



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Vincent Kanitz

Entwicklung eines H-Rotorfunktionsmodells und Vermessung der Anlageneigenschaften zum Vergleich mit der klassischen Dreiblatt- Windenergieanlage

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Vincent Kanitz

**Entwicklung eines H-Rotorfunktions-
modells und Vermessung der
Anlageneigenschaften zum Vergleich mit
der klassischen Dreiblatt-
Windenergieanlage**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau/Energie- und Anlagensysteme
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Birgit Koeppen
Zweitprüfer/in : Prof. Dr. Thomas Veese

Abgabedatum: 16. März 2016

Zusammenfassung

Vincent Kanitz

Thema der Bachelorthesis

Entwicklung eines H-Rotorfunktionsmodells und Vermessung der Anlageneigenschaften zum Vergleich mit der klassischen Dreiblatt-Windenergieanlage

Stichworte

3D-Druck, Aerodynamik von Windkraftanlagen, H-Rotor, Vertikalwindkraftanlage

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung des H-Rotors. Es wird zunächst auf die physikalischen Grundlagen der Windenergienutzung eingegangen und anschließend ein H-Rotormodell ausgelegt. Der H-Rotor wird mit einem CAD-System konstruiert und mit dem 3D-Druckverfahren gefertigt. Des Weiteren werden die Anlageneigenschaften und Anlagenkennlinien vermessen und mit der klassischen Dreiblatt-Windenergieanlage verglichen.

Vincent Kanitz

Title of the paper

Design of a functional model for an H-rotor and measurement of the system properties for comparison with the classical three-bladed wind turbine

Keywords

3D printing, aerodynamics of wind turbines, H-rotor, vertical wind turbine

Abstract

This paper deals with the design of an H-rotor used in wind turbines. While the first part of the paper discusses the physical fundamentals of the utilization of wind energy, a model for an H-rotor will be designed in the second part. The H-rotor will thereby be constructed using a CAD-system and manufactured in a 3D printing process. Furthermore, the system properties and the system characteristic curve will be measured in order to compare it to the classical three-bladed wind turbine.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	v
Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen	vi
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Ziele der Arbeit.....	1
1.3 Aufbau der Arbeit	2
2 Physikalische Grundlagen.....	3
2.1 Die Impulstheorie nach Betz.....	3
2.2 Aerodynamik	6
2.2.1 Widerstandsprinzip.....	7
2.2.2 Auftriebsprinzip	8
2.3 Konstruktive Eigenschaften	10
2.3.1 Horizontalachsen-Rotoren.....	10
2.3.2 Vertikalachsen-Rotoren.....	12
3 Berechnung und Auslegung.....	16
3.1 Grundlage Experimentierkoffer.....	16
3.2 Rotorgröße.....	17
3.3 Rotorblatt	19
3.3.1 Rotorblattanzahl.....	19
3.3.2 Rotorblatttiefe.....	20
3.3.3 Profilauswahl.....	21
3.4 Rotorachse und Tragarme.....	22
3.4.1 Tragarme	23
3.4.2 Rotorachse.....	24
4 Konstruktion und Fertigung	25
4.1 CAD-Konstruktion	25
4.1.1 Konstruktion des Rotorblattes	25
4.1.2 Konstruktion der Tragarme und der Rotorachse.....	26

4.2	3D-Druck.....	27
5	Versuch.....	29
5.1	Vermessung des H-Rotors	29
5.1.1	H-Rotor (Savonius-Generator)	29
5.1.2	H-Rotor (Gleichstrommotor)	32
5.1.3	H-Rotor (beidseitig)	35
5.2	Dreiblattrotor	37
5.3	Savonius-Rotor	39
5.4	Vergleich der Messergebnisse	40
6	Ursache der Funktionsunfähigkeit.....	42
7	Fazit und Ausblick.....	43
	Literaturverzeichnis	vi
	Anhang.....	vii
A	Messdaten H-Rotor (Gleichstrommotor)	viii
B	Messdaten H-Rotor (beidseitig)	x
C	Messdaten Dreiblattrotor.....	xiii
D	Messdaten Savonius-Rotor.....	xiv
E	CD-ROM.....	xv

