

Maschinenlabor: Versuch V3

Untersuchung einer Strömungsmaschine

hier: Leistungsanalyse einer Kleinwindturbine



Bearbeiter:

Name: Vorname: Gruppe:

Matr. Nr.:

Laborversuch durchgeführt am:
(Datum)

.....
(Unterschrift Betreuer)

Endtestat:
(Datum)

.....
(Unterschrift Betreuer)

Wichtig:

Treffpunkt im Treppenhaus vor Raum PB-A 406!

1. Ziel des Laborversuchs und Vorbereitung der Teilnehmer auf die Versuchsvorbereitung

1.1 Ziel

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.

1.2 Versuchsvorbereitung

Von den Versuchsteilnehmern wird erwartet, dass sie sich *vor der Versuchsdurchführung* mit den theoretischen Grundlagen des Versuchs (Kapitel 2), dem Aufbau und Funktionsweise der zu untersuchenden Windturbine (Kapitel 3) und der Aufgabenstellung vertraut machen (Kapitel 4). Die Teilnehmer müssen in der Lage sein, Fragen zum gesamten Inhalt dieses Skriptes beantworten zu können. Die Aufgaben aus Kapitel 4.1 sind *vor* der Versuchsdurchführung zu lösen. Es wird zudem erwartet, dass die Versuchsteilnehmer mit dem Versuchsablauf und der durchzuführenden Auswertung vertraut sind (Kapitel 4.2).

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). In **Bild 1** ist eine Windturbine mit horizontaler Achse schematisch dargestellt, wie sie heute oft eingesetzt wird.

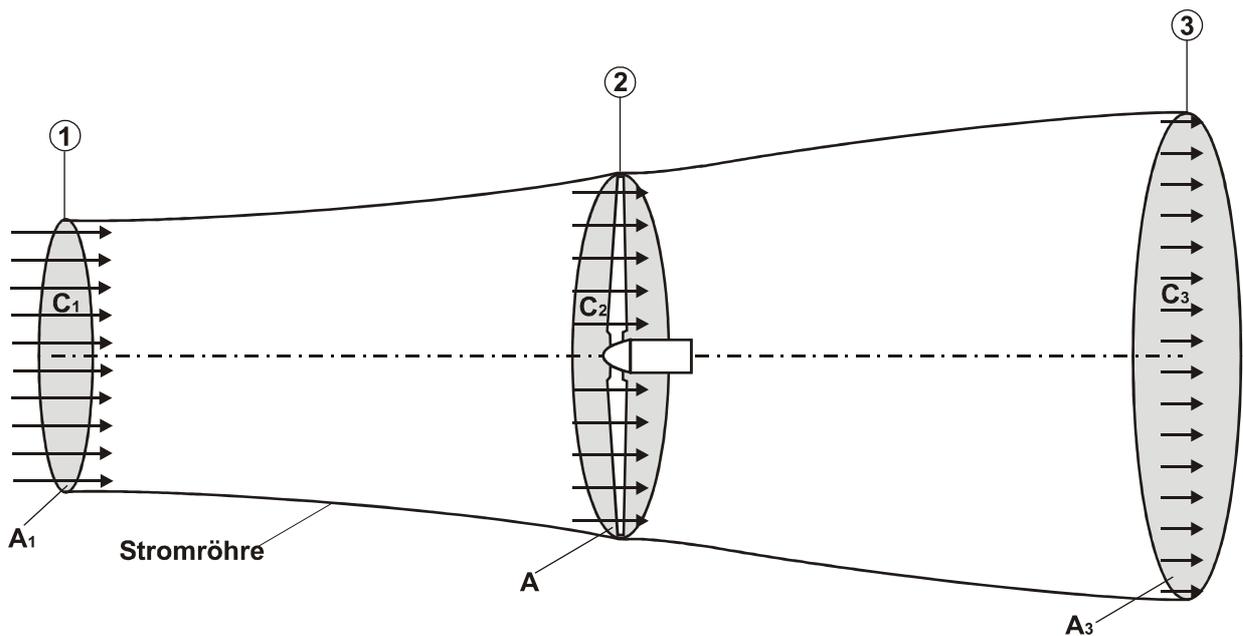


Bild 1 Verzögerung der Strömungsgeschwindigkeit durch eine Windturbine mit horizontaler Achse

Der Wind, welcher mit der Windgeschwindigkeit c_1 durch eine *gedachte* kreisförmige Fläche A strömt, verfügt über die Leistung

