

Rotorblattlärm: Reine Formsache!

Rotor Noise: A Matter of Shape!

Kramkowski, Theo; Montag, Peter*; Osten, Tjado, DEWI

Summary

A very annoying noise of the rotor blades of a 30 kW wind turbine, caused by separation of the lower surface laminar boundary layer, was eliminated by forcing transition of the boundary layer by means of turbulators. The sound power level in the noise sensible medium wind speed range was reduced by up to 9 dB(A)! In one case reported from the same type of turbine the machine has to be run at half rotor speed at night to avoid trouble with the neighbours. The cure method presented in this report will be offered to the owners of these machines.

Fortunately this noise is not likely to appear at the larger 500kW turbines, commonly installed today. It seems to be restricted to Reynolds numbers below 2,000,000 and hence small and medium size wind turbines.

The very same wind turbine's rotor blade surfaces showed severe deformations after only two years of operation. Such deformations are avoidable today by the additional knowledge gained meanwhile, leading to more accurate moulds and manufacturing methods. But commonly agreed tolerances for rotor blade quality control are yet missing. DEWI's work in this field will be continued.

1. Einleitung

Seit Ende 1992 betreibt das DEWI auf seinem Testfeld unter anderen eine Windenergieanlage (WEA) mit 30kW Nennleistung. Schon bald nach Inbetriebnahme der WEA fiel ein lästiges Pfeifgeräusch der Rotorblätter auf, das an einem anderen Standort sicher zu Problemen mit Anwohnern führen würde. Praxiserfahrene Mitarbeiter der Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR) und des DEWI stellten, gestützt durch detaillierte strömungsmechanische Berechnungen, die Lärmursache fest und erzielten mit einfachen Mitteln eine drastische Geräuschminderung.

Vor dem Aufstellen der WEA wurden drei Querschnitte eines Rotorblattes abgeformt und mit den vom Hersteller angegebenen Profilen verglichen. Die festgestellten extremen Fertigungstoleranzen verursachen rechnerisch einen ca. 6% geringeren Energieertrag [1] und sind verantwortlich für das lästige Pfeifgeräusch. Nach einer Betriebszeit von 2,5 Jahren ergab sich während des Einrüstens von Meßaufnehmern erneut eine Gelegenheit, die Rotorblattkontur zu überprüfen. Auf die merkliche Formänderung während des bisherigen Betriebs wird hier ebenfalls eingegangen.

2. Geräuschminderung

Eine 30 kW WEA auf dem Testfeld des DEWI machte sich nach ihrer Aufstellung durch ein auffälliges Pfeifgeräusch unangenehm bemerkbar. Das pfeifende Geräusch war moduliert mit der Frequenz der Blattpassage und wies damit auf die Rotorblätter als Quelle des Übels hin. Eine durchgeführte Schallmessung [2], ergab eine völlig untypische Geräuschcharakteristik mit einem flachen Maximum des Schallpegels bei mittlerer Leistung (Abb. 1) und einer markanten Spitze im Terzspektrum um 2kHz (Abb. 2). Der schallmessende Ingenieur verglich die Geräuschkulisse mit der einer aufgebrauchten Seevögelkolonie.

* Fa. Stemme

2.1 Laminare Grenzschichtablösung als Geräuschursache

Das auffällige Rotorblattgeräusch regte auf einer Exkursion zum DEWI Testfeld anlässlich der DEWEK '94 den Ehrgeiz der Strömungsmechaniker der DLR und des DEWI an.

In einem früheren Experiment des DEWI [3] wurde ein ähnliches Geräusch an der 5kW WEA des Energielabors der Universität Oldenburg beobachtet. Im dortigen Windkanal wurde als Ursache eine laminare Grenzschichtablösung auf der Profilunterseite gefunden. Durch Aufkleben eines künstlichen Turbulators auf das Rotorblatt konnte diese Ablösung beseitigt werden. Der Turbulator zwingt, sofern richtig positioniert, die laminare Grenzschicht zum Umschlag in eine turbulente Grenzschicht und vermeidet so die Ausbildung einer widerstandsreichen und geräuschintensiven laminaren Ablösung.

