zu lösen sei. Zu was reines Wegdiskutieren von Problemen führen kann, zeigt nicht zuletzt die aktuell weltweite Krise der Finanzwelt.

### Klassische Betrachtungsweise

Der Anteil der installierten Kraftwerksleistung, die zu einer bestimmten Versorgungssicherheit beiträgt wird als »gesicherte Leistung« bezeichnet. In der klassischen Betrachtungsweise geht man davon aus, dass jedes Element in der Versorgungskette ein Mindestmaß an Sicherheit erfüllt. Für die Bemessung der notwendigen Reserveleistung im Verbundnetzbetrieb der Kraftwerke und des Übertragungsnetzes wurde nach [1] bisher von einer Versorgungssicherheit bis zu 99,9999726 % (1 d/10 000 a) ausgegangen und auf dieser Basis Investitionsentscheidungen getroffen. In aktuellen Studien zur Netzintegration der Windenergie wird oft lediglich eine Versorgungssicherheit von 99 % zugrunde gelegt, was wiederum die Aussagekraft vor allem zur gesicherten Leistung der Windenergie entscheidend schmälert, da sich allein in den vier weiteren Neunen hinter dem Komma unsere gewohnte hohe Versorgungssicherheit begründet. Um generell Aussagen von Netzstudien im Zusammenhang mit der gesicherten Leistung richtig einordnen zu können, sollte zunächst immer nach der zugrunde gelegten Versorgungssicherheit gefragt werden.

Wird entsprechend der klassischen Vorgehensweise bei konventionellen Kraftwerken unter Zuhilfenahme von unabhängigen Einzelausfallwahrscheinlichkeiten und einer zu erreichenden Versorgungssicherheit von 99,9999726 % die Windenergie untersucht, kommt

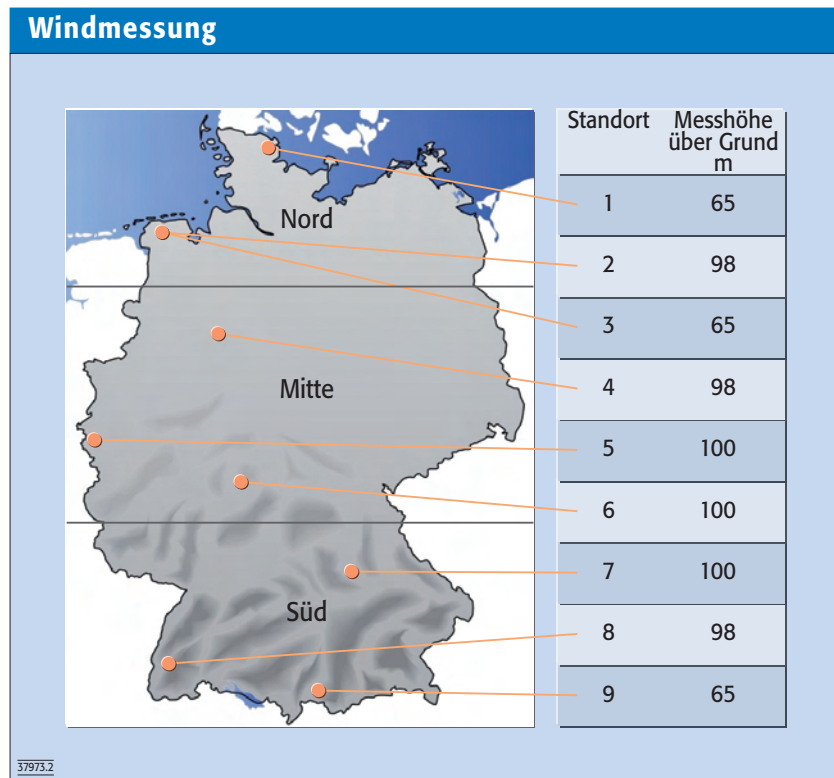


Bild 2. Standorte und Höhe der Messung über Grund

man unweigerlich zum Ergebnis, dass die Windenergie in Deutschland keinen Beitrag zur gesicherten Leistung liefert und damit kein einziges Megawatt konventioneller Kraftwerke ersetzen kann.

