

Wie baue ich einen Energiespender mit einem 200-Liter-Ölfass ohne Öl (Savonius-Windgenerator)

meiner Tochter Claudia gewidmet am 19. August 2008

von Manuel Franquesa Voneschen¹

Inhalt

1. Einführung	1
2. Einige Worte über die Windenergie im allgemeinen	2
2.1 Herr Betz, die Windenergie und die Leistung eines Windrades	2
2.2 Die Drehzahl eines Windrotors	3
3. Bau eines Savonius-Generators	4
3.1 Allgemeines	4
3.2 Beschreibung	5
3.3 Leistung eines Savonius-Generators	6
3.4 Übersetzungsverhältnis zwischen Savoniusrotor und Alternator	7
3.5 Elektrisches System	11
3.6 Schlusswort	12

1. Einführung

“Denke global, handle lokal”

Früher oder später werden uns die globale Erwärmung und die Ölknappheit (oder die hohen Ölpreise) zwingen, nach bescheideneren und deshalb respektvolleren Energien zu suchen.

Diese Kurzanleitung wird Dir eine Idee geben, wie man mit einem 200-Liter-Ölfass (oder zwei) einen "kleinen" Windgenerator bauen kann.

Diese einfache Windmaschine heisst “Savonius-Generator” zu Ehren seines Erfinders.

Ihre Leistung ist ziemlich bescheiden, aber sie ist schön, billig und relativ einfach zu bauen. Ein anderer grosser Vorteil besteht darin, dass die Windrichtung keine Rolle spielt.

Aber **Achtung**: wie jede sich drehende Maschine, kann ein Windgenerator gefährlich sein!

Man muss SEHR ROBUSTE Teile verwenden!

¹ Autor de “Kleine Windräder : Berechnung u. Konstruktion” - Wiesbaden ; Berlin : Bauverlag, 1989. ISBN 3-7625-2700-8. **Der autor kann via Facebook kontaktiert werden.**

2. Einige Worte über die Windenergie im allgemeinen

2.1 Herr Betz, die Windenergie und die Leistung eines Windrades

Die **maximale Leistung**, die wir mit einer idealen Maschine dem Wind entziehen können, beträgt (wenn wir alle Verluste vernachlässigen):

$$P = 0,29 \cdot D^2 \cdot v^3$$

- **P** ist die Leistung in Watt [**W**]
- **D** ist der Durchmesser des Windrades in meter [**m**]
- **v** ist die Windgeschwindigkeit in meter pro sekunde [**m/s**].

Diese einfache Formel ist ein Kind von Herrn **Betz**², ein deutscher Gelehrter, der 1926 als Erster die theoretischen Grundlagen der Windmaschinen veröffentlicht hat. Deshalb nennt man diese Formel auch **Grenzwert von Betz**.

Wir sehen, dass die Leistung mit der dritten Potens der Windgeschwindigkeit zunimmt. d.h. **je mehr** Wind, desto **viel mehr** Leistung.

Leider wird es in der Praxis nicht möglich sein, den Grenzwert von Betz zu erreichen, weil alle Bestandteile einer Windmaschine entweder aerodynamische oder mechanischen Verluste aufweisen (der Rotor, die Lager, die Übersetzung (bzw. Untersetzung), der Generator, die Kabel, die Batterie um die Energie zu speichern usw.).

Um die maximale Energie einer Windmaschine zu **schätzen**, kann man folgende Formel benutzen (Gesamtwirkungsgrad der Anlage ca. 50%):

$$P = 0,15 \cdot D^2 \cdot v^3$$

Beispiel:

¿Wieviel beträgt die maximale Leistung eines Winrades mit einem Durchmesser von 6 m?

