

# Wieviel Profil zeigen Rotorblätter von Windkraftanlagen ?

Seifert, Henry; Kramkowski, Theo

## **Summary**

*The first stage of wind energy to electric energy conversion takes place on the surface of the rotor blades. The shape of the rotor blade's cross sections are of major importance at this point. Small changes in profile shape can strongly affect the blade's aerodynamic properties. Today's blade manufacturers originate from ship yards, agricultural companies, aircraft manufacturers and others. Due to their varied backgrounds, there is a wide scatter in the used materials, manufacturing methods and quality standards. Comparison of measured rotor blade profile coordinates with those of the catalogued values prove that there can be significant differences between the intended profile shapes and those actually used on wind turbines. It is shown that there is a need to investigate the rotor blade quality to improve the aerodynamic properties.*

*Two rotor blades built in the same moulds, but with different manufacturing techniques, showed upon close investigations two different resulting profile shapes. Calculating the aerodynamic coefficients of different shapes and comparing the resulting power curves showed possible additional energy yield of some three to seven per cent when paying more attention to blade quality.*

*The complete paper [1] in English language is available on request.*

## **Einleitung**

Der erste Schritt der Umwandlung von Windenergie in elektrische Energie bei einer Windkraftanlage findet am Rotorblatt statt. Die aerodynamische Formgebung der Querschnitte, die Rotorblattprofile, sind dabei von entscheidender Bedeutung für die Effektivität dieser Umsetzung. Kleine Änderungen der Profilform können die Aerodynamik und damit die Leistungsfähigkeit eines Rotorblattes stark beeinflussen. Die Rotorblatthersteller, die ihre Produkte auf dem europäischen Markt anbieten, haben ihren Ursprung in verschiedenen Branchen, wie zum Beispiel Schiff-, Landmaschinen- und Leichtflugzeugbau. Durch diese Herkunft begründet, finden sich auch unterschiedliche Materialien, von Holz über Glasfaser-Polyester- bis Kohlefaser-Epoxy-Verbundwerkstoffe, sowie verschiedene Bauweisen in den angebotenen Rotorblättern. Auch die mit dem Material und der Bauweise gekoppelte Fertigungsmethode und besonders die je nach Branche des Herstellers verschiedenen Qualitätsansprüche der Rotorblatthersteller beeinflussen die tatsächliche Formgebung der Profile, deren exakte Form aus Berechnungen und Windkanalversuchen vorgegeben ist.

Erste Untersuchungen des DEWI [1] am Beispiel zweier Rotorblätter, die in derselben Negativform bei verschiedenen Herstellern gebaut wurden, zeigten am fertigen Rotorblatt stark voneinander abweichende Profile. Solche Änderungen beeinflussen sowohl die Leistung der Windkraftanlage, als auch die aerodynamische Geräuschentwicklung. Für die tatsächlich gebauten Rotorblattprofile wurden die aerodynamischen Beiwerte berechnet und mit den Sollwerten verglichen. Mit den Ergebnissen einer Leistungsberechnung konnten dann für verschiedene Jahresmittel der Windgeschwindigkeit die Unterschiede im Jahresenergieertrag festgestellt werden. Die Untersuchung von zwei Anlagen zeigte bereits, daß durch Einhalten der geforderten Profilform zwischen drei und sieben Prozent mehr Jahresenergieertrag erreichbar gewesen wäre.

## **Profilverlust berechnet**

Rotorblätter für Windkraftanlagen gleichen im Aufbau den Flügeln von Segelflugzeugen und leichten Motorflugzeugen. Als Materialien finden vorwiegend Faserverbundwerkstoffe wie Glasfaser-Polyester, Glasfaser-Epoxy, Kohlefaser-Epoxy oder auch Holz-Epoxy Verwendung. Die enorme Leistungsfähigkeit moderner Segelflugzeuge resultiert vor allem aus den verwendeten Profilen und der exakten Einhaltung ihrer Form. Formabweichungen, Welligkeiten und Oberflächenrauigkeiten führen sehr schnell zu gravierender Leistungseinbuße und Änderungen der Flugeigenschaften. Gilt dies in gleichem Maße für die Profile von Windkraftanlagen? Welchen Einfluß haben Bauungenauigkeiten auf die Leistung einer Windturbine? Um diesen Fragen nachzugehen, wurden beim DEWI von verschiedenen Rotorblättern Profilschnitte abgeformt und deren Profilkordinaten mit den Sollwerten aus den Profilkatalogen verglichen. Als Beispiel zeigen die Profile A und B in Abb. 1 denselben Rotorblattschnitt

zweier Blätter, die von verschiedenen Herstellern in derselben Form gefertigt wurden, jeweils im Vergleich zu der Sollkontur, wie sie im NACA-Report [2] festgelegt ist.

