

Lorenz Jarass  
Gustav M. Obermair  
Wilfried Voigt

# Windenergie

Zuverlässige Integration  
in die Energieversorgung

2., vollständig neu bearbeitete Auflage

 Springer

Prof. Dr. Lorenz Jarass  
Rhein-Main-University Wiesbaden  
Dudenstr. 33  
65193 Wiesbaden  
www.JARASS.com

Prof. Dr. Gustav M. Obermair  
Riverside Plot 124  
P.O. Box 8141  
Swakopmund, Namibia

Wilfried Voigt  
Brückenstr. 29  
24148 Kiel

ISBN 978-3-540-85252-0

e-ISBN 978-3-540-85253-7

DOI 10.1007/978-3-540-85253-7

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;  
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1980, 2009

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Einbandgestaltung: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

9 8 7 6 5 4 3 2 1

springer.de

# Überblick und Einführung

Der folgende Überblick ist nach den Kapiteln des Buchs geordnet:

## **(1) Abkehr von fossilen Brennstoffen: Probleme, Ziele und Lösungsansätze**

Schon vor einigen Jahren schlug Lord Browne, der damalige Chef des Konzerns „British Petroleum“, als neue Fassung für den weltbekannten Kurznamen BP den Namen „Beyond Petroleum“ vor. Damit hat er in zwei Wörtern eines der vordringlichsten Ziele benannt, das von der Weltwirtschaft bis zur Mitte dieses Jahrhunderts erreicht werden sollte: eine drastische Verringerung des Einsatzes fossiler Energieträger und der damit verbundenen Emission des Treibhausgases Kohlendioxid.

In der Europäischen Union gibt es feste Vereinbarungen, in einem ersten Schritt bis 2020 den Ausstoß der klimaschädlichen Treibhausgase im Vergleich zu 1990 um mindestens ein Fünftel zu verringern. Dabei ist eine vermehrte Substitution fossiler durch nukleare Energie weltweit umstritten, in Deutschland politisch negativ entschieden; Kernfusion steht, wenn überhaupt, erst in 50 Jahren zur Diskussion. Die CO<sub>2</sub>-Rückhaltung und Einlagerung in tiefe Schichten ist wohl grundsätzlich möglich, aber technisch unerprobt.

So wird neben drastischen Verbesserungen der Energieeffizienz v. a. eine rasche und weitgehende Substitution fossiler durch erneuerbare Energie als realistischer Weg beschritten: Der Anteil von Energie aus Sonne, Wasser, Wind und Biomasse am gesamten Primärenergieeinsatz soll bis 2020 in der Europäischen Union auf mindestens 20% erhöht werden, Deutschland soll seinen Anteil von 6,6% in 2007 auf 18% in 2020 erhöhen. Bei der Stromerzeugung hat Deutschland diesen Anteil von 18% erneuerbarer Energie schon 2007 erreicht, bis 2020 soll hier knapp ein Drittel erreicht werden, bis 2050 drei Viertel, v. a. durch Offshore-Windenergie. Damit entsteht ein zusätzlicher Übertragungsbedarf im Hoch- und Höchstspannungsnetz.

## **(2) Physikalisch-technische Grundlagen der Windenergienutzung**

Wie fast alle auf der Erde verfügbaren Energieformen ist auch Windenergie eine abgeleitete Form von Sonnenenergie. Die unterschiedliche Erwärmung der

Erdatmosphäre durch die Einstrahlung der Sonne auf verschiedene Gebiete der Erdoberfläche führt zu Dichte- und Druckunterschieden, die in fluktuierenden Luftströmungen auf allen Längen- und Zeitskalen von Metern bis zu Tausenden von Kilometern und von Sekunden bis zu Wochen und Monaten ihren Ausgleich suchen.