### Bessere Methode der Bewertung

Die klassischen Annahmen über unabhängige Ausfallwahrscheinlichkeiten und Betriebsweisen von konventionellen Anlagen ist auf die Windenergie übertragen zu kurz gegriffen. Die Ausfallwahrscheinlichkeit von WEA wird im Unterschied zu konventionellen Kraftwerken maßgeblich über die Verfügbarkeit des Brennstoffs, sprich des Windes, bestimmt. Ist aber an einem Ort Windflaute, so nimmt mit der Entfernung von diesem Ort die Wahrscheinlichkeit höherer Windgeschwindigkeiten zu. Ein konventionelles Kraftwerk wird normalerweise, wenn es technisch verfügbar ist, meist nahe der Nennleistung betrieben, um nicht zuletzt den höchst möglichen Wirkungsgrad zu erzielen. Dies ermöglicht eine planbare Brennstoffzufuhr. Hingegen kann eine technisch betriebsbereite WEA aufgrund des dargebotsabhängigen Windaufkommens nur ei-

nen Bruchteil ihrer Betriebszeit bei Nennleistung fahren. Dies ist für die Nutzung von Energiequellen typisch und muss bei deren Bewertung durch Berücksichtigung der Teilleistungsszenarien beachtet werden. Aufgrund der recht jungen Betriebsgeschichte der Windenergie sind zudem noch unterschiedlichste aber zum Teil auch bereits wieder veraltete Anlagentypen in Betrieb, die mangels Erfahrung auch nicht immer an einem für ihre Betriebsweise günstigen Standort errichtet sind.

Aussagekräftiger und realistischer als die klassischen Methoden scheint ein Ansatz, in dem die windbedingte Betriebsfähigkeit von WEA im Vordergrund steht. Ins Zentrum der Analyse wird die Verfügbarkeit von Wind als Brennstoff gerückt. Damit wird die Analyse auf das Winddargebot ausgerichtet. Die Möglichkeiten eines solchen Ansatzes sind vielfältig. Notwendig ist zunächst die Auswahl adäquater Referenzmesspunkte.

Dazu wurden Windmessdaten bestehender WEA an repräsentativen Messorten in Westdeutschland neutral bewertet. Bewertungskriterien sind Anlagentyp, vor allem die Nabenhöhe, und der Standort. Die

