

Entwicklungstendenzen im Windkraftanlagenbau

Klares Ziel der dänischen Regierung sind 4000 MW offshore-Windkraft bis 2030, Die Niederlande planen 1500 MW bis 2020. [2]. Die Marktvorhersagen enthalten einen erheblichen Teil Offshore-Projekte [7].

Ebenso hektisch geht bei den Herstellern die Entwicklung der kommenden Anlagengeneration weiter. Ziel sind Leistungen von 2 bis 5 MW fuer den kommenden Offshore-Markt. Aus zahlreichen Studien zur optimalen Grösse von Offshore-Anlagen geht klar hervor, dass das wirtschaftliche Optimum bei "möglichst gross" liegt. Grund dafuer sind die Fundament- und Verkabelungskosten, die bei wenigen grossen Anlagen anteilig geringer sind als bei kleineren. Ein weiterer Vorteil ergibt sich durch die prozentual kleineren Eis- und Wellenlasten fuer grosse Fundamente und Anlagen. In Finnland ist dies wichtig, man wird die Anlagengrösse so gross wählen dass die Eislasten nicht mehr dimensionieren.

Möglichst gross bedeutet aber nicht generell wirtschaftlicher. Die jetzigen 1,5 MW-Anlagen stossen bereits auf folgende Grenzen:

Der maximale Turmdurchmesser ist mit 4,2 m an der Grenze des Strassentransportes (Bruecken)

Die Rotorblätter sind mit rund 35 m Länge an vielen Standorten ebenso an der Grenze des Strassentransportes (Kurven).

Die Gondeltopmasse ist mit rund 90 to immerhin so gross, dass das komplette Heben einen teuren und seltenen 800 to-Kran erfordert. Alternativ kann in Portionen mit einem 400to-Kran gehoben werden, was dann aber länger dauert.

Ein weiteres Vergrössern fuer Landaufstellung wuerde bedeuten, dass Mehrkosten durch technisch unoptimale Wandstärken, einen längsgeteilten unteren Turmschuss oder gar geteilte Rotorblätter entstuenen, die den geringen Wirtschaftlichkeitszuwachs der grösseren Anlage aufzehren wuerden. Wir können also nicht erwarten, dass die Entwicklung noch grösserer Anlagen uns fuer normale Landaufstellung preiswerteren Windstrom beschert. Die grossen Anlagen sind nur fuer offshore.

Es ist nicht allzu schwierig, einen Antriebstrang fuer eine 80m Anlage mit 3 MW zusammenzustellen. Getriebe dieser Grössenordnung (ca. 1800 kNm) gibt es in ähnlicher Bauform fuer Zementmuehlen, auch die AEOLUS-Prototypen kommen dieser Grösse nahe. Mit zwei Generatoren zu 1,5 MW bliebe man auch dort im Rahmen durchaus gängiger Grössen. Warum also geht es nicht schnell und routinemässig?

Zum einen hängt die Entwicklung der gesamten Anlage stark an der Rotorblattentwicklung. Weder LM noch AERPAC bieten zur Zeit frei verkäufliche Rotorblätter fuer ueber 70m Durchmesser an. Neueinsteiger NOI präsentierte in Husum 77m. Fuer einige Windkraftanlagenhersteller ist eine eigene Blattentwicklung nicht möglich, sie sind dadurch in schlechterer Startposition. Neue Rotorblattentwicklungen dauern länger als die des Antriebstranges.

Zum zweiten kann es vorkommen, dass das fuer Offshore am besten geeignete Anlagenkonzept nicht konform mit der bisherigen Produktfamilie ist, was die Entwickler zum Nachdenken bringt.

Die Leistungsschwankungen von Stall-Anlagen verringern sich bekanntlich etwa mit der Wurzel der Anlagenzahl, sodass Flicker nicht das Problem sein wird. Andererseits fuehren die Extremlasten konventioneller Passivstall-Anlagen (Pitch fest) zu erhöhten Fundamentkosten, ein Pluspunkt fuer den Pitch.

