

Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Windkraftanlagen durch Wölbklappen-Regelung

Improvement of the Economy of Wind Turbines by Flap-Control

Montag, Peter; Richert, Frank; Kramkowski, Theo*; Inst. f. Flugmech., TU Braunschweig; *DEWI

Summary

Flap control can increase the cost effectiveness of wind turbines. Deflecting the flaps that are situated in the outer part of the rotor blades changes the rotor torque and thrust. By downwind deflection the rotor power is controlled like on a pitch regulated turbine. Full flap deflection ($\gg -90^\circ$) keeps the rotor speed in save limits fulfilling the safety requirements of a primary brake system. The costs of flap control and the loads on the actuation system are lower compared to a pitch controlled rotor and similar compared to a stall limited rotor with moveable blade tips. By negative flap deflection the rotor thrust and thus the corresponding flap bending moment at the blade root are decreased. In extreme winds the rotor loads are lower than that of a stall limited rotor and can even be lower than that of a pitch regulated rotor in standstill when the rotor brakes are applied. Differing from stall and pitch rotor blades flap controlled blades do not need to be adjustable in pitch angle at the hub. Thus the cross section of the rotor blade root can be non-circular and better be matched to the loads. Especially the fatigue stresses in the rotor plane due to cyclic gravity loading can be lowered. When applied to a one piece two bladed rotor the rotor blade and the hub attachment can be simplified even more. A teetering rotor can be used to decrease the out of plane loads and may be mounted in a simple fork shaped hub. The described features allow for lower production costs and will help to economize large wind turbines.

1. Einleitung

Heutige Serien-Windkraftanlagen verwenden zur Leistungsregelung die Rotorblattverstellung (Pitch) oder nutzen zur Leistungsbegrenzung den aerodynamischen Strömungsabriß (Stall). Beide Systeme haben systembedingte Vor- und Nachteile an. Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Windkraftanlagen erscheint eine Leistungsregelung mit Wölbklappen sehr erfolgversprechend. In den USA sind dazu bereits theoretische und praktische Untersuchungen mit positiven Ergebnissen durchgeführt worden [1].

Dieser Bericht basiert auf einer Diplomarbeit [2] am Institut für Flugmechanik der TU Braunschweig. In dieser Arbeit, die das DEWI initiierte, wurden die Wirkungsweise und die wesentlichen Strukturlasten - Rotorschub sowie Wurzelbiegemomente in Schlag- und Schwenkrichtung - untersucht und mit einer Stall- und einer Pitch-Anlage der 500-kW-Klasse verglichen. Als Berechnungsgrundlage diente eine modifizierte Form des PROP-Codes [2]. Die aerodynamische Datenbasis für den wölbklappen-geregelten Rotor stammt aus Windkanaluntersuchungen in den USA [3], [4].

2. Wirkungsweise von Wölbklappen

2.1 Konstruktionsprinzip

Die Änderung der Profilwölbung durch Klappen (Wölbklappen) wird im Flugzeugbau von Beginn an sehr erfolgreich angewandt. Die Wölbklappen dienen dort zur aerodynamischen Steuerung des Flugzeugs und befinden sich an Flügel und Leitwerken. Bei einer Windkraftanlage liegen die Wölbklappen im äußeren Bereich des Rotorblattes (Abb. 1). Hier ist die Wirksamkeit aufgrund der hohen Umfangsgeschwindigkeiten am größten. Die Wirkungsweise ist unabhängig von der Blattanzahl.

Abb. 2a+b zeigen die Funktionsweise von Wölbklappen. Unterschiedliche Klappenstellungen ändern die aerodynamischen Eigenschaften des Profils (Abb. 2a). Negative Klappenausschläge (in Schlagrichtung) verringern den Auftrieb. Mit zunehmenden Klappenwinkeln erhöht sich der Profilwiderstand. Dadurch ändern sich Rotordrehmoment und -schub. Die Effizienz der Wölbklappe hängt von der Klappentiefe und -länge ab. Während für die Leistungsregelung je nach Länge der Wölbklappe mäßige Ausschläge ausreichen, ist für eine Abschaltung der Anlage ein Ausschlag von bis zu -90° notwendig. Die Wölbklappe muß daher in einem großen Winkelbereich verstellbar sein.