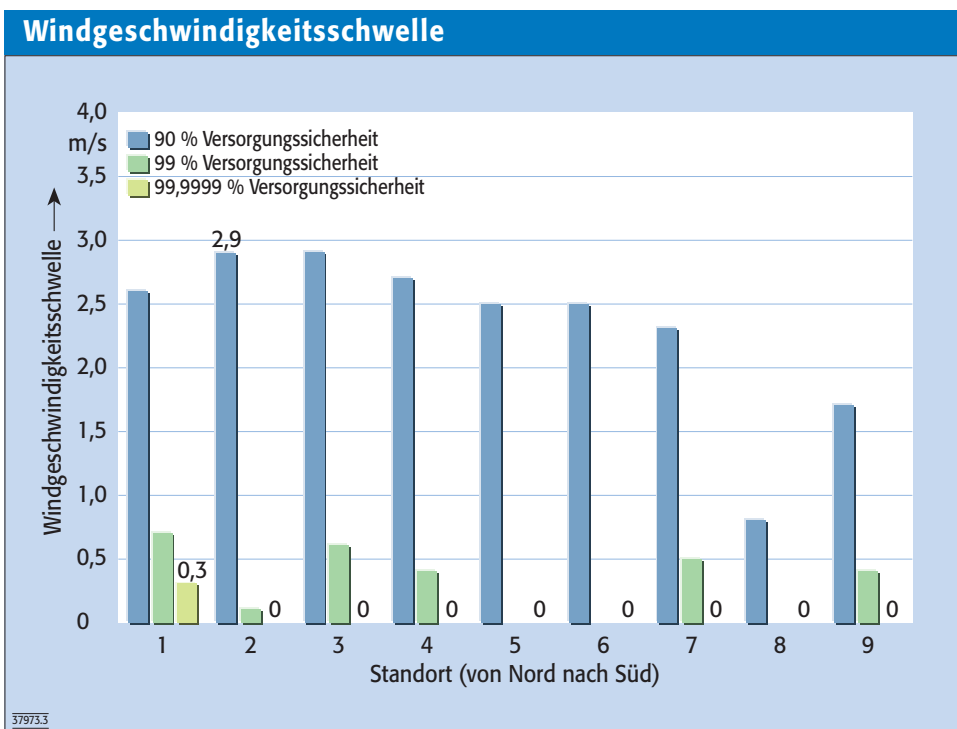


Bild 3. Windgeschwindigkeitsschwellen bei vorgegebener Sicherheit

Auswahl kann die Ergebnisse erheblich beeinflussen und muss deshalb sorgfältig abgewogen werden. Sofern geeignete, ähnliche Anlagen und gleichmäßig verteilte Standorte gefunden werden, sind alle notwendigen Ortsabhängigkeiten bereits

berücksichtigt. Die Synchronisation der Datenreihen wird über die Zeit vorgenommen.

In einem Projekt zur Windenergienutzung am Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung der Universität in Erlangen wurden neun

solche WEA ausgewählt und deren auf Nabenhöhe gemessene Windgeschwindigkeiten aus dem gesamten Jahreszeitraum 2006 entsprechend aufbereitet und ausgewertet. Der Einfluss der Charakteristik und der Güte der Anlage kann so unterdrückt werden, da nur die Werte der Windmessung betrachtet werden (Bild 2).

#### Vorgehensweise

Alle Windgeschwindigkeitsmesswerte sind 10-min-Mittelwerte und werden zwischen ihrem Minimum und Maximum in 0,1-m/s-Intervalle sortiert und die Anzahl gleicher Messwerte kumuliert. Die so entstandene Zusammenstellung gibt Aufschluss über die Verteilung der vorherrschenden Windgeschwindigkeiten und deren Dominanz. Eine Wahrscheinlichkeitsdichte der Windgeschwindigkeiten lässt sich mittels Normierung auf die Anzahl aller Datenpunkte erzeugen. Aus ihr lassen sich die Wahrscheinlichkeiten für ein Windgeschwindigkeitsintervall ablesen. Das Integral über die Wahrscheinlichkeitsdichte, die Verteilungskurve, veranschaulicht die Entwicklung der Wahrscheinlichkeit zur Unterschreitung bzw. Überschreitung von Windgeschwindigkeitsschwellen. Je nachdem von welcher Seite aus integriert wird, kann man z. B. die Wahrscheinlichkeit dafür entnehmen, dass der Wind mit mindestens 2,5 m/s weht. Mittelwert und Median der Windgeschwindigkeit werden ebenfalls ermittelt.

#### Ergebnisse

Zunächst werden die einzelnen Standorte getrennt voneinander untersucht. Es zeigt sich, dass die Anlagen bezogen auf ihren Windgeschwindigkeitsmittelwert in einem relativ engen Band zwischen 4,9 und 6,9 m/s liegen. Alle neun betrachteten Anlagen haben einen durchschnittlichen Mittelwert von 6,0 m/s. Der Median aller Messpunkte bleibt immer ein paar Zehntel unterhalb des Mittelwerts. Diese Ergebnisse weisen das erwartete charakteristische Spektrum von Windgeschwindigkeitsverteilungen auf.

