

## **Der Schlitzflügel: Konstruktionsprinzipien und Dimensionen**

Für den Konstrukteur von Kleinwindrädern ist es schwer, geeignete Flügel für den Rotor selbst herzustellen. Profilierte Flügel müssen zunächst für die vorherrschende Windgeschwindigkeit berechnet, die Schablonen hergestellt und wenn die Flügel aus Holz gefertigt werden, geschnitten, gehobelt, geglättet und lackiert werden. Diese Tätigkeit stellt an den Laien sehr hohe Ansprüche in theoretischer und praktischer Hinsicht. Meistens werden gekaufte profilierte Flügel verwendet, die ihren Preis haben und nicht unbedingt besser als ein Schlitzflügel sein müssen.

Wir wollen hier zeigen, wie mit einfachen Mitteln und wenigen Werkzeugen ein sehr brauchbarer Schlitzflügel hergestellt werden kann, der sich besonders durch folgende Vorteile auszeichnet:

- einfache Bauweise mit einfachen Werkzeugen und zeitsparende Herstellung
- hohe mechanische Stabilität
- geringes Gewicht und Materialersparnis
- sehr gutes Anlaufverhalten auch unter Last
- eine um 30% höhere Leistung als bei einem ungeschlitzten Flügelblatt
- Leistungsbeiwerte um 0,5 bei einer Schnelllaufzahl von 4,5 bei einem dreiflügligen Schlitzrotor

Der Flügel wurde am 17.4.1991 vom Europäischen Patentamt unter der Nummer EP0295 353B1 von Herrn Achmed Adolf Wolfgang Khammas patentiert. Erfinder des Schlitzflügels ist Herr Tahsin Al- Majed.

Untersuchungen der Physik- AG 1995/96 des Fachbereiches Naturwissenschaften an der Knobelsdorff- Schule unter dem Fachbereichsleiter Siegmund Ewert ergaben nähere Hinweise über die Eigenschaften von Schlitzflügeln und seine optimalen Konstruktionsprinzipien, die hier zum ersten Mal publiziert werden sollen.

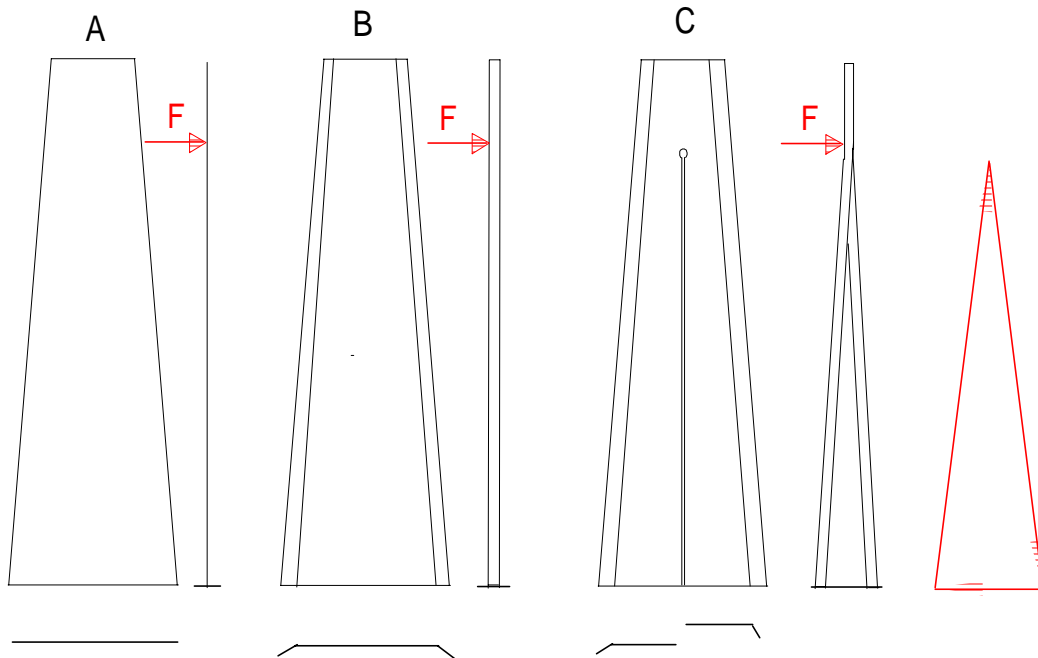
Inzwischen (9/2008) hat mir Herr Khammas erklärt, dass er das Patent und die Idee als „open source“ freigegeben hat. Das bedeutet, dass jeder Interessierte einen Schlitzflügel privat oder geschäftlich bauen und nutzen kann. Allerdings gebietet es die Fairness, bei Veröffentlichungen den Namen des Erfinders zu nennen.

Wir haben inzwischen an der Knobelsdorff- Schule Berlin am Fachbereich Naturwissenschaften verschiedene Windrotoren mit Schlitzflügel gebaut und im Einsatz praktisch erprobt und denken, dass die Zukunft dieses einfachen Flügeltyps noch bevorsteht.

