

# Strömungsmechanische Besonderheit kleiner Windkraftanlagen

## Aerodynamic Features of Small Wind Turbines

E. Hafner, Ingenieurbüro Prof. Dr. Hafner (www.buerohafner.de)

### Kurzfassung

Die relativ guten Leistungsbeiwerte für große Windkraftanlagen sind bei Kleinwindkraftanlagen aus strömungsmechanischen Gründen nur sehr schwer zu erreichen. Dennoch kann auch bei kleinen Windkraftanlagen der Profilwirkungsgrad durch optimierte Flügelform und individuelle Gestaltung günstig beeinflusst werden. So werden Reynoldszahl und Gleitzahl der Windkraftanlage zu einem wichtigen Qualitätskriterium und bilden einen Maßstab für die Leistungsfähigkeit der Energiewandlung.

### Abstract

*Due to aerodynamic reasons the high power coefficients of big wind turbines can hardly be achieved by small wind turbines. Nevertheless even the power coefficient of small wind turbines can be optimised by applying a sophisticated blade design. So the Reynolds number and the lift-drag ratio are growing into particular features and become considerable bench-marks for the efficiency of small units.*

### Einführung

Der Bedarf an kleinen Windkraftanlagen besteht weltweit. Diese Anlagen sind leicht zu transportieren und zu errichten, anpassungsfähig und zuverlässig. Ideal für netzferne Standorte eignen sie sich als autarke Einheiten zur Stromversorgung oder im Netzparallelbetrieb, als Einzelanlage oder im Verbund mit Energieträgern. In den Industrieländern versorgen mobile Systeme Yachten, Berghütten und Meßstationen. Sie können in Krisenfällen die Notversorgung übernehmen, in Wohnhäusern und Gewerbebetriebe zur Energiekostensenkung beitragen und als imageförderndes Corporate Design für innovative Unternehmen dienen.

Eine besondere Bedeutung haben Kleinwindkraftanlagen für die Entwicklungsländer. Nach Zahlen der Weltbank leben rund 2 Milliarden Menschen, d.h. ein Drittel der Weltbevölkerung, ohne Strom. Viele dieser Menschen leben in Gegenden, in denen eine Anbindung an Überlandstromnetzen wirtschaftlich nicht realisierbar ist. Kleinwindkraftanlagen könnten ein wirkungsvolles Instrument sein, um diesen Menschen eine bessere Zukunft zu ermöglichen.

Obwohl es inzwischen ein beachtenswertes Angebot an Kleinwindkraftanlagen gibt, ist die Marktdurchdringung noch unbefriedigend (Lehmann/Koenemann SW&W 5/2005). Neben zahlreichen Markthemmnissen sind aber auch gestalterische und konstruktive Aspekte, z.B. Gewicht der Anlage, Geräuschentwicklung, Betriebssicherheit, Effizienz, Design und visuelle Akzeptanz, Fertigungsqualität und Steuerungselektronik zu verbessern.

In strömungstechnischer Hinsicht haben die Entwickler von Kleinwindkraftanlagen mit etwas ungünstigeren physikalischen Bedingungen zu kämpfen, wenn sie kleine hocheffiziente und leicht zu transportierende Systeme bauen wollen. Die effiziente Wandlung der Windenergie in mechanische Energie ist für kleine Windkraftanlagen bis ca. 10kW

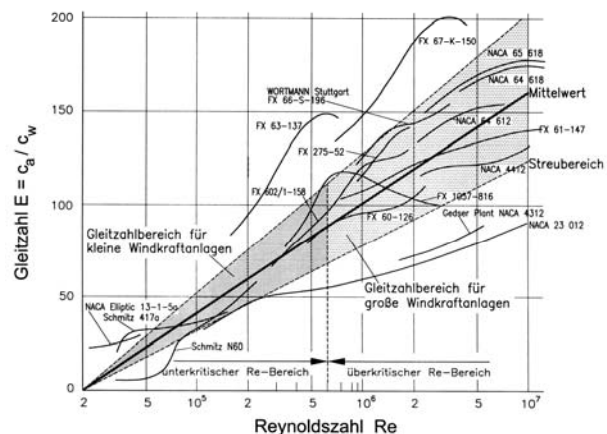


Abb. 1: Profilvergleiche in Abhängigkeit von der Reynoldszahl, vereinfachte Darstellung (Profildaten s. Molly)

Fig. 1: Simplified graph to plot the lift-drag ratio versus Reynolds-number (Airfoil data see MOLLY)

Leistung erheblich schwieriger zu lösen, als bei den Großanlagen. Bei kleinen Systemen ergibt sich aus dem Zusammenwirken von Luftströmung und Auftriebskraft am Rotorblatt grundsätzlich ein Nachteil.