Bei einer Windgeschwindigkeit von 10 m/s (= 36 km/h), beträgt die Leistung:
 $P = 0,15 \cdot 36 \cdot 10^3 = 5400 \text{ [W]} = \mathbf{5,40 \text{ [kW]}}$ (1 kW = 1000 W)

Verdoppelt sich die Windgeschwindigkeit auf 20 m/s (= 72 km/h), dann erhalten wir **acht mal mehr** Leistung (**2³**):

$$P = 0,15 \cdot 36 \cdot 20^3 = 43200 \text{ [W]} = \mathbf{43,20 \text{ [kW]}}$$

² Siehe die gescannte Originalausgabe des Buches von Albert Betz "**Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen**" in www.amics21.com/laveritat/albert_betz_wind_energie.pdf

2.2 Die Drehzahl eines Windrotors

Die Drehzahl eines Windrotors wird mit folgender Formel berechnet:

$$n = (60 \cdot \lambda \cdot v) / (\pi \cdot D)$$

- n ist die Drehzahl in **Umdrehungen pro minute [U/min] oder [rpm]**
- Der Faktor λ nennt man **Schnellaufzahl** des Windrotors. Sie ist von der Breite und dem Anstellwinkel der Flügel abhängig. In der Praxis kann sie Werte zwischen ca. 0,8 und 14 annehmen. Ein Savonius-Windrotor hat eine Schnellaufzahl zwischen 0,9 und 1,1.
- v ist die Windgeschwindigkeit in **meter pro sekunde [m/s]**.
- D ist der Durchmesser des Windrotors in **meter [m]**

Die Schnellaufzahl λ wird folgendermassen definiert:

$$\lambda = u_o/v$$

u_o ist die (tangentele) Geschwindigkeit der Flügelspitzen und v die Windgeschwindigkeit (Fig. 2.2.-1).

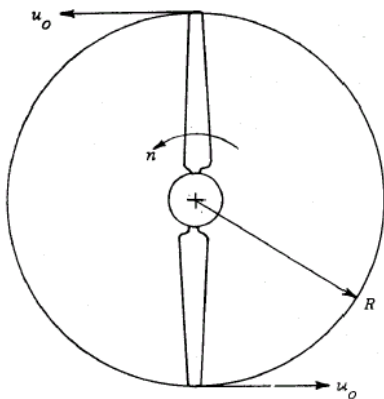


Fig. 2.2.-1 Zur Definition der Geschwindigkeit u_o der Flügelspitzen

Grössenordnung der Geschwindigkeit u_o :

Ein moderner Windgenerator mit einem Durchmesser von 20 m hat eine Schnellaufzahl $\lambda = \text{ca. } 8$.

Berechnen wir seine Drehzahl bei einem Wind der Geschwindigkeit $v = 10 \text{ m/s}$ (= 36 km/h):

$$n = (60 \cdot 8 \cdot 10) / (\pi \cdot 20) = 76,4 \text{ rpm}$$

Das scheint nicht viel, aber die Flügelspitzen drehen mit einer Geschwindigkeit von **288 km/h!** Das macht viel Lärm und stellt eine Gefahr für die Vögel dar.

3. Bau eines Savonius-Generators

3.1 Allgemeines

Folgende Figur zeigt schematisch den Aufbau einer Savonius-Maschine:

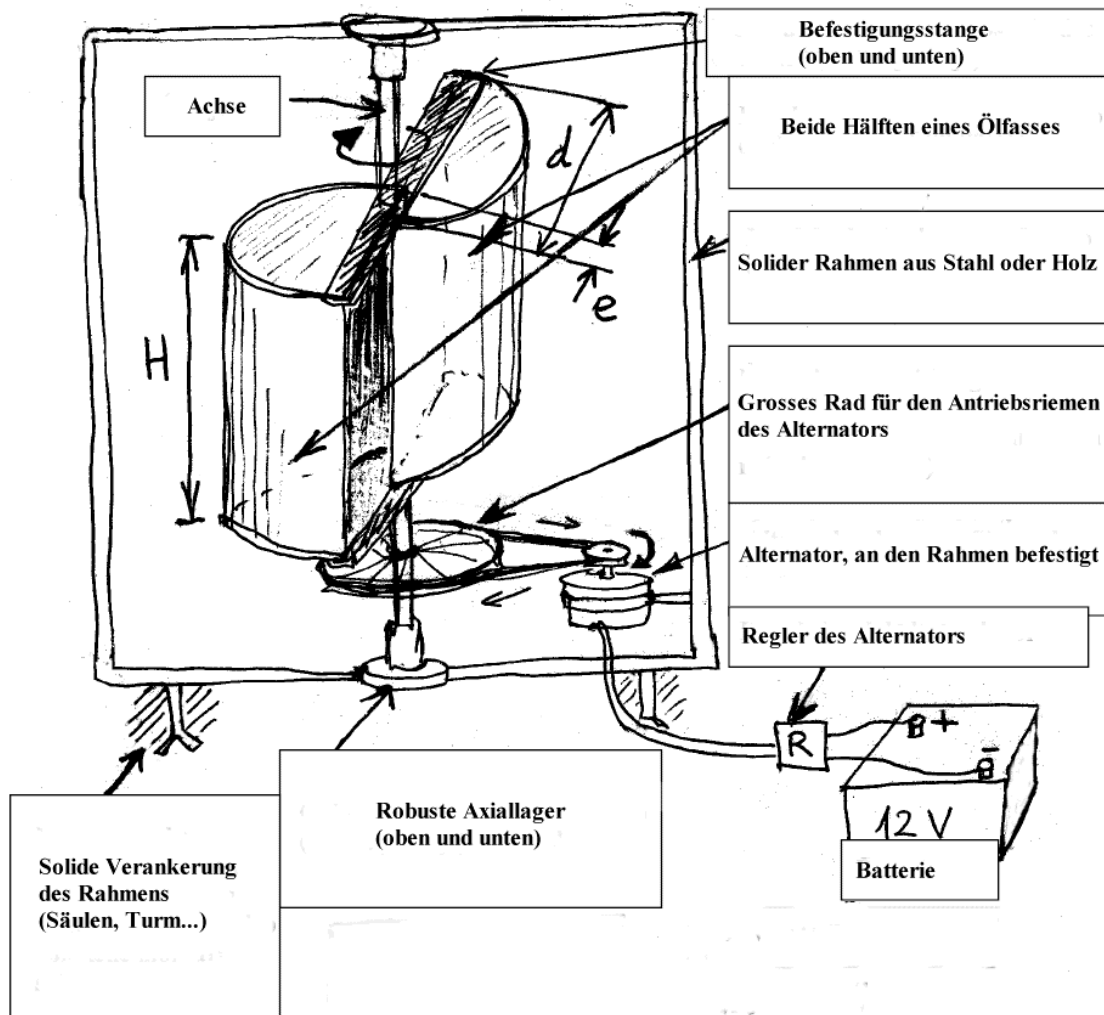


Fig. 3.1-1 Prinzip eines Savonius Windgenerators

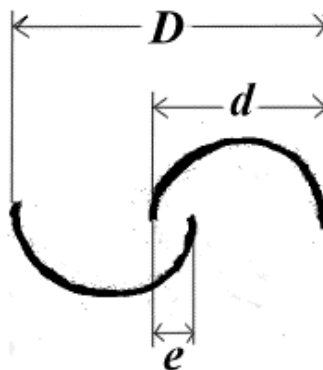


Fig. 3.1-2 Zur Definition der Grössen D , d und e

3.2 Beschreibung

Der Rotor besteht aus den zwei Hälften eines 200 Liter-Ölfasses, oben und unten verbunden mit Flachprofilen o.ä., welche seinerseits an die vertikale Achse geschweisst sind. Da der Wind einen erheblichen Druck auf den Rotor ausübt, sollte die Achse oben und unten robuste Axiallager aufweisen. Der Rahmen sollte nicht auf eine Mauer montiert werden, da diese den freien Fluss des Windes hemmt und Turbulenzen erzeugt.