Der prozentuale Kostenanteil der Rotorblätter steigt mit wachsender Anlagengrösse. Das ist noch ein Pluspunkt fuer den Pitch, denn die schlankeren und leichteren Pitch-Rotorblätter sind beim Kosten/Nutzen-Vergleich klar im Vorteil. Pitchbetrieb geht aus regelungstechnischen Gruenden wie

bekannt nur mit genügend variabler Drehzahl. Einfache Käfigläufer-Generatoren mit 3-4% Schlupf scheiden aus thermischen Gründen in der geforderten Grösse aus. Es bleiben drehzahlvariable Antriebssysteme. VESTAS ging mit der 2 MW-Anlage erstmals vom Optislip auf variable Drehzahl über. NORDEX ging ebenso mit ihrer 2,5 MW Neuentwicklung auf pitch und variable Drehzahl. [7]

Bei ersten Abschätzungen der Gesamtwirtschaftlichkeit hat aerodyn GmbH für Pitch/drehzahlvariable klare Vorteile gegenüber Stall/drehzahlfest festgestellt [4]. Dieser Kostenvorteil wird umso stärker, je höhere Umfangsgeschwindigkeiten man am Blatt aus Schallgründen zulässt.

Als Kompromiss kann man die Aktivstall-Regelung einsetzen, die durch geringere Pitchbewegungen möglicherweise die Lebensdauer der Pitchmechanik erhöht. Man kommt mit Aktivstall aber nicht auf die Umfangsgeschwindigkeiten, die man für offshore aus Lärmgründen zur Zeit für akzeptabel hält.

Also klare Vorteile für Pitch und variable Drehzahl für grosse Offshore-Anlagen.

Die technischen Vorteile können durch Ausfallzeiten bei Störungen an der Blattverstellung und am Umrichter wieder zunichte gemacht werden, weshalb man jetzt beginnt, sich verstärkt mit Zuverlässigkeitsanalysen, Redundanz und Schadensfrüherkennung zu beschäftigen. Interessant ist hier z.B. der Vorschlag eines Umrichter-Herstellers, den gesamten Umrichter in zwei parallele redundante Teile aufzuspalten. Mehrkosten gegen erhöhte Betriebssicherheit.

Interessant ist auch der klare rechnerische Vorteil für den Zweiflügler. Die Holländischen Forscher, ein paar Schweden und die dänische Ausnahme GENVIND sind die letzten, die dem aussterbenden Zweiflügler die Treue halten. Da die ersten offshore-Windparks gut sichtbar in Küstennähe und zudem als Anlagen-Mix verschiedener Hersteller realisiert werden, hat der Zweiflügler auch hier optische Akzeptanzprobleme. Die Möglichkeit, ihn komplett zu heben, macht das Konzept interessant. (Foto 1). Die erhöhten Betriebsfestigkeitslasten werden durch den Minderpreis der Rotorblätter mehr als ausgeglichen.

Der Einflügler kommt wegen seinem "Hubschraubergeräusch" als Leeläufer wohl nicht mehr in Betracht. Auch zeigt er mit wachsender Anlagengrösse wachsenden Schlagwinkelbereich, der Elastomer-Pendellager problematisch macht und technisch riskante Wälzlagerungen erfordert.

Das Drehmoment steigt nahezu mit dem Rotordurchmesser hoch drei. Um unnötig schwere Wellen zu vermeiden, bietet sich das dreireihige Rollenlager an. Dieser Lagertyp ermöglicht eine kraftflussgerechte Lagerung der Nabe am Maschinenträger und kommt verstärkt wieder in Diskussion. Der französische Hersteller JEUMONT Industrie setzt an seiner Windkraftanlage J 48 diesen Lagertyp wegen seiner grösseren Steifigkeit zur Einhaltung des Luftspaltes am Direktantriebsgenerator ein. Der 1,2 MW Zweiflügler A 1200 hat denselben Lagertyp, ebenso wie die uralte HSW 250.