Die Antriebskinematik der Wölbklappe ist einfach. Die Bewegung des Stellglieds, z.B. ein Hydraulik-

zylinder, wird über einen Umlenkhebel an die Klappe übertragen (Abb. 2b). Die Drehlinie der Klappe liegt in der Kontur der Profilloberseite. Dies ist die einfachste Möglichkeit, einen Ausschlag von -90° zu ermöglichen. Für eine automatische Notabschaltung im Störfall - Hydraulikausfall, etc - lässt sich mit einem Gewicht am Umlenkhebel ein fliehkraftbetätigter Klappenvollausschlag und somit ein einfaches Fail-Safe-System erreichen.

Die Wölbklappe und ihr Antrieb sind einfach zu fertigen. Auf die Antriebs Elemente wirken im Gegensatz zur Rotorblattverstellung durch die relativ kleine und leichte Wölbklappe nur geringe Massenkräfte. Die aerodynamischen Lasten sind wegen der kleinen Klappenfläche klein. Damit ergeben sich beim Stellsystem gegenüber der Pitch-Anlage merkbare Vorteile. Bei Stall-Anlagen ist der konstruktive Aufwand für Blattspitzenbremsen ähnlich hoch wie für die Wölbklappen-Konstruktion.

2.2 Leistungsregelung

Oberhalb der Nennwindgeschwindigkeit lässt sich die Rotorleistung durch negative Wölbklappenausschläge konstant halten.

Abb. 2a: Wölbklappenantrieb am Versuchsrotor der MOD-0 [5].

Fig. 2a: Flap-control as used in the MOD-0 tests [5].

Abb. 3 zeigt die Leistungskennlinien für verschiedene Klappenwinkel h_K . Die Kennlinie für $h_K=0^\circ$ entspricht der eines Pitch-Rotors (kein Klappenausschlag). Mit zunehmendem negativen Ausschlag verschiebt sich die Leistungskennlinie nach rechts unten. Durch die damit verbundene flachere Steigung der Kennlinie im Betriebspunkt ändert sich bei Windböen die Rotorleistung weniger stark als bei einer Pitch-Anlage. Im gezeigten Beispiel reichen bereits Ausschläge von weniger als $h_K=-30^\circ$ aus, um die gewünschte Rotorleistung konstant zu halten.

2.3 Abschaltverhalten

Für den Wölbklappenvollausschlag ($h_K=-90^\circ$) zeigt Abb. 4 die Bremsleistung bei der

Abb. 1: Wölbklappen-geregelter 3-Blatt-Rotor.

Fig. 1: Flap-controlled 3-bladed rotor.

Abb. 2b: Wölbklappenantrieb am Versuchsrotor der MOD-0 (äußerer Teil), Fail-Safe-System mit Fliehkraftgewicht [5].

Fig. 2b: Flap actuation at the MOD-0 rotor (note fail-safe operation by centrifugal forces) [5].

Abb 3: Leistungscharakteristik einer wölbklappen-geregelten Windkraftanlage (Klappentiefe: 38%; Länge: 40%).

Fig. 3: Power performance of a flap-controlled wind turbine (38% chord flap, 40% radius flap length).

Abb. 4: Abschaltcharakteristik bei Klappenvollausschlag (Klappentiefe: 38%; Länge: 40%; $h_K=-90^\circ$).

Fig. 4: Cut out performance at flap's full deflection (38% chord flap, 40% radius flap length).

Betriebsdrehzahl des nachgerechneten Rotors (34,1 rpm). Unterhalb der Abschaltwindgeschwindigkeit der Windkraftanlage (25 m/s) kann mit einem Wölbklappenausschlag von $h_k = -90^\circ$ ein stark rückdrehendes Rotordrehmoment erzeugt und die Anlage somit abgeschaltet werden. Ab einer sehr hohen Windgeschwindigkeit (38,5 m/s) wirken trotz Klappenvollausschlag wieder antreibende Drehmomente. Dies bedeutet, daß mit einer konventionellen Wölbklappe der Rotor nicht zum Stillstand zu bringen ist. Bei Lastabwurf stellt sich unter der Wirkung der antreibenden oder rückdrehenden Rotordrehmomente eine stabile Rotordrehzahl, die Gleichgewichtsdrehzahl n_G , ein. Ihre Größe ist von der Windgeschwindigkeit abhängig (Tab. 1).