### Reynoldszahl $Re$

Unter Voraussetzung reibungsbehafteter Strömung bildet jedes Rotorblatt ein Hindernis. Man unterscheidet dabei, abhängig von der dimensionslosen Reynoldszahl  $Re$  zwischen laminarer und turbulenter Strömung. Unterhalb einer bestimmten "kritischen" Reynoldszahl herrscht der laminare, zweidimensionale Strömungszustand. Man spricht hier von dem unterkritischen Reynoldsbereich (*Hafner SW&W 10/ 2002*). Wird die kritische Reynoldszahl überschritten, stellt sich ein anderes Strömungsbild ein. In diesem überkritischen Reynoldsbereich ist das Strömungsverhalten immer instationär, dreidimensional und rotationsbehaftet. Man bezeichnet eine solche Strömung als turbulent. Die Reynoldszahl ist definiert als

$$Re = l \cdot u / \nu$$

und beschreibt das Verhältnis der charakteristischen Körperlänge  $l$  in m zur viskosen Länge  $\nu/u$ , wobei mit

- $l$  = charakteristische Länge (z.B. Profiltiefe an der Blattspitze)
- $u$  = Umfangsgeschwindigkeit der Blattspitze in m/s
- $\nu$  = die kinematische Viskosität des Mediums (z.B. Luft bei NN =  $1,5 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s).

Fazit:

Bei den großen Windkraftanlagen liegen die Reynoldszahlen an der Blattspitze im überkritischen Re-Bereich von  $0,6$  bis  $8 \cdot 10^6$ , je nach Größe des Rotors und hat einen geringen Strömungswiderstand. Bei den sog. kleinen Windkraftanlagen befindet sich die Blattspitze des Rotors noch im unterkritischen Re-Bereich der Reynoldszahlen  $< 0,6 \cdot 10^6$  und hat damit einem hohen Strömungswiderstand.

### Gleitzahl $E$

Bei der aerodynamischen Gestaltung wirken an dem Tragflügelprofil des Rotorblattes in Richtung der Anströmung eine Widerstandskraft  $W$  und eine Komponente senkrecht zur Anströmung, die Auftriebskraft  $A$ . Das Zusammenwirken von Auftrieb zu Widerstand wird durch die Gleitzahl  $E$  beschrieben und ist definiert als Quotient der Beiwerte für den Auftrieb  $c_a$  und dem Widerstand  $c_w$ . Die dimensionslosen Beiwerte für Auftrieb  $c_a$  und Widerstand  $c_w$  leiten sich aus der Umströmung am Rotorblattprofil und dessen Anstellwinkel  $\alpha$  zur Strömung ab. Ferner ist für den Widerstandsbeiwert  $c_w$  die Abhängigkeit von der Reynoldszahl  $Re$  zu berücksichtigen.

Im *unterkritischen* Re-Bereich, d.h. für Re-Zahlen  $< 0,6 \cdot 10^6$  ergeben sich bei guter Aerodynamik des Rotorblattes Gleitzahlen  $E$  zwischen 30 und 80.

Im überkritischen Reynoldsbereich, d.h. für Re-Zahlen  $> 0,6 \cdot 10^6$  sinkt der Widerstandsbeiwert  $c_w$ . Damit verbessert sich die Gleitzahl  $E$  deutlich, die Werte liegen in diesem Re-Bereich zwischen 80 und 170 und können Werte bis 200 erreichen.

### Zusammenhang zwischen Gleitzahl $E$ und Leistungsbeiwert $c_p$

Der Leistungsbeiwert  $c_p$  kennzeichnet das Verhältnis der entziehbaren mechanischen Leistung zu der im Luftstrom enthal-

tenen Leistung  $v_2/v_1$ . Bei idealer Strömung und verlustloser Umwandlung ist der  $c_p$ -Wert auf 0,593 begrenzt. Dieser von BETZ erstmals abgeleitete, theoretisch höchste Leistungsbeiwert zeigt, daß nur knapp 60 % der Windenergie maximal in mechanische Arbeit umgewandelt werden kann.

Das Verhältnis von Auftrieb zu Widerstand am Tragflügelprofil verändert sich bei kleinen Windkraftanlagen nachteilig, da die physikalischen Strömungsbedingungen am Rotorblatt dem unterkritischen Re-Bereich entsprechen. Bei annähernd gleichem Auftrieb  $A$  ergibt sich ein vergrößerter Strömungswiderstand  $W$ . Der Widerstandsbeiwert  $c_w$  verdoppelt sich.

Steigt also der Profilwiderstand  $c_w$  am Rotorblatt, sinkt die Gleitzahl  $E$  und damit auch zwangsläufig der Leistungsbeiwert  $c_p$  (Abb. 2). Folglich werden die besseren Gleitzahlen  $E$  im überkritischen Re-Bereich erreicht.