Die beiden Fasshälften sollten versetzt montiert werden ("Spalt" e in Fig. 3.1-2). Dies erhöht die Leistung des Rotors erheblich. Für ein Standard-Fass (Höhe $H = \text{ca. } 90 \text{ cm}$, Durchmesser $d = \text{ca. } 57 \text{ cm}$), sollte dieser Spalt $\text{ca. } 10 \text{ cm}$ betragen. (Für andere Savoniusrotoren gilt $e_{\text{opt}} = d/6$)

Bemerkung: Suche im Internet nach Bilder und Videos von Savonius-Windgeneratoren. Das kann eine wichtige Inspirationsquelle sein!
Beispiel:

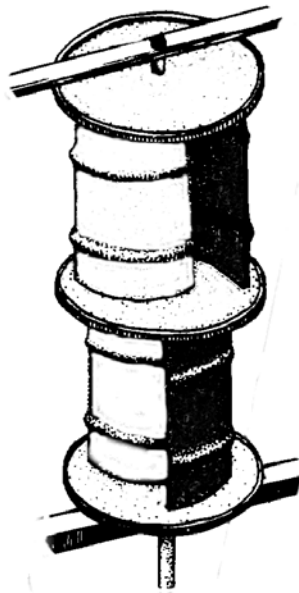


Fig. 3.2 Savonius-Generator mit zwei Fässern
(= doppelte Leistung = gleiche Drehzahl)
(Bemerkung: Rotoren versetzt montieren → erleichtert den Start)

3.3 Leistung eines Savonius-Generators

Gemäss Messungen in einem Windkanal³, beträgt die maximale Leistung eines Ein-Fass-Savoniusrotors:

$$P_{max} = 0,18 \cdot H \cdot D \cdot v^3 \text{ [W]}$$

wo v die Windgeschwindigkeit in [m/s], H die Höhe [m] und D der Durchmesser [m] des Savonius-Rotors bedeuten.

Unter Berücksichtigung der Verluste der durch den Rotor angetriebenen Elemente (z.B. Übertragungssystem ca. 90%, Alternator ca. 50%), muss die maximale Leistung eines **1-Fass-Savonius-Windgenerators** mit folgender Formel abgeschätzt werden ($H \cdot D = 0,94 \text{ m}^2$):

$$P_{max} = 0,12 \cdot v^3 \text{ [W]}$$

Beispiel: Bei einer Windgeschwindigkeit von 10 m/s (= 36 km/h) wird unser 1 Fass-Savonius-Windgenerator eine **maximale Leistung von ca. 120 W** liefern.

Folgende Tabelle zeigt die ungefähre Leistung und die optimale Drehzahl (in Umdrehungen pro Minute [U/min]) eines Savonius-Windgenerators:

Windgeschwindigkeit [m/s]	Leistung [W]	optimale Drehzahl [U/min]
5 (= 18 km/h)	15	75
7 (= 25,2 km/h)	41	105
10 (= 36 km/h)	120	150
12 (= 43,2 km/h)	207	180
14 (= 50,4 km/h)	330	210
16 (= 57,6 km/h)	491	240
20 (= 72 km/h)	960	300

Maximale Leistung eines Savoniusrotors mit einem oder zwei 200-Liter-Fässern für verschiedene Windgeschwindigkeiten

Folgende Figur stellt die Kennlinien eines Savonius-Rotors in Funktion seiner Drehzahl für vier verschiedene Windgeschwindigkeiten (8, 10, 12 y 14 m/s) dar. Die oberen Kennlinien entsprechen der Leistung und die unteren dem Drehmoment.

³ Le Gourières, D.: Énergie Eolienne. Théorie, conception et calcul pratique des installations. Paris, Editions Eyrolles, 1980