Windgeschwindigkeit V_0 [m/s]	2	5	10	25	30	38,5	60
Gleichgewichtsdrehzahl n_G [min ⁻¹]	1,8	4,4	8,9	22,1	26,6	34,1	53,1

Tab. 1: Gleichgewichtsdrehzahlen.

Tab. 1: Equilibrium rotor speed.

Nach den Zulassungsrichtlinien für Windkraftanlagen wird für die Primärbremse nicht der Stillstand des Rotors gefordert, nur die zulässige maximale Rotordrehzahl darf nach dem Abschalten nicht überschritten werden [6]. Die größte Gleichgewichtsdrehzahl bei Lastabwurf wird innerhalb der Betriebswindgeschwindigkeiten bei der Abschaltwindgeschwindigkeit erreicht (25 m/s). Sie beträgt nur 2/3 der Betriebsdrehzahl (34,1 rpm). Bei Extremwind wird der Rotor mit der Sekundärbremse zum Stillstand gebracht. Bei Versagen des Systems, wovon nicht ausgegangen zu werden braucht, würde auch bei einem Extremwind von 60 m/s der Rotor nur 55% schneller drehen als während des Betriebs. Das Abschaltverhalten genügt allen sicherheitstechnischen Anforderungen. Die Wölbklappe kann daher als primäre Bremse eingesetzt werden.

3. Kräfte, Lasten und Durchbiegung am Rotorblatt

Durch die für die Leistungsregelung notwendigen negativen Wölbklappenausschläge werden die Schubkräfte, die das Rotorblatt in Schlagrichtung und den Turm belasten, gesenkt. In Abb. 5 ist dieses Verhalten im Vergleich zu einer Pitch-Anlage zu sehen. Der Wölbklappen-Rotor entspricht weitestgehend der Geometrie des Vergleichs-Pitch-Rotors (2-Blatt-Rotor), nur sind zusätzlich die Wölbklappen integriert. Der leicht niedrigere Rotorschub im Teillastbereich beim Wölbklappenrotor wird durch den etwas größeren Grundeinstellwinkel der Rotorblätter verursacht, der die Stall-Leistung des Wölbklappen-Rotors erhöht, aber die Schubkräfte etwas verringert. Wird die Nennleistung erreicht und bei weiter zunehmendem Wind die Leistungsregelung aktiv, so verringert sich bei beiden Anlagentypen der Rotorschub sehr schnell. Mit steigender Windgeschwindigkeit nimmt der Rotorschub bei der Pitch-Anlage nicht mehr so schnell, aber weiter kontinuierlich ab. Bei der Wölbklappen-Anlage hingegen steigt nach Erreichen eines relativen Minima der Rotorschub wieder an. Ursache hierfür ist die strömungstechnische Mischform zwischen Pitch- und Stall-Konzept. Bei der Abschaltwindgeschwindigkeit wird der bei der Nennwindgeschwindigkeit maximale Rotorschub wieder annähernd erreicht.

Abb. 5: Rotorschubverlauf einer pitch- und wölbklappen-geregelten Windkraftanlage bei Betriebswindgeschwindigkeiten.

Fig. 5: Rotor thrust of a pitch- and flap-controlled wind turbine.

Durch die Schubkräfte wird das Rotorblatt auf Biegung in Schlagrichtung belastet. Abb. 6 zeigt das Biegemoment an der Blattwurzel. Die Kurvenverläufe für den Wölbklappenrotor und den Pitchrotor entsprechen qualitativ ihrem Rotorschubverlauf. Allerdings bleibt beim Wölbklappen-Rotorblatt das Biegemoment bei der Abschaltwindgeschwindigkeit noch deutlich unter dem Maximum, das bei Nennwindgeschwindigkeit erzielt wird. Das gegenüber dem Pitch-Rotorblatt größere Biegemoment bei hohen Betriebswindgeschwindigkeiten wirkt sich auf die Dauerfestigkeit kaum aus, da diese Windgeschwindigkeiten sehr selten auftreten.