Die Windgeschwindigkeitsverläufe und Verteilungskurven zeigen, dass das Windangebot stets aus vielen meist stark schwankenden Windgeschwindigkeitsanteilen zusammengesetzt ist. Für die Versor-

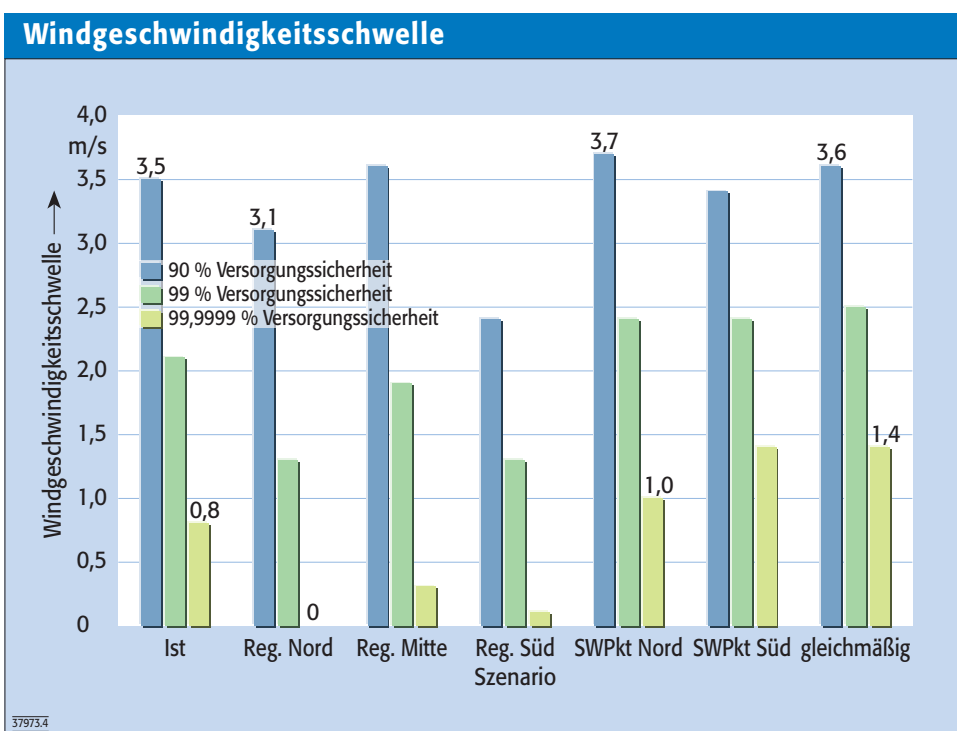


Bild 4. Windgeschwindigkeitsschwellen unterschiedlicher Szenarien

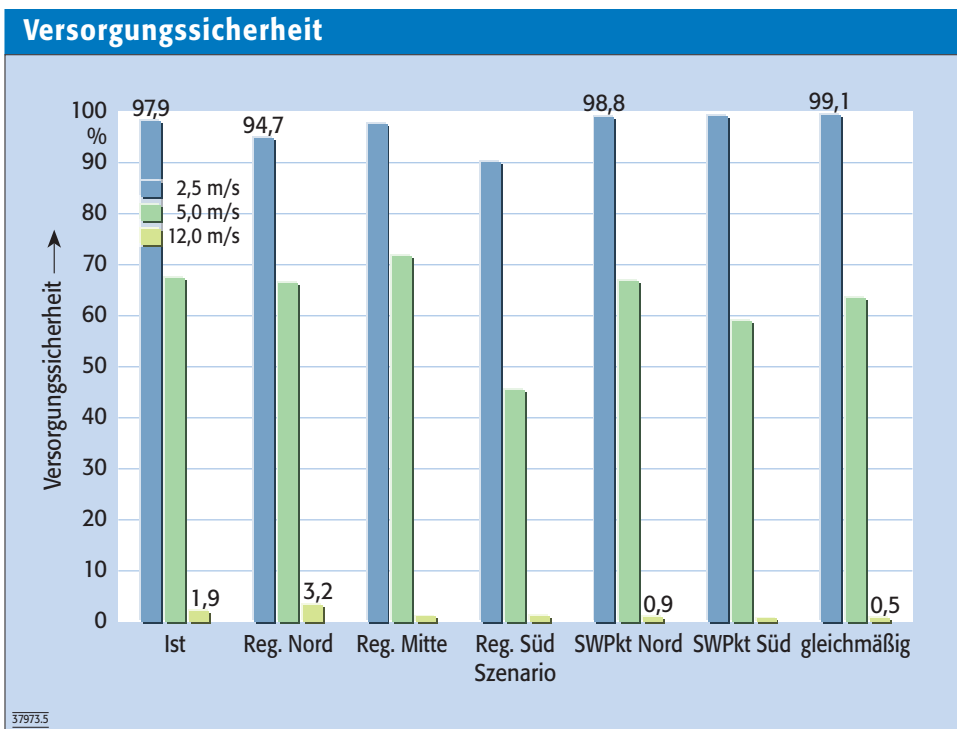


Bild 5. Versorgungssicherheit unterschiedlicher Szenarien

gungssicherheit ist der Anteil an geringen Windgeschwindigkeiten entscheidend, denn nicht der maximale, sondern die minimale Windgeschwindigkeit wirkt limitierend, da in Zeiten zu geringer Windgeschwindigkeiten die Anlage aus dem Versorgungsverbund ausfällt und ihr Leistungsanteil kompensiert werden muss.

Die Versorgungssicherheit wird über das Integral der Wahrscheinlichkeitsdichte berechnet. Als Windgeschwindigkeitsschwellen der Standorte dienen 2,5 (Einschaltgrenze), 5 und 12 m/s (Nennbetrieb), die mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,9999 %, 99 % und 90 % untersucht werden (Bild 3). Es

zeigt sich, dass an keinem Standort mit einer Wahrscheinlichkeit bzw. Versorgungssicherheit von nur 90 % eine Windgeschwindigkeit von mindestens 3 m/s garantiert werden kann. Über alle Standorte gemittelt ist mit 99,9999 % Sicherheit 0,0 m/s, mit 99 % Sicherheit 0,3 m/s und mit 90 % Sicherheit 2,3 m/s Wind zu erwarten. Mit Windgeschwindigkeiten über 2,5 m/s lässt sich zu 88 %, mit über 5 m/s zu 60 % und mit über 12 m/s zu 3,5 % rechnen.

Die Wahrscheinlichkeiten für eine Leistungsbereitstellung im Netz ist indes geringer, da die Anlagen bei Windgeschwindigkeiten ab 2,5 m/s erst anlaufen und häufig ab

