

INSTITUT FÜR AERODYNAMIK
UND GASDYNAMIK



Direktor: Prof. Dr.-Ing. F. X. Wortmann
UNIVERSITÄT STUTTGART

WIE WEIT KANN DAS BLATT EINER WINDTURBINE FLIEGEN ?

F.X. Wortmann

zum Seminar
"Windenergie"
23.-24.10.1978
KFA Jülich

Stuttgart, September 1978

Wie weit kann das Blatt einer Windturbine fliegen?

von

F.X.Wortmann ⁺⁾

Bei der Aufstellung großer Windturbinen mit horizontaler Achse, für die vorerst noch wenig Erfahrungen vorliegen, ist es wichtig, das damit verbundene Risiko abzuschätzen. Sieht man von der unmittelbaren Umgebung der Turbine ab, so entsteht eine Gefährdung der weiteren Umgebung hauptsächlich dadurch, daß ein Rotorblatt als ganzes oder als Teil abbricht und davonfliegt. Es soll deshalb abgeschätzt werden, wie weit unter bestimmten Bedingungen das Blatt einer Windturbine fliegen kann.

Ballistischer Flug

Die Flugbahn eines davonfliegenden Rotorblattes soll zunächst im Vakuum, d.h. ohne Luftkräfte betrachtet werden. Beim Verlassen der Drehebene führt der Schwerpunkt des Blattes eine Translations- und das Blatt eine Drehbewegung um den Schwerpunkt aus. Die maximale Wurfweite des Schwerpunktes bei einem Wurfwinkel von 45° aufwärts ist dann

$$s_{\max} = \frac{v_0^2}{g} \quad (1)$$

wobei v_0 die Bahngeschwindigkeit des Schwerpunktes und g die Erdbeschleunigung ist.

Die maximale Steighöhe bei einem Wurf senkrecht aufwärts erreicht den halben Wert der Weite w_{\max} . Beide Angaben beziehen sich nicht auf den Erdboden, sondern auf eine erdparallele Ebene, die im Augenblick der Trennung durch den Schwerpunkt des Blattes geht, vgl. Abb.1. Wenn man die Längen vom Fußpunkt des Turmes an zählt, muß man deshalb bezüglich der Steighöhe noch die Achshöhe des Ro-

⁺⁾ Universität Stuttgart, Institut für Aerodynamik und Gasdynamik

tors und hinsichtlich der maximalen Wurfweite ungefähr den Rotordurchmesser hinzuzählen, vgl. Abb. 1. Da die Geschwindigkeiten der Blattspitzen maximal etwa 100-150 m/s sind und der Schwerpunkt des gesamten Blattes bei etwa 30-50% des Rotorradius liegt, liegt v_0 in der Größenordnung 30-50 m/s bzw. 50-75 m/s, sodaß sich maximale Wurfweiten von 90 bis 562 m zuzüglich eines Rotordurchmessers ergeben. Entsprechend ist die maximale Wurfhöhe etwa 45 bis 280 m zuzüglich der Turmhöhe.

Aerodynamischer Flug

Unter Berücksichtigung der Luftkräfte ergeben sich zwei völlig verschiedene Perspektiven: die Wurfbewegung kann einerseits durch den Luftwiderstand gebremst werden, sodaß die Wurfweite vermindert wird. Die Größe der Verzögerung hängt vom Verhältnis der Luftkräfte zu den Massenkräften ab. Das Blattgewicht pro Quadratmeter wird kaum 100 kp/m^2 überschreiten. Die Luftkraft, genauer der Staudruck, kann im Schwerpunktsbereich Werte von etwa $60-350 \text{ kp/m}^2$ erreichen, sodaß bei einer Queranströmung relativ starke Verzögerungen in der Größenordnung der Erdbeschleunigung auftreten werden. Die ballistische Wurfweite von 562 m würde bei einer derartigen aerodynamischen Verzögerung auf Werte von weniger als 150 m reduziert. Mit anderen Worten: durch den Luftwiderstand kann die Wurfweite des Blattes auf etwa ein Viertel der ballistischen Werte reduziert werden.