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Strömungsverhältnisse eines Energiewandlers beim Entzug mechanischer Leistung ([6], S. 82)	4
Abbildung 2-2: Verlauf des Leistungsbeiwertes über dem Geschwindigkeitsverhältnis v_2/v_1 ([6], S. 84)	6
Abbildung 2-3: Strömungsverhältnisse bei einem Widerstandsläufer ([6], S. 87)	7
Abbildung 2-4: Luftbewegungen an einem umströmten Rotorblattprofil [2]	8
Abbildung 2-5: Luftkräfte an einem umströmten Rotorblattprofil ([6], S.88)	8
Abbildung 2-6: Leistungsbeiwerte von Windrotoren unterschiedlicher Bauart über der Schnelllaufzahl λ ([6], S. 109)	9
Abbildung 2-7: Klassische Windkraftanlage (Foto Vestas) ([6], S. 72)	10
Abbildung 2-8: Aufbau einer Horizontalanlage ([6], S. 88)	11
Abbildung 2-9: Persische Windmühle ([4], S.17).....	12
Abbildung 2-10: Rotorformen von vertikalen Windkraftanlagen ([6], S.68)	13
Abbildung 2-11: Anströmverhältnisse und Luftkräfte beim H-Rotor ([6], S. 162)	14
Abbildung 3-1: Aufbau des Versuchs.....	16
Abbildung 3-2: Überstrichene Rotorflächen	18
Abbildung 3-3: H-Rotoren mit verschiedener Anzahl an Rotorblättern	19
Abbildung 3-4: Vergleich verschiedener Rotortypen [10]	20
Abbildung 3-5: Vergleich verschiedener Naca-Profile [8].....	21
Abbildung 3-6: Profilquerschnitt.....	22
Abbildung 3-7: Einseitig eingespannter Balken ([5], S.114)	23
Abbildung 4-1: Koordinatenpunkte des Rotorblattprofils	25
Abbildung 4-2: Rotorblattmodell	26
Abbildung 4-3: Tragarmmodell	27
Abbildung 4-4: Rotorachsenmodell.....	27
Abbildung 4-5: H-Rotor in verschiedenen Ansichten.....	28
Abbildung 5-1: Savonius-Rotor als Generator des H-Rotors.....	30
Abbildung 5-2: Versuchsaufbauschema H-Rotor (Savonius-Rotor)	30
Abbildung 5-3: Versuchsaufbauschema H-Rotor (Gleichstrommotor).....	32
Abbildung 5-4: Versuchsaufbau H-Rotor (Gleichstrommotor)	32
Abbildung 5-5: P- λ –Kennlinie H-Rotor (Gleichstrommotor)	35
Abbildung 5-6: Versuchsaufbau H-Rotor (beidseitig)	36
Abbildung 5-7: P- λ -Kennlinie H-Rotoren.....	36
Abbildung 5-8: Versuchsaufbau Dreiblattrotor	37
Abbildung 5-9: Versuchsaufbauschema Dreiblattrotor	37

0 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5-10: P- λ -Kennlinie Dreiblattrotor.....	38
Abbildung 5-11: Versuchsaufbau Savonius-Rotor	39
Abbildung 5-12: P- λ -Kennlinie Savonius-Rotor	39
Abbildung 5-13: Vergleich der P- λ -Kennlinien	40
Abbildung 5-14: Vergleich der c_p - λ -Kennlinien	41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1: Messwerte bei einer Drehzahl von 400U/min..... 34

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Formelzeichen

m	[kg]	Masse
V	[m ³]	Volumen
ρ	[kg/m ³]	Dichte
v	[m/s]	Windgeschwindigkeit
B	-	Anzahl der Rotorblätter
t	[m]	Profiltiefe
F	[N]	Kraft
M	[Nm]	Biegemoment
W	[Nm]	Widerstandsmoment gegen Biegung
E	[J]	Kinetische Energie
A	[m ²]	Rotorfläche
P	[W]	Watt
c_p	-	Leistungsbeiwert
λ	-	Schnelllaufzahl
c_w	-	Luftwiderstandsbeiwert
c_A	-	Auftriebsbeiwert
F_w	[N]	Widerstandskraft
F_A	[N]	Auftriebskraft
σ	[Pa]	Biegespannung
σ	-	Völligkeit
D	[m]	Durchmesser
d	[m]	Profildicke
h	[m]	Höhe
I	[m ⁴]	Flächenträgheitsmoment
b	[m]	Balkenbreite
ω	[rad/s]	Winkelgeschwindigkeit
r	[m]	Rotorradius
n	[1/s]	Drehzahl
u	[m/s]	Umfangsgeschwindigkeit der Blattspitzen
U	[V]	Spannung
I	[A]	Stromstärke
\dot{V}	[m ³ /s]	Volumenstrom
\dot{m}	[kg/s]	Massenstrom

Indizes

<i>HR</i>	H-Rotor
<i>SR</i>	Savonius-Rotor
<i>DR</i>	Dreiblatt-Rotor

Abkürzungen

VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
CAD	Computer Aided Design
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics

1 Einleitung

1.1 Motivation

[1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] Die Bedeutung von erneuerbarer Energie wächst für die heutige Gesellschaft stetig, da die Ressourcen fossiler Energieträger immer weiter zurückgehen. Mit erneuerbaren Energien soll die Kohlenstoffdioxidproduktion der gesamten Energiegewinnung verringert werden und der steigende Energieverbrauch der Gesellschaft gesichert werden. Zusätzlich ist es für viele Länder, die keine großen fossilen Brennstoffvorkommen besitzen, eine wichtige Möglichkeit zur Energiegewinnung. Die Nutzung der Windenergie ist in Deutschland und Westeuropa ein sehr aktuelles Thema. Heutzutage werden fast ausschließlich Windkraftanlagen mit einer horizontalen Drehachse zur Stromgewinnung genutzt. Sie haben gegenüber den Anlagen mit vertikaler Drehachse einen enormen Entwicklungsvorsprung und finden in der Windenergiebranche deutlich mehr Beachtung.

Im Versuchslabor der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW) stehen zurzeit ein klassischer Dreiblattrotor sowie ein Savonius-Rotor für Versuche der Windenergie zur Verfügung. Um die Unterschiede zwischen den verschiedenen Anlagen deutlich machen zu können, soll ein drittes, noch nicht vorhandenes, Versuchsmodell entwickelt werden. Aus diesem Grund wird ein sogenannter H-Rotor mit vertikaler Drehachse entwickelt, der am Ende als Vergleichsmodell zu den anderen Rotoren dienen soll.

1.2 Ziele der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, ein funktionierendes H-Rotormodell für zukünftige Laborversuche und Veranstaltungen zu entwickeln. Die Berechnung und Auslegung des H-Rotors soll auf den Grundlagen der Windenergienutzung basieren. Dafür ist das Verständnis zur Nutzung der Windenergie unumgänglich. Das Modell wird selber konstruiert und mit einem 3D-Drucker gefertigt. Das Funktionsmodell soll anschließend im Versuch getestet werden. Die gemessenen und berechneten Anlageneigenschaften und Anlagenkennlinien sind im Anschluss mit denen der Dreiblattanlage und des Savonius-Rotors zu vergleichen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau dieser Arbeit orientiert sich an den vorher genannten Zielen und wird in folgender methodischer Vorgehensweise dargestellt.

Nach der Einleitung in diesem Kapitel folgen die physikalischen Grundlagen der Windkraft. Zuerst wird die maximale Nutzbarkeit der Windenergie erläutert. Anschließend werden die Wirkungsprinzipien der Windenergienutzung erklärt und anhand verschiedener Anlagentypen beschrieben.

Das dritte Kapitel handelt von der Auslegung des H-Rotorfunktionsmodells. Dort wird zunächst auf die Basis und die Gegebenheiten im Versuch eingegangen. Danach folgt die Berechnung der verschiedenen Bauteile des H-Rotors, die für die Funktionsfähigkeit später unumgänglich ist.

Im nächsten Kapitel geht es um die Konstruktion und Fertigung des H-Rotors. Es wird dargestellt, wie die einzelnen Bauteile konstruiert werden und welche Kriterien bei der Konstruktion wichtig sind. Zudem wird die Fertigung des H-Rotors mit dem 3D-Drucker beschrieben.

Das fünfte Kapitel beinhaltet die verschiedenen Versuche und Bemühungen, die Anlageneigenschaften des H-Rotors zu vermessen. Zusätzlich werden der Dreiblattrotor und der Savonius-Rotor im Versuch getestet und im Nachhinein mit dem H-Rotor verglichen.

Am Ende folgen die möglichen Fehlerursachen des H-Rotors und ein abrundendes Fazit.

2 Physikalische Grundlagen

Eine Windkraftanlage dient als Energiewandler, der die kinetische Energie des Windes in mechanische Arbeit konvertiert. Der Leistungsbeiwert c_p bezeichnet das Verhältnis der mechanischen Leistung der Windkraftanlage zu der Leistung des Luftstroms, der durch die Querschnittsfläche des Rotors strömt. Albert Betz, ein deutscher Physiker, zeigt mit seiner Impulstheorie, dass dieser Leistungsbeiwert begrenzt ist. Mithilfe physikalischer Gesetze bewies er, dass maximal 59,3 % der kinetischen Energie des Windes nutzbar sind. Dabei geht er von einem verlustfrei arbeitendem Energiewandler und reibungsfreier Strömung aus. Für das Verständnis von Windkraftanlagen und deren Wirkungsweise ist die Impulstheorie sehr wichtig und wird in folgendem Kapitel erläutert. ([7], S. 81ff)

2.1 Die Impulstheorie nach Betz

Eine Luftmasse m (Wind), die sich mit der Geschwindigkeit v bewegt, lässt sich als kinetische Energie E beschreiben ([7], S. 81):