Bei der 30kW WEA des DEWI schien der Verdacht auf eine laminare Ablösung als Lärmursache naheliegend. Zur Klärung dieser Vermutung wurde mit den DLR-Aerodynamikern J. Lieser und P. Montag eine Zusammenarbeit vereinbart, um die gesammelte Erfahrung der Forschungseinrichtung intensiv zu nutzen. Mit einem leistungsfähigen und zuverlässigen Profil-Nachrechnungsverfahren der DLR wurden die Blattquerschnitte nachgerechnet, die vor Aufstellung der WEA von den Rotorblättern abgeformt wurden [4].

Die erwähnte WEA des Energielabors arbeitet aufgrund der schmalen Rotorblätter und der variablen Drehzahl in einem Reynoldszahlbereich von $350.000 < Re < 1.000.000$ gegenüber $1.200.000$ an der 30kW WEA des DEWI. Das tonale Geräusch konnte durch die begrenzte Strömungsgeschwindigkeit im Windkanal seinerzeit aber nur bis zu einer Reynoldszahl von 500.000 nachgewiesen werden. Für solch kleine Reynoldszahlen ($Re < 500.000$) sind massive Ablösungen der laminaren Grenzschicht typisch und erstrecken sich teilweise bis über die Profilhinterkante hinaus. Im Bereich von $500.000 < Re < 3.000.000$ werden die laminaren Ablösungen, abhängig von der Profilkontur, immer kleiner. Gewöhnlich legt sich solch eine lokal begrenzte laminare Ablösung (Ablöseblase) wieder an die Blattoberfläche an, nachdem die laminare Strömung oberhalb der Ablöseblase in eine turbulente umgeschlagen ist. Bei Reynoldszahlen über $3.000.000$ erfolgt der Grenzschichtumschlag laminar/turbulent ohne Ablösung [5]. Aufgrund der größeren Reynoldszahlen bei der 30kW WEA erschien die für die 5kW WEA gefundene Lösung nicht unbedingt übertragbar.

Vor allem aber schien es wenig wahrscheinlich, daß infolge der normalen Verschmutzung der Rotorblätter überhaupt eine laminare Grenzschicht an der Druckseite der Rotorblätter vorliegt. Eine laminare Ablösung als Lärmquelle wäre dann ebenfalls ausgeschlossen. Rauigkeit der Profilvorderkante durch Insektenreste oder Erosion führt direkt bzw. sehr schnell zur Entwicklung einer turbulenten Grenzschicht der ankommenden laminaren Luftströmung, verbunden mit einem Anstieg des Reibungswiderstandes. Dies kann an der Profiloberseite zu vorzeitiger Strömungsablösung, verbunden mit teilweise erheblicher Minderung der Rotorleistung, führen. Gleiche Verschmutzung vorausgesetzt, steigt die Tendenz einer laminaren Grenzschicht in eine turbulente Grenzschicht umzuschlagen mit wachsender Reynoldszahl. Diese von der Reynoldszahl abhängige Wirkung der Profilverschmutzung ist auch in Windkanalmessungen nachgewiesen [6].

Aufgrund der Profilkontur und der üblichen Anstellwinkel am Rotorblatt der 30kW WEA vermutete ein Autor des DLR-Berichts [3], daß trotz Verschmutzung eine ausgeprägte laminare Grenzschicht an der Profilunterseite vorliegen könne. Die Grenzschichtberechnungen sagten für die nicht verschmutzten Profile an der Unterseite eine laminare Grenzschicht von mehr als 90% der Flügeltiefe mit einer laminaren Ablösung im Bereich der Endkante vorher. Die Unterseite ist auf einer Länge von ca. 1cm zur Endkante hin zugespitzt, vermutlich in der guten Absicht eine aeroakustisch günstige dünne Endkante zu erzielen. Leider wurde in diesem Fall das genaue Gegenteil erreicht. Der konvexe Verlauf vor der Endkante bewirkt einen heftigen Druckanstieg, den die hierauf empfindliche laminare Grenzschicht mit Ablösung quittiert. Diese laminare Ablösung, bis über die Hinterkante hinaus ausgedehnt, bewirkt ein kräftiges tonales Geräusch, das im Frequenzspektrum durch den Dopplereffekt verwischt. Die DLR-Untersuchung empfahl abschließend, das tatsächliche Vorhandensein der laminaren Strömung und einer laminaren Ablösung durch Anstrichbilder am Rotorblatt der WEA im Betrieb nachzuweisen. Bei diesem Verfahren wird die Strömungscharakteristik - laminare, turbulente Grenzschicht oder Ablösung - mit gefärbtem Öl, Ruß, etc. auf der Blattoberfläche sichtbar gemacht. Sollte sich der Verdacht bestätigen, so sei das lästige Geräusch durch Erzwingen des Grenzschichtumschlags laminar/turbulent mit einem stromaufwärts vor der laminaren Ablösung aufgeklebten künstlichen Turbulator zu beseitigen.