*Abb. 1: Vergleich der gefertigten Rotorblattprofile A, B und C mit den Sollkoordinaten*  
*Fig. 1: Comparison of the manufactured rotor blade profiles A, B, and C with the intended airfoil*

Das Profil A paßt sehr gut zu der Vorgabe und zeigt, daß eine gute Übereinstimmung mit der geforderten Kontur erreichbar ist. Lediglich die Endkante ist etwas dicker ausgefallen, ein Zugeständnis an bessere Handhabung bei der Herstellung und Montage. Bemerkenswert bei Profil B ist neben einer generellen Aufdickung des gesamten Profils die stumpfe Form im Bereich der Nase und die extreme Aufdickung der Endkante. Diese Abweichungen rühren offensichtlich von einem mangelhaften Produktionsverfahren her. Ein zweites Beispiel, Profil C in Abb. 1 zeigt, daß die Wölbung des hergestellten Profils deutlich geringer ist. Ebenso wird bei diesem Profil die Druckverteilung im Nasen- und Endkantenbereich durch Welligkeit beziehungsweise Begradigung der Kontur ungünstig beeinflusst.

### **Profilverlust = Energieverlust**

Die Güte einer Windkraftanlage wird am erreichbaren Jahresenergieertrag an einem bestimmten Standort gemessen. Dieser Ertrag ergibt sich aus der Leistungskurve, deren Form wiederum stark von der Aerodynamik des Rotors abhängt. Um den Verlust an Jahresenergie durch veränderte Rotorblattprofile abzuschätzen, werden zunächst die aerodynamischen Beiwerte, für den Auftrieb  $c_l$  und für den Widerstand  $c_d$ , für die gemessene Profilform nach [3] berechnet (Abb. 2 und 3). Als zweiter Schritt wird dann die Leistungskurve des Rotors jeweils mit den Originalprofilen und den tatsächlich eingebauten Profilen berechnet. Da hier nur die relative Änderung der Rotor-aerodynamik von Interesse ist, die Einflüsse von Getriebe- und Generatorwirkungsgraden sowie der Regelungsbereich in erster Näherung gleich sind, wurde ausgehend von der vermessenen Leistungskurve die relative Änderung berücksichtigt. Diese beiden Leistungskurven, nämlich die der Windkraftanlage mit Rotorblättern guter und der mit schlechter Profiltreue, dienen als Basis für die nachfolgenden Berechnungen des Jahresenergieertrags. Abb. 4 zeigt den rechnerischen Einfluß der unterschiedlichen Profiltreue auf den Jahresenergieertrag anhand zweier Beispiele.