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Der Volumenstrom \dot{V} ist das Produkt aus der Luft mit der Strömungsgeschwindigkeit v und der durchströmten Querschnittsfläche A ([7], S. 82):

$$\dot{V} = v \cdot A$$

Mit der Luftdichte ρ ergibt sich der Massenstrom ([7], S. 82):

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A$$

Die Windleistung P_0 , also die durch eine Querschnittsfläche A fließende Energiemenge pro Zeit, ist definiert durch ([7], S. 82):

$$P_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2$$

Wird mechanische Leistung aus dem Luftstrom entnommen, verringert sich folglich die kinetische Energie. Bei gleicher Luftdichte ρ bleibt der Massenstrom \dot{m} während des Prozesses unverändert. Deswegen muss sich die Geschwindigkeit v des Luftstroms verringern und die Querschnittsfläche A vergrößern.

2 Physikalische Grundlagen

Um herauszufinden, wie viel mechanische Leistung aus dem Luftstrom entnommen werden kann, betrachtet man einen Kontrollraum. In diesem sind die Zustände vor und nach dem Energiewandler dargestellt (siehe Abbildung 2-1). Dabei beschreibt v_1 die Windgeschwindigkeit davor und v_2 die Windgeschwindigkeit danach. Die entnommene mechanische Leistung P entspricht der Leistungsdifferenz vor und hinter der Windkraftanlage ([7], S. 82):

$$P = \frac{1}{2} \cdot \dot{m}_1 \cdot v_1^2 - \frac{1}{2} \cdot \dot{m}_2 \cdot v_2^2$$

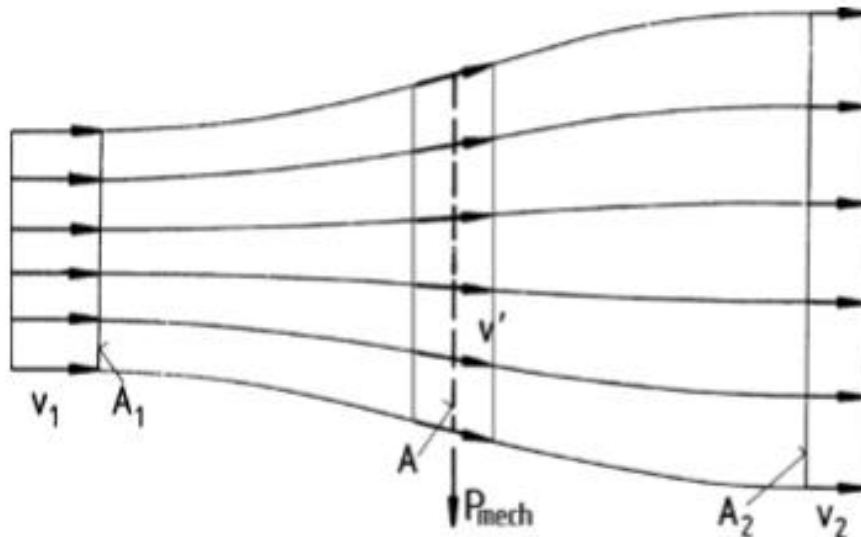


Abbildung 2-1: Strömungsverhältnisse eines Energiewandlers beim Entzug mechanischer Leistung ([7], S. 82)

Aus dem gleichbleibenden Massenstrom ergibt sich ([7], S. 83):

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \rightarrow \dot{m} = \rho \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho \cdot v_2 \cdot A_2$$

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_2^2)$$

Rein rechnerisch gesehen ist die Leistung P am größten, wenn die Windgeschwindigkeit v_2 gleich null ist. Wäre dies jedoch der Fall, gäbe es keine Luftströmung mehr. Die Leistung wird bei einem bestimmten Zahlenverhältnis v_1/v_2 maximal, welches im Folgenden mit Hilfe des Impulssatzes bestimmt wird. Die Schubkraft der Luft auf den Wandler wird berechnet mit ([7], S. 83):

$$F = \dot{m}(v_1 - v_2)$$

Diese Schubkraft verschiebt den Wind in der Ebene des Wandlers mit der Durchströmgeschwindigkeit v' . Die notwendige Leistung ist definiert durch ([7], S. 83):

$$P = F \cdot v' = \dot{m}(v_1 - v_2)v'$$

2 Physikalische Grundlagen

Die entzogene mechanische Leistung kann somit einmal aus der Energiedifferenz und einmal aus dem Impulssatz hergeleitet werden. Durch Gleichsetzen der Ansätze kann die Durchströmgeschwindigkeit v' bestimmt werden ([7], S. 83):

$$\frac{1}{2}\dot{m}(v_1^2 - v_2^2) = \dot{m}(v_1 - v_2)v'$$

$$v' = \frac{1}{2}(v_1 + v_2)$$

Der arithmetische Mittelwert der Durchströmgeschwindigkeit v' beträgt also ([7], S. 81):

$$v' = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

Daraus folgt der Massenstrom ([7], S. 83):

