



Maschinenlabor: Versuch V2b

Untersuchung einer Strömungsmaschine

hier: Leistungsanalyse einer Kleinwindturbine



Bearbeiter:

Name: Vorname: Gruppe:

Matr. Nr.:

Laborversuch durchgeführt am:
(Datum)

.....
(Unterschrift Betreuer)

Korrekturhinweise:

Endtestat:
(Datum)

.....
(Unterschrift Betreuer)

1. Ziel des Versuchs

In dem Versuch werden Teilnehmer mit den Grundlagen der Windturbinen vertraut gemacht. Die Teilnehmer werten aktuelle gemessene Daten der Windgeschwindigkeit und des Energieertrags aus. Daran können das Potential und die Grenzen der Energiegewinnung durch Windkraft eingeschätzt werden.

2. Grundlagen

Die Strömungsmaschine „Windturbine“ wandelt die kinetische Energie des Windes in Arbeit an der Abtriebswelle um, mit der dann der elektrische Generator angetrieben wird. Dazu wird die Geschwindigkeit des ankommenden Windes im Rotor der Windturbine verzögert (abgebremst).

Wir betrachten eine Windturbine mit horizontaler Achse, wie sie heute oft eingesetzt werden.

Strömt der Wind mit der Windgeschwindigkeit c_1 durch eine *gedachte* kreisförmige Fläche A und würde auf $c_2 = 0$ m/s verzögert werden, so verliert er pro Zeiteinheit die kinetische Energie

$$P_{wind} = \dot{m} \frac{1}{2} c_1^2. \quad (1)$$

Dies ist das *maximal* mögliche *Leistungsangebot des Winds*. Dabei ist der Massenstrom durch die gedachte Fläche $\dot{m} = \rho c_1 A$, so dass

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A c_1^3. \quad (2)$$

Eine Verzögerung auf $c_2 = 0$ m/s ist aber nicht möglich, da dies die Strömung durch die durchströmte Fläche zum Erliegen bringen würde. („Was vorne hereinströmt, muss auch hinten wieder heraus!“). In einer realen Windturbine wird daher nun der ankommende Wind mit seiner Geschwindigkeit c_1 auf $c_2 > 0$ abgebremst. BETZ konnte mit seiner Windturbinentheorie zeigen, dass die optimale Verzögerung des Windes c_2/c_1 durch die Windturbine gerade 0,33 beträgt und dabei dann maximal knapp 60% des *Windleistungsangebots* in Leistung an der Welle des Turbinenrotors P_W umgesetzt werden können. Das Verhältnis P_W/P_{wind} bezeichnet man als den theoretischen Leistungsbeiwert $c_{P,th}$.

Berücksichtigt man die noch auftretenden Verluste in der Strömung und im Generator über einen Wirkungsgrad η ($< 100\%$), so kann man die tatsächliche Leistung am Generator der Turbine aus

$$P = \eta c_{P,th} \frac{1}{2} \rho A c_1^3 \quad (3)$$

mit A als der vom Rotor pro Umdrehung überstrichenen Fläche $A = \pi/4 D^2$ berechnen.

Der reale Leistungsbewert ist dann

$$c_P \equiv \eta c_{P,th} = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A c_1^3}. \quad (4)$$

Nimmt man vereinfachend an, dass die Verluste unabhängig von Windgeschwindigkeit und Baugröße sind, dann erkennt man, dass die Leistung der Windturbine mit der *dritten* Potenz der Windgeschwindigkeit und *linear* mit der Größe der durchströmten Fläche, also quadratisch mit dem Rotordurchmesser wächst. Daraus ergeben sich zwei Erkenntnisse für die Planung von Windturbinenanlagen:

- Bereits relativ kleine Unterschiede im Windangebot können über die Wirtschaftlichkeit einer Windturbine entscheiden.
- Man versucht immer, Turbinen mit der größtmöglichen Fläche des erfassten Windes (also große Rotoren) zu bauen; dabei ist nicht die Blatt- sondern die von den Blättern überstrichene Größe maßgebend.

3. Die Kleinwindturbine an der Universität Siegen

Die Kleinwindturbine auf dem Dach des Gebäudes A in der Paul-Bonatz-Strasse hat einen Rotordurchmesser $D = 3,0$ m. Eine Windfahne sorgt dafür, dass der Rotor selbständig in Windrichtung gestellt wird. Aufgrund des magnetisch- und reibungsbedingten Bremsmoments des Generators im Stillstand benötigt der Rotor eine gewisse Anlaufwindgeschwindigkeit $c_{Anlauf} > 0$ m/s. Die Sturmsicherung ist bei dieser Turbine wie folgt realisiert: Überschreitet der windinduzierte Schub auf den Rotor ein zulässiges Maß, schwenkt der Rotor mit der kompletten Generatorgondel in die sog. Helikopterstellung. Dadurch wird der Rotor aus dem Wind gefahren und somit vor Überdrehzahlen geschützt. Sobald der Wind nachgelassen hat, zieht ein Gewicht die Generatorgondel wieder zurück in die Ausgangsstellung.

Der Generator speist seine elektrische Leistung in das öffentliche Netz ein. Die Turbine läuft dabei drehzahlvariabel, d.h. das Steuergerät versucht auch bei wechselnden Windgeschwindigkeiten permanent die Drehzahl so einzustellen, dass die optimale Verzögerung der Windgeschwindigkeit nach BETZ erzielt wird.

