

## Simulation der Leistungskurven und Energieerträge von Windenergieanlagen auf der Basis gemessener Profilgeometrien.

Simulation of Power Curves and Energy Yields of Wind Turbines on Basis of Measured Profiles of Rotorblades

Kramkowski, Theo; DEWI

### Summary

*The following article presents results of a project called HIROQ which was partially supported by the European Commission and was carried out in cooperation with the rotor blade manufacturer A&R ROTEC (D), AERPACK (NL), LM-Aeroconstruct (D) and LM Glasfiber (DK) as well as the turbine manufacturer AN Windenergie (D) and Tacke Windenergie (D).*

*The profile shape tolerances as applied by the rotor blade and turbine manufacturers for a finished blade were investigated, discussed and harmonised. Due to the influence of the rotor design, e.g. tip speed ratio, power control and blade sections used, general tolerances applicable for all blades are limited. The participants of the project agreed on a minimum set of tolerances.*

*Blade section and mould coordinates at app. 0.71, 0.84 and 0.95 of the rotor radius were measured by DEWI at six blades and four types of serial produced 20m blades. The aerodynamic properties were simulated and compared to the reference blade section. For two blades the rotor power curve and energy output were calculated and compared to the reference blade. Possible ageing effects were investigated by measuring a one year old blade. The results show that today's aerodynamic blade quality is fair or even good. Nevertheless improvements are possible, especially in the leading edge region. Based on the limited number of blades investigated the typical energy loss due to blade section tolerances seems to be 1-2%. Recommendations for the rotor blade quality control have been derived from the discussion on rotor blade tolerances and the results of the blade sections measured.*

*Four 40m prototype blades of the NÄSUDDEN II and AEOLUS II wind turbines, that were built in the same mould, were measured by FFA. Blade sections and twist angles were directly measured at the turbine, using special equipment. Significant differences were found, compared to the intended airfoils, as well as between the four blades. Nevertheless the energy output is reduced by 1.5% only, the same result as above.*

*The influence of the blade manufacturing errors, including twist deviation and blade section shape errors, on the aerodynamic performance of a horizontal axis wind turbine has been simulated by CRES. The adopted numerical method is based on stochastic analysis and standard blade element theory. It is shown that the standard deviations of the rotor power and thrust coefficients are proportional to the standard deviations of the introduced error on the twist angle and the aerodynamic parameters employed. The latter are defined by parametrizing the characteristic lift and drag curves of the blade sections. The global effect on power production and blade loading can be obtained through the linear superposition of the individual effects, as long as the introduced errors are small.*

### 1. Einleitung

Im Rahmen des EU-geförderten Projektes HIROQ, in Zusammenarbeit mit den Rotorblatt-Herstellern A&R ROTEC, AERPAC (NL), LM-Aeroconstruct und LM Glasfiber (DK), sowie den WEA-Herstellern AN-Windenergie und TACKE Windenergie wurden die in diesem Artikel vorgestellten Ergebnisse erarbeitet. Der vollständige Bericht [2] ist beim DEWI erhältlich. Beim Entwurf des Rotorblattes einer Windenergieanlage (WEA) wird allgemein vorausgesetzt, daß die wirklich gefertigten Rotorblatt-Querschnitte (Profile) die zugrunde gelegten aerodynamischen Eigenschaften der idealen Profile einhalten. Diese Annahme ist nicht immer richtig. Eine Überprüfung findet erst mit der Messung der Leistungskurve statt, wobei aber der Einfluß des Rotors allein nicht mehr zu erkennen ist.

Um eine wirtschaftliche Rotorblatffertigung zu ermöglichen, dürfen bestimmte Toleranzen für die Profilgeometrie nicht unterschritten werden. Diese Untersuchung zeigt, in welcher Größenordnung solche Toleranzen tatsächlich auftreten und welche Auswirkungen sie auf die aerodynamischen Eigenschaften des Profils, die Leistungskurve und den Energieertrag einer WEA haben.