Hier taucht allerdings die Frage auf, ob der Flügel wirklich querschlägt oder ob er sich wie ein Pfeil seiner Flugbahn anpaßt, wobei die schwere Wurzel vorausfliegt und der leichte Außenflügel den Zustand stabilisiert. Dann wäre der Luftwiderstand sehr klein und die Wurfweite nahezu so groß wie im Vakuum. Nach dem Losbrechen dreht jedoch der Flügel den schnelleren und leichten Außenflügel nach vorn, schlägt dadurch quer und kann, wie weiter unten noch gezeigt wird, auf keine Weise mehr in eine glatte und schlichte Flugbahn gebracht werden.

Ein ganz anderer Gesichtspunkt ergibt sich, wenn man den Transport des Blattes durch den Wind mitberücksichtigt. Jetzt kommt es darauf an, herauszufinden, wie lange ein Blatt in der Luft schweben kann.

Zunächst der ungeordnete, abgebremste Absturz. Die ballistische Flugzeit wird bei halbiertes Wurfweite oder -höhe

$$t = \frac{v_0}{g}, \text{ also rund 3 bis 7 sec.} \quad (2)$$

Da Windturbinen bei einer gewissen maximalen Windgeschwindigkeit abgestellt werden, bestimmt aber, wenn die Windgeschwindigkeit 30 m/s erreicht, könnte man zur gebremsten ballistischen Wurfweite noch einen Windtransport von etwa 200 m dazu addieren. Hier ist jedoch schon angenommen, daß das Blatt bereits beim Start in Windrichtung fliegt, was praktisch ausgeschlossen ist, aber doch angenommen werden mag. Hinsichtlich des flachen Erdbodens würde damit die maximale Reichweite bei $v_0 = 75$ m/s etwa den Wert 150 m + 200 m + Rotordurchmesser annehmen.

Bei dieser Abschätzung ist vorausgesetzt, daß der losgebrochene Flügel in einer ungeordneten, stark torkelnden und gebremsten Bahn zu Boden stürzt. Man muß jedoch auch den Fall berücksichtigen, daß das Blatt eine geordnete und aerodynamisch effektive Flugbewegung ausführt und dadurch seine Sinkgeschwindigkeit herab- und seine Transportweite heraufsetzt.

Im folgenden sollen deshalb verschiedene Möglichkeiten zur Verminderung der Sinkgeschwindigkeit eines Flügels im Hinblick darauf diskutiert werden, ob sie auch von einem Windturbinenflügel verwirklicht werden können.

Hier kommen rotatorische Bewegungen um freie Achsen in Frage. Die Rotation um die Achse des kleinsten Trägheitsmomentes kennt jeder, der einen schmalen Papierstreifen konstanter Breite zu Boden fallen läßt: der rotierende Streifen gleitet langsam zu Boden, wobei Gleitzahlen von rund 2:1 erzielt werden. Die Sinkgeschwindigkeit errechnet sich aus

$$v_s = \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{G}{F} \frac{1}{c_w}} \quad (3)$$

Dabei ist ρ die Luftdichte, G das Gewicht und F die Grundfläche des Blattes. Der Widerstand des Blattes ist dabei von gleicher Größenordnung wie der Auftrieb eines rotierenden Zylinders und

hängt natürlich von der Drehgeschwindigkeit um die Spannweitenachse ab. Er wird bei Rotation immer größer als beim querangeströmten ruhenden Blatt. Ein brauchbarer Wert für c_w dürfte zwischen drei und fünf liegen. Mit $G/F = 100 \text{ kp/m}^2$ und $c_w = 5$ ergibt sich aus (3) eine Sinkgeschwindigkeit von rund 18 m/s.