2.2 Praktische Umsetzung

Bei einer Demontage der WEA zum Einbau von Meßaufnehmern ergab sich die Gelegenheit, der Theorie nachzugehen. Es zeigte sich, daß ölige Leckagen der WEA zusammen mit der allgemeinen Luftverschmutzung durchaus von Nutzen sein können. So entstanden auf diese Weise durch Schmutzspuren "Langzeit-Anstrichbilder" im Betrieb, die die Grenzschichteffekte sichtbar machten. Sie zeigten trotz Verschmutzung und Erosion der Profilvorderkante eine laminare Grenzschicht der Blattunterseite und auffällige Schmutzablagerungen im Bereich abgelöster Grenzschicht auf einem ca. 5mm schmalen Streifen an den Blattspitzen parallel zur Endkante. Diese Beobachtungen bestätigen die Vermutungen und Nachrechnungen der DLR. Mit Hilfe der "Anstrichbilder" wurde die Turbulatorposition festgelegt, die Oberfläche gereinigt und ein Turbulator aus selbstklebendem Zick-Zack-Kunststoffband aufgebracht. Schon der erste subjektive Höreindruck bestätigte den Erfolg der Maßnahme. Das Pfeifen war verschwunden!

Die später durchgeführte Geräuschmessung bestätigt dies: Die Meßdaten zeigen deutlich das überaus erfreuliche Ergebnis sowohl im Schalleistungspegel als auch im Terzspektrum. Im mittleren Leistungsbereich wurde eine Reduktion des A-bewerteten Schalleistungspegels von bis zu 9 dB(A) erreicht (Abb. 1) und die Lästigkeit des abgestrahlten Geräusches konnte drastisch gesenkt werden. Der Vergleich der bei jeweils gleicher elektrischer Leistung (18 kW) aufgenommenen Terzspektren (Abb. 2) zeigt eine deutliche Verringerung der Geräuschabstrahlung mit Turbulatoren im Frequenzbereich um 2kHz.

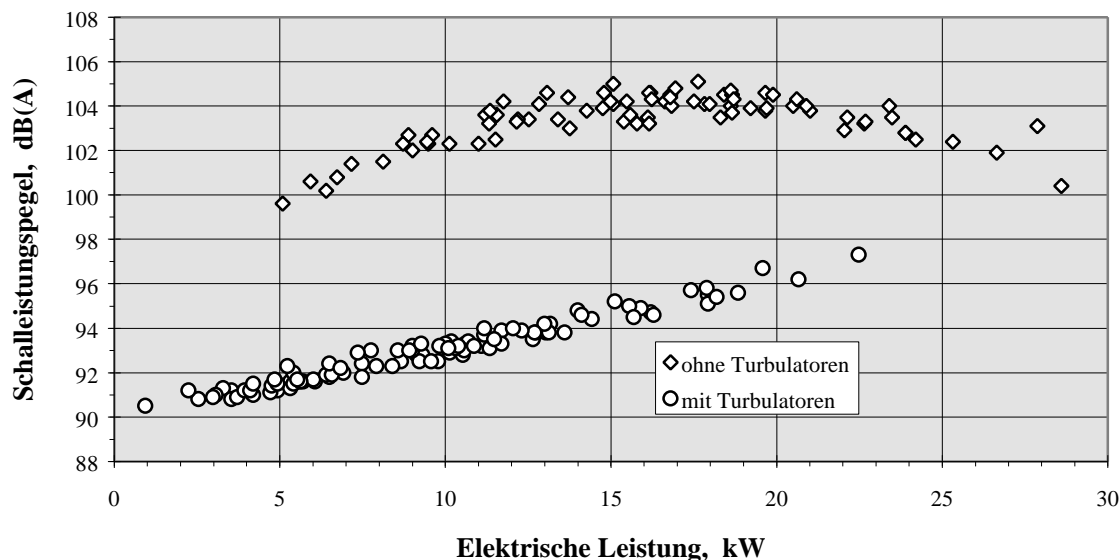


Abb. 1: Abhängigkeit des A-bewerteten Schalleistungspegels von der elektrischen Wirkleistung der WEA vor und nach Anbringen der Turbulatoren (Mittelungszeit: 60s)