Diese Untersuchung von sechs 20 m Rotorblättern baut auf den gemessenen Koordinaten von je drei Profilen bei 0,71, 0,85 und 0,95 Rotorradius auf. Damit ist die äußere Hälfte der überstrichenen Rotorfläche, die in der Regel den größten Leistungsanteil erzeugt, ausreichend beschrieben. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt anonym und in normalisierter Form.

## 2. Vorgehensweise

Es wurden vier Rotorblatt-Typen von ca. 20m Länge untersucht, insgesamt sechs Rotorblätter von fünf Herstellern. Die Profile der Rotorblätter wurden bei 0,71, 0,85 und 0,95 Rotorradius abgeformt und die Koordinaten der abgeformten Schablonen mit einer Meßmaschine bestimmt.

Nach dem gleichen Verfahren und an den gleichen Radien wurden auch die Koordinaten der zugehörigen Negativformen ermittelt. Damit ist es möglich, die Ursachen der gefundenen Toleranzen der Negativform oder dem Fertigungsverfahren zuzuordnen. Ausgehend von diesen gemessenen Koordinaten erfolgte die Berechnung der aerodynamischen Eigenschaften mit dem EPPLER Programm und der Vergleich mit den Ergebnissen des gleichen Rechenprogramms für die idealen Koordinaten. Diese simulierten aerodynamischen Eigenschaften, auf der Basis gemessener und idealer Profilgeometrien, waren zusammen mit den jeweiligen Rotordaten Eingangsgrößen für die Berechnung der Rotorleistung mit dem Programm PROPCODE. Das Ergebnis dieser Simulation ist die Rotorleistungskurve.

Ausgehend von den berechneten Rotorleistungskurven für die gemessenen und die idealen Profilgeometrien erfolgte mit dem Programm ALWIN die Berechnung der Energieerträge für einen typischen Küsten- und Binnenland-Standort. Der Vergleich der Energieerträge des idealen und des realen, gemessenen Rotors erlaubt eine Bewertung der Toleranzen der gemessenen Profile.

## 3. Ein Beispiel

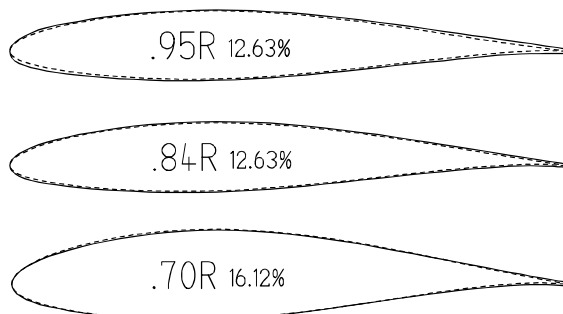


Abb. 1: Ideale (gestrichelt) und gemessene Profile eines Rotorblattes

Fig. 1: Ideal (broken line) and measured profile of a rotorblade

Abb. 1 zeigt die gemessenen Profile eines Rotorblattes

im Vergleich mit den idealen Referenzprofilen. Die Sehnenlängen (Blattbreiten) sind normiert und erscheinen daher in gleicher Größe, was aus aerodynamischer Sicht sinnvoll ist. In Wirklichkeit beträgt hier die Sehnenlänge  $C$  bei 0,95 Rotorradius  $R$  nur 0,55 der Sehnenlänge bei 0,71R.

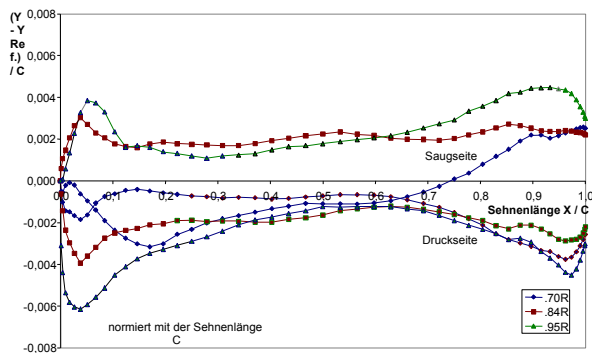


Abb. 2: Differenzen der gemessenen und idealen Profile eines Rotorblattes

Fig. 2: Differences of measured and ideal profiles of a rotor blade

In der Fertigung ist es natürlich wesentlich schwieriger bei kleinerer Sehnenlänge gleiche relative Toleranzen zu erreichen, und nur diese sind für die Aerodynamik von Bedeutung. Es ist daher leicht verständlich, warum die größten relativen Toleranzen an den äußeren Radien auftreten.