Unter welchen Voraussetzungen ist eine solche Autorotation möglich? Bei stationärer reibungsfreier Anströmung ist eine senkrecht angeströmte Platte, deren Schwerpunkt in der Mitte liege, zunächst stabil, weil die Staupunktwanderung bei Schräganströmung ein rückführendes Moment erzeugt.

Abb.2 zeigt reibungsfreie Stromlinien für die Schräg- und Senkrechtanströmung. Nimmt man den Fall 2a als Ausgangspunkt, so dreht sich die Platte bei kleiner werdendem Moment linksherum. Nach dem Durchlaufen der Position 2c kehrt sich das Moment um. Die Platte rotiert nicht, sondern führt um die stabile Lage 2c eine Drehschwingung aus. Bei instationärer Strömung und durch Reibungseinflüsse wird jedoch eine Asymmetrie erzeugt: das antreibende Moment bzw. die Dreharbeit im ersten Quadranten überwiegt die Bremsung im zweiten Quadranten, und eine kontinuierliche Rotation wird möglich.

Die mitrotierende Luftmasse bildet praktisch einen Zylinder, der durch seine Querkraft eine Gleitbewegung verursacht. Bei rechteckigem Flügelgrundriß, Abb.3a, ist der Gleitflug gerade. Bei einer Zuspitzung wie in Abb.3b ist die Querkraftverteilung in Spannweitenrichtung nicht mehr gleichförmig, und es entsteht ein Kurvenflug, der auf einer schnell enger werdenden Spiralbahn zum Absturz über die schmale Flügelseite führt.

Wenn die Schwereachse nicht in der Mitte der Flügeltiefe liegt (Abb.3c), wird die Rotation behindert und verlangsamt. Kleine Modelle rotieren nicht mehr, wenn die Schwereachse weniger als etwa ein Drittel der Tiefe vom Flügelrand entfernt ist.

Windturbinenflügel haben meistens eine Zuspitzung von etwa 1:2 bis 1:3, und bei großen Rotoren sollte die Schwereachse tunlichst im vorderen Drittel liegen. Nach dem oben Gesagten sor-

gen beide Eigenschaften dafür, daß die Rotation um die kleinste Trägheitsachse praktisch außer Betracht bleiben kann.

Eine weitere Möglichkeit zur Verminderung der Sinkgeschwindigkeit ist die Autorotation des Flügels um die Achse des größten Trägheitsmomentes. Diese Möglichkeit wird in der Natur von den Samen einiger Nadelhölzer und in unseren Breiten auch vom Ahorn genutzt^{*)}. Diese Form der Rotation ist deswegen so effektiv, weil das Blattgewicht gewissermaßen auf die ganze Kreisfläche verteilt wird und die Belastung dieser Fläche entsprechend gering ist. Die Kreisfläche kann bei Windturbinen das 30-50fache der Blattfläche erreichen, entsprechend gering ist in Gl.(3) die Belastung G/F . Der Widerstandsbeiwert dieser Gleichung ist mit etwa 0.8 anzusetzen. Die Sinkgeschwindigkeit wird also noch geringer sein als im Fall der Querrotation.

Mit einem Blattgewicht von 100 kp/m^2 und einer 50fachen Kreisfläche würde die minimale Sinkgeschwindigkeit nach Gl.(3) etwa 6.3 m/s erreichen.

Wenn man sich fragt, ob auch der Flügel eines Windrotors in eine solche Autorotationsbewegung geraten kann, muß man zunächst verstehen, warum eine stabile Rotation möglich oder unmöglich ist, und schließlich sollte auch eine Aussage über die Einleitung der Autorotation möglich sein.