### 1. Was ist ein Schlitzflügel?

Ein Schlitzflügel besteht aus Metallblech (A). Allerdings hat dieser Flügel keinerlei statische Stabilität. Eine gewisse Stabilität des Flügels erreicht man durch Abkantungen an den Längsseiten (B) des Bleches. Um den Flügel noch stabiler zugestalten, schlitzt man ihn fast bis zum Ende auf und spreizt die zwei Flügelhälften auseinander, bis ein stabiles Kraftdreieck entsteht (C).

Das Wunder dieser Flügelform ist nicht nur die statische Stabilität durch Kantung und Kraftdreieck des Schlitzes, vielmehr sind es die optimalen aerodynamischen Eigenschaften des Flügels, die dieser Schlitz glücklicherweise begünstigt. Warum das so ist, werden wir später kennen lernen.



Flache  
Blechplatte  
ohne  
Stabilität.  
Das Blech  
biegt sich  
durch.

Stabilitätserhöhung  
durch beidseitige  
Abkantung der  
längsseitigen  
Flügelkanten

Größte Stabilität durch  
geschlossenes  
Kraftdreieck. Das  
Dreieck hat die größte  
Stabilität

## 2. Konstruktionsdimensionen



Der Schlitzflügel kann seine guten Eigenschaften wie gute Anlaufeigenschaften, material- und zeitsparende Herstellung und hohe Leistung nur erreichen, wenn bestimmte Konstruktionsprinzipien beim Flügel eingehalten werden

Die vielen Untersuchungen am Windkanal der Knobelsdorff- Schule ergaben folgenden Zusammenhang für einen optimalen Zuschnitt des Flügelbleches zwischen der Flügellänge, Schlitzlänge, Flügelwurzelbreite und Verjüngung der Flügel:

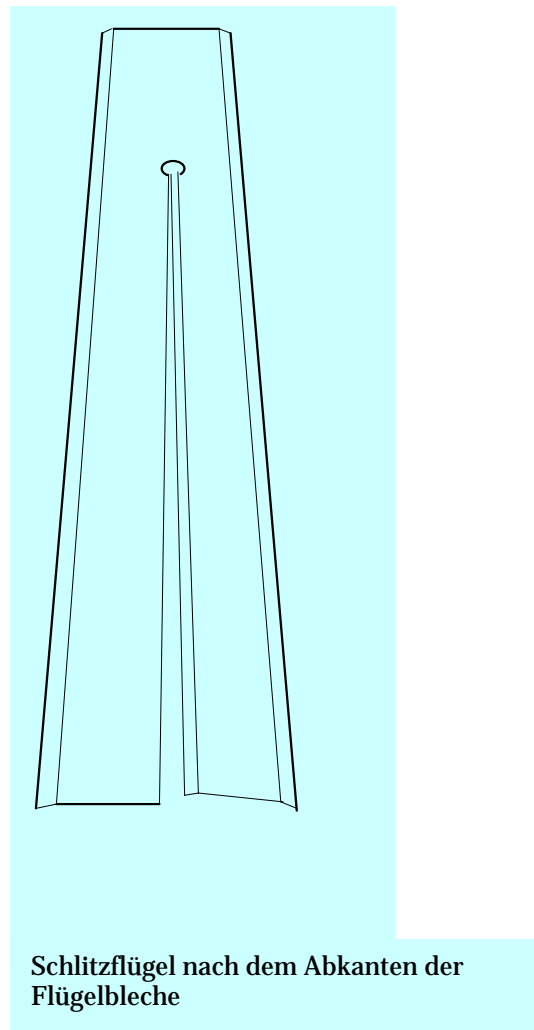
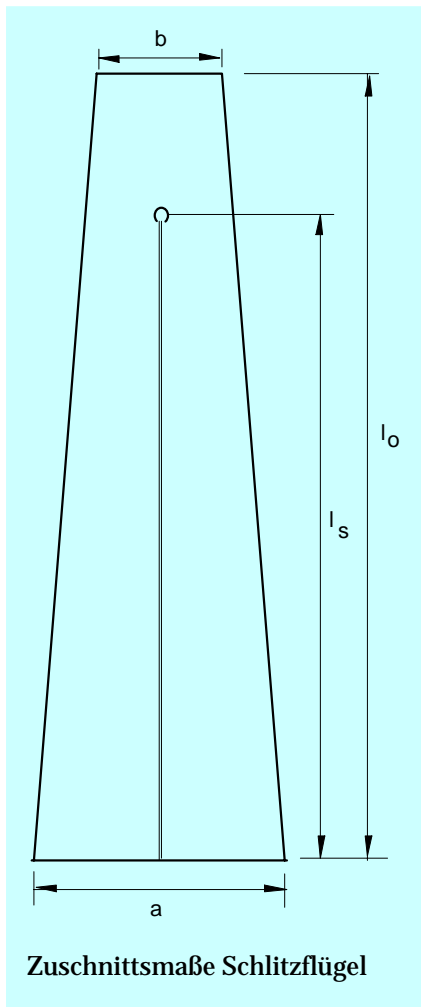
Senkrechte Flügellänge  $l_o$