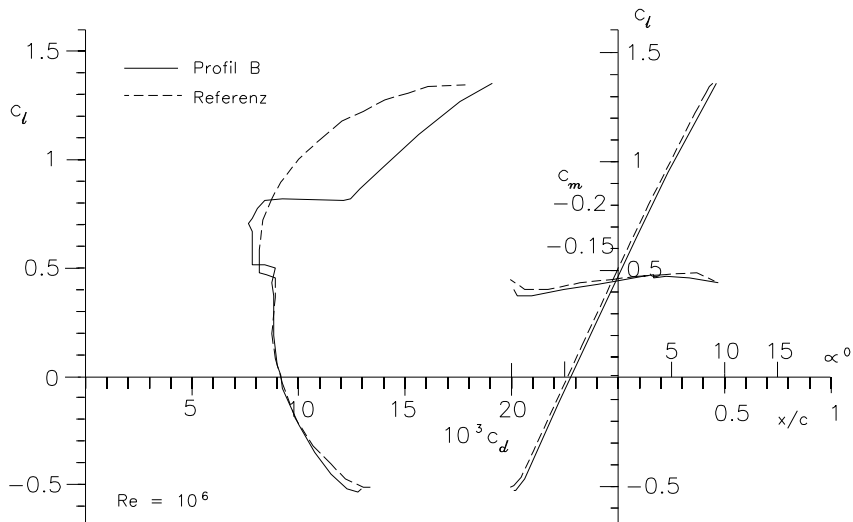


Abb. 2: Aerodynamische Kennwerte des gefertigten Profils B  
 Fig. 2: Aerodynamic properties of manufactured profile B

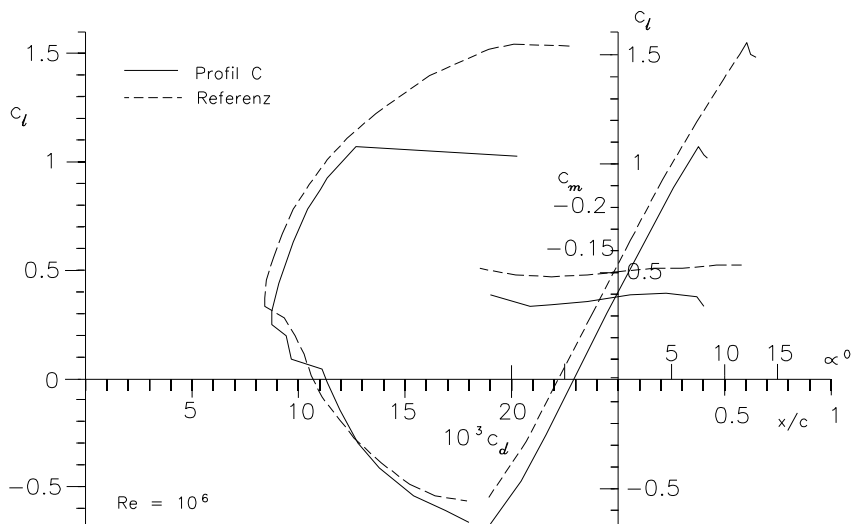


Abb. 3: Aerodynamische Kennwerte des gefertigten Profils C  
 Fig.: Aerodynamic properties of manufactured profile C

Die mögliche Verbesserung des Jahresenergieertrags in Abhängigkeit von der mittleren Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe ist dabei prozentual gegenüber der Anlage mit Rotorblättern höherer Baugenaugigkeit angegeben. Der Energieverlust kann so für beliebige Standorte leicht abgeschätzt werden.

### Profilverlust ist hörbar

*Windkraft wird störend oft empfunden, dieweil sie mit Geräusch verbunden.*

Die Aerodynamik von Rotorblättern ist mehr oder weniger stark hörbar. Das Bestreben der Hersteller ist, Windkraftanlagen so leise wie möglich zu gestalten. Geräuschuntersuchungen an Rotorblättern [4] zeigen, daß zum Beispiel dicke Endkanten, wie sie in Abb. 1 zu sehen sind, im höheren Frequenzbereich sehr viel mehr Geräusch erzeugen als dünne (Abb. 5). Ebenso führt ein hoher Profilwiderstand durch die größere Reibung zwischen umströmender Luft und Rotorblattoberfläche zum unerwünschten Anstieg des aerodynamischen Lärms. Dieser Widerstand kann zum Beispiel durch die stumpfe Form des Nasenbereiches oder durch Welligkeit der Oberfläche und Rauigkeit hervorgerufen werden.

Weitere Einflüsse einer geänderten Aerodynamik sind sicherlich nicht so leicht erfaßbar wie Energieverlust und erhöhtes aerodynamisches Geräusch. Der Berechnung der Rotorlasten liegen die aerody-

namischen Kennwerte aus Windkanaluntersuchungen zugrunde. Werden diese Kennwerte aber nicht erreicht oder werden sie gar überschritten, so ändern sich auch die Lasten. Einbußen an Lebensdauer können die Folge sein.