Vereinfacht gesehen ist der Ahornsamen ein einflügliger Rotor, der um eine freie Achse nahe dem Schwerpunkt rotiert (Abb.4a). Die spiralförmig geneigte Flugbahn liefert die Antriebskomponente für die Rotation, ganz ähnlich wie bei einer Windturbine. Da hinsichtlich der Flügelanstellung keine Zwangsbedingung vorliegt, muß der Flügel wie ein Nurflügler allein stabil fliegen können. Das ist wie bei jedem Flugzeug unter zwei Voraussetzungen möglich:

- 1) Der Schwerpunkt muß vor dem aerodynamischen Neutralpunkt liegen.
- 2) Das Schweremoment bezüglich des Neutralpunktes muß im Gleichgewicht mit dem Luftkraftmoment stehen.

^{*)} vgl. z.B. H.Hertel, "Struktur-Form-Bewegung", Krausskopf, Mainz 1963.

Beide Bedingungen sind zwingend: ein Flügel, dessen Schwereachse z.B. bei $t/2$ liegt, kann allein weder stabil fliegen noch rotieren. Da die Schwereachse großer Rotorblätter nahe dem $t/4$ -Punkt liegen wird, ist Autorotation zunächst nicht auszuschließen. Auch die Verwindung des Blattes ist wegen der ähnlichen Form der Anströmung eines Rotorblattes für die Autorotation eher günstig.

Beim Ahornsamen ist die Masse im Samen konzentriert und der Schwerpunkt dicht beim Samen. Beim Turbinenflügel (Abb.4b) liegt der Schwerpunkt in Spannweitenrichtung nicht so dicht an der Flügelwurzel. Das Wurzelstück des Flügels ist jedoch der Autorotation des Außenflügels nicht angepaßt und bremst die Rotation. Im Modellversuch wird es bereits schwierig, mit einem Flügel wie in Abb.4b überhaupt Autorotation zu beobachten. Die Drehfrequenz ist gegenüber einer mehr einseitigen Schwerpunktlage stark vermindert. Wandert der Schwerpunkt in die Nähe der Spannweitenmitte, wird die Autorotation unmöglich, aber eine neue und besonders leistungsfähige Möglichkeit zur Verminderung der Sinkgeschwindigkeit tut sich auf (vgl. Abb.5a oder 5b), die in Form des Zanoniasamens auch von der Natur gefunden wurde: der Nurflügler, der als Gleitflieger sehr gute Gleitzahlen verwirklichen kann. Allerdings ist die große Leistungsfähigkeit auch sehr empfindlich, denn ein wirklicher Flug kann nur zustandekommen, wenn nicht nur die beiden genannten Bedingungen - in Abb.5a und b sind dazu die hochgezogenen Flügelenden notwendig - erfüllt sind, sondern auch hohe Symmetrieanforderungen erfüllt werden. Die Blätter von Windrotoren können diese Flugmöglichkeit nicht verwirklichen, weil entweder die eine oder die andere der angegebenen Bedingungen verletzt ist.

Was kann man über den Einleitungsvorgang zur Autorotation sagen? Zunächst eine Beobachtung am Ahornsamen: läßt man den Samen mit dem Kopf voraus möglichst ungestört fallen, kann er viele Meter fallen, ohne zur Rotation zu kommen. Läßt man den Flügel vorausfallen, schlägt er sofort quer und rotiert nahezu unmittelbar. Die Autorotation ist also der stabilere Zustand, der bei ausreichender Störung schnell erreicht wird. Die Störungen, die

den freien Fall beenden, lassen sich finden: z.B. wenn das Flügelblatt nicht völlig eben ist, kommt es beim Fall zu einem Rollen um die Falllinie. Fliehkräfte und Ablösungsvorgänge am tiefer liegenden, schweren Flügelteil (oder am Samen) vergrößern den Rollkegel sehr schnell, bis der Zustand der Autorotation erreicht ist.

Der Flügel einer Windturbine bringt also einerseits gute Voraussetzungen mit, um in die Autorotation zu gelangen: er startet mit einer instabilen Position, weil zunächst der Flächenschwerpunkt vor dem Gewichtsschwerpunkt liegt. Er könnte, wenn die Schwereachse nahe der $t/4$ -Linie liegt, bald in Rotation geraten. Weil jedoch der Schwerpunkt in Spannweitenrichtung etwa bei 30-50% des Radius liegt, rotiert er schlecht. Die Rotation wird in diesem Fall zusätzlich durch die Verwindung und große Flügeltiefe der Flügelwurzel behindert, wenn nicht gar verhindert.

