

Geräuschminderung bei Windenergieanlagen durch Modifikation der Blattspitze, der Blatthinterkante und des Anstellwinkels

Reduction of the Acoustic Noise Emission of Wind Turbines by Modification of Rotor Blade Tip Shapes, Trailing Edges and Pitch Angles

Klug, Helmut; Gabriel, Joachim; DEWI

Summary

In cooperation with manufacturers of wind turbines and rotor blades acoustic measurements on modified tip shapes, trailing edges and pitch angles were performed in a wind tunnel and on real turbines. The results provide manufacturers, developers and operators of wind turbines with a tool to reduce the noise radiation from wind turbines. Significant noise reductions were obtained by tip shape modifications. The sound power level of a modified 600 kW wind turbine was reduced to less than 98 dB(A). Modifications of the trailing edge were less effective than expected from theory. Sharp trailing edges were almost as effective as serrated trailing edges but both require special procedures in production and handling. Pitch angle modifications led to significant noise reductions when the angle of attack was reduced. The power curve of the modified turbine was measured and resulted in an energy loss in the range of 1% while the noise was reduced by 2 dB(A).

Das dieser Veröffentlichung zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministers für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) unter Förderkennziffer 0329669 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

1. Einleitung

Bei den immer knapper werdenden guten Standorten für Windenergieanlagen (WEA) stellt die Geräuschabstrahlung in der Regel den limitierenden Faktor dar. Schon eine Reduzierung des Schalleistungspegels um 2 dB(A) führt dazu, daß auf einer vorgegebenen Fläche 50% mehr Windenergieanlagen aufgestellt werden können. Eine Verminderung der Geräuschabstrahlung erhöht zudem die Akzeptanz von Windenergieanlagen bei den umliegenden Bewohnern. Bei den Maschinengeräuschen führten die Bemühungen der Hersteller, insbesondere das Getriebegeräusch zu reduzieren, schon zu einer beträchtlichen Senkung der besonders lästigen tonalen Anteile des Anlagengeräusches. In diesem Projekt wurden die aeroakustischen Geräusche, wie zum Beispiel Blattspitzengeräusche und Geräusche bei der Umströmung der Blatthinterkante, an realen Anlagen minimiert. Das Forschungsprojekt wurde von der Fördergesellschaft Windenergie e.V. (FGW) in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Windenergie-Institut (DEWI) koordiniert. Projektteilnehmer waren: ABEKING & RASMUSSEN Faserverbundtechnik GmbH, itap - Institut für technische und angewandte Physik GmbH an der Universität Oldenburg, SEEWIND Windenergiesysteme GmbH, TACKE WINDTECHNIK GmbH & Co.KG und VENTIS GmbH. Es wurde an drei unterschiedlichen Windenergieanlagen gemessen, der SEEWIND 25/132 (132 kW), der TACKE TW 600 (600 kW) und der VENTIS V12 (500 kW).

2. Ziele des Projektes

In Zusammenarbeit mit Herstellern von Windenergieanlagen und Rotorblättern wurden die aus Windkanalmessungen und dem vom DEWI koordinierten EU Projekt JOU2-CT92-0233 **Aerodynamic Noise from Wind Turbines and Rotor Blade Modification** [1],[2] gewonnenen Erkenntnisse an unterschiedlichen Windenergieanlagen umgesetzt. Die durch die Modifikation erzielte Geräuschminderung wurde an realen Anlagen vor Ort gemessen. Dabei wurden konventionelle Blattspitzen- und Hinterkantengeometrien modifiziert und direkte Vergleichsmessungen vorgenommen. Es wurde jeweils auf die anlagenspezifischen Anforderungen bzw. Möglichkeiten (z.B. pitch-reguliert, stall-reguliert) einer WEA eingegangen. Da es sich um sehr unterschiedliche Anlagenkonzepte handelt, lassen sich aus den Ergebnissen des Projektes allgemeine Aussagen über Geräuschminderungsmaßnahmen an Windenergieanlagen ableiten, die allen Herstellern zugute kommen.