Der Direktantrieb gerät durch grössere Anlagengrösse noch weiter in den Kostennachteil. Der Stator eines vernünftig ausgelegten Direktgenerators für ca. 3 MW würde bei einem Luftspaltdurchmesser von rund 7- 8m mindestens einmal geteilt sein müssen, was die Fertigungskosten erhöht. Bei der ENERCON- E66 ging man aber gerade aus Kostengründen zum ungeteilten Ständer zurück. Der Kostenvergleich zwischen konventionellen und Direktantrieben zeigt ohnehin, dass der Direktantrieb keinen Preisvorteil aus technischen Gründen zu haben scheint [3] und die Ursachen für Enercons Erfolg eher in der wirtschaftlichen Eigenfertigung zu suchen sind. Diese Aussage wird dadurch untermauert, dass die Neueinsteiger mit Direktantrieb, Lagerwey und Genesys, bisher keinen oder einen sehr späten Markterfolg hatten.

Als Zwischenform propagiert aerodyn GmbH eine Version mit einstufigem Planetengetriebe und langsamlaufenden Synchrongenerator. Dieser "beinahe-Direktantrieb" ergibt den kompaktest

möglichen Antriebstrang, der bei 5MW Nennleistung noch als Ganzes fuer Strassentransport tauglich ist. Die Anlage ist in der Konzeptentwicklung.

Im Elektromaschinenbau (jetzt unabhängig von Windkraft) finden wir fallende Preise fuer Ne-Fe-Bo-Magnete und fuer Leistungshalbleiter. Das beguenstigt permanenterregte Generatoren und drehzahlvariable Umrichtersysteme, die sich jetzt verstärkt Kleinwasserkraft-Anwendungen erobern [5] sowie neuerdings in Aufzuegen eingesetzt werden. Diese Tendenz wird auch auf die Windbranche uebergreifen.

Um salzhaltige Kuehlluft möglichst komplett aus dem Gondelinnern fernzuhalten, wird man verstärkt Generatoren mit Wassermantelkuehlung oder aufgesetztem Luft/Wasser-Wärmetauscher einsetzen. Ein Seewasserwärmetauscher ermöglicht die endgueltige Wärmeabfuhr an die umgebende See.

FLENDER stellte auf der letzten Hannover-Messe und in Husum ein Antriebstrang-System vor mit platzsparendem kompakten Planetengetriebe fuer 5 MW. FLENDER und VALMET und bieten seit etwa einem Jahr schrägverzahnte Planetenstufen an, was den Körperschall im Bereich tiefer Frequenzen senkt. Weitere Entwicklungen im Getriebesektor sind Massnahmen zur Schallverringernug sowie der wachsende Einsatz von Schadensfrueherkennungssystemen. Hier fehlt noch ein brauchbarer Ölqualitätssensor.

Nachdem in den letzten Jahren zahlreiche Getriebeschäden wegen dynamisch ueberhöhter Bremsmomente aufgetreten sind, ist man beim Bremsen etwas vorsichtiger geworden, hat teilweise elektronisch geregelte Bremsen eingesetzt (SVENDBORG SOBO) oder die Bremsbelagsorte optimiert. Weitere Getriebeschäden gingen durch die Presse. Es gibt offensichtlich noch unvorhergesehene Sonderprobleme, die Wälzlagerschäden verursachen können.

Bei den Rotorblättern macht sich bereits bei 80 - 100m Durchmesser bemerkbar, dass die wechselnde Schwenkbiegung durch das Eigengewicht der Blätter eine wesentliche Lastgrösse ist. Auch hieraus leitet sich der Vorteil des Zweiflueglers ab: grössere Blatttiefe bei gleicher Umfangsgeschwindigkeit fuehrt bei ansonsten sinnvoller Geometrie zu guentigerem Verhältnis zwischen Widerstandsmomenten und Biegemomenten. Der gesamte Rotor wird zwar nicht um 2/3 leichter, jedoch um soviel, dass die Auswirkungen der erhöhten Betriebsfestigkeitslasten finanziell aufgewogen werden.

