

Entwicklungstendenzen in der Windkraftanlagentechnik

von Siegfried Heier
und Werner Kleinkauf

Dr.-Ing. Siegfried Heier ist Oberingenieur im Fachgebiet Elektrische Energieversorgungssysteme am Institut für Elektrische Energietechnik der Universität Gh Kassel.

Prof. Dr.-Ing. Werner Kleinkauf ist Leiter des Fachgebietes Elektrische Energieversorgungssysteme am Institut für Elektrische Energietechnik der Universität Gh Kassel und Vorstandsvorsitzender des Instituts für Solare Energieversorgungstechnik e.V. (ISET), Kassel.

Überblick

Die Nutzung der Windenergie nahm in den letzten Jahren einen enormen Aufschwung und steht an der Schwelle zur großtechnischen Anwendung. Diese Entwicklung wurde durch Förderprogramme des Bundes und der Länder sowie durch das Stromeinspeisungsgesetz unterstützt und von wesentlichen Fortschritten in der Windkraftanlagentechnik getragen. Kennzeichen des Fortschritts ist die kontinuierliche Erhöhung der Anlagenleistung und die damit verbundene Kostendegression sowie die beachtliche Steigerung der Zuverlässigkeit. Dabei läßt sich eine deutliche Tendenz zu getriebelosen, drehzahlvariablen Wandlersystemen feststellen. Bei den zukünftigen Entwicklungen werden neben weiteren Verbesserungen in der Netzverträglichkeit auch Leit- und Führungstechniken sowie Fehlerfrüherkennungssysteme neue Perspektiven in der Anwendung eröffnen.

Wind energy utilization made tremendous progress in the past years and stands at the threshold of large-scale application. This development was triggered by essential developments in wind energy converter (WEC) technology and supported by Federal and State Programs. The progress is characterized by a continuous rise in rated power, a decrease of specific costs and by an increase of reliability of WECs. A trend towards transmission-less and variable speed WEC configurations can be recognized. Improvements in grid compatibility, in control principles and in early failure warning systems will mark future developments and will open new application opportunities.

1. Einleitung

Die stürmische Entwicklung der Windenergienutzung hat in der Öffentlichkeit, Politik und Wissenschaft ein enormes Interesse geweckt und eine breite Diskussion ausgelöst. Dabei nimmt die Verträglichkeit der Windkraftanlagen mit dem Landschaftsbild sowie dem Elektrizitätsversorgungsnetz einen hohen Stellenwert ein.

Um die politischen Vorgaben zur Umweltentlastung im neuen Jahrtausend zu erreichen, muß neben Maßnahmen zur Energieeinsparung ein erheblicher Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien angestrebt werden. Da Strom aus Wind dabei momentan die günstigsten technischen und wirtschaftlichen Perspektiven besitzt, ist

dieser Energie eine hohe Priorität beizumessen.

Ziel einer zukunftsweisenden Energieversorgung sollte es daher sein, ein möglichst breites Spektrum angebotener und zu erschließender Energieformen (Wasser, Wind, Photovoltaik etc.) einzubinden und die vorhandenen Netze für eine derartige Energieeinspeisung möglichst gut auszunutzen. Dafür müssen Anlagen mit guter Netzverträglichkeit eingesetzt und, falls erforderlich, auch Maßnahmen zur Netzstützung ergriffen werden.

2. Windkraftanlagentechnik

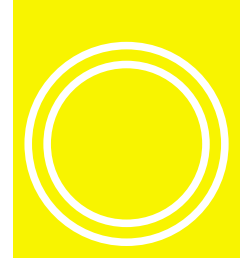
Die Entwicklung der Windkraftanlagen moderner Prägung führte – von Anlagen der 10 bis 50 kW-Klasse Anfang der achtziger Jahre ausgehend – ein gutes Jahrzehnt später zu serienreifen Konvertern der 500 bis 1.500 kW-Leistungsgröße, die überwiegend von mittelständischen Unternehmen produziert werden. Bei der Weiterentwicklung dieser Windkraftanlagen wurden erfolgreiche Konzepte und Innovationen von kleinen und mittleren Anlagen auf größere Einheiten übertragen. Die Windturbinen konnten in ihrer Zuverlässigkeit stark verbessert und in ihrer Wirtschaftlichkeit enorm gesteigert werden.

Für die Stromerzeugung aus Wind haben sich aus einer Vielzahl von Systemvarianten die folgenden technischen Lösungen mit guten Weiterentwicklungschancen herauskristallisiert:

- Dreiblattrotor mit Stall- oder Pitchregelung und Asynchrongenerator(en) direkt am Netz,
- Dreiblattrotor mit Einzelblatt-Pitchregelung, getriebelosem Synchrongenerator, variabler Drehzahl, Gleichstromzwischenkreis über Wechselrichter am Netz,
- Zweiblattrotoren mit Pitchregelung, starrer Nabe und Asynchrongenerator(en) direkt am Netz und
- Zweiblattrotoren mit Pitchregelung, Pendelnabe, Synchrongenerator mit vorgeschaltetem Getriebe, variabler Drehzahl, Gleichstromzwischenkreis über Wechselrichter am Netz.