Fig. 1: A-weighted sound power level vs. electrical power output of the wind turbine before and after mounting the transition strips (averaging time: 60s)

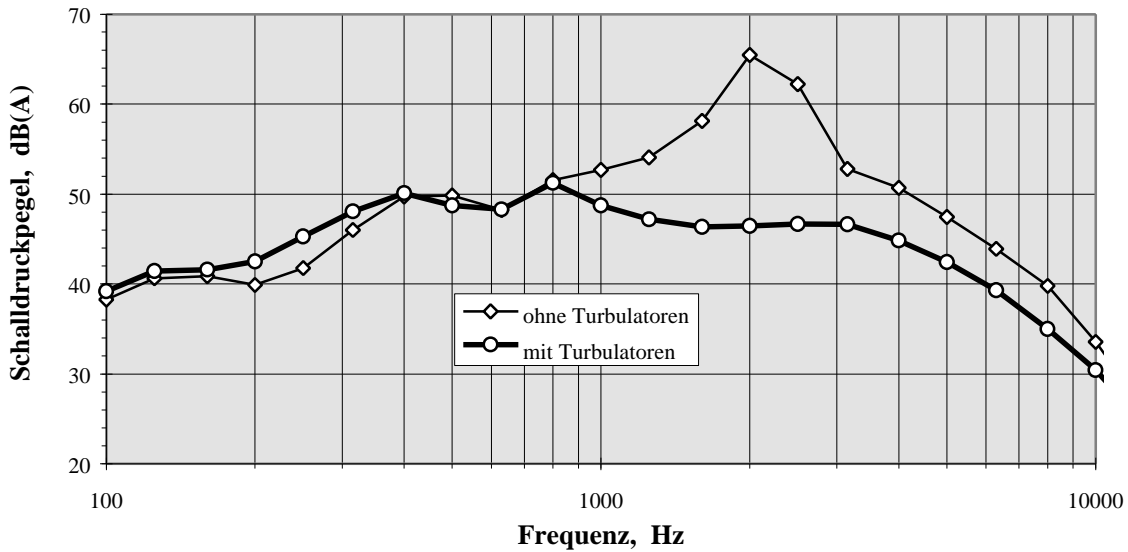


Abb. 2: Terzspektren bei gleicher elektrischer Leistung (18 kW) vor und nach dem Anbringen der Turbulatoren (Mittelungszeit: 5 Minuten)

Fig. 2: 1/3rd octave band spectra of the radiated noise before and after mounting the transition strips (electrical power output: 18 kW; averaging time: 5 minutes)

2.3 Nachweis des Geräuschanteils einer laminaren Ablösung im gemessenen Frequenzspektrum

Bei den beschriebenen Pfeifgeräuschen handelt es sich um einen schmalbandigen Geräuschanteil, der auf laminare Strömungsablösung an der Unterseite der Rotorblätter zurückzuführen ist. Auf die Ursachen der Entstehung und die Vermeidung solcher Quellen geht die Literatur [7] ein. Eine empirische Formel zur Frequenzbestimmung derartiger Geräusche wird in [8] gegeben:

$$f = 0,011 \cdot \left(\frac{u}{c} \right) \cdot \sqrt{Re}$$

Dabei ist u die Strömungsgeschwindigkeit, c die Profiltiefe und Re die Reynoldszahl, bezogen auf die Profiltiefe. Für die vermessene WEA beträgt die Reynoldszahl im äußeren Bereich des Rotorblattes etwa 1.200.000. Nach der o.g. Formel ergibt sich eine Frequenz von ca. 2,3 kHz, die durch die Messung bestätigt wird (Abb. 2). Mit der o.a. Formel kann man folglich eine laminare Ablösung als Geräuschursache im gemessenen Terzspektrum erkennen.

In welchem Bereich von Reynoldszahlen bzw. Anstellwinkeln die tonalen Geräusche erwartet werden, ist ebenfalls in [7] angegeben, siehe Abb. 3. Die Abbildung bestätigt für $Re \approx 1.200.000$ den weiten Bereich von Anstellwinkeln bzw. Windgeschwindigkeiten, in dem die Pfeifgeräusche bei der vermessenen WEA auftraten.