Aus den genannten Gruenden wird man vorzugsweise Epoxidharz, ggfs als Prepreg, einsetzen. Je grösser der Rotor, desto mehr kommt Kohlefaser in Betracht. Die klassische Vakuum/Folien-Technik wird mit Sicherheit ihren Platz haben, die automatischen Tapeleger werden zunehmende eine Rolle spielen, und bei grösseren Serien später auch die Vakuuminjektion.

Wickelfverfahren geben aufgrund der Geometrie keinen Sinn, das Blatt ist leider kein Tank.

Thermoplast -Pressverfahren erfordern druckfeste stark beheizte Formen, die Werkzeugkosten sind derart hoch dass man sich ein 40m-Blatt kaum vorstellen kann.

Holz-Epoxi hat wegen grosser Steifigkeit und Dämpfung ebenso gute Chancen, wenn es sich auch nicht in gleichem Masse automatisieren lässt.

Metallholme (Growian, WTS 75) sind ausgestorben, da man sie aus Gruenden der Betriebsfestigkeit nur ohne jede Schweiss-stellen ausfuehren könnte, jedoch eine Flugzeugfluegel-Bauweise mit tausenden von Nieten fertigungstechnisch zu aufwendig ist.

Die Grenze des technisch Machbaren liegt nach Meinung von Experten bei ca. 150 m Rotordurchmesser, die man auch mit Kohlfaser nicht ueberschreiten kann. Dazu gehören 8-10 MW Leistung, was aus heutiger Sicht etwa die "Schallmauer" darstellt. Zum Glueck zwingt uns niemand, möglichst grosse Anlagen zu bauen, sie sollen eben nur möglichst wirtschaftlich sein.

In einem Vortrag wurde die heutige Situation der Grossanlagenentwicklung treffend so dargestellt:
"....eine Grenze in der Grösse zeichnet sich noch nicht ab." [8]

- [1] B. Madsen 'How to reach 40'000MW by 2010', Wind Directions March 1999 p 4-7
- [2] M. Kuehn 'Don't be fooled by theoretical offshore potential' New Energy 1/1999 p 46-47
- [3] G. Böhmeke 'Direct Drive, geared drive, intermediate solutions - comparison of design features and operating economics' Proceedings of the EWEC '97 Dublin, p.664-667
- [4] Siegfriedsen et al 'Multibrid-Technology, a Significant Step to Multi-Megawatt-Turbines' Presentation on the EWEC '99, Nice, France.
- [5] Energia 4-5 1999 s.39
- [6] International Wind Energy Development, World Market Update, BTM Consult, Denmark.
- [7] J. Behnke 'Husum Wind zeigte neue Anlagengeneration' Erneuerbare Energien Nov. 1999
- [8] Chr. Nath, D. Quarton "Chancen und Grenzen von Windenergieanlagen ueber 3 MW", Husum Wind Conference Proceedings pp148.

Fotos

Nr. 1 Windkraftanlage A 1200, Bildunterschrift: "Am Boden vormontiert, komplett gehoben. Montagevorteil des Zweiflueglers."

Nr. 2 Einfluegler MBB-Monopteros , Bildunterschrift: "Kommt der Einfluegler wieder fur ganz- weitweg -offshore?"

Nr. 3 Prinzipskizze des MULTIBRID, Bildunterschrift: "Beinahe-Direktantrieb MULTIBRID. Vorteile speziell bei grossen Leistungen (mit freundlicher Genehmigung der aerodyn GmbH)"

Nr. 4 Rotorblattfertigung, Bildunterschrift: "Rotorblätter sind zur Zeit der Engpass fuer grosse Anlagen. Automatisierung wird zwingend notwendig"

Zum Autor:

Dipl. Ing. Georg Böhmeke baute sein erstes Windrad 1977. Seit 18 Jahren in Konstruktion und Projektabwicklung tätig, u.A. bei MBB, Tacke Windtechnik und aerodyn GmbH. Seit April 1999 in Finnland.