Dagegen konnten sich

- Einblattrotoren mit Pitchregelung, Schlaggelenknabe, variabler Dreh-



zahl über Wechselrichter am Netz sowie

- Vertikalachsenrotoren in H-Form mit getriebelosem Synchrongenerator, variabler Drehzahl über Wechselrichter am Netz

nicht mit dem gewünschten Erfolg auf dem Markt durchsetzen.

Bei Anlagen bis 600 kW hat sich bisher eine deutliche Dominanz von Systemen mit 3-Blattrotor, Leistungsbegrenzung durch Stalleffekt und Asynchrongenerator mit drehzahlstarrer Netzankopplung herauskristallisiert. Die Preise für die am Markt bereits eingeführten und überaus bewährten 500 bis 600 kW-Anlagen liegen zwischen 1.200 und 2.000 DM/kW Nennleistung bzw. 550 und 750 DM/m² Rotorkreisfläche. Energieerträge von 600 bis 800 kWh/m² und Jahr im Binnenland und Mittelgebirge sowie 900 bis 1.200 kWh/m² und Jahr an der Küste werden erreicht.

Bei den in der Einführung befindlichen Anlagen der Klasse mit 750 bis 1.500 kW Nennleistung bewegen sich die bezogenen Kosten momentan noch höher. Pitchregelung und drehzahlvariabler Anlagenbetrieb dominieren insbesondere bei Systemen in der 1,5 MW-Klasse (Abbildung 1). Starke Tendenzen zu getriebelosen Triebstrangkonzzepten sind zur Zeit zu beobachten. Insgesamt ist hier ein deutlicher Trend zu technisch aufwendigeren und innovativen Konfigurationen zu erkennen. Preisdifferenzen sind u.a. durch unterschiedliche Konzepte, Rotordurchmesser und Nabenhöhen (z.B. Küsten- bzw. Binnenlandversion) bedingt.

2.1 Leistungsbegrenzung und Regelung der Turbine

Bei elektrischen Energieversorgungsanlagen kann üblicherweise die Energiezufuhr entsprechend dem Leistungsbedarf erhöht oder vermindert werden. Windkraftanlagen erlauben hingegen nur Eingriffe in Richtung geringeren Energieumsatzes.

Eine Beeinflussung der Leistungsaufnahme aus dem Wind ist durch Veränderung der Einstellwinkel an den Rotorblättern (Pitchregelung) z.B. mit Hilfe einer Hydraulik und bei größeren Anlagen durch elektromotorische Ver-