**Fazit**

Die relativ guten Leistungsbeiwerte für große Windkraftanlagen sind bei Kleinwindkraftanlagen aus strömungsmechanischen Gründen nur sehr schwer zu erreichen. Dennoch kann auch bei kleinen Windkraftanlagen der Profilwirkungsgrad durch optimierte Flügelumrißform und individueller Gestaltung günstig beeinflusst werden. So werden Reynoldszahl und Gleitzahl der Windkraftanlage zu einem wichtigen Qualitätskriterium und bilden einen Maßstab für die Leistungsfähigkeit der Energiewandlung.

**Beispiel für eine effiziente Kleinwindkraftanlage**

Zur Dokumentation des Standes der Technik wurden die kennzeichnenden Parameter von 40 Kleinwindkraftanlagen in einem Leistungsbereich von 50 W bis 5000 W ausgewertet. Die Daten basieren auf Angaben der Hersteller und der einschlägigen Fachliteratur.

Bei allen Anlagen handelt es sich um Dreiflügler mit horizontaler Achse, gebaut als Luvläufer mit Windfahne. Betrachtet wurde der Leistungsbeiwert  $c_p$  der Anlagen, der ein Maß für den Wirkungsgrad bei der Wandlung von Windenergie in mechanische bzw. elektrische Energie darstellt. Die Beiwerte wurden normiert und einheitlich auf Meeresspiegelhöhe, Normalluftdruck und 10 °C Lufttemperatur bezogen. Die  $c_p$ -Leistungsbeiwerte der betrachteten Anlagen zeigen eine große Schwankungsbreite, die zwischen 6 % bis 31,6 % liegt, bei einem Mittelwert von 18,1 % (Abb. 2).

Aus der Abb. 2 wird aber auch deutlich, daß eine wesentliche Steigerung der Effizienz bei kleinen Windkraftanlagen erreicht werden kann. Das gelungene Beispiel der innovativen Windkraftanlage H180 zeigt, daß mit gutem Design und hochwertigen Rotorblättern größere Leistungsbeiwerte  $c_{p(e)}$  erzielbar sind. Dieser im Windkanal nachgewiesene Leistungsbeiwert ist deutlich größer, als bei allen vergleichbaren Kleinwindkraftanlagen.

Die Kleinwindkraftanlage H180 (Abb. 3) erfüllt die wichtigsten Voraussetzungen für eine hochwertige Anlage. Es sind u. a. das innovative gestalterische Konzept der Gesamtanlage, die spezielle strömungsmechanische Auslegung der Rotorblätter, das naturnahe Design, der speziell entwickelte hochpolige PM Generator, das geringes Transport- und Montagegewicht und die präzise Fertigung der Bauteile.

**Schrifttum**

- HAFNER, E.: Kleine Windkraftanlagen haben Zukunft, Sonne, Wind & Wärme, Heft 10/2002, S. 72-76
- LEHMANN, K.-P.; KOENEMANN, D.: Die Chancen der Kleinen, Sonne, Wind & Wärme, Heft 5, 2005 S. 70-72.
- MOLLY, J.: Windenergie, 2. Auflage 1990, Verlag C.F. Müller Karlsruhe

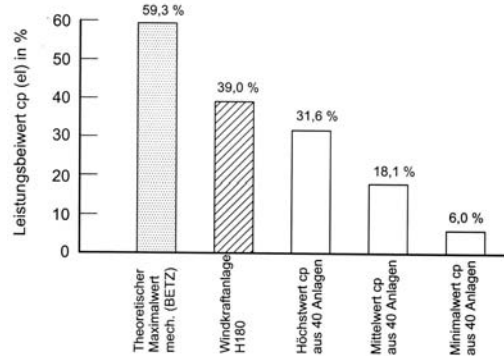


Abb. 2: Leistungsbeiwerte  $c_p$  (el) von 40 kleinen Windkraftanlagen im Vergleich zum Beiwert  $c_p$  der innovativen Windkraftanlage H180. Das theoretische Maximum nach BETZ kennzeichnet die Wandlung von Windenergie in mechanische Energie.

Fig. 2: Power coefficients  $c_p$  (el) of 40 small wind turbines compared with the power coefficient of the presented innovative wind turbine H180. In addition the theoretical BETZ's coefficient indicates the maximum possible proportion converting wind energy into mechanical energy.



Abb. 3: Windkraftanlage H180, Leeläufer mit automatischer Windnachführung, 1,0 kW Nennleistung, Durchmesser 1,80 m mit aerodynamisch optimierten Rotorblättern (Patent angemeldet)

Fig. 3: The wind turbine H180 with a diameter of 1.80 m and 1.0 kW rated power has aerodynamically optimised blades. Without a wind vane the downwind rotor follows the wind direction automatically (Patent pending)