Die Windgeschwindigkeit wird mit einem vorgelagerten Windmessmast (Schalenkreuzwindmesser) auf dem Dach gemessen.

Alle Messdaten werden mit einer Messwerterfassungsanlage aufgezeichnet und abgespeichert.

4. Aufgabenstellung

4.1 Aufgaben zur Versuchsvorbereitung. Bitte arbeiten Sie *vorab* die Begriffe und theoretischen Grundlagen sorgfältig durch und klären Sie für das Prüfungsgespräch mit dem Versuchsbetreuer folgende Fragen:

- Wie hoch ist das Leistungsangebot des Winds bei 3 m/s, 5 m/s und 10 m/s pro m^2 durchströmter Fläche? Nehmen Sie eine Luftdichte von $\rho = 1,16 \text{ kg/m}^3$ an.
- Wie hoch ist dann jeweils die theoretisch maximal mögliche Wellenleistung am Rotor der Kleinwindturbine auf dem Dach des Paul-Bonatz-Gebäudes?
- Um welchen Faktor ändert sich der Energieertrag, wenn man den Rotordurchmesser verdoppelt?
- Wie groß muss etwa der Rotordurchmesser werden, wenn man 5 MW Nennleistung bei 12 m/s Windgeschwindigkeit erzielen will? (Nehmen Sie für den realen Leistungsbeiwert c_p den Wert 0,5 an.)

4.2 Versuchsdurchführung und Auswertung.

Im Internet unter <http://www.uni-siegen.de/fb11/iftsm/aktuelles/?lang=de> finden Sie ein aktuelles Messprotokoll. Für jede Minute innerhalb der Messperiode sind die gemessene Windgeschwindigkeit c_1 in m/s (linke Spalte) und die elektrische Generatorleistung P in W (rechte Spalte) abgespeichert. Wichtig: Die Werte sind Durchschnittswerte, die aus einer zeitlichen Mittelung über *eine* komplette Minute entstanden sind, d.h. man muss davon ausgehen, dass jeder der abgespeicherten Messwerte für genau eine Minute anliegt.

- Plotten Sie zunächst die beiden Messdatenreihen über die komplette Messperiode. Achten Sie auf korrekte Achsenbeschriftung.
- Berechnen Sie an jedem Messzeitpunkt die akkumulierte Energie in kWh (Kilowattstunden), die seit Messbeginn ins Netz eingespeist wurde und plotten Sie diese ebenfalls als eine Funktion der Zeit in ein drittes Diagramm. Welchen Eurobetrag haben wir innerhalb der kompletten Messperiode erwirtschaftet, wenn man eine Vergütung von 7 Eurocent pro eingespeister kWh zugrunde legt?
- Berechnen Sie den realen Leistungsbeiwert c_p und vergleichen Sie ihn mit dem BETZ'schen Maximalwert (Luftdichte von $\rho = 1,16 \text{ kg/m}^3$).
- Ermitteln Sie für einen einzigen Messpunkt des realen Leistungsbeiwerts c_p die maximale Unsicherheit. Typischerweise sind die Unsicherheiten in der vorliegenden Messanordnung für die wesentlichen Einflussgrößen
 - $\Delta\rho = \pm 0,01 \text{ kg/m}^3$
 - $\Delta c_1 = \pm 0,5 \text{ m/s}$
 - $\Delta P = \pm 5 \text{ W}$

Hinweis: Ist ein Messergebnis y eine Funktion mehrerer Einflussgrößen, gilt also $y = f(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_k)$, so ist die maximale Unsicherheit Δy_{\max} gegeben durch:

$$\Delta y_{\max} = \pm \sum_{j=1}^k \left| \frac{\partial f}{\partial x_j} \Delta x_j \right|$$

Dabei sind Δx_j die Unsicherheiten der einzelnen Einflussgrößen.

5. Versuchsbericht

Der abzugebende Versuchsbericht ist wie folgt zu gliedern:

1. Versuchsbeschreibung
 - 1.1 Beschreibung der Versuchswindturbine und Messtechnik
 - 1.2 Beantwortung der unter 4.1 gestellten Fragen
2. Auswertung
 - 2.1 Zusammenstellung der für die Auswertung entscheidenden Beziehungen
 - 2.2 Drei Diagramme gemäß Aufgabe 4.2a) und b).
 - 2.3 Leistungsbeiwert c_p und Ertrag in Eurocent.
 - 2.4 Berechnung der Unsicherheit bei der Ermittlung des realen Leistungsbeiwerts c_p der Turbine.
3. Diskussion der Ergebnisse (Versuchen Sie, die Anlaufwindgeschwindigkeit der Turbine aus den Messdaten abzuleiten; Vergleich des berechneten und theoretischen Leistungsbeiwerts, Unsicherheitsbetrachtung, usw.)

Der Versuchsbericht muss selbständig angefertigt werden. Er kann im Kasten vor dem Labor PB-D 0102 oder im Raum PB-A 101 abgegeben werden. Der Stand über die Anerkennung des Berichts wird online unter <http://www.uni-siegen.de/fb11/iftsm/aktuelles/> bekannt gegeben.

6. Literatur

- 1 Carolus, Th.: Turbomaschinen und Turboantriebe. Skript zur gleichnamigen Vorlesung an der Universität Siegen, 2010
- 2 Gasch, R., Tvele, J.: Windkraftanlagen. 6. Auflage, Vieweg+Teubner 2010