3. Messungen und Ergebnisse

Auf die Geräuschentstehungsmechanismen wird hier nicht näher eingegangen (s. a. [3] - [7]). Es war aus Voruntersuchungen bekannt, daß zum Beispiel Blattspitzen mit einer starken Krümmung an der Vorderkante Randwirbel ablösen, die (insbesondere bei langgezogenen Blatthinterkanten) bei der Um-

strömung der Hinterkante ein Blattspitzengeräusch abstrahlen, das den Gesamtschalleistungspegel um einige dB(A) erhöhen kann. Auch ergaben sich aus Windkanaluntersuchungen interessante Hinweise, wie sich mit scharfen oder sägezahnförmigen Blatthinterkanten Geräuschreduzierungen erzielen lassen. Großen Einfluß auf die Schallabstrahlung haben zudem die Blattspitzengeschwindigkeit und der Blatteinstellwinkel.

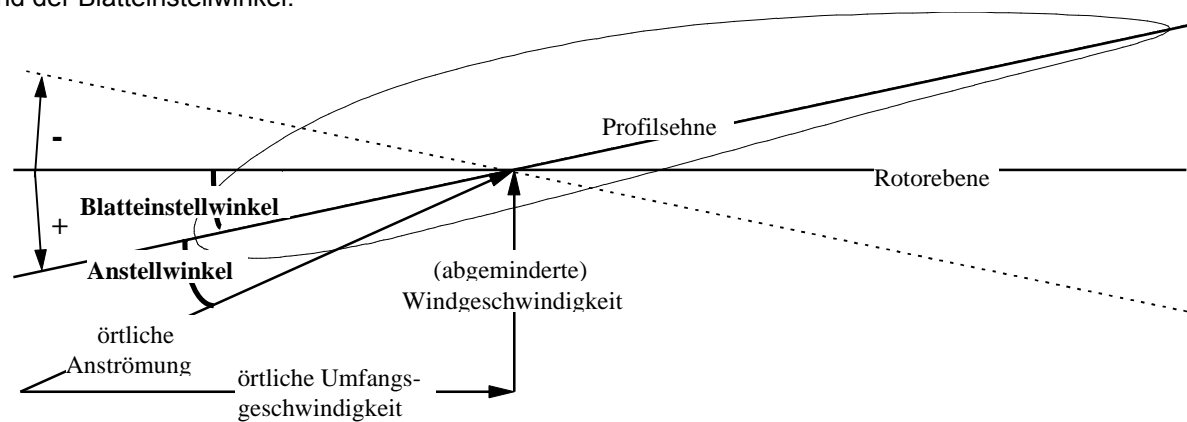


Abb. 1: Definition von Blatteinstell- und Anstellwinkel

Fig. 1: Twist / pitch angle und angle of attack

Im folgenden werden zum Teil auch die Begriffe Anströmwinkel für Anstellwinkel und Pitchwinkel für Blatteinstellwinkel verwendet. Bei einer Zunahme der Windgeschwindigkeit erhöht sich der Anstell- / Anströmwinkel, und die turbulente Grenzschichtdicke nimmt zu. Da die Dicke der turbulenten Grenzschicht die Schallabstrahlung beeinflusst, nimmt in der Regel auch der Schalleistungspegel zu. Man beachte, daß bei einer Veränderung des Blatteinstell- / Pitchwinkels von 0° auf 1° der Anstell- / Anströmwinkel abnimmt.

Seewind 25/132 - Modifizierte Hinterkanten und Blattspitzen:

Es wurde dem ITAP für die Windkanalmessungen eine Originalblattspitze (ca. 1,70 m lang) zur Verfügung gestellt. Sowohl die Windkanalmessungen durch das ITAP als auch die Vermessung des Ist-Zustandes der Anlage durch das DEWI ergaben Hinweise auf ein Geräuschminderungspotential an der Blattspitze. Da das Blattspitzengeräusch gegenüber dem Blatthinterkantengeräusch dominierte, war abweichend vom ursprünglichen Arbeitsplan eine Modifikation der Blattspitze notwendig. Da zudem die Windkanalmessungen keine deutliche Verbesserung der Schallabstrahlung mit sägezahnförmigen Hinterkanten gegenüber scharfen Hinterkanten ergaben, wurde der Schwerpunkt bei der Seewind Anlage auf die Optimierung der Blattspitze gelegt. Die Ergebnisse der Windkanalmessungen und die optimierten Blattspitzengeometrien sind dem Abschlußbericht zu dem Forschungsvorhaben (BMBF- Förderkennziffer 0329669) zu entnehmen.