Mit den zunehmenden negativen Wölbklappenausschlägen werden die auf das Rotorblatt im Wölbklappenbereich wirkenden Schubkräfte immer kleiner, d.h., die Durchbiegung des Rotorblattes verringert sich bei aktiver Leistungsregelung. Eine mechanische Versperrung der Wölbklappe bei großen Ausschlägen ist deshalb nicht zu erwarten, ließe sich aber notfalls auch mit einer Wölbklappenteilung vermeiden.

Während der überwiegenden Betriebswindgeschwindigkeiten sind die Kräfte und Wurzelbiegemomente bei der Pitch- und Wölbklappenanlage sehr ähnlich. Bei Extremwind (Jahresbö, Jahrhundertbö, etc.) sind aber deutliche Unterschiede zu erkennen. Das Pitch-Rotorblatt kann in Fahnenstellung gefahren werden. Damit bleibt der auf den Turm und die Gondel wirkende Rotorschub sehr klein. Wird der Pitchrotor jedoch festgebremst, muß mit einer Schräganströmung durch Böen gerechnet werden. Dabei wird die maximale Auftriebsverteilung erreicht und das Wurzelbiegemoment in Blatt-Schlagrichtung wird auch in Fahnenstellung sehr groß, das dann in der Größenordnung wie bei Stall- und Wölbklappen-Rotorblättern liegt.

Tab. 2 zeigt den Rotorschub und die Wurzelbiegemomente. Für die Wölbklappen-Anlage sind drei Klappenlängen aufgeführt (0%, 40% und 90%), jeweils mit Klappenvollausschlag $h_K = -90^\circ$, wobei die Länge 0% gleichbedeutend mit einem Stallrotor ist. Der Rotorschub der Pitch-Anlage in Fahnenstellung ist mit Abstand der niedrigste und auch erheblich kleiner als bei Betrieb. Durch den Wölbklappenausschlag lassen sich merkliche Vorteile gegenüber dem Stall-Rotor erzielen. Der Unterschied zwischen Stall- und Wölbklappen-Rotor beim Wurzelbiegemoment ist größer als beim Rotorschub. Der festgebremste Pitchrotor liegt zwischen diesen beiden Anlagentypen. Beim Wölbklappen-Rotor liefert die längste Klappe (über die gesamte Rotorblattspanweite: »90%) auch die größte Entlastung. Allerdings rechtfertigt ihre Größe nicht mehr den konstruktiven Aufwand. Etwa 40% Klappenlänge scheinen der beste Kompromiß zu sein.

Abb. 6: Wurzelbiegemoment in Schlagrichtung einer pitch- und wölbklappen-geregelten Windkraftanlage bei Betriebswindgeschwindigkeiten.

Fig. 6: Flapwise blade root bending of a pitch- and flap-controlled wind turbine.

4. Strukturelle Entlastung des Rotors

4.1 Querschnittsform des Blattanschlusses

Die Rotorblätter des Pitchrotors sind am Blattanschluß drehbar gelagert. Zur Grundeinstellung des Stallrotors müssen seine Rotorblätter in einem kleinen Winkelbereich verstellbar sein. Bei beiden Anlagen ist daher der Rotorblattanschluß kreisförmig. Dagegen müssen die Rotorblätter des Wölbklappenrotors am Blattanschluß nicht verdrehbar sein, eine Regelung bzw. Grundeinstellung wird durch die Wölbklappen erzielt. Für den Rotorblattanschluß ist die Wahl einer nicht-kreisförmigen Querschnittsform möglich, die hinsichtlich der strukturellen Erfordernisse erheblich besser angepaßt ist als ein Ringquerschnitt. Ein

Pitch Fahnenstellung fest gebremst	Wölbklappenlänge ($h_K = -90^\circ$)		
	0% (Stall)	40%	90%
Rotorschub [kN]			
21,8 12%	186,2 100%	169,6 91%	139,2 75%
Wurzelbiegemomente (in Blatt-Schlagrichtung) [kNm]			
775,5 93%	835,4 100%	706,4 85%	599,3 72%

Tab. 2: Rotorschub und Wurzelbiegemomente bei extremem Wind (60 m/s).