Die obigen Bemerkungen beruhen zum größeren Teil auf Beobachtungen an kleinen Modellen. Die Modelle hatten ungefähr das gleiche Verhältnis von Massenkraft zu Luftkraft wie die Großausführung. Eine deutlich erkennbare Autorotation, die die Flugzeit vergrößern würde, wurde an solchen Modellen, die Rotorflügel simulieren, nicht beobachtet.

Im Einzelfall ist es auch nicht schwer, die jeweiligen Bedingungen mit einem kleinen Modell nachzuahmen und sich von der Möglichkeit oder Unmöglichkeit der Autorotation ein Bild zu verschaffen. Das Modell hat lediglich den Blattgrundriß, die Verwindung und die Massenverteilung der Großausführung zu simulieren. Dann ist noch die Startgeschwindigkeit des Modells so festzulegen, daß das Verhältnis der Massenkraft zur Luftkraft der Großausführung entspricht.

Zusammenfassend ist zu sagen, daß ein losbrechender Flügel einer Windturbine keine Chance hat, als ballistisches Geschöß zu fliegen und daß die Verlängerung der Flugzeit durch Autorotation ein relativ unwahrscheinliches Ereignis ist. Die Wurfweite des Gesamtflügels wird maximal etwa 25-50% der ballistischen Weite des Schwerpunkts erreichen, wozu bei großen Anlagen noch eine Transportweite durch den Wind von maximal etwa $20 \text{ sec} \times 30 \text{ m/s} = 600 \text{ m}$

hinzuzurechnen wäre. Dabei ist noch zu beachten, daß die Wurf-
richtung in der Rotorebene, die Windrichtung jedoch etwa senk-
recht dazu steht.

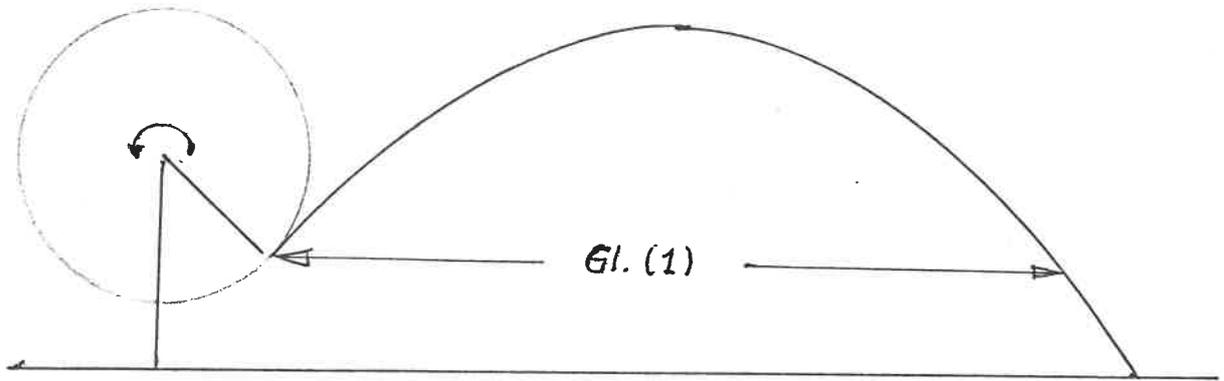
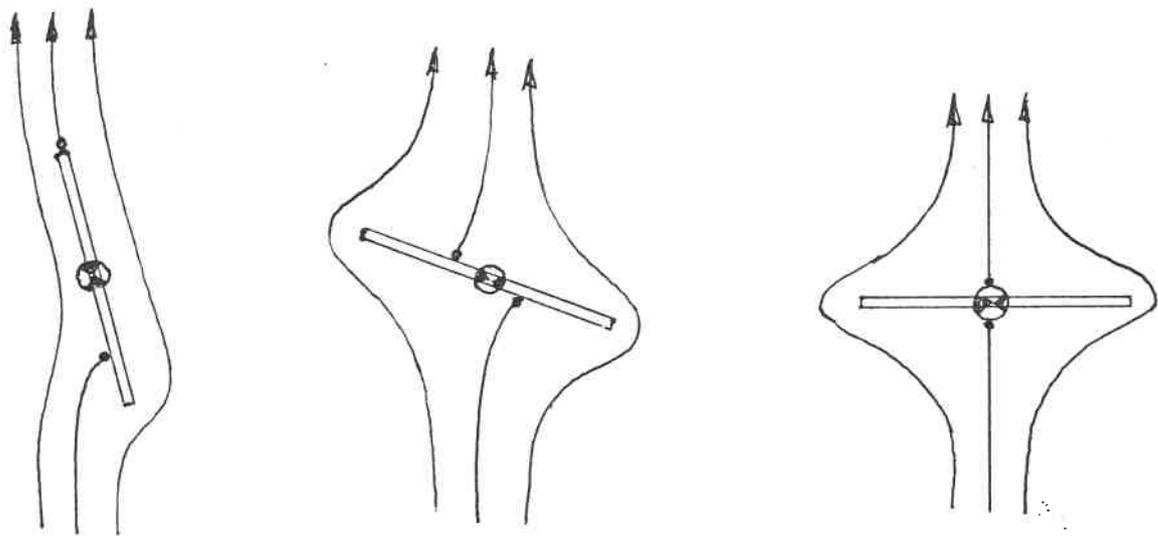