Das Leistungsangebot des Windes steigt mit der dritten Potenz der momentanen Windgeschwindigkeit. Tatsächlich läuft eine große Windenergieanlage erst bei 3 bis 5 m/s an, erreicht dann Nennleistung bei 12 bis 14 m/s und wird bei etwa 25 m/s sturmabgeschaltet. Dabei wird maximal eine elektrische Energieausbeute von vier Fünftel des theoretischen Höchstwerts einer idealen Windenergieanlage realisiert. Der tatsächliche Jahresenergieertrag an einem Standort steigt etwa mit dem Quadrat des dort gegebenen Jahresmittelwerts der Windgeschwindigkeit. Optimierung des Energieertrags und Vermeidung von Überlastung werden bei großen Anlagen durch eine der jeweiligen Windgeschwindigkeit entsprechende Einstellung des Anstellwinkels der Rotorblätter erreicht.

### **(3) Wind als stochastische Energiequelle**

Die Windstärke und damit die mögliche Windenergieproduktion in Nordwesteuropa zeigt einen irregulären zeitlichen Verlauf mit sehr großen und raschen Fluktuationen, der durch statistische Größen wie Häufigkeitsdichten, Verteilungsfunktionen oder „Leistung-Dauer-Kurven“ charakterisiert werden kann.

Wenn man die Leistung-Dauer-Kurve einer gegebenen Anlage in einer Standortregion bestimmt hat, so ist die dort erzielbare Jahresenergieproduktion gleich der Fläche unter dieser Kurve. Teilt man diese Jahresenergieproduktion durch die installierte Generatornennleistung, so erhält man die „Volllaststundenzahl“. Sie beträgt für größere Anlagen auf dem heutigen Stand der Technik im Binnenland rund 1.500 Stunden, an der Küste rund 2.000 Stunden, offshore könnten 4.000 Stunden erreicht werden; eine Erhöhung der Türme auf 150 m könnte im Binnenland Werte von über 2.000 Stunden erbringen.

Beim realen Zeitverlauf der Stromerzeugung eines großen Windparks, einer ganzen Region oder aller Windenergieanlagen in Deutschland zeigt sich gegenüber einer Einzelanlage eine deutliche Glättung der starken Fluktuationen im Minuten- und Stundenbereich. Doch auch im deutschlandweiten oder sogar nordwesteuropaweiten Verbund wirken sich großräumiger Schwachwind und Flauten über Tage und in seltenen Fällen über Wochen auf den Energieertrag aus und müssen durch Regel- und Reservekraftwerke ausgeglichen werden.

### **(4) Versorgungssicherheit im Stromnetz bei hoher Windenergieeinspeisung**

Bei der Übertragung von elektrischer Energie aus Wind kann man die *Entsorgungssicherheit* im öffentlichen Netz sehr viel kleiner halten als die *Versorgungssicherheit* der Stromverbraucher, weil man die Einspeisung der Windenergieanlagen im Netzstörfall kurzfristig zurückregeln kann im Gegensatz zur Nachfrage der

Stromverbraucher. Bei einer windbedingten Erhöhung der Übertragungsleistung des Netzes ist nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz ein Leitungsneubau nur dann wirtschaftlich zumutbar, wenn die kostengünstigeren Lösungen Netzoptimierung (z. B. durch Temperaturmonitoring) und Netzverstärkung (z. B. durch Hochtemperaturseile) nicht ausreichen.

Bei einem Neubau von 110-kV-Hochspannungsleitungen sind grundsätzlich Erdkabel gegenüber Freileitungen zu bevorzugen, weil sie schneller realisierbar sind, geringere Umweltbelastungen verursachen und nicht nennenswert teurer sind. Insgesamt liegen die windenergiebedingten Netzausbaukosten auch für die Höchstspannungsfernübertragung onshore im Bereich von 10% der Investitionskosten der Windenergieanlagen. Mittelfristig ist allerdings ein aufwändiges großräumiges Verbundnetz erforderlich, das insbesondere die neuen Offshore-Windparks der Nordsee-Anrainerstaaten untereinander und mit den Verbraucherschwerpunkten verbindet.