Tab.2: Rotor thrust and flapwise blade root bending moments in extreme wind (60m/s).

elliptische Querschnitt beispielsweise, der mit seiner langen Achse in Schwenkrichtung ausgerichtet ist, verringert die zyklischen, mit zunehmender Anlagengröße immer kritischer werdenden Beanspruchungen durch das Blattgewicht erheblich. Gleichzeitig kann die kurze Achse kleiner sein als der Durchmesser eines festigkeitsmäßig vergleichbaren Ringquerschnitts. Damit brauchen die Rotorblätter zur Nabe hin nicht mehr so stark aufgedickt zu werden. Die Blattstruktur läßt sich mit diesen Maßnahmen verbessern, was sich festigkeitssteigernd sowie gewichts- und kostensenkend auswirkt.

Pitch	Wölbklappe (40% Länge)
4,33 N/mm ²	2,67 N/mm ²

Tab. 4: Vergleichsspannung an der Blattwurzel in Schwenkrichtung aus dem Biegemoment durch das Blatteigengewicht.

Tab. 4: Gravity induced edgewise stress at the rotor blade root.

4.2 Beanspruchung der Blattwurzel

Die in der Rotorblattwurzel herrschenden Spannungen (Beanspruchungen) werden aus den Wurzelbiegemomenten (vgl. Abb. 6) und den Widerstandsmomenten, die sich aus der Querschnittsgeometrie bestimmen, berechnet ($s_v = M_b / W_b$). Abb. 7 zeigt die Vergleichsspannung s_v an der Blattwurzel in Schlagrichtung bei Betrieb für eine Wölbklappen- und Pitch-Anlage. Für das Wölbklappen-Rotorblatt wurde ein elliptischer Ringquerschnitt gewählt, der in Schwenkrichtung besonders günstig ist. Bei gleicher Wandstärke verbessert sich beim Wölbklappenblatt das Widerstandsmoment in Schlagrichtung um etwa 21% und in Schwenkrichtung um etwa 97%. Im gesamten Teillastbereich und auch noch oberhalb der Nennwindgeschwindigkeit (bis »15 m/s) sind so die Vergleichsspannungen beim Wölbklappen-Rotorblatt ca. 20% niedriger als beim Pitch-Rotorblatt.

Bei Extremwind sind die Vorteile auch vorhanden (Tab. 3). Gegenüber dem Stall-Rotorblatt (WK-Länge 0%, Pitch-Querschnitt) werden beim Wölbklappenblatt 30% niedrigere Beanspruchungen erreicht.

In Schwenkrichtung wirken neben dem Drehmoment die besonders ungünstigen, wechselnden Biegemomente aus dem Eigengewicht der Rotorblätter. Beim Wölbklappenrotor ergibt sich durch die sehr günstige Querschnittsform auch eine sehr niedrige Vergleichsspannung aus diesem Biegemoment (Tab. 4). Sie ist um 38% geringer als beim Pitch-Rotorblatt, obwohl für die am langen Hebelarm wirkenden zusätzlichen Gewichte der Wölbklappe und der Antriebselemente eine pessimistische Annahme getroffen wurde.

Pitch Fahnenstellung festgebremst	Wölbklappe	
	0% Länge (Stall) Pitch-Querschnitt	40% Länge, $h_k = -90^\circ$
34,3 N/mm ² 93%	36,9 N/mm ² 100%	25,8 N/mm ² 70%

Tab. 3: Vergleichsspannung an der Blattwurzel in Blatt-Schlagrichtung bei Extremwind (60 m/s).

Tab.3: Flapwise stress at the rotor blade root in extreme wind (60m/s).

Abb. 7: Vergleichsspannung an der Rotorblattwurzel in Schlagrichtung bei Betriebswindgeschwindigkeiten.

Fig. 7: Flapwise stress at the rotor blade root.