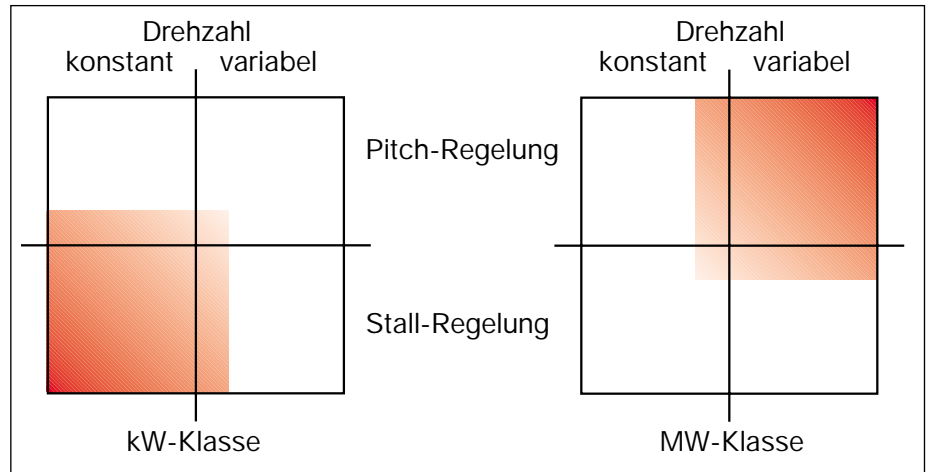


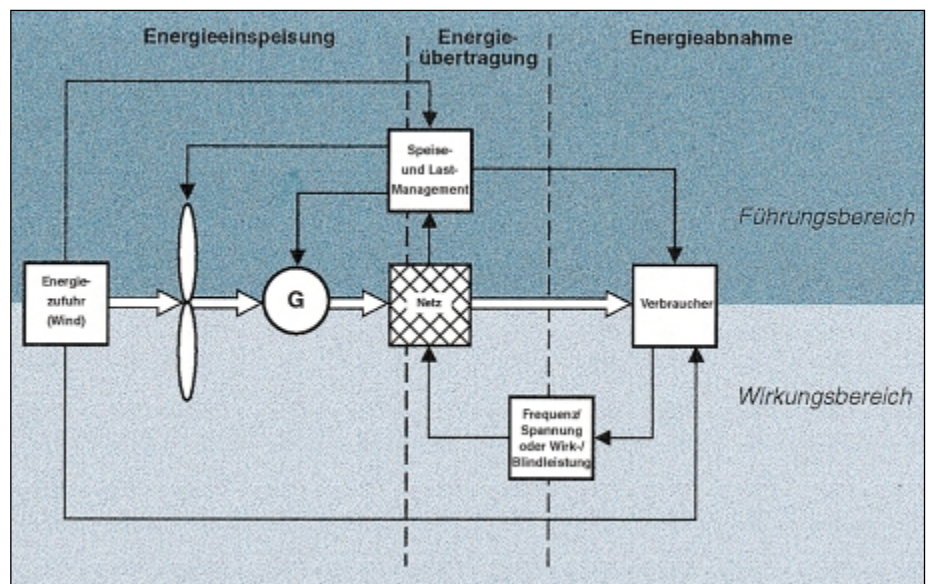
Abbildung 1: Verteilung der Regelungs- und Wandlerkonzepte der Windkraftanlagen in verschiedenen Leistungsklassen

stellantriebe möglich. Bei der überwiegenden Zahl der MW-Anlagen, bei vielen Konvertern größer als ca. 300 kW und vereinzelt auch bei kleinen Einheiten wird dieses Prinzip zur Turbinenregelung und Leistungsbegrenzung angewendet. Das Antriebsmoment des Windrades bzw. seine Leistungsaufnahme kann damit gezielt den Verbraucher- bzw. Netzerfordernissen angepaßt werden. Somit läßt sich bei genügend großem Windangebot die Anlagenleistung bzw. die Rotordrehzahl oder die Generatorfrequenz in allen Leistungsbereichen beeinflussen. Durch diese Eingriffsmöglichkeiten ist eine wesentliche Voraussetzung zum sicheren Betrieb der Anlagen in allen Lastbereichen gegeben (Abbildung 2). Neue Regelungsverfahren, die komponentenschonend und gütekriterien-

orientiert ausgerichtet sind sowie selbsteinstellend auch an veränderte Umwelt- und Systembedingungen angepaßt arbeiten, werden zukünftig zur weiteren Erhöhung der Betriebssicherheit und der Lebensdauer von Windkraftanlagen führen.

Falls negative Einwirkungen auf Netze, sogenannte Netzurückwirkungen, durch Windkraftanlagen in leistungsschwachen oder stark ausgenutzten Netzen hohe Werte annehmen, ist es möglich, diese durch eine Pitchregelung herabzusetzen, so daß die entsprechenden Grenzwerte eingehalten werden. Derartige Eingriffe sind allerdings mit einem geringeren Windenergienutzungsgrad verbunden und können die Lebensdauer der Stelleinrichtung beeinträchtigen. Da sich