Tacke TW 600 - Modifizierte Blattspitzen und Blatteinstellwinkel:

Zunächst wurden von DEWI/ITAP 2D-Vorgaben über zwei modifizierte Blattspitzen gemacht. Die modifizierten Blattspitzen wurden im Windkanal mit den Originalblattspitzen verglichen. Die akustisch optimierte Blattspitze wurde an einer Anlage in der Nähe von Emden angebracht und vom DEWI bei zwei verschiedenen Blatteinstellwinkeln vermessen. Danach wurde die Anlage mit der Originalblattspitze ausgerüstet und vom DEWI noch einmal akustisch vermessen.

Blattspitze / Blatteinstellwinkel	Schalleistungspegel bei $v_{10} = 8 \text{ m/s}$
Serienblattspitze / -1.65°	99.3 dB(A)
Modifizierte Blattspitze / -1.65°	98.6 dB(A)
Modifizierte Blattspitze / -0.75°	97.5 dB(A)

Tab. 1: Bei unterschiedlichen Modifikationen gemessenen Schalleistungspegel

Tab. 1: Measured sound power levels

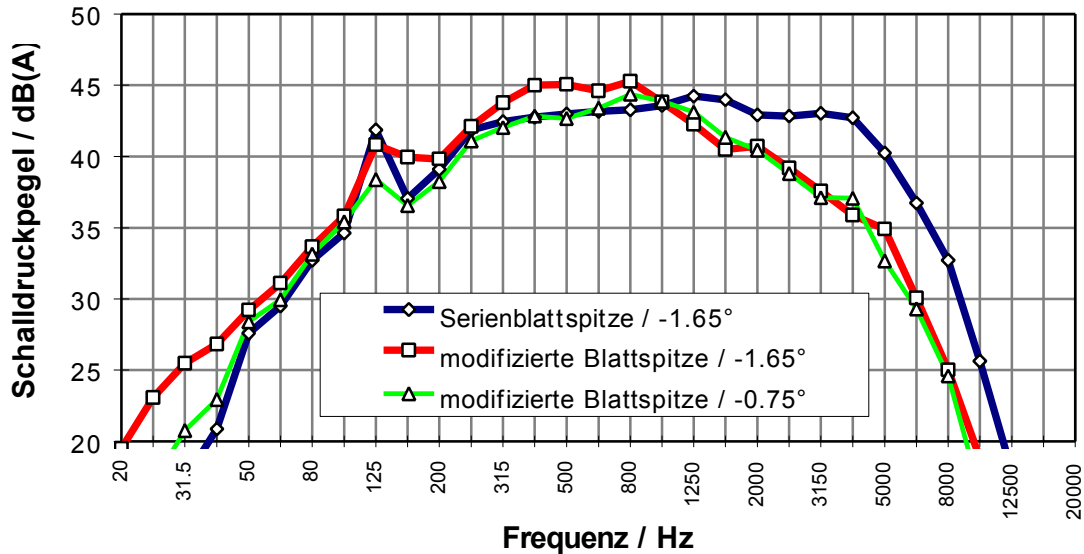


Abb. 2: Terzspektren bei einer Windgeschwindigkeit von 8 m/s in 10 m Höhe

Fig. 2: Spectra at a wind speed of 8 m/s at 10 m height

Die Spektren zeigen deutlich die Pegelminderung der modifizierten Blattspitzen im Frequenzbereich oberhalb von 1 kHz. Im Frequenzbereich von 250 Hz bis 1 kHz wurden jedoch bei modifizierten Blattspitzen im Vergleich zur Serie höhere Pegel gemessen, wodurch der Geräuschminderungseffekt verringert wird. Die Messungen belegen eine Minderung des immissionsrelevanten Schalleistungspegels durch die Blattspitzenmodifikation von 0.7 dB(A). Die Schallemission der modifizierten Blattspitzen unterscheidet sich im Frequenzbereich oberhalb von 1 kHz bei beiden Blatteinstellwinkeln nicht wesentlich. Im Frequenzbereich von 250 Hz bis 1 kHz liegt das Geräuschminderungspotential durch Vergrößerung des Blatteinstellwinkels (d.h. Verkleinerung des Anströmwinkels, s. Erläuterung von Abb. 1). In diesem Frequenzbereich bewirkt die Vergrößerung des Blatteinstellwinkels von -1.65° auf -0.75° eine deutliche Pegelminderung. Der immissionsrelevante Schalleistungspegel der Windenergieanlage mit modifizierten Blattspitzen ist bei einem Blatteinstellwinkel von -0.75° um 1.1 dB(A) niedriger. Die Ergebnisse der Windkanalmessungen und die optimierten Blattspitzengeometrien sind dem Abschlußbericht zu dem Forschungsvorhaben (BMBF- Förderkennziffer 0329669) zu entnehmen.