Abb 8: Wölbklappen-geregelter 2-Blatt-Rotor

Fig.8: Flap-controlled 2-bladed rotor

4.3 Vorteile bei 2-Blatt-Auslegung

An der Nabe geteilte Rotorblätter haben einen sehr aufwendigen Blattanschluß. Wölbklappen-Rotorblätter müssen nicht verdrehbar sein. Bei 2-Blatt-Auslegung kann deshalb an der Nabe auf eine Blatteilung verzichtet werden (Abb. 8). Die beiden Rotorblätter lassen sich einteilig bauen, sofern der Rotor noch transportabel ist. Bei größeren Rotordurchmessern erfolgt eine Teilung im äußeren Blattbereich, wo die Belastungen sehr viel geringer sind als im Nabenbereich (3- oder 5-teiliger Rotor). Die nach außen verlagerten Blatttrennstellen sind deutlich kostengünstiger zu fertigen als die Trennstelle an der Nabe. Durch diese Maßnahme wird die Blattstruktur im Nabenbereich erheblich vereinfacht. Eine günstige Blattquerschnittsform im Nabenbereich ermöglicht zusätzlich eine Verringerung der Strukturbeanspruchung und der Blattgewichte. Die Festigkeitsprobleme bei Großanlagen lassen sich so lösen. Dies senkt die Kosten für die Rotorblatffertigung. Die amerikanischen Großanlagen mit 2-Blatt-Partial-Pitch-Regelung (MOD-2, MOD-5b) basieren auf diesen konstruktiven Verbesserungen.

Der Aufwand für den Anschluß der durchgehenden Blätter an die Rotornabe ist deutlich geringer als bei Teilung der Blätter an der Nabe. Er erfolgt über ein Gabelgelenk (Abb. 9). Dieses ist konstruktiv ähnlich einfach wie eine starre Nabe. Eine Gabelgelenknabe ist aber gleichzeitig auch eine klassische Pendelnabe mit allen ihren Vorteilen. Sie senkt gegenüber dem starren Blattanschluß die Rotorblatt-, die Rotorwellen- und die Nabenlasten. Die dynamischen günstigen Eigenschaften auf die Gierschwingung der Rotorgondel sind mit denen des 3-Blatt-Rotors (Sternform) vergleichbar, im Gegensatz zum starren 2-Blatt-Rotor. Bei der ersten Serienanlage mit Wölbklappen, der NPS250 aus den USA, erfolgt der Rotorblattanschluß des einteiligen 2-Blatt-Rotors über ein pendelgedämpftes Gabelgelenk [7]. Dieses Beispiel einer konstruktiv sehr einfachen Lösung zeigt die Überlegenheit des Wölbklappenkonzepts beim Blattanschluß und der Rotornabe.

5. Lärm

Ein wichtiger Aspekt ist auch der Rotorlärm durch die zusätzlichen Klappenspalte. Genaue Untersuchungen hierzu fehlen bisher. Ist die Wölbklappe sorgfältig konstruiert (abgedichtete Klappenscharnierlinie, kleine Klappenspalte), sind keine Lärmprobleme zu erwarten. Die offenen Klappenspalten in Profillängsrichtung liegen im hinteren Profilbereich, wo die Druckunterschiede zwischen Ober- und Unterseite nur noch klein sind und somit die lärmverursachenden Durchströmungen ebenfalls. Im Gegensatz hierzu sei auf den Spalt bei Stallanlagen mit Blattspitzenbremsen und bei Partial-Pitch-Anlagen hingewiesen, wo auch ein Ausgleich der großen Druckunterschiede im vorderen Profilbereich stattfindet, der die Rotorleistung auch bei nicht ausgelenkten Blattspitzen verschlechtert und den Lärm erhöht.

Die Wölbklappen werden erst ab Nennwindgeschwindigkeit ausgeschlagen. Lärm durch große Klappen-ausschläge bei starkem Wind wird dann vom Hintergrund übertönt. Diese positive Erwartung stützt sich auf Erfahrungen bei Segelflugzeugen, wo unter o.g. Voraussetzungen auch bei großen Klappenau-