Flügelwurzelbreite:  $a = 0,32 \cdot l_o$

Flügelbreite an der Spitze:  $b = 0,44a$

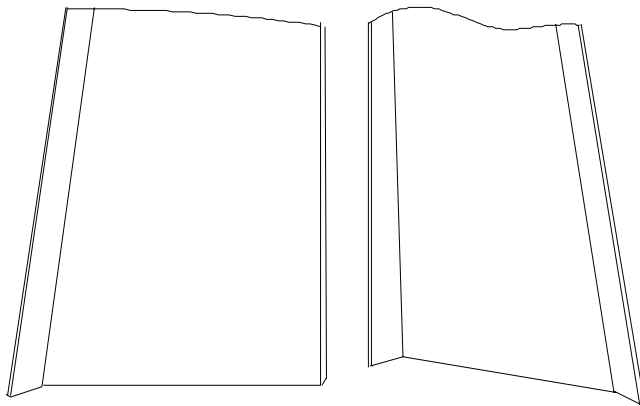
Schlitzlänge:  $l_s = 0,8 \cdot l_o$

Schlitzbreite:  $AW = 0,048 l_o$ .



Beim Bau eines erfolgreichen Schlitzflügels müssen bestimmte Kriterien eingehalten werden.

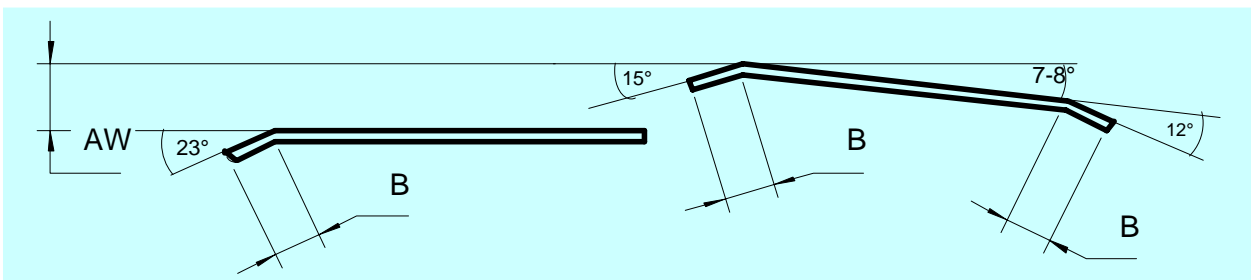
Folgende Zeichnungen zeigen die Winkel, mit denen die Flügelkanten an der Abkantbank gebogen werden müssen.



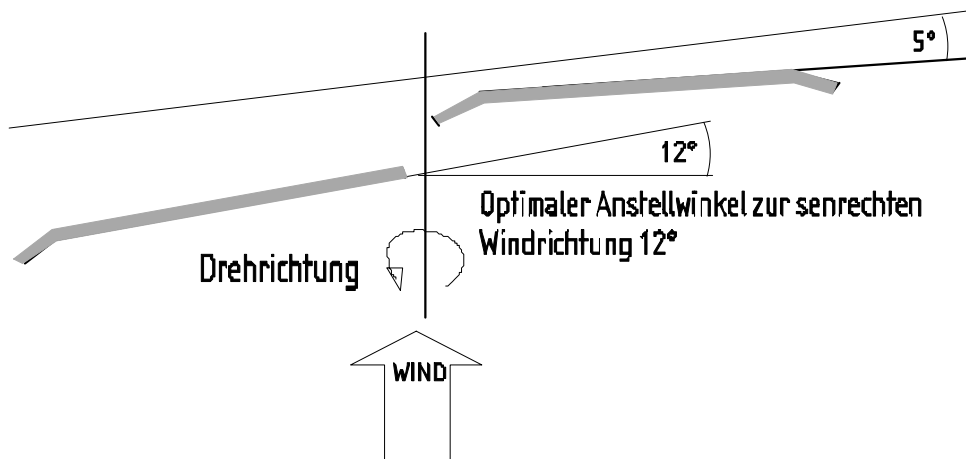
Die Flügelwurzel nach dem  
Abkanten der Flügelkanten

Die Knickkanten haben eine  
Breite von  $B = 0,26 l_0$ .

Die optimale Schlitzbreite  
beträgt  $AW = 0,048 l_0$



Der optimale Anstellwinkel der Flügel senkrecht zur Windradebene beträgt zwischen  $10^\circ$  und  $12^\circ$





Detail: Flügelbefestigung an der Flügelwurzel.