Ventis V12 - Modifizierter Blatteinstellwinkel:

Die Ventis V12 ist ein zweiflügeliger, pitchgeregelter Luvläufer mit einer Nennleistung von 500 kW. Der Prototyp steht auf dem Testfeld des DEWI in Wilhelmshaven. Eine Vermessung des Ist-Zustandes der V12 ergab keinen zwingenden Hinweis auf eine notwendige Blattspitzenmodifikation. Sowohl die Blattspitzen als auch Blattsegmente wurden im Windkanal akustisch vermessen. Vor Ort wurde der Schalleistungspegel bei 7 unterschiedlichen Blatteinstellwinkeln und die Leistungskurve bei zwei unterschiedlichen Blatteinstellwinkeln vermessen. Um die unterschiedlichen Blattwinkel einzustellen, wurde jeweils der Steuerungsparameter für die Pitchwinkeleinstellung verändert. Da im akustisch relevanten Leistungsbereich keine Leistungsbegrenzung durch die Pitchregelung erfolgt, wird hierdurch jeweils ein konstanter Blatteinstellwinkel vorgegeben. Als Bezug für die vergleichenden Messungen dient die Standardeinstellung der Anlage (Blatteinstellwinkel bei Radius 19 m = 0°).

Schallmessungen wurden für die Blatteinstellwinkel -2° , -1° , 0° , $+1^\circ$ und $+2^\circ$ durchgeführt. Ein Wert von $+90^\circ$ entspricht der Fahnenstellung. Die Änderungen der Blattwinkeleinstellungen bewirkten deutliche Veränderungen des von der Windenergieanlage abgestrahlten Geräusches. Da die Umschaltung von einer zur anderen Einstellung jeweils bei laufender Anlage erfolgte, waren bereits vor Ort deutliche Unterschiede in der Geräuschabstrahlung hörbar. Es wurde bei einem Einstellwinkel von $+2^\circ$ (kleinerer Anströmwinkel) ein um 5.7 dB(A) niedrigerer Schalleistungspegel als bei -2° gemessen. Wird der Blatteinstellwinkel von 0° auf $+1^\circ$ verändert, ergibt sich bei Referenzwindgeschwindigkeit (Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe von 8 m/s) ein um 1.9 dB(A) niedrigerer Schalleistungspegel. Eine Änderung von $+1^\circ$ auf $+2^\circ$ bewirkt nur noch eine weitere Reduzierung um 0.6 dB(A). Die Pegelverringerung bei Vergrößerung des Blatteinstellwinkels kann mit der durch den verringerten Anströmwinkel abnehmenden turbulenten Grenzschichtdicke erklärt werden. Da bei einer Einstellung von $+3^\circ$ ein leicht ansteigender Schalleistungspegel zu verzeichnen ist, erscheinen für Geräuschminderungsmaßnahmen

Blatteinstellwinkel von $+1^\circ$ bis $+2^\circ$ als am vorteilhaftesten. Die Änderung des Blatteinstellwinkels veränderte auch deutlich die spektrale Charakteristik des Anlagengeräusches. Während bei Änderungen auf niedrige Pitchwinkel (größerer Anströmwinkel) die Zunahme eines eher breitbandigen aerodynamischen Geräusches zu verzeichnen ist, führen Winkel von $+2^\circ$ und $+3^\circ$ (kleiner Anströmwinkel) zu einem schmalbandigen Laminarablösegeräusch im Frequenzbereich von 2 bis 3 kHz.

Parallel zu den Schallmessungen wurden für zwei Pitchwinkeleinstellungen Messungen der Leistungskurven durchgeführt. Da jede Leistungskurvenmessung mit erheblichem Aufwand verbunden ist, dienten Leistungskurvenberechnungen im Vorfeld zur Orientierung und Entscheidungshilfe bei der Auswahl der zu vermessenden Einstellungen. Die Leistungskurven ermöglichen eine Quantifizierung der Energieertragsverluste bei Geräuschminderungsmaßnahmen und somit eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit. Zur Berechnung der Leistungskurven wurde das Programm PROPCODE verwendet, das nach Eingabe der Profil- und Rotordaten die Rotorleistung ermittelt. Mit den berechneten Leistungskurven lassen sich für Standorte mit normierten Windprofilen und Windgeschwindigkeitsverteilungen standardisierte Energieertragsrechnungen durchführen.