Kriterium:	Regelsystem		
	Bewertung: + o - (gut ... schlecht)		
	Pitch	Wölbklappe	Stall (Blattspitzenbremse)
konstruktiver Aufwand für Stellsystem	-	o	o
Einhaltung der Generator-Nennleistung	+	+	-
Überdrehzahlverhinderung bei Lastabwurf (Abschaltverhalten)	+	+	o
Blattquerschnitt im Nabenbereich	-	+	-
Wurzelbiegebeanspruchung in Blatt-Schlagrichtung bei Betrieb und Extremwind	o festgebremster Rotor	+	-
Rotorschub bei Extremwind	+	o	-
Wurzelbiegebeanspruchung in Schwenkrichtung (Blattgewicht)	-	+	-
konstruktiver Aufwand für Nabe	+ starr	+ 2-Blatt-Pendelnabe	+ starr
Blattstruktur im Nabenbereich	-	+ einteiliger 2-Blatt-Rotor	-
dynamisches Verhalten bei Gierschwingung der Gondel	+ 3-Blatt	+ 2-Blatt-Pendelnabe	+ 3-Blatt
Kosten für Rotorfertigung	-	+	-

Tab. 5: Vor- und Nachteile der Regelsysteme

Tab.5: Advantages and disadvantages of control systems

Abb 9: Prinzip einer Gabelgelenk-Pendelnabe.
Fig.9: Principle of a fork shaped teetering hub.

schlagen ($h_k=40^\circ-75^\circ$) und Geschwindigkeiten von 50 m/s und mehr keine Lärmprobleme entstehen. Der Hauptlärm ist abhängig von der Blattspitzengeschwindigkeit. Deshalb sollte auch ein 2-Blatt-Rotor mit niedrigen Drehzahlen betrieben werden. Die aerodynamischen Verluste werden durch die strukturellen Vorteile mehr als ausgeglichen.

6. Fazit

Die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Regelsysteme sind in Tab. 5 gegenübergestellt. Mit einem wölbklappen-geregelten Rotor läßt sich die Wirtschaftlichkeit von Windkraftanlagen verbessern. Die größten Verbesserungen erzielt die 2-Blatt-Auslegung, mit der sich auch wirtschaftliche Großanlagen realisieren lassen. Aber auch eine 3-Blatt Auslegung bietet noch Vorteile gegenüber dem Pitch- und Stall-Konzept. Bei 2-Blatt-Rotoren wird häufig auf ihre schlechte optische Akzeptanz hingewiesen. Für kleine, schnelldrehende Anlagen trifft dies auch zu. Große, langsamdrehende 2-Blatt-Rotoren liefern allerdings einen angenehmen optischen Eindruck. Am AEOLUS II, einer 2-Blatt-Anlage mit 80 m Rotordurchmesser, ist dies gut zu beobachten.

7. Literatur

- [1] Miller, D.R.: *Summary of NASA/DOE Aileron Control Development Program for Wind Turbines*. NASA TM-88811, NASA Lewis Research Center. Cleveland, Ohio: Feb. 1986.
- [2] Montag, P.: *Untersuchen der Wirksamkeit von Wölbklappen an Windkraftanlagen im Vergleich zu Stall- und Pitch-geregelten Anlagen*. Diplomarbeit am Inst. für Flugmechanik, Technische Universität Braunschweig: Nov. 1993.
- [3] Savino, J.M. et al.: *Reflection Plane Tests of a Wind Turbine Blade Tip Section with Ailerons*. NASA TM-87018, NASA Langley Research Center. Cleveland, Ohio: Aug. 1985.
- [4] Wentz, W.H. Jr./Snyder, M.H./Ahmed, A.: *Two-Dimensional Tests of Four Airfoils at Angles of Attack From 0 To 360 Degrees*. WER-16, Wind Energy Laboratory, Wichita State University. Wichita, KS: Feb. 1984.
- [5] Wentz, W.H. Jr./Snyder, M.H./Calhoun, J.T.: *Feasibility Study of Aileron and Spoiler Control Systems for Large Horizontal Axis Wind Turbines*. WER-10, Wind Energy Laboratory, Wichita State University. Wichita, KS: Nov. 1979.
- [6] Germanischer Lloyd: *Richtlinie für die Zertifizierung von Windkraftanlagen*. Hamburg: Selbstverlag des Germanischen Lloyd 1993.
- [7] Butterfield, C.P. et al.: *DOE/NREL Advanced Wind Turbine Development Program*. In: European Community Wind Energy Conference, Lübeck-Travemünde, Germany: 8.-12. März 1993, S. 260...264.