Abbildung 2: Energiefluß, Regelung und Führung von Windkraftanlagen



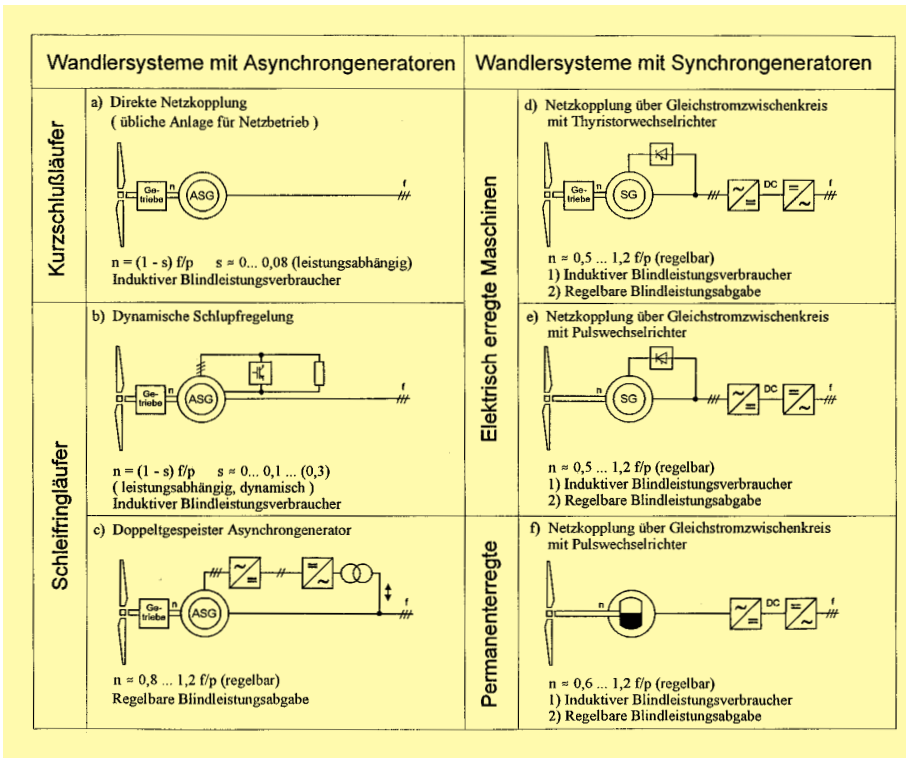
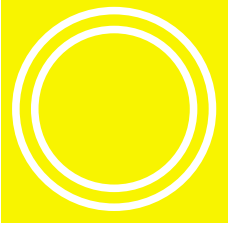
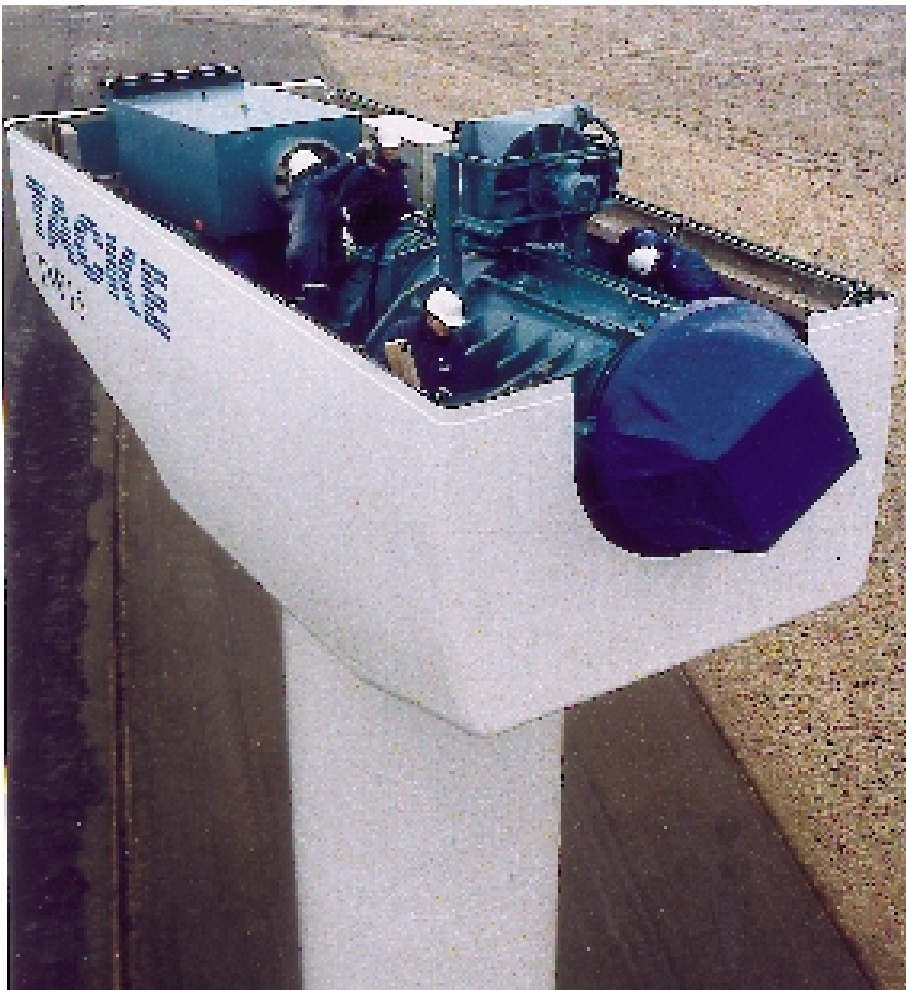


Abbildung 3: Mechanisch-elektrische Wandlersysteme

Abbildung 4: Konventioneller Triebstrang mit Getriebe und Asynchrongenerator



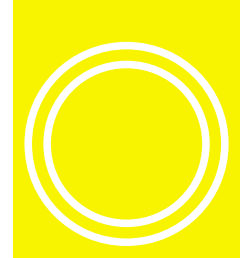
Maßnahmen zur Leistungsbegrenzung, die beispielsweise durch eine Fernüberwachung möglich sind, im allgemeinen auf relativ kurze Eingriffszeiten beschränken, fallen dadurch hervorgerufene Ertragsminderungen im Hinblick auf die Jahresenergielieferung in der Regel nicht sonderlich ins Gewicht.

Zur Begrenzung der Windturbinenleistung wendet die überwiegenden Zahl aller Hersteller für kleine und mittelgroße Anlagen bis ca. 600 kW das Prinzip des Strömungsabrisses (sog. Stallregelung) an. Bei einem Windangebot über dem Nennbereich gelangen die Rotorblätter dabei in den Stallbetrieb. Durch Strömungsabriß an den Rotorblättern wird somit die Leistungsaufnahme der Turbine infolge der konstruktionsbedingten Gegebenheiten begrenzt. Dazu muß allerdings die Turbine durch den Generator in ihrer Drehzahl gehalten werden. Verbraucherorientierte Eingriffe an der Windturbinen können bei diesen Anlagenarten nur durch das elektrische Lastmoment des Generators über den gesamten mechanischen Triebstrang auf die Turbinen rückwirkend vorgenommen werden.