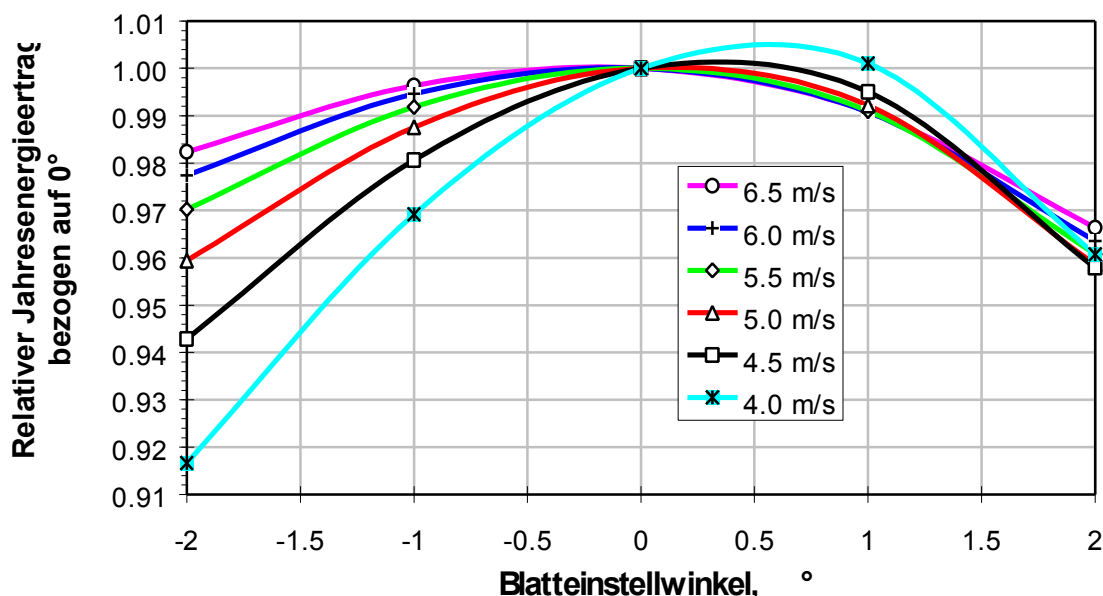


Abb. 3: Berechnete Jahresenergieerträge (mittlere Jahreswindgeschwindigkeit in 10m Höhe)
Fig. 3: Calculated annual energy production (AEP)

Nach Abb. 3 ist die Anlage in der Standardeinstellung bezüglich des Blatteinstellwinkels auf den Standort (v_{30} -Mittel ca. 6 m/s) gut angepaßt. Für einen windschwächeren Standort (v_{10} -Mittel = 4 m/s) ergibt sich sogar rechnerisch ein leicht höherer Jahresenergieertrag für die **geräuschgeminderte Einstellung mit $+1^\circ$** . Für den Referenzstandort (Jahresmittel 5.5 m/s in 10 m Höhe) [8] ergeben sich berechnete Energieertragseinbußen von 1 %, wenn die Windenergieanlage durchgehend mit einem Blatteinstellwinkel von $+1^\circ$ geräuschgemindert betrieben wird.

In Abb. 4 sind die Schalleistungspegel in Abhängigkeit von dem Blatteinstellwinkel zusammen mit den relativen Jahresenergieerträgen (AEP) dargestellt. AEP = 100% entspricht dabei dem Jahresenergieertrag bei der Standard-Blatteinstellwinkel-Einstellung von 0° .

Bei der Abwägung zwischen Geräuschminderung und Energienertragseinbuße schneidet die Blattwinkeleinstellung von $+1^\circ$ am günstigsten ab. Auf der Basis der gemessenen Schalleistungspegel und berechneten Energieerträge ergibt sich ein Verhältnis von 1.9 dB(A) Geräuschminderung zu ca. 1% Ertragsverlust.

Wegen des geringen zu erwartenden Energieertragsverlustes bei deutlicher Pegelreduzierung, wurde der Wert von $+1^\circ$ als schallmindernde Einstellung für die Leistungskurvenvermessung nach der IEA-Richtlinie [10] gewählt. Auch mit den gemessenen Leistungskurven wurden standardisierte Jahresenergieerträge berechnet. Es ergab sich ein Energieertragsverlust von ca. 3 %.