#### **(5) Systematische Berücksichtigung von externen Kosten: Erneuerbare-Energien-Gesetz**

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz mit seinen Kernregelungen der festen Einspeisevergütungen und der Abnahmeverpflichtung des erzeugten Stromes ist ökonomischer Garant für den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien. Angesichts der Verhältnisse in der deutschen Stromwirtschaft mit dem massiven Angebotsdruck eines oligopolistisch organisierten und weitgehend abbeschriebenen Großkraftwerksparks war und ist dieser Ansatz des Gesetzgebers ohne ernsthafte Alternative. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz hat sich mittlerweile zum Exportschlager entwickelt, ähnliche Gesetze wurden in vielen Ländern eingeführt, die ebenfalls den Ausbau der erneuerbaren Energien vorantreiben wollen.

Die garantierte Einspeisevergütung für Windenergie liegt schon heute deutlich unter den dadurch vermiedenen volkswirtschaftlichen Kosten fossiler Energieerzeugung, in denen neben den weiter steigenden Brennstoffkosten v. a. die externen Kosten durch CO<sub>2</sub>- und Schadstoffemissionen bewertet werden müssen. Der geplante Übergang von fester Einspeisevergütung und Abnahmeverpflichtung hin zum Verkauf der Windenergie an der Strombörse ist ebenso risikoreich wie die Einführung eines Quotensystems: Eine reine Börsenvergütung würde Windenergie im Mittel weit unter ihrem gesamtwirtschaftlichen Nutzen vergüten und zukünftig den Zubau von Windenergieanlagen unwirtschaftlich machen, wie das Beispiel Dänemark zeigt.

#### **(6) Windenergieausbau und Verwaltungsverfahren**

Die auch im weltweiten Vergleich beeindruckende Windenergieentwicklung in Deutschland war nur möglich durch zielführende Rechtsnormensetzung, gerade auch im Bereich der Genehmigungsverfahren und der Flächenausweisungen. Die rapide Entwicklung des Onshore-Windenergieausbaus mit rund 24 GW installierter Leistung Ende 2008 zeigt dies ebenso wie der Offshore-Windenergieausbau,

der nach aufwändigem Genehmigungsverfahren für die ersten 8 GW seit 2009 anläuft. Verschiedenste Interessengegensätze wurden soweit überwunden, dass der Rechtsrahmen auch für den windenergiebedingten Ausbau der Stromnetze und für die kostenaufwändige Offshore-Netzanbindung mittels Höchstspannungsseekabeln geschaffen werden konnte. Die so erreichbaren positiven Gesamtwirkungen des Ausbaus der Windenergie belegt nicht zuletzt die wirtschaftliche Entwicklung in Schleswig-Holstein, dem Pionierland der Windenergie.

### **(7) Windenergie in Deutschland, Europa und weltweit**

Die Windenergie ist in Deutschland, Europa und weltweit der erneuerbare Energieträger, der die mit Abstand größte Ausbaudynamik aufweist. Die deutschen Ausbauplanungen können bis zum Jahr 2030 zur Installation von bis zu 60 GW installierter Leistung führen. Dieses setzt sowohl die Fortschreibung und Weiterentwicklung geeigneter Rahmenbedingungen als auch die Lösung teilweise noch anstehender Probleme, v.a. bei der Offshore-Windenergie, voraus. Auch andere europäische Länder, wie z. B. Spanien oder Großbritannien, verfolgen ehrgeizige Windausbaupläne – onshore wie offshore. Die weltweite Dynamik nimmt ebenfalls zu, was die Entwicklung in großen Schwellenländern wie China und Indien ebenso zeigt wie die jüngere Entwicklung in den USA und Kanada. Die Windenergienutzung entwickelt sich so zu einem zentralen Eckpfeiler klimaschonender Stromversorgung und kann als eines der positiveren Beispiele globaler Entwicklung gelten.