Auffällig an den sehr dünnen äußeren Profilen sind besonders die Abweichungen im Bereich der Profilnase am Profil 0,95 R. Der Krümmungsradius der Profilnase ist hier am gemessenen Profil deutlich größer, was zu merklichen Änderungen der Aerodynamik führen wird. Die deutlich dickere Endkante dieses Profils ist auf eine unrealistische Endkantendicke des Referenzprofils zurückzuführen. Doch ist die ausgeführte Endkantendicke mit  $0,007 C$  deutlich größer als die fertigungstechnisch minimal mögliche Dicke von etwa  $0,005 C$ . Dieses Potential sollte für eine geringere Schallemission genutzt werden.

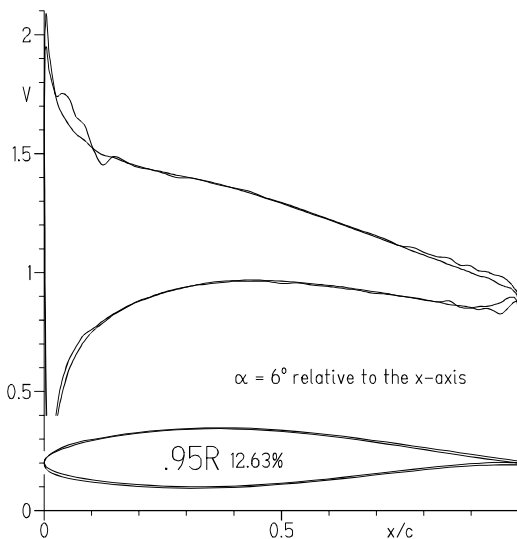


Abb. 3: Geschwindigkeitsverteilungen des gemessenen und idealen Profils

Fig. 3: Wind speed distribution of a measured and ideal profile

In Abb. 2 sind die Differenzen der gemessenen Y-Koordinaten zu denen der Referenz, bezogen auf die Sehnenlänge  $C$ , über der dimensionslosen Sehnenlänge  $X/C$  aufgetragen. Der bereits in Abb. 4 erkennbare Anstieg der relativen Toleranzen mit abnehmender Sehnenlänge wird hier besonders deutlich. Das Profil 0,95 R, dessen Ergebnisse hier besprochen werden, zeigt ein auffälliges Maximum der Toleranzen bei ca.  $0,05 C$  an Saug- und Druckseite. Die Ursache ist eine nach dem Entformen aufgebrauchte Verstärkung der Klebefuge an der Profilnase, die an ihren Enden bei  $0,05 C$  nicht ausreichend beigeschliffen wurde. Diese strukturell sicher sinnvolle Maßnahme ist hier leider aerodynamisch sehr ungünstig ausgeführt.

Im Bereich der Endkante steigen die Toleranzen aufgrund der unrealistischen Vorgaben der Referenz an.

Weiter ist eine Nachbearbeitung der Endkante auf Saug- und Druckseite für  $X/C > 0,97$  zu erkennen, um eine dünnere Endkante zu erreichen. Solche Nachbearbeitung sollte aber besonders an der Druckseite nur mit Vorsicht geschehen, da hiermit leicht Strömungsablösungen verursacht werden, die auch hörbar sein können.