Noch wesentlich geringer fallen die Verluste aus, wenn die Pegelreduzierung mit den konkreten Immissionsschutzbelangen des jeweiligen Standortes verknüpft werden. Der geräusch- und energieertragsgeminderte Betrieb ist dann nur nachts und bei bestimmten Windrichtungen und -geschwindigkeiten erforderlich. Aus einer groben Abschätzung (mit 1/3 Nachtzeit) ergeben sich dann auf der Basis gemessener Leistungskurven lediglich Energieertragsverluste von unter 1%.

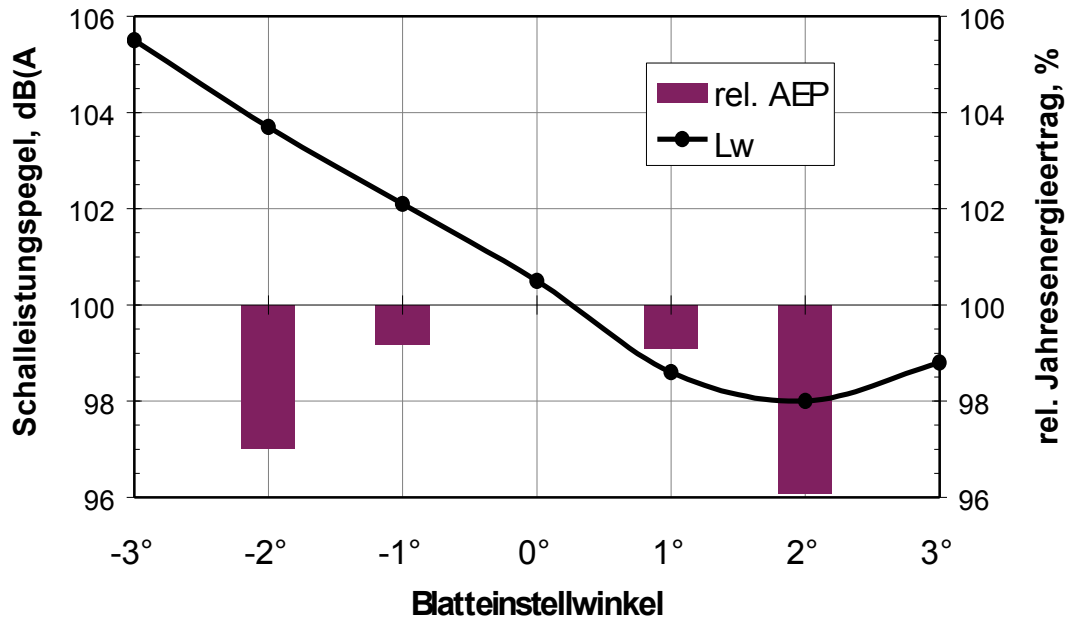


Abb. 4: Gemessene Schalleistungspegel und errechnete Jahresenergieerträge (AEP)

Fig. 4: Measured sound power levels and calculated annual energy production (AEP)

Obwohl die notwendigen, häufigen Einstellungsänderungen für die Schallmessungen nur durch das Anlagenkonzept mit Pitch-Regelung möglich wurden, dürften die Ergebnisse qualitativ auch auf Windenergieanlagen ohne mechanische Blätterverstellung (stall-geregelt) übertragbar sein. Quantitativ sind zwar mit zunehmend akustisch optimierten Anlagen (Blattspitzen, -hinterkanten, Rotordrehzahlen) geringere „akustische Einsparpotentiale“ zu erwarten. Diese können in kritischen Fällen jedoch über Sein oder Nichtsein einer Anlage entscheiden. Bei stall-geregelten Windenergieanlagen ist zu beachten, daß der akustisch günstigere Betrieb mit größeren Blatteinstellwinkeln zu späterem Strömungsabriß und damit zu einem höheren Leistungskurvenmaximum führt.

4. Zusammenfassung

Es hat sich gezeigt, daß bei vielen Windenergieanlagen deutliche Reduzierungen der Geräuschabstrahlung durch eine Veränderung der Blattspitzenform erzielt werden können. Die spitze Form mit zurückgenommener Hinterkante erwies sich dabei als am günstigsten. Eine zusätzliche Verwindung der Blattspitze erweist sich bei hohen Windgeschwindigkeiten als günstig, kann jedoch bei niedrigen Windgeschwindigkeiten (kleiner oder sogar negativer Anströmwinkel) ein Laminarablösegeräusch erzeugen, was unter Umständen durch Trippen (erzwungener Umschlag) vermieden werden kann. Die Modifikation der Blattspitze führte zu dem niedrigsten vom DEWI gemessenen Schalleistungspegel in der 600 kW - Leistungsklasse von unter 98 dB(A).