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v' = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A(v_1 + v_2)$$

Die entzogene mechanische Leistung ist hiermit ([7], S. 84):

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2)$$

Als Vergleich dient jetzt die Nettowindleistung, aus der keine mechanische Leistung entnommen wird und dessen Luftstrom durch die gleiche Querschnittsfläche strömt ([7], S. 84):

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^3 \cdot A$$

Wie oben beschrieben, beschreibt der Leistungsbeiwert c_p das Verhältnis der mechanischen Leistung der Windkraftanlage zu der Leistung des Luftstroms, der durch die Querschnittsfläche A des Rotors strömt ([7], S. 84):

$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2)}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v_1^3}$$

Der Leistungsbeiwert c_p ist nach einigen Umformungen eine Funktion des Geschwindigkeitsverhältnisses v_2/v_1 ([7], S. 84):

$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_2}{v_1} - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^3 \right)$$

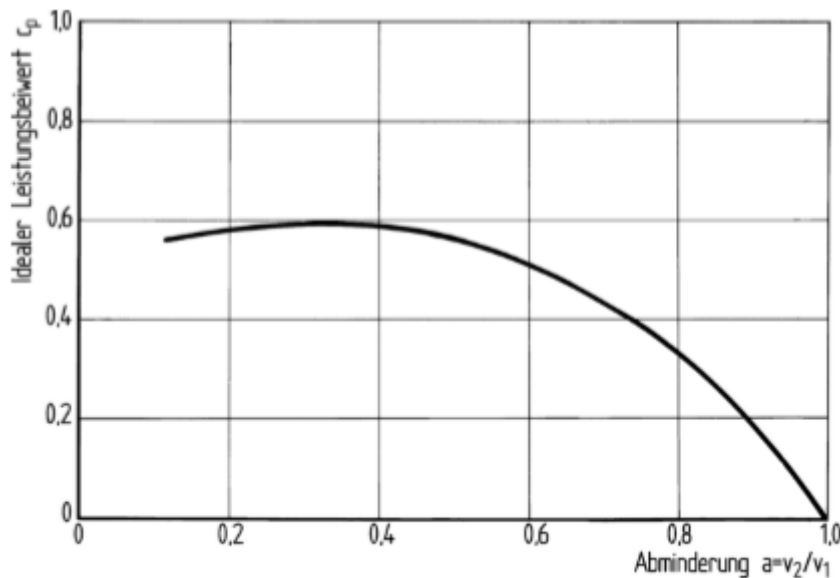


Abbildung 2-2: Verlauf des Leistungsbeiwertes über dem Geschwindigkeitsverhältnis v_2/v_1 ([7], S. 84)

In Abbildung 2-2: Verlauf des Leistungsbeiwertes über dem Geschwindigkeitsverhältnis v_2/v_1 ist der Verlauf des Leistungsbeiwertes über dem Geschwindigkeitsverhältnis v_2/v_1 dargestellt. Bei $v_2/v_1 = 1/3$ hat der Leistungsbeiwert sein Maximum ([7], S. 85):

$$c_p^{max} = \frac{16}{27} = 0,593$$

Daraus folgt für die Durchströmgeschwindigkeit v' und für die Windgeschwindigkeit v_2 ([7], S. 85):

$$v' = \frac{2}{3}v_2 \quad v_1 = 3v_2$$

2.2 Aerodynamik

Die Umwandlung der kinetischen Energie des Windes in die mechanische Energie wird durch den Rotor der Windkraftanlage realisiert. Für Windkraftanlagen gibt es zwei verschiedene Wirkungsprinzipien. Sie funktionieren entweder nach dem Widerstandsprinzip oder dem Auftriebsprinzip. Der Unterschied liegt in der Richtung der wirkenden Luftkraftkomponenten. Liegen die Komponenten in Strömungsrichtung, bezeichnet man es als Luftwiderstand. Bei Komponenten, die senkrecht zur Anströmung liegen, nennt man es aerodynamischer Auftrieb. Je nachdem, für welche Wirkungsweise eine Windkraftanlage ausgelegt ist, ergeben sich unterschiedliche reale Leistungsbeiwerte ([7], S. 87). Heutzutage nutzen die modernsten Windenergieanlagen das Prinzip des aerodynamischen Auftriebs, mit dem sich Leistungsbeiwerte rund um 0,5 erzielen lassen ([7], S. 108)) Also nur knapp unter dem idealen Leistungsbeiwert von ungefähr 0,59.