Auch an großen WEA werden trotz Reynoldszahlen > 2.000.000 an der Blattspitze wegen der abnehmenden Umfangsgeschwindigkeit zur Blattwurzel hin Reynoldszahlen im vorhergesagten Bereich (Abb. 3) erreicht. Entscheidend ist aber der Bereich der Blattspitze, weil die Intensität des Geräusches etwa in der 6. Potenz von der Strömungsgeschwindigkeit abhängt. Daraus kann abgeleitet werden, daß diese Geräuschquelle bei Anlagen der 500kW-Klasse wegen der höheren Reynoldszahlen unbedeutend wird. Allerdings ist das folgende Ergebnis aus dem Windkanal [6] zu beachten: Für ein Profil der FX W-84-Familie wurde trotz simulierter Insektenrauhigkeit bei einer Reynoldszahl von 3.000.000 und Anstellwinkeln größer 6 Grad eine laminare Grenzschichtlänge von mehr als 90% der Profiltiefe gemessen! Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, daß bei ungünstiger Profilkontur auch außerhalb des vorhergesagten Bereiches laminare Ablösungen auftreten können. Die obere Reynoldszahl-Grenze dieser tonalen Geräusche ist in Abb. 3 vermutlich zu niedrig angegeben.

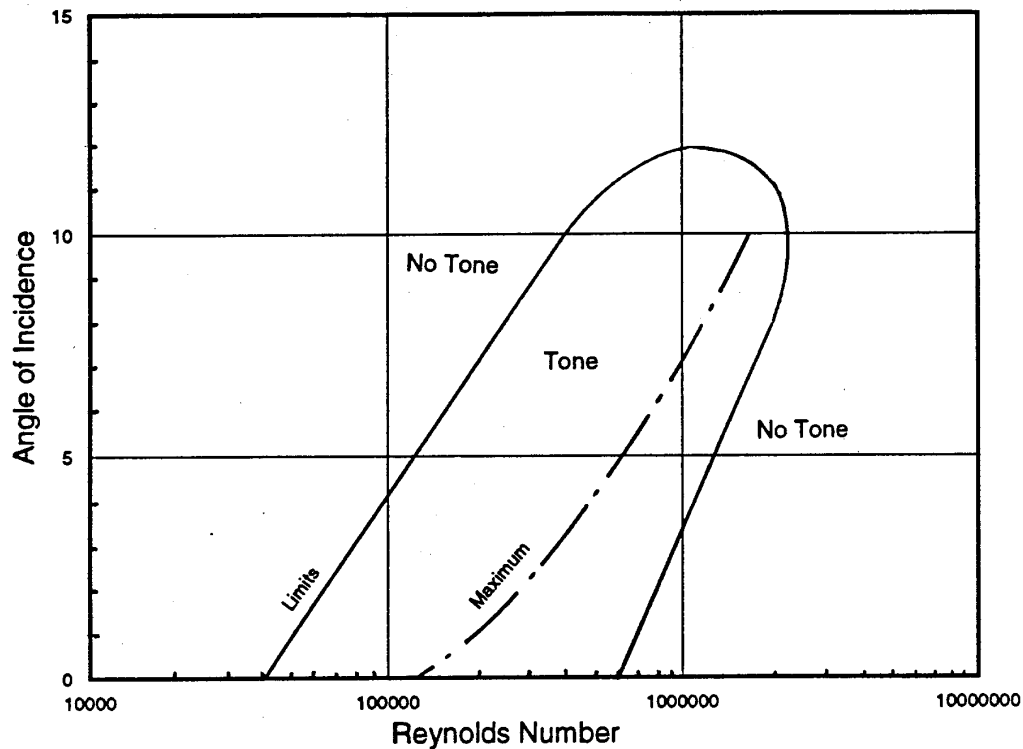


Abb. 3: Vorhergesagter Bereich der durch laminare Grenzschichtablösung verursachten tonalen Geräusche [7]

Fig. 3: Predicted appearance of laminar boundary layer instability noise [7]