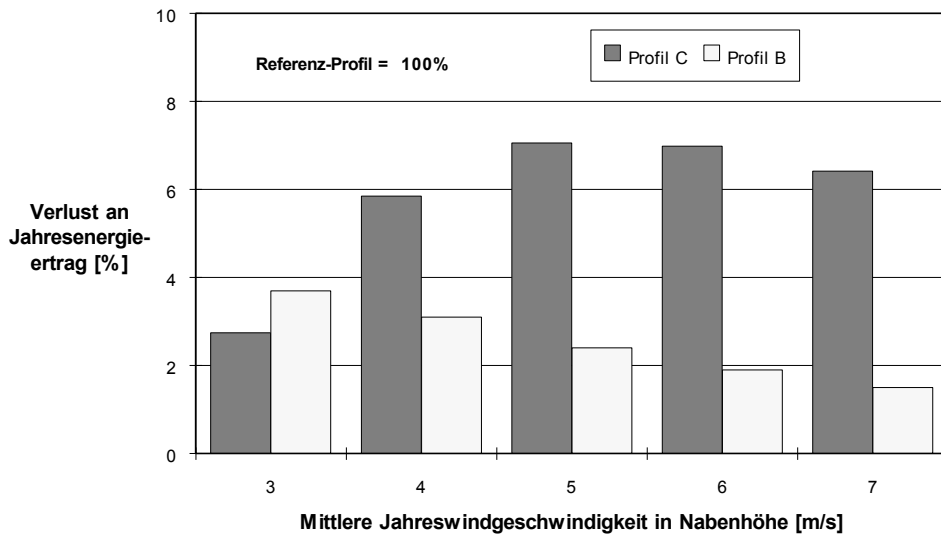


Abb. 4: Verlust im Jahresenergieertrag bei Verwendung der Profile B und C anstelle der Sollprofilform  
 Fig.: 4: Resulting loss of annual energy output (AEO) using rotor blade profiles B and C instead of original profiles

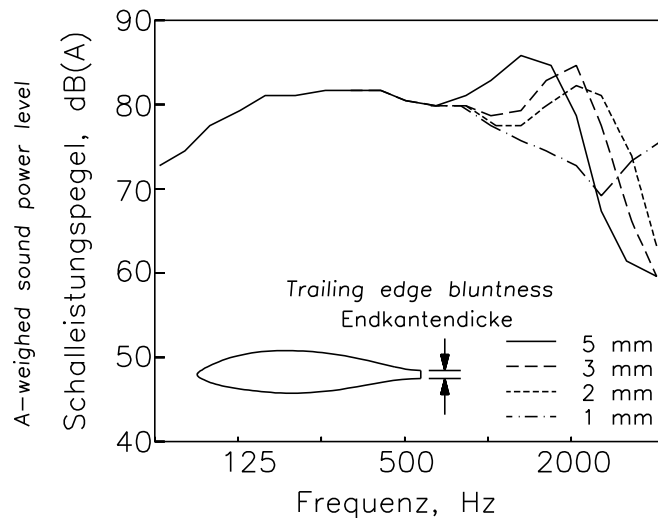


Abb. 5: Einfluß der Endkantendicke auf das Rotorblattgeräusch [4]  
 Fig. 5: Illustration of influence from trailing edge bluntness upon rotor noise [4]

### Zeigt mehr Profil !

Seit Beginn der Studie wurden etliche Rotorblätter untersucht, die meisten konnten allerdings nicht vermessen werden. Hier blieb zur Beurteilung nur die Erfahrung des Aerodynamikers, um Welligkeit, dicke Endkanten, Kanten am Erosionsschutz oder ähnliches zu entdecken. Der negative Einfluß auf die aerodynamischen Kennwerte kann nicht quantifiziert werden. Rotorblattprofile abweichend von den aerodynamischen Vorgaben zu fertigen, ist offensichtlich weit verbreitet und die beschriebenen Einzelfälle wohl nur die Spitze des Eisbergs.