In Abb. 3 ist die Geschwindigkeits-Verteilung für das gemessene und das Referenz-Profil bei einem Anstellwinkel von  $6^\circ$  dargestellt. Die Verteilung des gemessenen Profils erkennt man an ihrem unruhigen Verlauf. Man erkennt eine geringere örtliche Geschwindigkeit an der Profilnase aufgrund des größeren Nasenradius und eine deutliche Abweichung im Bereich  $0,1 C$  verursacht durch die Nasenverstärkung. Auch die dickere Endkante ist gut zu erkennen.

Das wichtigste Ergebnis der simulierten aerodynamischen Eigenschaften in Abb. 4 ist der 12% höhere Maximalauftrieb  $c_{a \max}$  des gemessenen Profils, verursacht durch den größeren Nasenradius, siehe [1]. Ein solcher Anstieg des Maximalauftriebs wird an einem durch Strömungsablösung in seiner Leistung

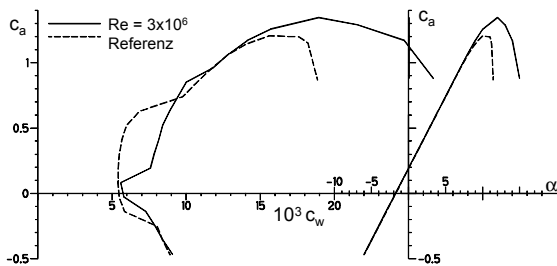


Abb. 4: Aerodynamische Beiwerte des gemessenen und idealen Profils

Fig 4: Aerodynamic coefficient of measured and ideal profile

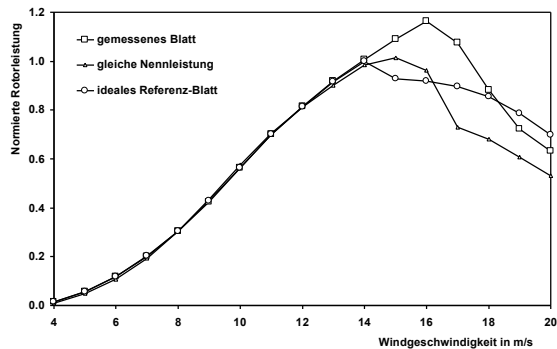


Abb. 5: Leistungskurven des gemessenen und idealen Rotors

Fig. 5: Power curve of a measured and an ideal profile

begrenzten Rotor, einem sogenannten Stall-Rotor, einen nicht akzeptablen Anstieg der Maximalleistung hervorrufen, sofern dies nicht durch andere Teile des Rotorblattes ausgeglichen wird. Der Bereich günstiger Widerstände in der Profilpolare, hier für  $-0,2 < c_a < 0,7$ , die sogenannte Laminardelle, existiert praktisch nicht mehr. Damit ist der wesentliche Vorteil dieses dünnen Profils dahin, der Widerstand steigt dort um etwa 40% an. Die Ursache liegt in dem frühen Umschlag der Saugseiten-Grenzschicht bei  $c_a = 0,2$ . Der Umschlagpunkt der laminaren Saugseitengrenzschicht springt dabei von  $0,5 C$  auf  $0,1 C$ , ausgehend von der größten Koordinatendifferenz im Nasenbereich, die den auslösenden Geschwindigkeitsabfall bzw. Druckanstieg verursacht. Der Auftriebsanstieg über dem Anstellwinkel ist trotz der starken Abweichungen in der Geschwindigkeitsverteilung im linearen Teil identisch mit der Referenz, ein erstaunliches Ergebnis bei so großen Toleranzen.

In Abb. 5 sind die Auswirkungen der drei gemessenen Profile auf die Leistungskurve im Vergleich zum Referenzblatt dargestellt. Wie erwartet, führt der höhere Maximalauftrieb zu einem erheblichen Anstieg der Maximalleistung dieses stallbegrenzten Rotors um 18%. Bei Windgeschwindigkeiten von 16 m/s wird dies zum Stop der WEA wegen Überlastung des Generators führen. Sicher kann man durch eine Änderung des Einstellwinkels der Blätter um  $-1,25^\circ$  die gewünschte Maximalleistung einstellen, doch führt dies zu einer Verschlechterung der Leistungskurve im oft genutzten Bereich kleiner Windgeschwindigkeiten. Für den angenommenen Küstenstandort ( $A = 7,8$ ,  $k = 2,6$ ) führt dies zu Einbußen von 1,2% im Energieertrag, bzw. zu 3% für den zu Grunde gelegten Binnenland-Standort ( $A = 6,1$ ,  $k = 2,1$ ). Besonders für den Binnenland-Standort können die Verluste bei Windgeschwindigkeiten unter 8 m/s nicht durch die bessere Leistungskurve um 10 m/s ausgeglichen werden.