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

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

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

In einer Windturbine wird der ankommende Wind mit seiner Geschwindigkeit c_1 auf c_3 abgebremst. Innerhalb der in **Bild 1** dargestellten *Stromröhre* gilt Massenerhaltung ($\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3$ - „Was vorne hereinströmt, muss auch hinten wieder heraus!“), so dass sich die durchströmte Fläche mit abnehmender Strömungsgeschwindigkeit aufweiten muss (vgl. **Bild 1**). Die dem Wind durch die Turbine entzogene Leistung, ergibt sich dann aus der Differenz der Leistungsangebote des Windes an *Punkt 1* und *Punkt 3*

$$P_w = \frac{1}{2} \dot{m} (c_1^2 - c_3^2). \quad (3)$$

Wie der Gl. (3) zu entnehmen ist, wird dem Wind keine Leistung entzogen, wenn die Strömung nicht verzögert wird ($c_3 = c_1$). Eine Leistungsaufnahme bei maximaler Verzögerung auf $c_3 = 0$ m/s ist auch nicht möglich, da dies die Strömung durch die durchströmte Fläche zum Erliegen bringen würde ($\dot{m} = 0$). BETZ konnte mit seiner Windturbinentheorie zeigen, dass die optimale Verzögerung des Windes c_3/c_1 durch eine *ideale* Windturbine gerade 0,33 beträgt und dabei dann knapp 60% des *Windleistungsangebots* in Leistung an der Welle des Turbinenrotors $P_{w,ideal}$ umgesetzt werden können. Das Verhältnis $P_{w,ideal}/P_{Wind}$ bezeichnet man als den idealen Leistungsbeiwert $C_{P,ideal}$.

Aufgrund von Verlusten in der Strömung ist der reale Leistungsbeiwert $C_P < C_{P,ideal}$. Darüber hinaus kann man meist nicht die Leistung direkt an der Welle des Turbinenrotors messen sondern nur am Generator mit seinem elektrischen Wirkungsgrad $\eta_{el} < 100\%$, so dass gilt

$$P_{el} = \eta_{el} C_P \frac{1}{2} \rho A c_1^3 \quad (4)$$

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

Der elektrische Leistungsbeiwert ist dann

$$C_{P,el} \equiv \eta_{el} C_P = \frac{P_{el}}{\frac{1}{2} \rho A c_1^3}. \quad (5)$$

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:

- (a) Bereits relativ kleine Unterschiede im Windangebot können über die Wirtschaftlichkeit einer Windturbine entscheiden.
- (b) 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. Dies ist ein System zur *passiven Windnachführung*, da der Rotor nicht durch einen zusätzlichen Antrieb ausgerichtet wird (*aktive Windnachführung*). 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 Windmessmasten (Schalenkreuzwindmessern) 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 verdoppeln würde?
- Wie groß muss etwa der Rotordurchmesser werden, wenn man 5 MW elektrische Nennleistung bei 12 m/s Windgeschwindigkeit erzielen will? (Nehmen Sie für den realen Leistungsbeiwert c_p den Wert 0,5 und für den Generatorwirkungsgrad η_{el} eine Wert zwischen 75% und 90% an.)

4.2 Versuchsdurchführung und Auswertung.

Im Messprotokoll, das während des Versuchs ausgegeben wird, sind Daten der Wetterstationen (Windgeschwindigkeit und Windrichtung), Leistungsdaten der Anlage (elektrische Leistung) sowie gemessene Anlagengrößen (z.B. Drehzahl) enthalten. Innerhalb der aufgezeichneten Messperiode von 24 Stunden wurden diese Daten mit einer Abtastfrequenz von 1 Hz erfasst.

Wichtig: Die Werte sind Durchschnittswerte, die aus einer zeitlichen Mittelung über eine Sekunde entstanden sind, d.h. man muss davon ausgehen, dass jeder der abgespeicherten Werte für genau eine Sekunde 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 hätten wir innerhalb der kompletten Messperiode erwirtschaftet, wenn man 1 kWh Strom zu 20 Eurocent verkaufen könnte?
- Berechnen Sie die elektrischen Leistungsbeiwerte $C_{p,el}$ zu jedem Messzeitpunkt und plotten Sie diese über die gesamte Messperiode. Berechnen sie daraus einen zeitlichen Mittelwert von $C_{p,el}$. Zeichnen sie diesen Mittelwert und den BETZ'schen Maximalwert in das Diagramm und diskutieren Sie das Ergebnis (Luftdichte von $\rho = 1,16 \text{ kg/m}^3$).
- Ermitteln Sie für einen einzigen Messpunkt des elektrischen Leistungsbeiwerts $C_{p,el}$ die maximale Unsicherheit. Typischerweise sind die Unsicherheiten in der vorliegenden Messanordnung für die wesentlichen Einflussgrößen
 - $\Delta\rho = \pm 0,01 \text{ kg/m}^3$
 - $\Delta c_1 = \pm 0,5 \text{ m/s}$
 - $\Delta P_{el} = \pm 5 \text{ W}$

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. Literatur

- 1 Carolus, Th.: Turbomaschinen und Turboantriebe. Skript zur gleichnamigen Vorlesung an der Universität Siegen, 2013
- 2 Gasch, R., Tvele, J.: Windkraftanlagen. 6. Auflage, Vieweg+Teubner 2010