2.2.1 Widerstandsprinzip

Widerstandsläufer funktionieren nach der einfachsten Art der Windenergieumwandlung. Sie nutzen die Widerstandskraft. Die Widerstandskraft entsteht, wenn der Wind auf eine Fläche trifft, die quer zu seiner Richtung steht. In Abbildung 2-3: Strömungsverhältnisse bei einem Widerstandsläufer ist ein Windrotor mit einer drehenden Bewegung nach dem Widerstandsprinzip zu erkennen. Die Widerstandskraft F_W ist abhängig von der Windgeschwindigkeit v , der Luftdichte ρ , der Querschnittsfläche A und dem Luftwiderstandsbeiwert c_W . Die Widerstandskraft berechnet sich mit ([7], S. 87):

$$F_W = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_W \cdot v^2 \cdot A$$

Der Luftwiderstandsbeiwert c_W beschreibt den Luftwiderstand eines Körpers und richtet sich nach der Form. Er wird experimentell, zum Beispiel in einem Windkanal, bestimmt. Dabei gilt: Je kleiner der c_W -Wert, desto geringer ist auch der Luftwiderstand ([5], S. 38)

Für Widerstandsläufer ist der maximale Leistungsbeiwert cp von circa 0,59 nicht einmal annähernd zu erreichen. Bei einer ähnlichen Vorgehensweise wie in Kapitel 2.1 zeigt sich, dass der maximale cp -Wert für Windenergieumwandler nach dem Widerstandsprinzip deutlich niedriger liegen muss ([7], S. 88):

$$cp^{max} = \frac{4}{27} c_W$$

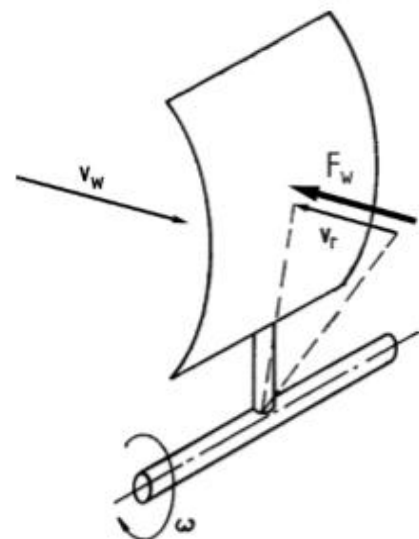


Abbildung 2-3: Strömungsverhältnisse bei einem Widerstandsläufer ([7], S. 87)

Der Luftwiderstandsbeiwert c_W kann nicht viel größer als 1,3 werden, sodass sich daraus ein Leistungsbeiwert von rund einem Drittel des idealen Leistungsbeiwertes ergibt ([7], S. 88):

$$cp^{max} \approx 0,2$$

Das liegt unter anderem an der Schnelllaufzahl λ . Die Schnelllaufzahl ist ein wichtiger Faktor bei der Auslegung einer Windkraftanlage und beschreibt das Verhältnis der Umfangsgeschwindigkeit der Blattspitze des Rotors u zur Windgeschwindigkeit v ([7], S. 93):

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

Die Schnelllaufzahl eines Widerstandsläufers liegt immer unter eins, da sich das Rotorblatt nicht schneller als der Wind bewegen kann. Aufgrund des geringen Leistungsbeiwertes finden Widerstandsläufer bei der gewerblichen Stromgewinnung keine Verwendung ([2]).

2.2.2 Auftriebsprinzip

Moderne Windkraftanlagen nutzen das Prinzip des aerodynamischen Auftriebs. Mit diesem Prinzip lassen sich deutlich höhere Leistungsbeiwerte als mit dem Widerstandsprinzip erreichen und der Gesamtwirkungsgrad steigt erheblich. Ähnlich wie bei einem Flugzeugtragflügel sind die Rotorblätter so geformt, dass der aerodynamische Auftrieb möglichst groß wird. ([7], S. 88):

Trifft der Wind auf ein Rotorblatt, strömt die Luft oberhalb und unterhalb des Rotorblattes entlang. Wenn das Rotorblattprofil gewölbt ist oder mit einem Anstellwinkel größer null zur Luftströmung steht, muss die Luftströmung auf der einen Seite einen längeren Weg zurücklegen und somit schneller fließen als auf der anderen Seite (siehe Abbildung 2-4). ([2])

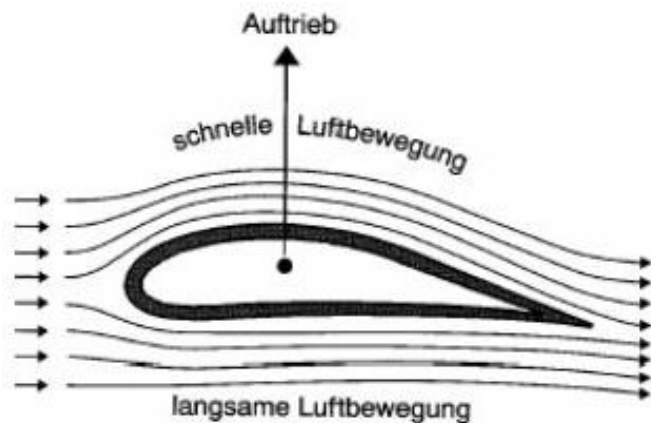


Abbildung 2-4: Luftbewegungen an einem umströmten Rotorblattprofil [2]