Eingriffe zur Minderung der Anlagenleistung bzw. der Netzurückwirkungen etc. sind bei stallbetriebenen Anlagen nicht ohne weiteres möglich. Die Eingriffe der Regelung und Betriebsführung beschränken sich weitgehend auf die Steuerung der Ein- und Ausschaltvorgänge. Diese sollten insbesondere bei Windparks z.B. durch eine Fernüberwachung zu definierten Zeitpunkten im Rahmen eines Parkmanagements ermöglicht werden.

2.2 Generatoren und Netzanbindung

Zur mechanisch-elektrischen Energie wandlung kommen bei Windkraftanlagen – aufgrund der robusten Ausführungsmöglichkeiten – nur Drehfeldmaschinen zum Einsatz. Bei diesen Generatoren kann grundsätzlich unterschieden werden zwischen Asynchron- und Synchronmaschinen mit direkter Netzanbindung sowie mit Stromrichterkopplung. [Abbildung 3](#) gibt einen Überblick über die bereits erprobten sowie in naher Zukunft zum Einsatz kommenden Wandlersysteme. Die [Abbildungen 4](#) und [5](#) zeigen die



Unterschiede im Aufbau des Maschinenhauses.

Mehr als 90% der weltweit betriebenen Windkraftanlagen sind mit direkt netzgekoppelten Asynchrongeneratoren ausgerüstet. In Deutschland kommen hingegen in zunehmendem Maße Synchronmaschinen mit und ohne Getriebe, mit Gleichrichter, Gleichstromzwischenkreis und netzgeführtem Wechselrichter bzw. neuerdings auch mit Pulswechselrichter zum Einsatz. Leistungs- und Spannungsschwankungen sowie auch die mechanischen Belastungen am Triebstrang haben bei drehzahlstarrten Einheiten besonders große Werte. Drehzahlvariable Systeme sind von diesen Belastungen nur in erheblich abgeschwächter Form betroffen, benötigen allerdings einen größeren gerätetechnischen Aufwand. Bereits relativ kleine Drehzahlstellbereiche (z.B. 5%) reichen aus, um Leistungsänderungen und mechanische Belastungen wesentlich zu mindern. Durch einen großen Drehzahlvariationsbereich (z.B. 50 bis 100%) lassen sich insbesondere bei Teillast die Windturbinen in der Nähe ihres Leistungsoptimums betreiben. Auf diese Weise können höhere Energieerträge erzielt werden. Somit kann durch die Wahl des Wandlerkonzeptes auch das Anlagenverhalten bzw. die Rückwirkungen auf das Netz stark beeinflusst werden.

2.2.1 Anlagen mit Asynchrongeneratoren

Asynchrongeneratoren werden statorseitig meist direkt mit dem Netz verbunden. Ankopplungen über Umrichtersysteme bilden die Ausnahme. Kurzschluß- und Käfigläufermaschinen haben eine weitgehend feste Drehzahlkopplung mit dem Netz. Variationen sind im wesentlichen nur im Bereich des Nennschlupfs möglich. Heute übliche Baugrößen der 50 bis 1.500 kW-Klasse weisen bei Nennbetrieb im allgemeinen Schlupfwerte um 1% auf, wobei mit zunehmender Maschinenleistung kleinere Schlupfwerte und somit bessere Wirkungsgrade erreicht werden. Dementsprechend vermindert sich jedoch der Drehzahlvariationsbereich. Mechanisch eingebrachte Leistungsschwankungen können somit im Netz Spannungsschwankungen hervorrufen. Speziell ausgelegte