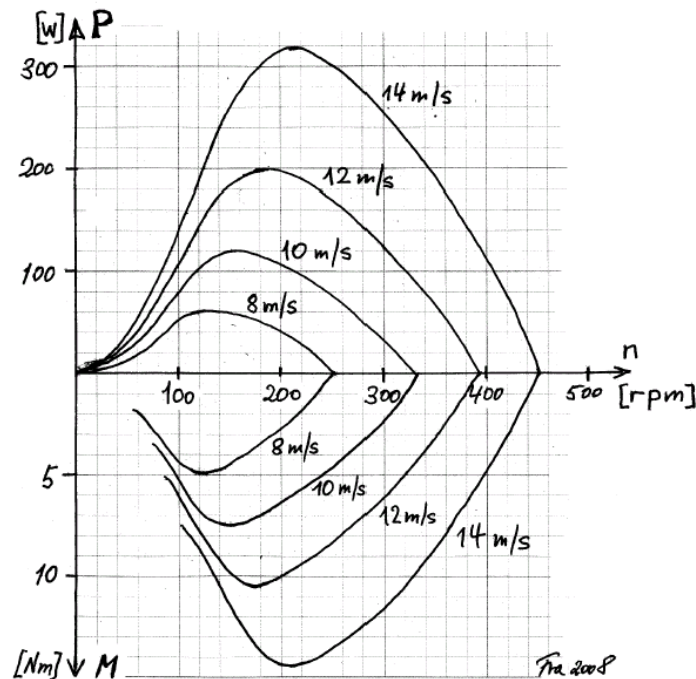


Fig. 3.3-1 Leistungs – und Drehmomentkennlinien eines 1-Fass-Savoniusrotors

3.4 Übersetzungsverhältnis zwischen Savoniusrotor und Alternator

Es muss hier erwähnt werden, dass die Wahl eines Automobilalternators keine gute Wahl für eine Windmaschine ist. Der Wirkungsgrad dieser Maschinen ist meistens miserabel: kaum über 50%. Aber wenn wir uns mit einem schlechten Wirkungsgrad unseres Savonius-Windgenerators begnügen, können wir mit einem solchen Alternator beginnen, denn diese Maschinen sind billig und jederzeit bei einem Schrotthändler verfügbar.

Damit ein Automobilalternator Strom zu liefern beginnt, braucht er eine ziemlich hohe Drehzahl (mindestens ca. 750 U/min). Wie wir oben gesehen haben, hat der Savoniusrotor eine merklich tiefere Drehzahl, sodass wir eine Untersetzung einbauen müssen.

Fig. 3.4-1 zeigt die typische Stromkurve eines Automobilalternators.

Wir sehen, dass dieser Alternator erst ab einer Drehzahl von ca. 750 U/min anfängt Strom zu liefern. Bei ca. 1250 U/min liefert er ca. 27 A.

Unter einer Ladespannung von 14 V und einem Strom von 27 A, beträgt die vom Alternator gelieferte Leistung ca. $14 \text{ V} \cdot 27 \text{ A} = 378 \text{ W}$.

Wir sehen, dass zwischen 750 y 1250 U/min der Strom praktisch linear ansteigt und somit auch seine Leistung (Fig. 3.4-2).