20 m/s abgeschaltet werden müssen. Vor allem bei Offshore-Anlagen muss das erhöhte Wartungsrisiko berücksichtigt werden. Damit trägt keine einzige Anlage einzeln betrachtet zur Versorgungssicherheit aus Sicht der elektrischen Energieversorgung bei, was auch dem Ergebnis der klassischen Vorgehensweise entspricht.

Eine Verbesserung kann nur eine Gesamtbetrachtung aller Anlagen bringen. Der Vergleich der Verteilungskurven einzelner Anlagen und auch der zugehörigen Mittel- und Medianwerte zeigt deutliche Standortunterschiede. Standorte im Norden sind bezüglich des Ertrags besser als im Süden. Daher erscheint es bisher vernünftig zu sein, bevorzugt im Norden WEA zu errichten. Klarheit darüber bringt eine Sensitivitätsanalyse. In verschiedenen Szenarien werden die Windgeschwindigkeitsmesswerte der Einzelanlagen entsprechend *Tafel 1* und *Bild 2* kombiniert und gewichtet.

Für jedes dieser Szenarien werden die gewichteten Windgeschwindigkeiten der beteiligten Standorte addiert und gemittelt. Die Ergebnisse sind in *Bild 4* und *Bild 5* dargestellt. Es zeigt sich, dass mit einem regionalen Ausbau einzelner ertragreicher Windregionen der Energieertrag sicher wächst, aber die Versorgungssicherheit eher geringer wird. Das Szenario »Regional Norden« veranschaulicht diesen Sachverhalt. Im Vergleich zum Szenario »Ist« steigt der erwartete Energieertrag an, da die Wahrscheinlichkeit auf Windgeschwindigkeiten über 12 m/s mit 3,2 % (*Bild 4*) deutlich erhöht ist. Der Anteil der Windgeschwindigkeiten über 2,5 m/s sinkt aber gleichzeitig auf 94,7 %. Der Beitrag zu einer Versorgungssicherheit von 99,9999 % des Szenario »Regional Nord« geht so auf null zurück.