3. Formänderung der Rotorblätter im Betrieb

Eine Überprüfung der Profile (Querschnitte) eines Rotorblattes der 30kW WEA vor Errichtung der Anlage auf dem DEWI Testfeld [1, 9] ergab, daß nicht ein Profilstrak der FX 84-W-Profilfamilie verwendet wurde, wie angegeben und geplant, sondern nur aufgedickte FX 84-W-175 Profile. Eine besonders gravierende Abweichung stellt die bis zu 1.5% der Flügeltiefe geringere Wölbung der Profile dar, was einen deutlich geringeren Maximalauftrieb zur Folge hat. Außerdem ist die Unterseite im Bereich der Hinterkante deutlich dicker als vorgesehen und zur Endkante hin zugespitzt. Neben dem dadurch hervorgerufenen Geräusch (s. Kap. 2), bewirkt die fehlende konkave Formgebung der Unterseite einen weiteren Auftriebsverlust - das sogenannte "rear loading" fehlt. Ohne Berücksichtigung möglicher Abweichungen der Verwindung und Einstellung des Rotorblattes, die nicht geprüft wurden, beträgt der rechnerische Verlust im Energieertrag 6%.

Bereits nach einigen Monaten Betriebszeit konnte unter günstigen Lichtbedingungen eine eingefallene, beulige Oberfläche der Rotorblätter beobachtet werden. Aufgrund dieser Beobachtung wurden die im

Neuzustand abgeformten Profilschablonen anlässlich einer Demontage der Rotorblätter nach 2,5 Jahren Betriebszeit zu einer erneuten Überprüfung verwendet. Das Ergebnis bestätigte die Beobachtungen mit deutlichen zusätzlichen Formänderungen, wie z.B. in Abb. 4 dokumentiert. Die Oberfläche ist zwischen den steifen Punkten Nasenkante, Stege und Endkante eingefallen. Die Stege treten deutlich hervor und sind durch Abklopfen eindeutig identifizierbar. Die Ursachen dieser unzureichenden Standfestigkeit der Rotorblattoberfläche sind unklar. Eine mangelnde Aushärtung des verwendeten Laminierharzes, verursacht durch unzureichende Wärmezufuhr während des Verkettungsprozesses, erscheint aber naheliegend. Die Folgen für die nun abermals geänderte Aerodynamik des Rotors sind noch nicht durch eine erneute Leistungsvermessung bzw. -rechnung erfaßt. Eine weitere Verschlechterung ist wahrscheinlich. Möglicherweise setzen nun bereits vor Erreichen der Nennleistung Strömungsablösungen ein. Die gefundenen Abweichungen zeigen den Bedarf für eine umfassende Qualitätssicherung von Rotorblättern. Um die hier gezeigten -und hoffentlich nicht repräsentativen- Bauabweichungen an aktuellen Rotorblättern zu überprüfen und geeignete Toleranzen für eine Qualitätskontrolle festzulegen, wird zur Zeit ein durch die Europäische Kommission gefördertes Forschungsvorhaben unter der Leitung des DEWI durchgeführt.

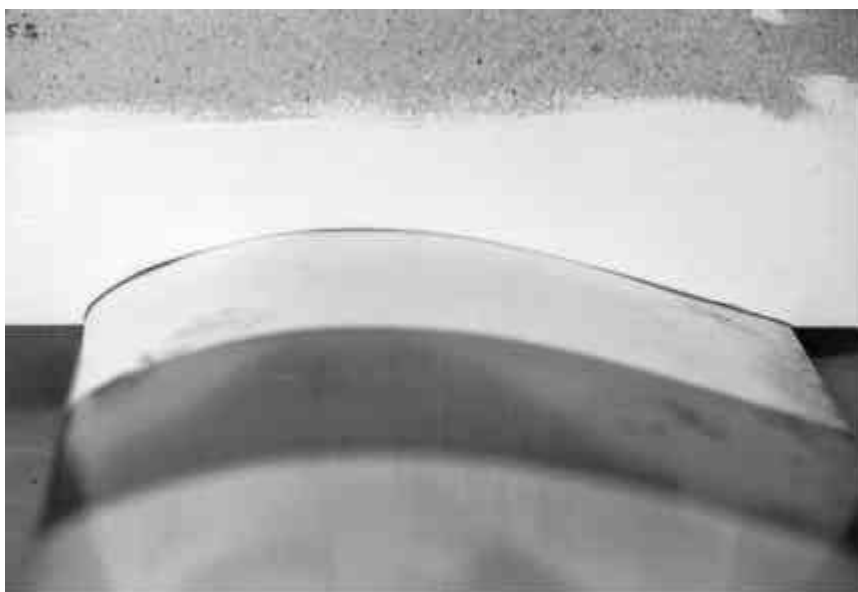


Abb. 4: Form eines Rotorblattes aus faserverstärktem Kunststoff nach 2,5 Betriebsjahren, verglichen mit der bei Anlieferung abgeformten Schablone