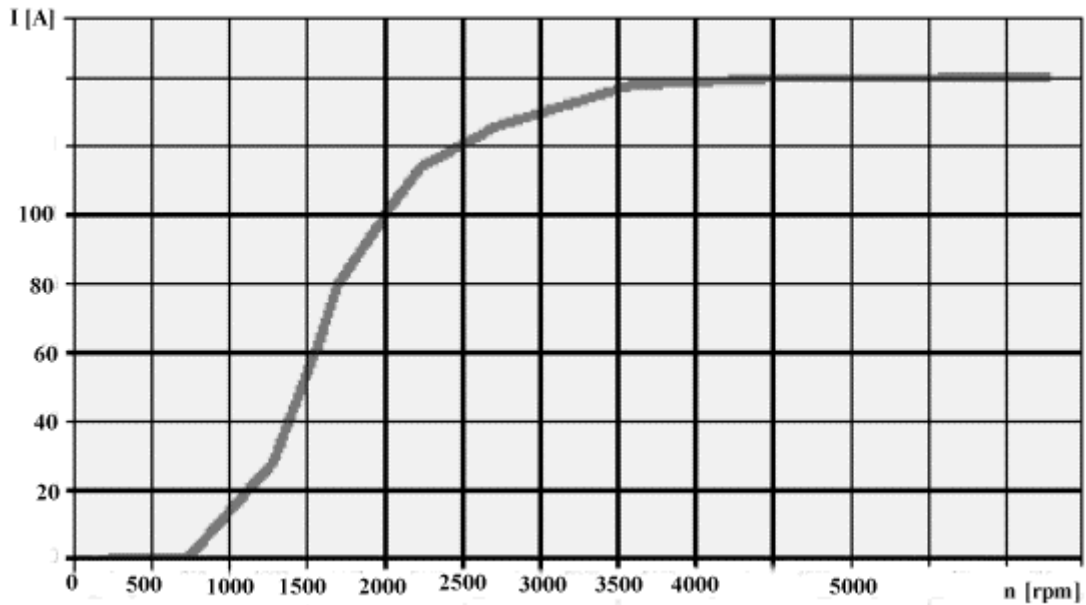


Fig. 3.4-1 Stromkurve eines typischen Automobilalternators

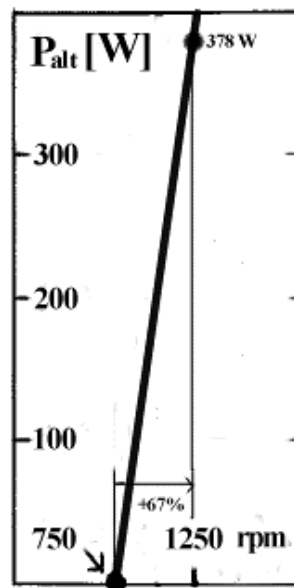


Fig. 3.4-2 Leistungskurve des Alternators zwischen 750 und 1250 U/min

Tragen wir jetzt die Leistungskurve des Alternators in die Leistungskurvenschar des Savoniusrotors (Fig. 3.3-1) ein (mit der korrekten Steigung!) und zwar so, dass sie die Leistungskurven des Savoniusrotors möglichst nahe ihren entsprechenden Maxima schneidet.

In der Variante "1" von Fig. 3.4-3 schneidet die Leistungskurve des Alternators die 8 m/s – Kurve des Rotors an ihrem höchsten Punkt (Maximum), aber für die anderen Windgeschwindigkeiten entfernt sie sich erheblich von den entsprechenden Maxima.

Die Variante "2" ist besser, da sie näher an die entsprechenden Maxima verläuft.

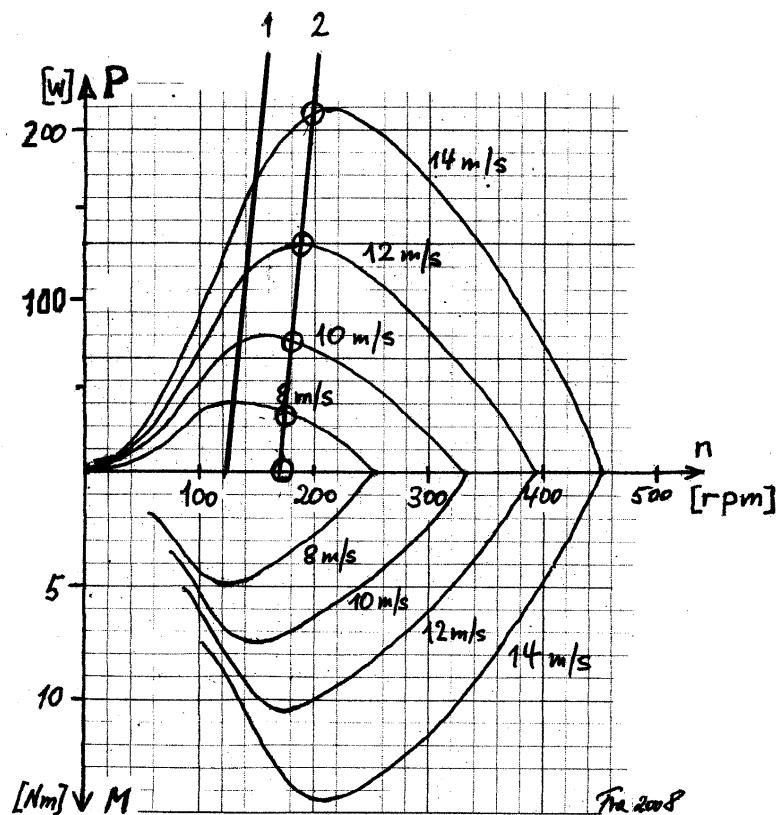


Fig. 3.4-3 Übertragung der Leistungskurve des Alternators in die Leistungskennlinienschar des 1-Fass-Savoniusrotors