Die Verwendung eines U- Aluminiumprofils als Aufnahme der Flügelwurzel hat sich in der Praxis bewährt. Die Befestigungsschrauben müssen gegen Verdrehung mit Zahnscheiben o.ä. gesichert sein. Hier wurde das U- Profil um  $8^\circ$  geknickt um den Anstellwinkel des hinteren Flügels zu realisieren



Detail: Flügelaufnahme

Die Flügelaufnahme aus rostfreiem Stahl wird gebogen und anschließend werden die Berührungskanten verschweißt.

Achtung! Es ist hier zwar nicht deutlich zu erkennen, doch der Anstellwinkel der Flügel liegt auf der falschen Seite. Der zum Wind gerichtete Flügel (Vorderflügel) muss in Drehrichtung sein. In der Praxis ist dieser Fehler zunächst nicht sofort erkennbar, der Rotor dreht sich trotzdem, doch nicht mit der gewünschten Leistung.

**Auswuchten des Schlitzflügel- Rotors:**

Im Bild ist der Flügel auf einer, mit einem Kugellager versehenen Welle zum Auswuchten montiert. Der Flügel muss in jeder Phase in der Ruhelage ausgeglichen sein. Das heißt, er muss in jeder Drehstellung stehen bleiben, ohne wegzudrehen. Gegebenenfalls ist mit einer Schraube oder einem Blechstückchen auf einem der Flügel der genaue Gleichgewichtszustand herzustellen.

Leider ist auf diese Weise nur ein statisches Auswuchten möglich. Ein dynamisches Auswuchten der Flügel in Windradenebene ist nur mit einer Auswuchtmaschine möglich. Deshalb gebietet es sich, bei der Herstellung der Flügel und der Flügelnahe sehr präzise zu arbeiten.

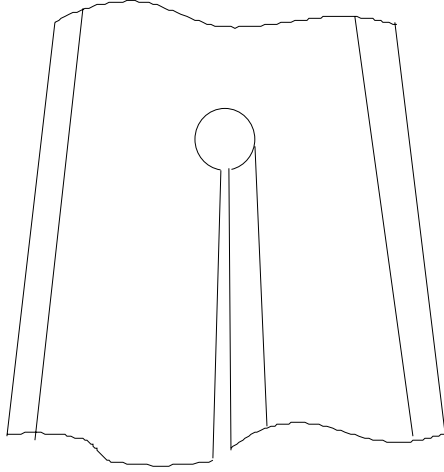
Tipp: Bevor die Flügel auf die Nabe montiert werden, sollten sie schon im Voraus mit einer Feinwaage auf gleiche Massen überprüft werden.

### 3. Flügelparameter bezogen auf die Länge $L_0 = 750\text{mm}$ eines Flügels

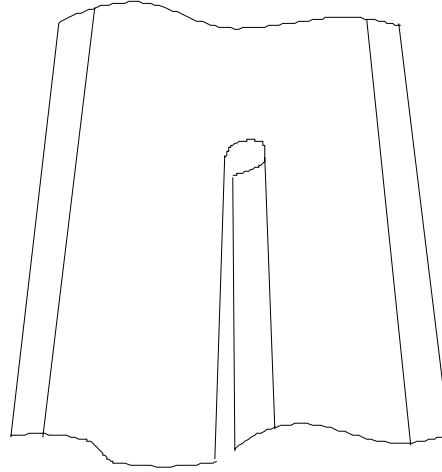


## 4. Zum Flügelloch

Das Ende des Flügelschlitzes, das in einem Loch endet, ist das stärkste von Schwingungen beanspruchte Teil des Schlitzflügels. Erfahrungen zeigen, dass hier die ersten Risse auftreten. Deshalb sind an dieser Stelle besondere Prinzipien zu beachten.

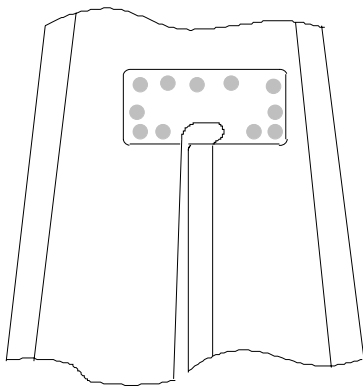


Klassische Art: Schlitzende endet mittig im Schlitzloch



Bessere Möglichkeit: Schlitzende als Langloch

Um den Schlitz an der Handschlagschere zu schneiden, ist am Schlitzende ein Loch zu bohren. Der Schlitz darf keinesfalls beim Schneiden über dieses Bohrloch hinaus gehen, sonst reißt das Flügelblatt aus. Praktisch bewährt haben sich Langlochlöcher, die mit der Feile bearbeitet werden müssen. Trotzdem bleibt das Endloch die Achillesferse des Schlitzflügels. Es empfiehlt sich, das Schlitzende zweiseitig mit einem angenieteten Blech zu verstärken.