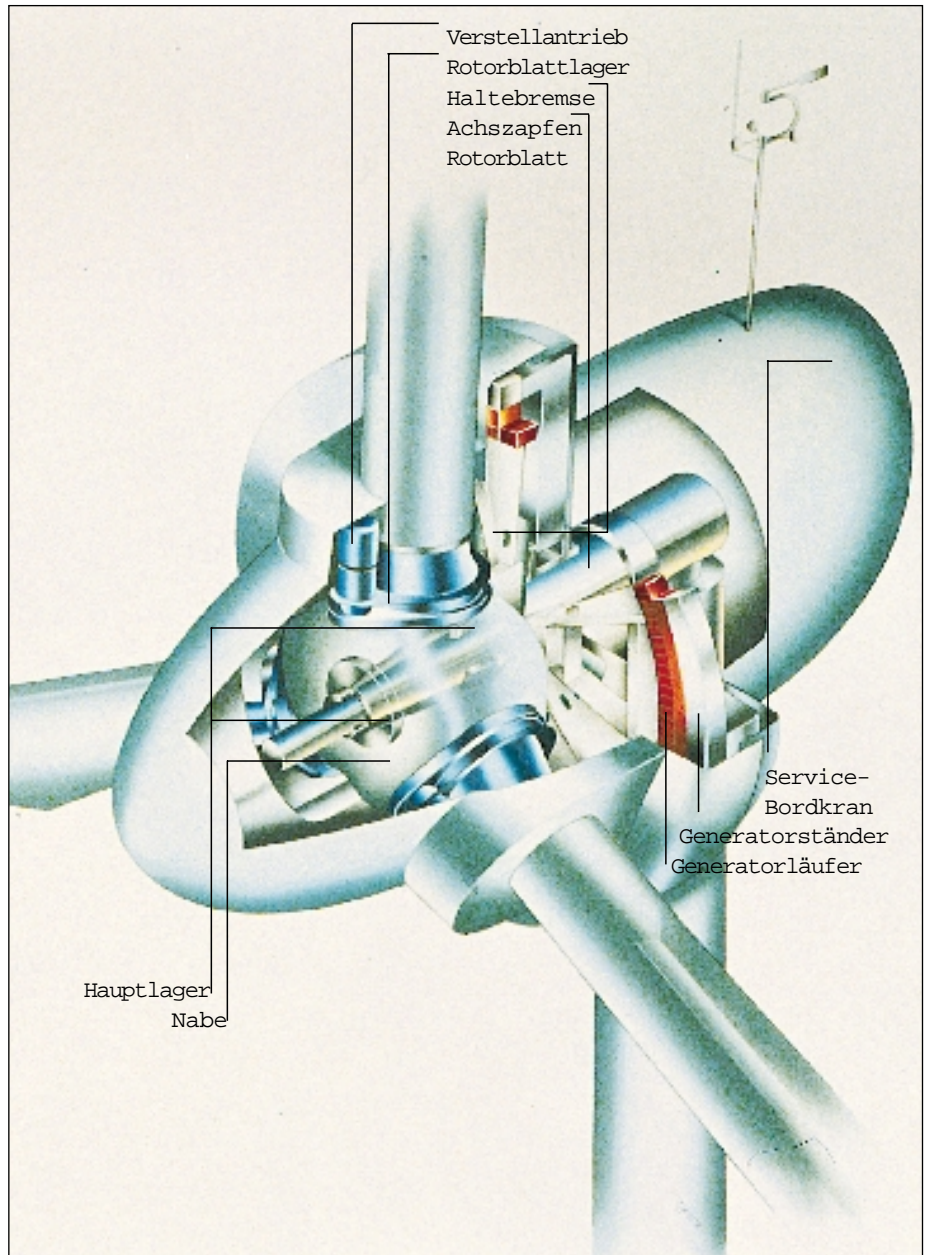


Abbildung 5: Getriebelose Windkraftanlage mit Vielpolgenerator

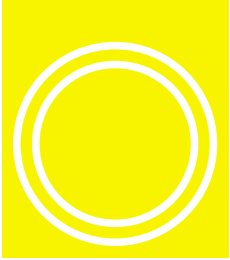
Generatoren mit erhöhtem Schlupf führen zu kleineren Leistungsschwankungen und niedrigeren Belastungen am Triebstrang und im Netz, dabei bewirkt eine Verdoppelung des Nennschlupfs etwa eine Halbierung der Leistungsänderungen. Aufgrund schlupfproportionaler Verluste sind allerdings größere Maschinenbauformen und ein niedrigerer Wirkungsgrad die Folge.

Schleifringläufermaschinen können im Schlupfbereich drehzahlvariabel betrieben werden. Die Weiterentwicklung der dazu notwendigen leistungselektronischen Bauelemente und Umrichtertechnik eröffnet zunehmend die Möglichkeit, technisch bessere Strom-

richtersysteme kostengünstig einzusetzen. Ein gewisser Trend zu derartigen Wandler-systemen ist bei einigen 1,5 MW-Anlagen zu erkennen.

2.2.2 Anlagen mit Synchron-generator und Umrichter

Zur Elektrizitätserzeugung werden in konventionellen Wärmekraftwerken nahezu ausschließlich elektrisch erregte Synchrongeneratoren eingesetzt. Mit diesem System lassen sich Wirk- und Blindleistung entsprechend den Netzbedürfnissen einstellen. Da Windturbinen in ihrem Leistungsverhalten den Windgeschwindigkeiten bzw. deren Gradienten unterworfen sind,



werden Synchrongeneratoren aufgrund ihrer starren Drehzahlkopplung an die Netzfrequenz nicht direkt am Netz betrieben. Ihre Netzanbindung über Frequenzumrichter ermöglicht eine Entkopplung der Turbinendrehzahl von der Netzfrequenz und somit einen drehzahlvariablen Betrieb. Bis vor kurzem wurden Synchrongeneratoren nur in Verbindung mit Übersetzungsgetrieben verwendet. Bei den seit kurzer Zeit auf dem Markt eingeführten Vielpolgeneratoren kann jedoch auf ein Getriebe verzichtet werden. Bisher wurden dabei sowohl hochtourige als auch langsamlaufende Synchrongeneratoren mit elektrischer Erregereinheit ausgeführt. Die Fortschritte in der Werkstofftechnik im allgemeinen und eine damit zusammenhängende Kostendegression für hochwertige Magnetwerkstoffe lassen jedoch in naher Zukunft auch einen wirtschaftlichen Einsatz von permanenten Synchrongeneratoren erwarten.