Fig. 4: Shape of a fibre reinforced plastic rotor blade after 2.5 years of operation compared to the template taken at delivery

4. Zusammenfassung

Ein sehr lästiges tonales Geräusch am Rotorblatt einer 30kW WEA, verursacht durch Ablösung der laminaren Grenzschicht an der Profilunterseite, konnte durch Anbringen eines Turbulators beseitigt werden. Der Schalleistungspegel sank im mittleren Leistungsbereich um bis zu 9dB(A). Betreiber gleicher Anlagen kennen das pfeifende Geräusch. In einem Fall wird die WEA nachts wegen Belästigung der Nachbarn nur mit halber Drehzahl betrieben. Das DEWI wird seine Lösung anbieten.

Das beobachtete Geräusch scheint nur an kleinen und mittleren WEA ($Re < 2.000.000$) aufzutreten und hängt sehr von der Querschnittsform des Rotorblattes ab. Auf die heute üblichen WEA mit Nennleistungen ab 500kW ist das Ergebnis daher vermutlich nicht zu übertragen.

Das Rotorblatt wies bereits im Neuzustand gravierende Bauabweichungen gegenüber der entworfenen Geometrie auf, wie eine Kontrolle durch Profilabdrücke vor Aufstellung der Anlage ergab. Teile dieser Abweichungen sind für das lästige Pfeifgeräusch verantwortlich. Die an der gleichen WEA beobachteten Formänderungen der Blattoberfläche nach nur zwei Jahren Betrieb müssen wohl als extremes Beispiel betrachtet werden. Die hier aufgetretenen Abweichungen, sowohl beim Bau als auch während des Betriebs, bewegen sich weit außerhalb tolerierbarer Grenzen. Durch den Wettbewerb unter den Rotorblattherstellern und den verbesserten Stand des Wissens sind heute wesentlich verbesserte Verfahren in Formenbau und Blattfertigung Stand der Technik. Allgemein

anerkannte Toleranzen sind aber als wesentlicher Bestandteil einer Qualitätssicherung von Rotorblättern notwendig. Das DEWI wird seine Arbeiten auf diesem Gebiet fortsetzen.

5. Literatur

- [1] Seifert, H.; Kramkowski, T.: *Wieviel Profil zeigen Rotorblätter von Windkraftanlagen?* DEWI Magazin Nr.2, Wilhelmshaven 1993.
 - [2] IEA-Empfehlung: *Recommended Practices for Wind Turbine Testing, 4. Acoustics. Measurement of Noise Emission from Wind Turbines.* IEA-Expert Group Study, 3. Edition, Stockholm 1994.
 - [3] Cornelius, V.: *Experimentelle Untersuchung der akustischen Eigenschaften verschiedener Rotorblattspitzen an einer Windkraftanlage mit horizontaler Achse.* TU Braunschweig / DEWI, 1992
 - [4] Montag, P.; Lieser, J.A.: *Berechnung von Profilpolaren für eine 32 kW-Windkraftanlage mit XFOIL zur Überprüfung laminarer Ablösung.* 129-94/22, DLR, Institut für Entwurfsaerodynamik, Braunschweig 1994
 - [5] Miley, S.J.: *A Catalog of Low Reynolds Number Airfoil Data for Wind Turbine Applications.* Texas A&M University, 1982, available from N.T.I.S
 - [6] Althaus, D.: *Windkanaluntersuchungen zum Einfluß von Rauigkeiten auf die Profilpolaren von vier Profilen.* Nicht veröffentlichter Bericht, Universität Stuttgart, 1988
 - [7] Lowson, M.V.: *Assessment and Prediction of Wind Turbine Noise.* ETSU W / 13 / 00284 / REP, 1993
 - [8] Paterson, R.W.; Vogt, P.G.; Fink, M.R.; Munch, C.L.: *Vortex Noise of Isolated Airfoils.* J. Aircraft, Vol.10, No.5, pp 296-302, 1973
 - [9] Schöttle, A.: *Einfluß der Rotorblattprofile auf den Energieertrag von Windkraftanlagen.* Universität Stuttgart / DEWI, 1993
-