Abb.1 Ballistische Flugbahn bei maximaler Wurfweite



a)

b)

c)

Abb.2 Stromlinienbilder und Staupunktlagen bei einer ebenen Platte in reibungsfreier Potentialströmung
a) mit Zirkulation, b) und c) ohne Zirkulation.

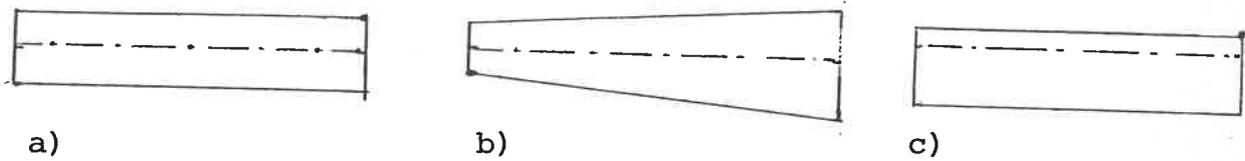


Abb.3 Rotation um die Achse des kleinsten Trägheitsmomentes
Variation der Lage der Schwereachse und des Blattgrundrisses

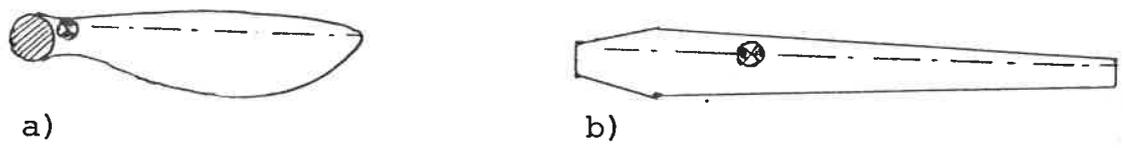


Abb.4 Autorotation um die Achse des größten Trägheitsmoments
Ahornsamen und typischer Blattgrundriß einer Windturbine mit Schwereachse und Schwerpunktlage



Abb.5 Zanoniasamen und Nurflügler.
Schwerpunkt 1 und Neutralpunkt 2 liegen hintereinander. Zum Momentengleichgewicht sind die Flügelenden hochgezogen.