3. Netzverträglichkeit und Netzurückwirkungen

Die Einbindung von Windkraftanlagen in elektrische Energieversorgungsnetze kann zu unerwünschten Rückwirkungen in diesen Netzen führen und die Versorgung angeschlossener Verbraucheranlagen stören. Um eine störungsfreie öffentliche Energieversorgung sicherzustellen, sind die Energieversorgungsunternehmen verpflichtet, von den Verbrauchern und den einspeisenden Erzeugern die Einhaltung von festgelegten Grenzwerten für Netzurückwirkungen bzw. -einwirkungen zu verlangen. Somit wird die Aufnahmefähigkeit für Windenergie, die sogenannte Netzkapazität, wesentlich von der Netzverträglichkeit einspeisender Windkraftanlagen beeinflusst.

Dabei fallen die Netzurückwirkungen durch

- Spannungsänderungen,
- Spannungsschwankungen und Flicker sowie
- Oberschwingungen

besonders ins Gewicht.

Andere Einflüsse wie

- Spannungsunsymmetrien,
- Zwischenharmonische,

- Veränderungen der Rundsteuersignale sowie
- Verschlechterungen des Leistungsfaktors $\cos \varphi$ und
- sonstige Störaussendungen

nehmen hingegen eine untergeordnete Rolle ein. Weiterhin treten Veränderungen der Netzimpedanz und damit der Kurzschlußleistung auf. Darüber hinaus muß möglichen Netzresonanzen und elektromagnetischen Störungen besondere Beachtung gewidmet werden.

3.1 Spannungsvariationen

Die elektrische Leistung einer Windkraftanlage unterliegt periodischen und stochastischen Schwankungen, die – je nach Wandlerkonzept – direkt oder nach kurzzeitiger Zwischenspeicherung geglättet an das Netz weitergegeben wird. Diese Leistungsänderungen verursachen in den Elektrizitätsversorgungsnetzen entsprechende Spannungsvariationen, die sich z.B. als Flicker bemerkbar machen können.

Periodische Leistungsschwankungen, die insbesondere durch Höhenwindgradienten, Turmschatten- bzw. Turmstaueffekte hervorgerufen werden, spielen insbesondere bei drehzahlvariablen Anlagen im Hinblick auf Spannungseinflüsse eine untergeordnete Rolle. Demgegenüber nehmen im allgemeinen die durch kurz- und langfristige Windgeschwindigkeitsänderungen auftretenden Leistungs- und Spannungsschwankungen dominierende Werte an. Auch das Zuschalten der Windkraftgeneratoren verursacht entsprechend hohe Schaltströme und damit wiederum Spannungsschwankungen.

3.2 Oberschwingungen

Unterschiedliche Wandler Systeme weisen je nach Netzanbindung im Hinblick auf Oberschwingungen große Differenzen auf. Direkt mit dem Netz gekoppelte Asynchrongeneratoren führen im allgemeinen auch mit zunehmender Anzahl mehrerer Anlagen nicht zu einer Erhöhung der Oberschwingungsbelastung. Bereits im Netz vorhandene Oberschwingungen und Zwischenharmonische werden meist sogar abgeschwächt.

Im Gegensatz dazu steigt der Oberschwingungsgehalt mit der Anzahl

und der Leistung der an das Netz angeschlossenen Windkraftanlagen mit Umrichterspeisung. Dabei haben 6-pulsige netzgeführte Wechselrichter erheblich stärkere Netzurückwirkungen als 12-pulsige Wechselrichter, bei denen die 5. und 7. Oberschwingung nicht auftritt. Selbstgeführte Puls-Umrichter mit einer hohen, im kHz-Bereich liegenden Taktfrequenz, weisen demgegenüber noch erheblich niedrigere Oberschwingungspegel auf. Sie bieten zudem die Möglichkeit, auf das Netz stützend einzuwirken.

3.3 Elektromagnetische Verträglichkeit

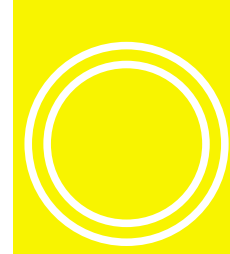
Auch über magnetische und elektrische Felder sowie durch elektromagnetische Wellen können Störungen in Elektrizitätsversorgungsnetze eingekoppelt werden. Diese nicht leitungsgeführten Störgrößen müssen im Hinblick auf die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) beachtet werden. Insbesondere bei Windkraftanlagen mit Pulsumrichtern hoher Schaltfrequenz (10 kHz-Bereich) ist mit Störabstrahlungen zu rechnen, wenn nicht entsprechende Filter eingesetzt werden.

4. Windparks

Für Windparks, die nur aus Anlagen mit Asynchrongeneratoren bestehen, bieten statische oder rotierende Phasenschieber die Möglichkeit, durch dynamische Blindleistungs- bzw. Spannungsregelung vorhandene Netzkapazitäten optimal auszunutzen.