### **(8) Grundlagen der Optimierung: Nutzen versus Kosten**

Ein Investor oder eine ganze Gesellschaft wird sich für den Einsatz einer bestimmten Technik entscheiden, wenn der damit erzielbare Nutzen höher ist als die dafür zu erbringenden Kosten. Darüber hinaus muss die Rendite der Investition, also das Verhältnis von Nettoertrag zu Kapitaleinsatz, nicht nur positiv sein, sondern mindestens so hoch wie die für Investitionen mit vergleichbarem Risiko erzielbare typische Rendite. Für Investitionen in Windenergie werden Kosten und Nutzen abgeschätzt.

Ist die Rendite der Investition grundsätzlich ausreichend, so bleibt die Frage, wie hoch die Investition gewählt werden soll. Hier gibt es im Allgemeinen ein Optimum, da die Anlagengröße häufig aus technischen Gründen und wegen Platzbedarf nicht beliebig erhöht werden kann oder bei einem Überangebot des nutzenbringenden Gutes der Ertrag pro Stück wieder abnimmt. Mit Hilfe der Grenznutzen-Grenzkosten-Methode kann das Optimum ermittelt werden. Es resultiert daraus ein neues und für die Integration der Windenergie wesentliches Ergebnis: Die Grenznutzenkurve und damit das Optimum von Investitionen in eine zeitlich stark fluktuierende Quelle von Nutzen lässt sich direkt aus der „Leistung-Dauer-Kurve“ der Quelle herleiten. Damit lässt sich die optimale Nennleistung von Windenergieanlagen oder die optimale Grenzleistung von windenergiebedingten Übertragungsleitungen bestimmen.

## **(9) Optimierung von Windenergieanlagen**

Seit 1980 wurden die Windenergieanlagen drastisch vergrößert: Die typischen Turmhöhen stiegen von 30 m auf bis zu 120 m, wodurch wesentlich höhere und gleichmäßigere Windgeschwindigkeiten genutzt werden können. Die installierte Generatornennleistung stieg von rund 30 kW auf mittlerweile bis zu 6.000 kW. Der Rotordurchmesser stieg von rund 15 m auf bis zu 127 m, was die für die jährliche Windenergieproduktion entscheidende Rotorkreisfläche von knapp 200 m<sup>2</sup> auf über 12.000 m<sup>2</sup> erhöhte.

Der jährliche Energieertrag pro Anlage stieg von etwa 0,035 GWh auf bis zu 20 GWh. Die Stromgestehungskosten konnten so bis 2005 etwa halbiert werden. Seit 2006 steigen allerdings die spezifischen Investitionskosten der Windenergieanlagen wegen der stark gestiegenen Rohstoffpreise und der wachsenden internationalen Nachfrage nach Windenergieanlagen. Es bleibt zudem abzuwarten, ob die offshore mindestens doppelt so hohen Investitionskosten durch die dort deutlich höheren Winderträge voll ausgeglichen werden können. Windenergie ist in jedem Fall von allen erneuerbaren Energien (mit Ausnahme der Wasserkraft) am kostengünstigsten und lag 2008 bei den einzelwirtschaftlichen Kosten nicht mehr wesentlich über dem Niveau neuer thermischer Kraftwerke.

Eine Verringerung der spezifischen Flächenleistung (W/m<sup>2</sup>), d. h. kleinerer elektrischer Generator in sonst unveränderter Windenergieanlage, verringert die jährliche Energieerzeugung nur geringfügig, führt aber zu einer geringeren mechanischen Belastung der Anlage, einer deutlich höheren Volllaststundenzahl und einer deutlich besseren Prognostizierbarkeit der Windenergieproduktion.

## **(10) Optimierung der Übertragung von Windenergie**

Die Netzbetreiber sind gesetzlich zur unverzüglichen Erhöhung der Übertragungsleistung („Netzausbau“) für erneuerbare Energien verpflichtet, allerdings nur, soweit dies (volks)wirtschaftlich zumutbar ist. Diese Anweisung zu einer gewissen Beschränkung des windbedingten Netzausbaus drückt eigentlich nur die wirtschaftliche Selbstverständlichkeit aus, dass für die wenig Energie erbringenden sehr seltenen kurzen Spitzen der Windleistung keine teure zusätzliche Übertragungskapazität von den Stromkunden bezahlt werden muss.