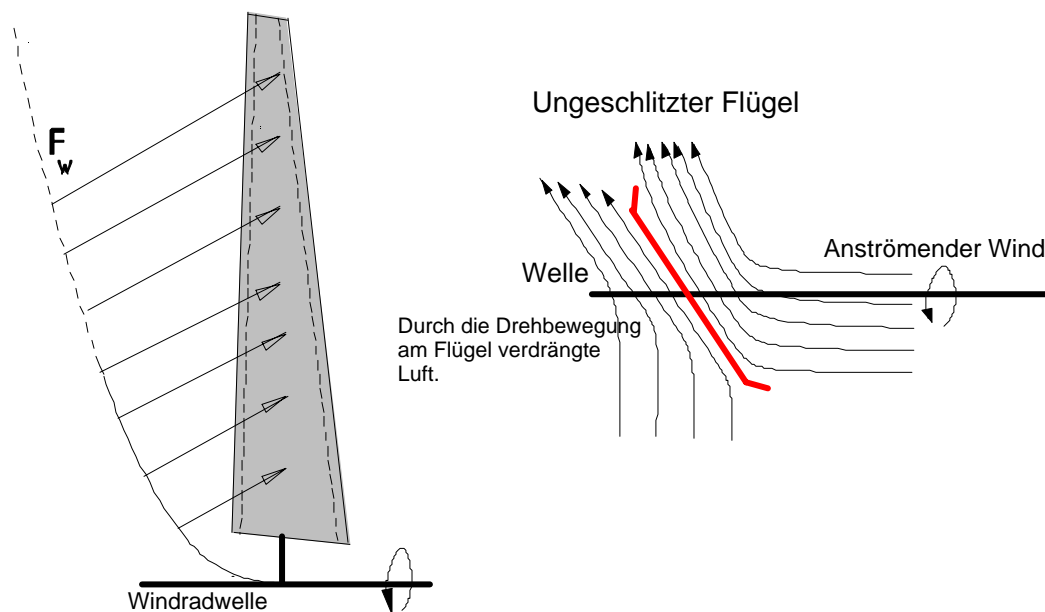
Langloch mit zwei beidseitig angenieteten Blechen verstärkt

## 5. Warum hat ein geschlitzter Flügel einen um 30% größeren Wirkungsgrad als ein ungeschlitzter Flügel gleicher Größe?

Vorweg: Ein Flügel hat in der Ebene der Drehrichtung bezogen auf die Flügellänge einen Luftwiderstand, der den Flügel in seiner Drehbewegung abbremst (Widerstandsläufer). Ihm wird mit zunehmender Drehzahl immer mehr Energie von der antreibenden Windkraft entzogen. Das ist der Grund, dass Flügel mit zunehmender Drehzahl an Leistung verlieren. Der Luftwiderstand in der Drehebene nimmt quadratisch mit der Länge des Flügels zu.

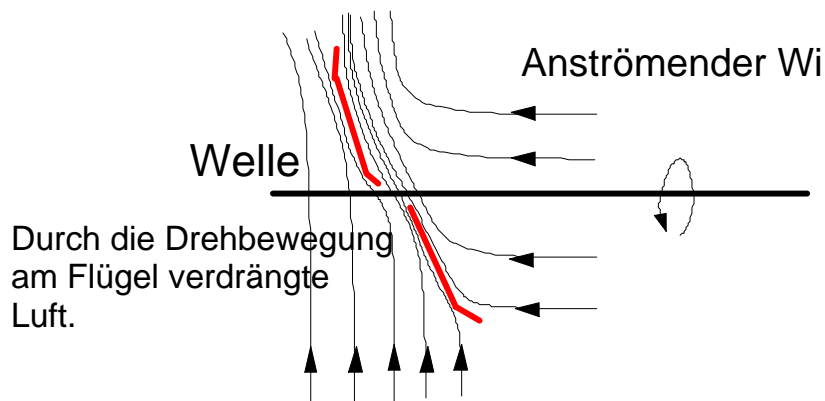
$$F_w = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot (2 \cdot \pi \cdot l \cdot n)^2.$$

Bei doppelter Drehzahl oder doppelter Flügellänge wirkt ein vierfach hemmender Widerstand auf die Drehbewegung des Flügels.