Das entsprechende Übersetzungsverhältnis wird folgendermassen bestimmt: Die Gerade "2" schneidet die horizontale Achse bei 170 U/min, was einer Drehzahl des Alternators von 750 U/min entspricht. Das entsprechende Übersetzungsverhältnis ist somit:

$$k = 750 : 170 = 4,4$$

Allgemein:

Um das Übersetzungsverhältnis eines beliebigen Alternators (oder eines Gleichstromgenerators) zu schätzen, müssen wir zwei Arbeitspunkte seiner Stromkurve kennen:

- n_0 = Drehzahl wo die Maschine anfängt Strom zu liefern, und als zweiter Punkt zum Beispiel
- n_{15} = Drehzahl wo die Maschine ca. 15 A liefert.

Mit diesen zwei Arbeitspunkten können wir die (ungefähre) Leistungskurve (Gerade) der Maschine zeichnen, so wie wir in Fig. 3.4-2 gemacht haben.

Wenn wir nur den Wert n_0 kennen, können wir einen ersten Versuch mit folgendem Übersetzungsverhältnis machen:

$$k = n_0 : 170$$

Für $n_0 = 1000 \text{ U/min}$ wäre das Übersetzungsverhältnis $k = 1000 : 170 = 5,9$

Um den Durchmesser des Antriebsrades des Savoniusrotors zu bestimmen (grosses Rad, Fig. 3.1-1), müssen wir den Durchmesser des Antriebsrades des Alternators mit dem geschätzten Übertragungsverhältnis k multiplizieren:

$$\text{Durchmesser des grossen Rades} = k \cdot \text{Durchmesser des Antriebsrades des Alternators}$$

Bemerkung: Der optimale Durchmesser muss sowieso durch probieren gefunden werden ("trial and error method"). Die Motoren von Tischbohrmaschinen haben ein mehrstufiges Antriebsrad mit verschiedenen Durchmessern. Dies erlaubt die optimale Drehzahl des Alternators schneller den Verhältnissen anzupassen. Man muss eine Möglichkeit vorsehen um den Alternator heben und senken und den Riemen spannen zu können nachdem man einen anderen Durchmesser gewählt hat.

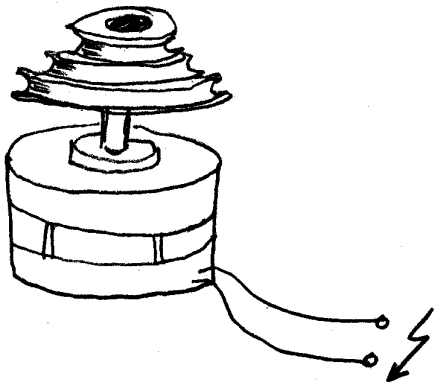


Fig. 3.4-4 Alternador mit mehrstufigem Antriebsrad

Falls wir einen Savoniusrotor mit zwei Fässern bauen wollen, können wir genau gleich vorgehen wie oben erwähnt, nur dass sich die Leistungs- und Drehmomentkurvenscharen des Rotors verdoppelt haben (Fig. 3.4-5).