Anders verhält es sich bei einer gleichmäßig deutschlandweiten Verteilung der WEA im Szenario »Gleichmäßig«. Die Wahrscheinlichkeit für hohe Windgeschwindigkeiten sinkt gegenüber dem Szenario »Ist«, jedoch steigt die Wahrscheinlichkeit für Windgeschwindigkeiten über 2,5 m/s auf einen relativ guten Wert von 99,1 %. Zudem ist der Beitrag zur Versorgungssicherheit mit der durchschnittlichen Mindestwindgeschwindigkeit von immerhin 1,4 m/s erhöht (*Bild 5*).

Gruppierung/Standort	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Ist-Verteilung (geschätzt)	10	10	10	5	4	2	1	1	1
Regional Norden	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Regional Mitte	0	0	0	1	1	1	0	0	0
Regional Süden	0	0	0	0	0	0	1	1	1
SWPkt Norden	3	3	3	2	2	2	1	1	1
SWPkt Süden	1	1	1	2	2	2	3	3	3
gleichmäßig	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tafel 1. Verteilungsszenarien von WEA in Deutschland

Eine detaillierte Betrachtung der Flautenzeiten zeigt, dass zu jedem Zeitpunkt zumindest an einem der untersuchten Standorte eine Windgeschwindigkeit über 2,5 m/s gemessen wurde und damit immer mindestens eine Anlage einspeist. Auch wenn bei dem Szenario »Gleichmäßig« nur wenig zur gesicherten Leistung beigetragen werden kann, ist doch zumindest die notwendige Strategie für den Windenergieausbau der Zukunft deutlich sichtbar.

### Fazit

Soll die Windenergie künftig in der elektrischen Energieversorgung einen wichtigen Beitrag liefern, muss nicht nur über eine Energieertragsoptimierung der einzelnen Anlagen sondern auch über eine Erhöhung des Beitrags zur gesicherten Leistung insgesamt nachgedacht werden, damit sie konventionelle Kraftwerksleistung tatsächlich ersetzen kann. Große Energieeinspeisungen zeitlich volatil und örtlich konzen-

triert, wie bisher, gefährden eher die Versorgungssicherheit, als dass sie ihr nützen.

Um Windflauten auch in sonst windreichen Gebieten auszugleichen, muss eine gleichmäßig überregionale Verteilung der Windstandorte auch in windärmeren Gebieten, trotz der dort zu erwartenden Energieertragseinbußen, angestrebt werden. Nicht die Höhe der installierten Leistung der WEA, sondern die bewusste Auswahl unterschiedlicher Standorte erhöht den Beitrag zur Versorgungssicherheit. Für Deutschland bedeutet dies einen notwendigen Zuwachs der Windenergie im Süden. Andererseits ist Deutschland aus meteorologischer Sicht ein kleines Gebiet und wird von einer Großwetterlage mühelos überspannt, die zu großen Gebieten niedriger Windgeschwindigkeiten führen kann. Ein weitreichender Ausgleich des Windenergieangebots wird wohl nur im europäischen Rahmen und durch die Bereitstellung der dann notwendigen Energietransportmöglichkeit mög-

lich sein. Außerdem sind zusätzliche Energiespeicherkapazitäten vorzugsweise in Form der bewährten Pumpspeichertechnik bereitzustellen. Ohne diese Maßnahmen wird die Windenergie in Zukunft ihren notwendigen Beitrag zur Versorgungssicherheit nicht erfüllen können

### LITERATUR

- [1] Alt, H.: Versorgungssicherheit und Windenergie. *ew* Jg. 104 (2005), H. 25, S. 42 – 45.

(37973)

[jaeger@eev.eei.uni-erlangen.de](mailto:jaeger@eev.eei.uni-erlangen.de)

[www.eev.e-technik.uni-erlangen.de](http://www.eev.e-technik.uni-erlangen.de)

[www.voltawind.de](http://www.voltawind.de)