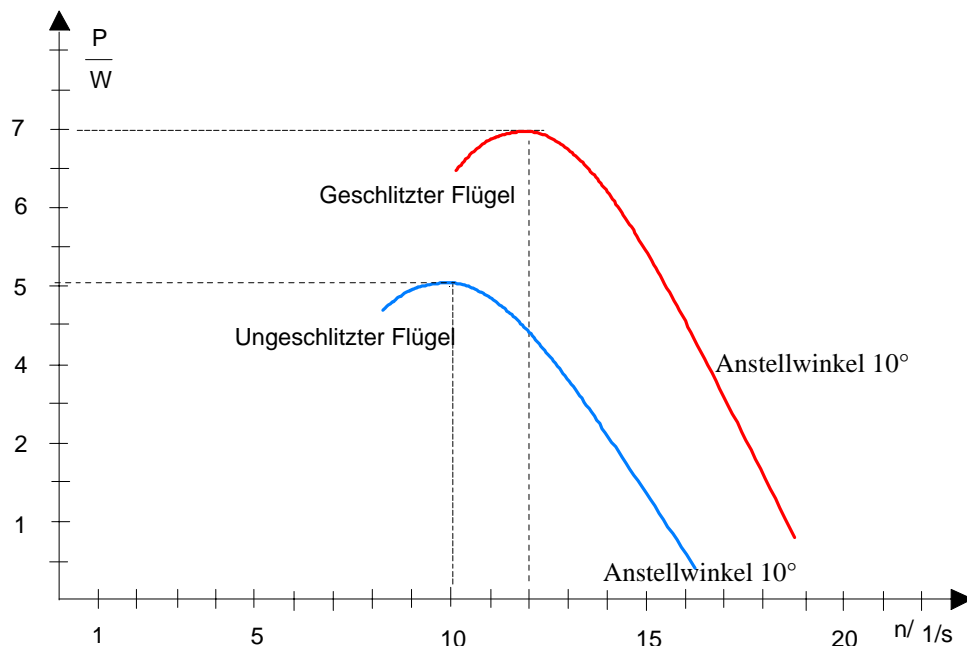


## Geschlitzter Flügel



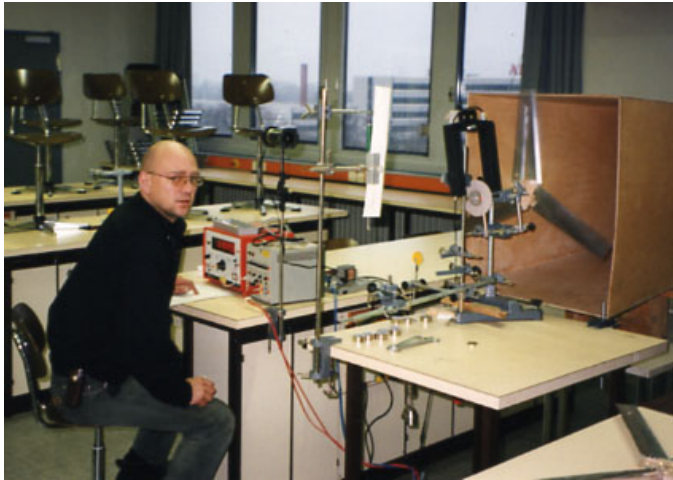
Die durch den Schlitz in Drehebene ausgesparte Fläche reduziert den energieverzehrenden Luftwiderstand des Schlitzflügels erheblich. Es bleibt zu untersuchen, ob die Luft hinter dem Windflügel durch den Schlitz beschleunigt wird und als zusätzlicher Antrieb auf der Vorderfläche des Hinterflügels wirkt. Dies könnte ein Grund sein, dass Schlitzflügel eine größere Leistung als ungeschlitzte Flügel haben.

Die untere Grafik zeigt ein  $P(n)$  – Diagramm eines ungeschlitzten- und eines geschlitzten zweiflügligen Rotors bei gleicher Größe, gleicher Anströmgeschwindigkeit und optimalem Anstellwinkel.



Ermittelt wurde die Rotorleistung nach der Bremsbandmethode im selbst gebauten Windkanal der Knobelsdorff- Schule bei einer Windgeschwindigkeit von 4m/s. Konstruiert und gebaut wurden der Windkanal und die Messvorrichtung vom Fachbereichsleiter Siegmund Ewert mit Hilfe von Auszubildenden der Schule.

Natürlich entspricht die Messvorrichtung nicht dem heutigen Standard der wissenschaftlichen Methoden der Strömungslehre,



doch konnten die Ergebnisse der Versuche auch mit dieser einfachen Messtechnik die Überlegenheit des Schlitzflügels gegenüber einem ungeschlitzten Flügel eindeutig belegen.

In der nächsten Zeit werden wir diese Versuchsreihe mit ihren Ergebnissen auf der Internetseite der Knobelsdorff- Schule veröffentlichen.

Bild: Labortechniker Hermann Sabel am Windkanalprüfstand 1996.

### Bilder zum Schlitzflügel



Der Autor bei der Installation eines Windrades auf dem Gelände der Peter- Lenné- Schule in Berlin. Dort ist die Berliner Landestelle für berufliche Entwicklungshilfe beheimatet, wo ausländische Teilnehmer in Kursen Kenntnisse über die Nutzung regenerativer Energieformen wie Photovoltaik, Solarthermie, Windenergie, Wassermanagement und Biogas Kenntnisse erwerben.



Siegmond Ewert mit einem Schüler beim Test eines dreiflügligen Schlitzrotors im Windkanal für die Windkraftanlage auf dem Schuldach der Knobelsdorff- Schule.