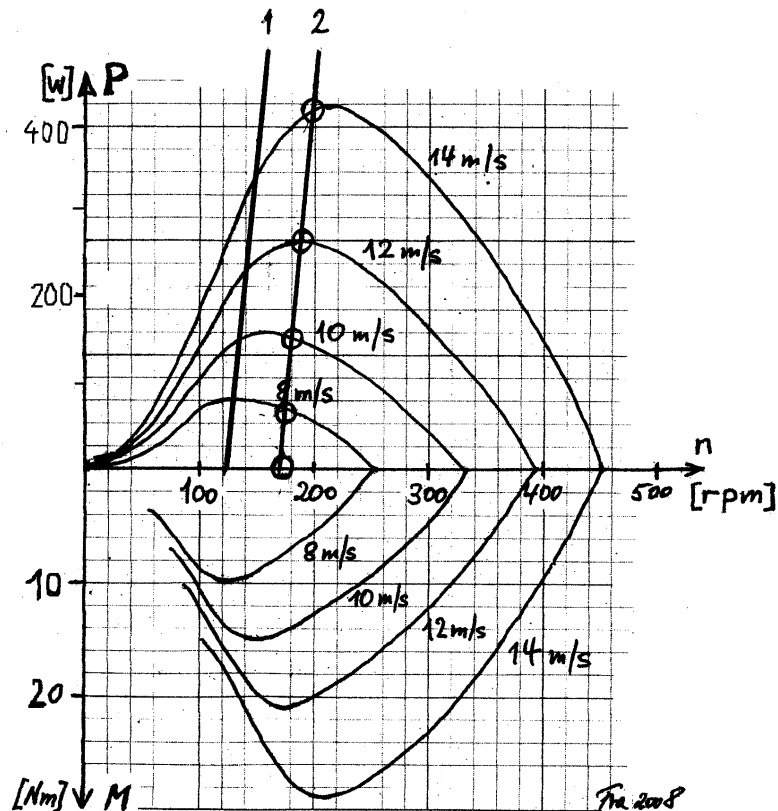


Fig. 3.4-5 Leistungs- und Drehmomentkennlinien eines zwei-Fass-Savoniusrotors (s. Fig. 3.2)

3.5 Elektrisches System

Darüber werden wir nicht viel sagen. **Sucht Rat bei einem guten Autoelektriker.** Es ist wichtig, den Alternator mit seinem entsprechenden **Regler** zu montieren. Dieser Regler verhindert, dass die Spannung zu hoch wird, begrenzt den Ladestrom und schaltet die Batterie aus wenn diese vollgeladen ist.

Es ist empfehlenswert, ein Alternator eines kleineren Autos oder eines Motorrades zu benutzen, da unser einfache Savonius-Windgenerator nicht mehr als 10 – 15A Nettostrom liefern wird.

Wichtige Bemerkung

Wenn der Savonius-Windgenerator sehr weit vom Haus entfernt steht, muss man sich im klaren sein, dass man sehr dicke Kabel benötigt, um Strom mit 12V zu transportieren, ansonsten stehen im Haus nur noch ein paar Volt zur Verfügung.

3.6 Schlusswort

Ich muss leider zugeben, dass ich persönlich nie einen Savonius-Generator gebaut habe. Was ich euch hier vorgeschlagen habe ist rein theoretisches Gedankengut.

Trotzdem bin ich davon überzeugt, dass ich das Ziel nicht weit verfehlt habe. Im schlimmsten Falle, d.h., wenn der gute Savonius euch nicht genug Strom liefern sollte, könnt ihr einfach ein Fass dazugeben. Auf diese Weise werdet ihr die dritte Zeile eines alten chinesischen Sprichwortes (Kunfuzius?) schneller erreichen, das besagt:

„Was ich höre, vergesse ich;
was ich sehe, erinnere ich;
was ich tue, verstehe ich.“

Oder, auf Deutsch:

“Die Übung macht den Meister”

Ich wünsche Euch viel Gesundheit, Humor und Wind!



Savonius-Ying-Yang

Diese Anleitung gibt es auch auf Spanisch, Englisch und Französisch:

http://www.amics21.com/laveritat/generador_savonius.pdf

www.amics21.com/laveritat/savonius_generator_english.pdf

www.amics21.com/laveritat/aerogenerateur_savonius_francais.pdf

Ihr könnt auch unsere bescheidene Anleitung zum Bau eines Windrades mit horizontaler Achse und Flügeln aus gebogenem Blech in folgender Web finden:

www.amics21.com/laveritat/windgenerator_anleitung.pdf