Bei den Modifikationen der Hinterkante konnte der erhoffte Erfolg bei sägezahnförmigen Hinterkanten im Windkanal nicht nachgewiesen werden. Zwar sind weitere Untersuchungen an realen Anlagen (ohne verdeckendes Blattspitzengeräusch) denkbar, jedoch wurde die Serienproduktion von Rotorblättern mit sägezahnförmiger Hinterkante von dem im Projekt beteiligten Blatthersteller als nicht praktikabel verworfen. Im Blattspitzenbereich dünne Hinterkanten (ca. 1mm) erweisen sich akustisch günstiger als dicke Hinterkanten (mehr als 2 mm), stellen jedoch ebenfalls hohe Anforderungen an die Produktion und die Handhabung der Rotorblätter.

Eine Modifikation des Blatteinstellwinkels hin zu niedrigeren Anströmwindwinkeln ergibt deutliche Schallpegelminderungen. Diese liegen in der Größenordnung von bis zu 2 dB(A) pro 1° Blattverstellung. Bei akustisch optimierten Blattspitzen liegt die Schallpegelminderung bei etwa 1 dB(A) pro Grad, da bei ungünstiger Blattspitzenform der Schalldruckpegel mit dem Anströmwindwinkel stärker ansteigt. Die Veränderung des Blattwinkels bewirkt allerdings auch eine Veränderung des Leistungsverhaltens. Bei Anlagen mit Blattverstellung (pitch-geregelte oder aktiv-stall-geregelte Anlagen) besteht jedoch die Möglichkeit, den Blattwinkel nur während des Nachtzeitraumes (geringere Immissionsrichtwerte) zu verändern, so daß die Energieertragseinbußen eventuell nur in der Größenordnung von 1 % oder sogar darunter liegen. Um eine standortabhängige Optimierung „Schallabstrahlung gegenüber Energieertrag“ vornehmen zu können, müssen die den bestimmten Blattwinkeln entsprechenden Schalleistungspegel und Leistungskurven vermessen sein.

Literatur

- [1] Klug, Osten, Lowson, Jakobsen, Andersen, van der Borg, Vink, Betke, Schultz-von Glahn, Larsen, 'Aerodynamic Noise from Wind Turbines and Rotor Blade Modification', Final Report DEWI V-95 0006 (EU-Projekt JOU2-CT92-0233), Wilhelmshaven, 1995.
 - [2] H. Klug, 'Aerodynamic Noise from Wind Turbines and Rotor Blade Modification - Experimental Results', Forum Acusticum 1996, Acta Acustica, S.81.
 - [3] Brooks, T.F., Pope, D.S., Marcolini, M.A., 'Airfoil Self Noise and Prediction', NASA Reference Publication 1218, 1989.
 - [4] Howe, M.S., 'A Review of the Theory of Trailing edge noise', J. Sound Vib. 61, 3, 437-465 (1978).
 - [5] Lowson, M.V., 'Assessment and Prediction of Wind Turbine Noise', ETSU W/13/00284/Rep1993.
 - [6] H. Klug, 'Viel Wind um wenig Lärm - Geräuschproblematik bei Windkraftanlagen, Sonnenenergie 4/91, 3-7, 1991.
 - [7] Wagner, Bareiß, Guidati; Wind Turbine Noise, Springer Verlag, 1996.
 - [8] DEWI, WINDTEST, WINDconsult: Technische Richtlinien zur Bestimmung der Leistungskurve, des Schalleistungspegels und der Netzverträglichkeit von Windkraftanlagen, Rev.9, 15.11.1996
 - [9] Recommended Practices for Wind Turbine Testing, 4. Acoustics - Measurement of Noise Emission from Wind Turbines, 3. edition, 1994
International Energy Agency. Edited by Sten Ljunggren, Sweden.
 - [10] IEA-Empfehlung: „Recommended Practices for Wind Turbine Testing, 1. Power Performance Testing“, IEA- Expert Group Study, 2. Edition, Dänemark 1990.
-