Der Schlitzrotor wurde ein Jahr später bei einem Sturm zerstört, weil die Sturmregelung in der turbulenten Luftströmung über der Flachdachkante nicht funktionierte. Windräder müssen auf Gebäuden 4-5m über der Dachkante installiert werden, sonst ist die Strömung zu turbulent.



Ein Windrad mit einem Schlitzflügel auf dem Gelände der Peter- Lenné- Schule in Berlin 2008.

## 6. Ausblick

Unserer Ansicht nach stellt der Schlitzflügelrotor eine ideale Grundlage für die Entwicklung eines Kleinwindrades speziell für Gebiete mit kleinen und mittleren Windgeschwindigkeiten dar. In Deutschland beträgt die durchschnittliche Windgeschwindigkeit ca. 4 m/s. In Verbindung mit einem guten Generator mit Permanentenerregung (hoher Wirkungsgrad bei geringen Drehzahlen) könnte ein Schlitzflügelwindrad in den Wintermonaten die Bereitstellung von Warmwasser mit einer Heizpatrone unterstützen, wenn wenig Solarenergie zur Verfügung steht. Auch für photovoltaische Inselsysteme stellt das Schlitzflügelkleinwindrad in den Wintermonaten eine ideale energetische Ergänzung dar. Das gute Anlaufmoment des Schlitzflügels bei geringen Windgeschwindigkeiten macht den Schlitzflügel zum idealen Flügel für Schwachwindgebiete.

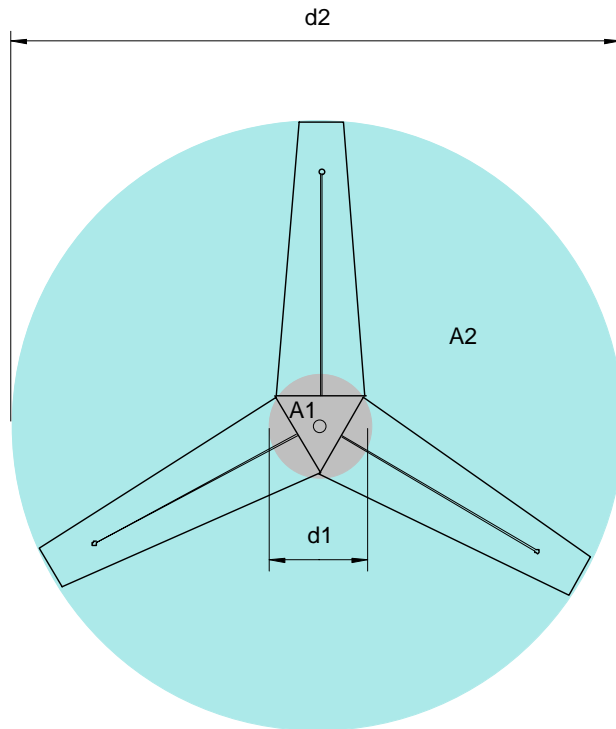
Natürlich sind die Entwicklungsressourcen des Schlitzflügelrotors gewiss nicht erschöpft und stehen erst am Anfang der Entwicklung. Für Entwicklungsländer kommt vermutlich nur der hier beschriebene Metallschlitzflügel aus Aluminium in Frage, weil er leicht mit einfachen Materialien und Werkzeugen herzustellen ist. Für den professionellen Flügelbau sind Baustoffe wie GFK oder Kohlefasermaterialien den Metallflügeln weit überlegen. Diese Werkstoffe sind wesentlich stabiler, leichter und dauerhafter als Metalle. Das betrifft insbesondere die Sturmsicherheit der Flügelemente, wo es auf Stabilität, Robustheit gegenüber Schwingungen und geringes Gewicht (Fliehkräfte) ankommt. In Größenordnungen bis zu 2m Flügeldurchmesser ist der Schlitzflügel anderen Flügelarten auch durch seine einfache Bauweise überlegen.

Der massenhafte Einsatz von Kleinwindrädern mit modernen Schlitzflügeln könnte weltweit zur CO<sub>2</sub> Reduktion beitragen und stellt zur Nutzung der solaren Energie eine ideale Ergänzung dar.

## 7. Dimensionierung eines Windrades

Bei Bau eines Windrades erhebt sich die Frage: Welche Leistung soll das Windrad bei einer bestimmten ortsüblichen durchschnittlichen Windgeschwindigkeit erreichen? Die zweite Frage ist: Was soll das Windrad antreiben, einen Generator oder eine mechanische Pumpe?

Beim Antrieb einer mechanischen Pumpe kommt nur ein Rotor zwischen 6 und 12 Schlitzflügeln in Frage, weil mechanische Pumpen ein hohes Anlaufdrehmoment benötigen.



Für unseren an der Knobelsdorff- Schule entwickelten und getesteten Dreiflügler-Schlitzflügelrotor haben wir zwei wichtige Eigenschaften eines Schlitzrotors festgestellt:

1. Der dreiflügliche Schlitzrotor hat einen  $c_p$ - Wert von ca.  $c_p = 0,45-0,5$
2. Der dreiflügliche Schlitzrotor hat eine Schnelllaufzahl von ca.  $\lambda = 4,5$ .