Durch den gemeinsamen Betrieb von direkt netzgekoppelten Asynchrongeneratoren und drehzahlvariabel geführten Anlagen mit Umrichter-Netzkopplung und Pulsumrichtern können sich bei Windparks technische und wirtschaftliche Vorteile ergeben. Anlagen mit Puls-Umrichter sind bei entsprechender Auslegung in der Lage, die Spannungsregelung gleich großer Asynchrongeneratoren mit zu übernehmen bzw. die benötigte Blindleistung bereitzustellen.

Für den netzverträglichen Betrieb von Windparks ist es außerdem notwendig, sowohl an einzelnen Anlagen wie auch am Netzverknüpfungspunkt einzuhaltende Parameter durch ein intelli-



gentes Parkmanagement zu überwachen. Es sollte dabei möglich sein, über Eingriffe in die Regelung einzelner Windkraftanlagen sowohl die Netzspannung und die Abgabeleistung zu regeln als auch die Einschaltzeitpunkte einzelner Anlagen zu beeinflussen. Mit dem Einsatz von Kurzzeitspeichern (z.B. Batterien) könnten zusätzliche Leistungsschwankungen im Sekunden- und Minutenbereich, die in Windgeschwindigkeitsänderungen ihre Ursache haben, weitestgehend ausgeglichen werden. Damit lassen sich hohe Qualitätsanforderungen an die Netzgrößen (insbesondere die Spannung) mit einer guten Ausnutzung der vorhandenen Netze verbinden. Darüber hinaus ist es für eine netzverträgliche und bedarfsorientierte Netzeinspeisung hoher Windkraftleistungen sinnvoll, neuartige, auf die dezentrale Versorgungsstruktur zugeschnittene Leitetechniken, Betriebsführungs- und Fehlerfrüherkennungssysteme zu entwickeln und in Windkraftanlagen zu integrieren.

5. Ausblick

Damit sich die Windenergienutzung im nächsten Jahrzehnt auf breiter Ebene durchsetzen kann, müssen momentan gegebene Hemmnisse abgebaut werden. Bei der Planung und Genehmigung von Windenergieprojekten ist der unbestritten positive Umwelteffekt dieser Technik dementsprechend stark herauszustellen. Die noch vorhandenen Forschungs- und Entwicklungspotentiale dieser jungen Technik sind groß, müssen kontinuierlich abgearbeitet und in die laufende Produktion eingebracht werden.

Die Nutzung der gegebenen Energiepotentiale sowie angestrebte Umweltentlastungen sind mit den Anlagen der neu entwickelten MW-Klasse am ehesten erreichbar. Mittelfristig sollte an guten Standorten bei einer technischen Verfügbarkeit von über 98% eine wirtschaftliche Stromerzeugung von z.B. knapp 10 Pf/kWh bei 15-jähriger Betriebszeit möglich sein.



Anzustrebende Ausbauziele der Windenergienutzung erfordern aufgrund der häufig ungeeigneten regionalen Netzkonfigurationen in windreichen Gebieten einen Netzausbau. Dabei lassen sich insbesondere in den neuen Bundesländern veraltete Kraftwerksanlagen ersetzen und zukunftsorientierte Erzeuger- und Verbrauchersysteme aufbauen. Um hohe Windstromanteile in Versorgungsnetze integrieren zu können, müssen Auswirkungen auf vorhandene und geplante Kraftwerke sowie auf mögliche Einspeisungen schon im Vorfeld der Ausbauphase bedacht werden. Abschließend bleibt anzumerken, daß die Nutzung der Windenergie neben den positiven Umwelteffekten auch günstige Einflüsse auf den Arbeitsmarkt ausübt, dessen Stärkung zweifellos noch an Bedeutung gewinnen wird.

Literatur

- [1] S. Heier
„Windkraftanlagen im Netzbetrieb“, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, B.G. Teubner, Stuttgart (1996)
- [2] S. Heier, W. Kleinkauf
„Trend zu größeren Einheiten. Technik und Perspektiven der Windenergienutzung.“, Energie, Jahrg. 45, Nr. 5 (Mai 1995), S. 20-27, ISSN 0013-7359
- [3] S. Heier, M., W. Kleinkauf, G. Füller
„Anforderungen an eine großtechnische Nutzung der Windenergie in Deutschland.“, Husumer Windenergietage (1993) 25–29
- [4] S. Heier; M. Hoppe-Kilpper; W. Kleinkauf
„Windenergienutzung in Deutschland – Stand und Perspektiven“, Globus, Heft 3 (1994) 1014
- [5] G. Dangriß; S. Heier; V. König; J. Kuntzsch; J. Müller
„Konzeptionen zur Auslastung der Netzkapazität.“, Deutsche Windenergiekonferenz '94, Wilhelmshaven (1994) 163–170
- [6] S. Heier; G. Arnold; V. König
„Anforderungen an Windkraftanlagen zu Netzverträglichkeit.“, Deutscher Kongreß Erneuerbare Energie '95, Messe- und Verlags-GmbH, Hannover (1995) 193–204

Windpark Utgast II bei Esens/Ostfriesland mit einundvierzig Tacke TW 600 Anlagen (je 600 kW)