Es muß betont werden, daß das hier gezeigte Beispiel nicht typisch für den derzeitigen Stand der Rotorblattqualität ist. Für den hier untersuchten stallbegrenzten Rotor ist es entscheidend, den angenommenen Maximalauftrieb der Profile möglichst genau zu erreichen. Durch die Nacharbeiten im kritischen Nasenbereich der dünnen Profile, über die gesamten äußeren 30% des Rotorradius, ist diese Bedingung nur schwer einzuhalten. Entweder muß mehr Sorgfalt auf diese formgebenden Arbeiten verwandt werden, oder die Nacharbeiten außerhalb der Negativform müssen ganz vermieden werden.

#### 4. Ergebnisse

Die Fertigungstoleranzen von Rotorblattprofilen verursachen heute Einbußen im Energieertrag im Bereich von 1-2 %. Eine Begrenzung dieser Verluste auf 1 % erscheint auch bei wirtschaftlicher Fertigung möglich und wird von einzelnen Herstellern bereits heute annähernd erreicht.

Rotoren, deren Leistung durch Strömungsablösung (Stall) begrenzt wird, verlangen engere Toleranzen der Rotorblattprofile. Der Bereich von der Profilnase bis ca. 20 % der Saugseite erwies sich bei den untersuchten Rotorblättern als besonders empfindlich. Dicke Profile (> 15 %) zeigten sich weniger empfindlich auf Formabweichungen der Profilnase.

#### 5. Empfehlungen und Ausblick

Untersuchungen dieser Art sind durch das zur Zeit verwendete Meßverfahren noch relativ aufwendig. Schnellere optische Meßverfahren sind verfügbar. Es scheint trotzdem lohnend das beschriebene Verfahren schon zur Beurteilung der Toleranzen der Negativform und der ersten produzierten Blätter einzusetzen.

Für neu zu entwickelnde Profile sollten die erforderlichen Toleranzen bereits vom Entwurfs-Aerodynamiker verlangt werden.

Sollte es möglich sein, die absoluten Toleranzen bei noch größeren Rotorblättern konstant zu halten, so ergeben sich engere relative Toleranzen, und nur diese sind für die Aerodynamik wirksam.

#### 6. Zusammenfassung

Eine allgemein übliche Annahme der Rotorblattauslegung ist, daß die tatsächlich gefertigten Profile die zugrunde gelegten aerodynamischen Eigenschaften der idealen Profile einhalten. Um eine wirtschaftliche Rotorblattfertigung zu ermöglichen, dürfen gewisse Toleranzen aber nicht unterschritten werden. Die vorliegende Untersuchung zeigt, in welcher Größenordnung diese Toleranzen tatsächlich auftreten, und vor allem, welche Auswirkungen sie auf die Profileigenschaften, die Leistungskurve und den Energieertrag haben.

Die Unterschiede im Energieertrag zwischen den gemessenen und den aerodynamisch idealen, aber unwirtschaftlichen Rotoren liegen bei 1-2%. Einige Kriterien für die Profilauswahl und die Endkontrolle eines Rotorblattes werden vorgestellt.

#### 7. Literatur

- [1] Schlichting, Truckenbrodt, *Aerodynamik des Flugzeuges*, Springer Verlag, 1967.
- [2] Kramkowski, Foussekis, Ronsten, *Harmonisation and Improvement of Rotor Blade Quality Control*, Final Report, JOR3-CT95-0082, Wilhelmshaven, 1998.