Das bedeutet, dass der Rotor ca. 45% der im Wind steckenden Windenergie zu nutzen vermag. Ein ideales Windrad ohne Reibungs- und Wirbelverluste könnte theoretisch ca. 59% der Windenergie nutzen.

Die Schnelllaufzahl  $\lambda = 4,5$  besagt, dass die Kreisgeschwindigkeit an den Flügelspitzen 4,5 mal größer ist als die anströmende Windgeschwindigkeit. Die Kenntnis der Schnelllaufzahl ist deshalb wichtig, weil man darüber erfährt, mit welcher Drehzahl des Rotors man

Wir wollen zunächst abschätzen, welche Fläche der Wind zum Antrieb des Windrades überstreicht. Die direkte Umgebung der Flügelnabe trägt wenig zur Windradleistung bei und ihre Fläche ist im Vergleich der überstrichenen Flügelfläche so klein, dass sich keine nähere Untersuchung hier lohnt.

**Beispiel:**

Bei einem Rotordurchmesser  $d_2$  von beispielsweise 1,5m und einen Nabendurchmesser von  $d_1 = 0,3m$  beträgt das Verhältnis von  $A_1$  und  $A_2$ :

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{d_1^2 \frac{\pi}{4}}{d_2^2 \frac{\pi}{4}} = \frac{0,3^2 m^2}{1,5^2 m^2} = 0,04.$$

Das bedeutet, dass die Nabenfläche 4% der gesamten Rotorfläche beträgt. Wenn man dazu bedenkt, dass der Wind in Nabennähe zu keinem bzw. nur einem sehr kleinen Anteil zur Windleistung des Windrades beiträgt (sehr kleines Drehmoment in Nabennähe), so darf man mit ruhigem Gewissen mit dem Gesamtdurchmesser  $d_2$  einen Schlitzflügelrotor dimensionieren.

**Angenommen, unser Schlitzrotor hat einen Durchmesser von 1,5m. Der  $c_p$ - Wert beträgt 0,45, die Schnelllaufzahl  $\lambda$  beträgt 5. Welche mechanische Windleistung kann an der Windradwelle bei einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von  $v = 5\text{m/s}$  erwartet werden?**

**Lösung:** Zunächst berechnen wir die Windleistung  $P_0$  weit vor dem Windrad, die der Rotor überstreicht.

Die Windradfläche A ist:

$$A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = \frac{(1,5\text{m})^2 \cdot \pi}{4} = 1,767\text{m}^2$$

Danach wird die Windleistung berechnet, bezogen auf diese Fläche vor dem Windrad.

$$P_0 = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^3 = 0,5 \cdot 1,767\text{m}^2 \cdot 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(5 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3 = 138\text{W} \quad \text{Diese Leistung steckt im Wind.}$$

Mit einem  $c_p = 0,45$  beträgt die Windleistung  $P_{WR}$  an der Welle:

$$c_p = \frac{P_{WR}}{P_0}$$

$$\text{aufgelöst nach } P_{WR} = c_p \cdot P_0 = 138\text{W} \cdot 0,45 = 62,1\text{W}$$

Zu beachten ist, dass sich die angeströmte Windleistung  $P_0$  bei 10m/s Windgeschwindigkeit verachtfacht. Hier können durchaus Windradleistungen bis 600W erwartet werden.

Die Umfangsgeschwindigkeit an den Flügelspitzen beträgt bei einer Windgeschwindigkeit von 5 m/s (18 km/h) und einer Schnelllaufzahl von  $\lambda = 5$ :

$$\lambda = \frac{v_u}{v}$$

$$v_u = \lambda \cdot v = 5 \cdot 5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Die Drehzahl berechnet sich dann nach der Formel der Umfangsgeschwindigkeit:

$$v = D \cdot \pi \cdot n \quad \text{Aufgelöst nach n: } n = \frac{v}{D \cdot \pi} = \frac{25 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1,5\text{m} \cdot \pi} = 5,3 \frac{1}{\text{s}} = 318 \frac{1}{\text{min}}$$

Mit dieser Drehfrequenz ist bei dem Rotor zu rechnen. Bei einer direkten Kopplung der Flügelwelle kann ein Permanentmagnet- Generator ausgewählt werden. Für eine Autolichtmaschine kommt nur eine Übersetzung mit einem Getriebe oder Übersetzung mit einem Keilriemen in Frage, weil Lichtmaschinen erst oberhalb von 1000 1/min elektrische Energie liefern. Zum Antrieb von mechanischen Pumpen ist der dreiflüglige Rotor zu schwach und die Drehzahl zu hoch. Hier ist ein Mehrflügelrotor mit mehreren Schlitzflügeln (Amerikanisches Windrad) sinnvoll.

Harald Sterzenbach, 11/08