Die Auswertung der Grenznutzenkurven zeigt, dass bei einem Netzausbau bis zum volkswirtschaftlichen Optimum deutlich weniger als 1% der möglichen Windenergieerzeugung „ausgesperrt“ werden muss, aber je nach Einzelfall beträchtliche Netzausbaukosten eingespart werden. Überdies werden die Betreiber der Windenergieanlagen durch die Einspeisebeschränkung nicht schlechter gestellt, da sie ab 2009 voll entschädigt werden. Die Stromkunden werden aber geringer belastet, weil die so vermiedenen Ausbaukosten niedriger sind als die Entschädigungszahlungen. Es werden Richtgrößen für die jeweils gesamtwirtschaftlich optimale Erhöhung der Übertragungsleistung bestimmt und zwar für die Anbindung von Onshore-Windparks, von Offshore-Windparks und für eine großräumige Nord-Süd-Übertragung.

### **(11) Struktur und Entwicklung des Kraftwerksparks: Zielvorgaben und Szenarien**

Bis etwa 2000 bestand in Deutschland eine Dominanz von Großkraftwerken auf Kohle- und Uranbasis. Diese Grundlastkraftwerke machten zwei Drittel der installierten Leistung aus und lieferten mehr als vier Fünftel der elektrischen Energie. Die von der Bundesregierung vorgegebenen, großteils gesetzlich festgeschriebenen Ziele des Klimaschutzes und einer verringerten Abhängigkeit von fossilen und nuklearen Brennstoffen sehen schon für die nächsten 20 Jahre schrittweise einen drastischen Wandel vor:

Bis 2023 soll das letzte Kernkraftwerk abgeschaltet sein, Erzeuger erneuerbarer Energien sollen bis 2025 50% der installierten Generatorleistung ausmachen (davon wiederum die Hälfte Windenergie), in 2050 über 80%, weitere 15% sollen dann auf dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung entfallen. Diesen v.a. von den konventionellen Stromversorgern angezweifelten Projektionen wird in zahlreichen Untersuchungen unabhängiger Experten Realisierbarkeit attestiert.

### **(12) Entwicklung des Kraftwerkssystems bei über 50 GW Windleistung**

Im Energieprogramm der Bundesregierung ist eine Erhöhung der installierten Leistung von Windenergieanlagen von rund 25 GW in 2008 auf knapp 50 GW in 2025 und bis zu 70 GW in 2040 festgeschrieben. Dadurch wird Zug um Zug eine durchgreifende Änderung des gesamten Kraftwerkssystems notwendig. Erforderlich ist v. a. der Ausgleich der raschen und starken Schwankungen des Windenergieangebots durch Nachfrage- und Angebotssteuerung und den Einsatz einer großen Anzahl von kleinen und mittelgroßen rasch regelbaren neuen Reservekraftwerken, zu deren Betrieb neben Erdgas zunehmend auch ins Gasnetz eingespeistes Biogas beitragen kann. Bewährte und neue Speicher für elektrische Energie werden dabei eine wachsende Rolle spielen.

Erneuerbare Energien können zusammen mit dem vorgesehenen hohen Anteil an Kraft-Wärme-Kopplung schon ab 2025 häufig für Stunden oder gar Tage annähernd die gesamte Stromnachfrage in Deutschland abdecken. Insbesondere das Erneuerbare-Energien-Gesetz und die CO<sub>2</sub>-Zertifikate werden dafür sorgen, dass der Markt die notwendige Umwandlung des gesamten Kraftwerkssystems in den nächsten 20 Jahren vorantreiben wird. Als Folge dieser notwendigen Entwicklung wird für große Grundlastkraftwerke nur noch ein sehr geringer Bedarf – etwa zur Frequenzstabilisierung – bestehen. Wegen der daraus resultierenden immer kürzeren Nutzungsdauern werden die derzeit geplanten Neubauten von Grundlastkraftwerken unwirtschaftlich und zu großen betriebswirtschaftlichen Verlusten für die Investoren führen.