Es müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um den Einfluß verschiedener Formabweichungen auf die Leistung einer Windkraftanlage genauer kennenzulernen. Besonders aber sollte der Einfluß ungenau hergestellter Profile auf die Erzeugung aerodynamischen Geräusches festgestellt werden. Dafür müssen Windkanaluntersuchungen durchgeführt werden, um den Einfluß verschiedener Parameter wie Endkantendicke, Strömungsablösung oder früher turbulenter Umschlag zu erfassen. Dies gilt insbesondere für den Bereich von hohen Auftriebsbeiwerten, der rechnerisch nicht exakt bestimmt werden kann. Dieser Bereich ist besonders wichtig für die sogenannten stall-geregelten Windkraftanlagen. Die aerodynamischen Kennwerte der Profile liegen sehr ausführlich vor, die Hersteller sind nicht mehr ausschließlich auf "trial and error" angewiesen. Das setzt aber voraus, daß auch die dazugehörigen Profilformen eingehalten werden, die sich in den Rechnungen und Windkanalmessungen als optimal erwiesen haben.

Weitere Untersuchungen sind also notwendig. Als Aufforderung an die Rotorblatthersteller soll an dieser Stelle stehen: Zeigt mehr Profil !

- Die Erstellung hochwertiger Negativformen zur Rotorblattherstellung kann nicht der bestimmende Kostenfaktor der Rotorblätter sein. Exakte Einhaltung der aerodynamischen Formgebung jedoch führt zu leistungsfähigen, leisen und damit konkurrenzfähigen Rotorblättern. Die exakte Formgebung kann einerseits durch genaue Fertigung des Urmodells, andererseits durch verstärkte Qualitätskontrolle in der Serienfertigung, beispielsweise durch eine Überprüfung des Blattes mit Schablonen, erreicht werden. Das Einhalten engerer Toleranzen bei der Herstellung der Negativformen und ein qualitätsüberwachtes Fertigungsverfahren führen auch zu geringerem Arbeitsaufwand bei der Endbehandlung (Finish) des einzelnen Blattes. Die Negativform und das Fertigungsverfahren zu optimieren, muß nur einmal je Rotorblattserie geleistet beziehungsweise bezahlt werden, vermeidbare abschließende Schleif- und Spachtelarbeiten sind aber an jedem einzelnen Rotorblatt notwendig.
- Die aerodynamischen Eigenschaften eines Rotorblattes hängen sehr von der Profiltreue ab. Daher müssen die Einhaltung der Koordinaten, wellenfreie Oberflächen und geringe Rauigkeiten gewährleistet sein. Dicke Endkanten sind zu vermeiden, denn sie sind im äußeren Bereich des Rotorblattes als Geräuschverursacher bestens bekannt.
- Ein qualitativ hochwertiges Rotorblatt, wenn auch geringfügig teurer, kann sich für einen Anlagenhersteller als lohnende Investition erweisen.

### **Schlußbemerkungen**

Bemühungen der Aerodynamiker, wenige Prozent Leistungs- beziehungsweise Ertragssteigerung durch konstruktive Maßnahmen am Rotorblatt zu erreichen, sollten nicht durch die Fertigung zunichte gemacht werden. Bei den in Zukunft zu erwartenden Stückzahlen kann eine hochwertige Fertigung und eine entsprechende Qualitätskontrolle das einzelne Rotorblatt nicht so verteuern, daß der zu erwartende Gewinn aufgeessen wird. Daß Rotorblätter mit guter Profiltreue hergestellt werden können, ist hier nachgewiesen. Das Rotorblatt ist nicht das teuerste Teil, aber eines der wichtigsten in der Energieumsetzung einer Windkraftanlage. Es verdient unsere Aufmerksamkeit.

### **Literatur**

- [1] T. Kramkowski; H. Seifert: Rotor Blades in Practice. Paper presented at the IEA-Symposium on Aerodynamics of Wind Turbines, 3./4. Dezember 1992, Stuttgart.
- [2] Ira H. Abbott; Albert E. von Doenhoff: Theory of Wing Sections. New York, N. Y.: Dover Publ., 1958.
- [3] Richard Eppler: Airfoil Program System: User's Guide. Universität (Stuttgart) / Institut A für Mechanik (Hrsg.). - Stuttgart: Univ., 1989.
- [4] J. Jacobsen: Noise from Wind Turbine Generators. Noise Control, Propagation, and Assessment. In: Proceedings Inter-Noise '90, Göteborg, 1990. - S 303-308.