Wie in Abbildung 2-5 zu erkennen ist, entsteht dabei eine Druckdifferenz. Auf der Oberseite herrscht Unterdruck, auf der Unterseite dagegen Überdruck. Die Druckdifferenz führt zu einer Auftriebskraft F_A , die senkrecht zur Anströmungsrichtung steht und für eine Bewegung des Rotors sorgt. Die Auftriebskraft F_A ist ähnlich wie die Widerstandskraft F_W abhängig von der

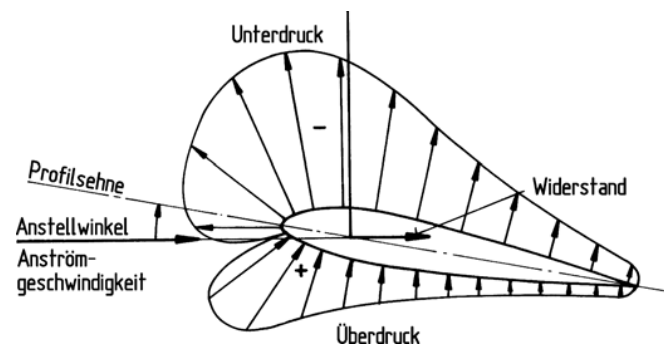


Abbildung 2-5: Luftkräfte an einem umströmten Rotorblattprofil ([7], S.88)

Luftdichte ρ , der Windgeschwindigkeit v , der Rotorfläche A und dem Auftriebsbeiwert c_A ([2]):

$$F_A = c_A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^2$$

Der Anstellwinkel des Rotorprofils bestimmt den Auftriebsbeiwert c_A . So kann die Auftriebskraft F_A und infolgedessen auch die Rotordrehzahl reguliert werden.

Auch Auftriebsläufer sind einer Widerstandskraft F_W ausgesetzt. Die Widerstandskraft spielt bei modernen aerodynamischen Profilen und kleinen Anstellwinkeln ($\alpha_A < 15^\circ$) jedoch nur eine sehr geringe Rolle ($c_W = 1/20 \cdot c_A$ bis $1/100 \cdot c_A$) ([5], S.44)

2 Physikalische Grundlagen

Windkraftanlagen, die auf dem Prinzip des aerodynamischen Auftriebs beruhen, können heutzutage Leistungsbeiwerte von über 0,5 erreichen ([7], S. 108). Also nur knapp unter dem idealen Leistungsbeiwert nach Betz. Das liegt unter anderem an der hohen Schnelllaufzahl. Durch die Nutzung von Auftriebskräften ist es möglich, dass sich die Rotorblätter schneller bewegen als der Wind. Man unterteilt die verschiedenen Bauarten in Langsamläufer und Schnellläufer. Zu den Langsamläufern gehören Widerstandsläufer und ältere, historische Windräder mit einer Schnelllaufzahl unter fünf, Schnellläufer dagegen besitzen immer eine Schnelllaufzahl, die größer als fünf ist ([7], S. 153). In Abbildung 2-6 sind die c_p - λ -Kennlinien einiger Bauarten im Vergleich dargestellt:

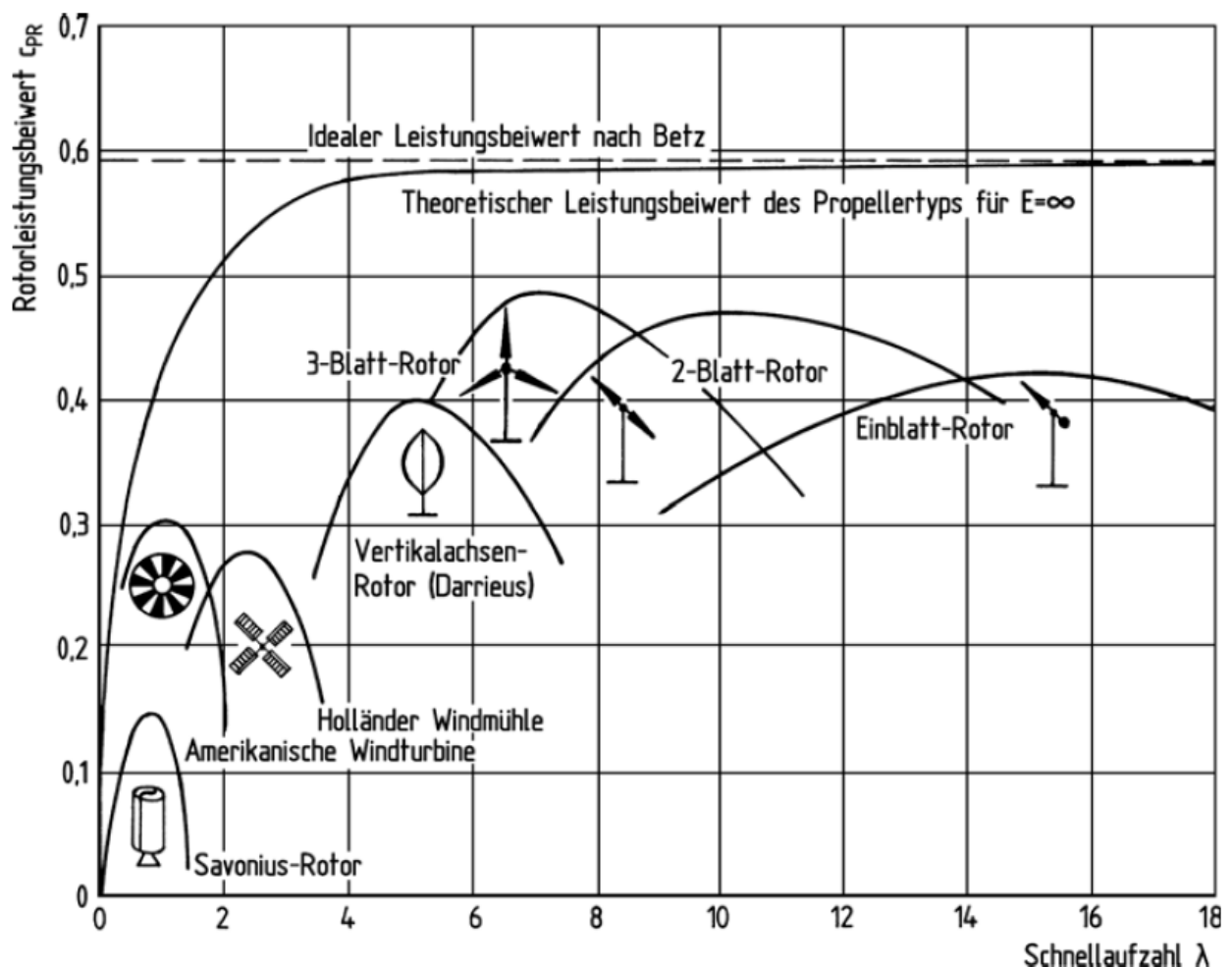


Abbildung 2-6: Leistungsbeiwerte von Windrotoren unterschiedlicher Bauart über der Schnelllaufzahl λ ([7], S. 109)

In der obigen Abbildung ist deutlich zu sehen, dass der klassische Dreiblattrotor und der Zweiblattrotor bei hohen Schnelllaufzahlen laufen und den höchsten Leistungsbeiwert aller Bauformen liefern. Der Darrieus-Rotor, von welchem der H-Rotor abgewandelt ist, läuft hingegen mit einer geringeren Schnelllaufzahl und erreicht den Leistungsbeiwert eines Dreiblattrotors nicht. Den schlechtesten Leistungsbeiwert liefert, wie erwartet, ein Widerstandsläufer (hier: Savonius-Rotor).

2.3 Konstruktive Eigenschaften

Nachdem die zwei Wirkprinzipien von Windkraftanlagen erläutert worden sind, werden nun die konstruktiven Eigenschaften behandelt. Windenergiewandler bzw. Windkraftanlagen treten in vielen Variationen und in den verschiedensten Formen auf. Das wichtigste Merkmal ist die Ausrichtung der Drehachse des Rotors, wobei man zwischen Rotoren mit horizontaler und vertikaler Drehachse unterscheidet. Im Folgenden werden die beiden konstruktiven Möglichkeiten beschrieben und anhand von Beispielen erläutert.

2.3.1 Horizontalachsen-Rotoren

Ein Horizontalachsen-Rotor, auch HAWT (horizontal axis wind turbine) genannt, steht für eine Windturbine mit horizontaler Drehachse. Die großen Horizontalwindkraftanlagen werden durch ihre Präsenz im Landschaftsbild als die typische Windkraftanlage wahrgenommen. Der Rotor wird bei modernen Anlagen durch eine aktive Nachführung gegen den Wind gerichtet. Horizontalachsen-Rotoren sind Auftriebsläufer, die durch die Umströmung der Rotorblätter einen aerodynamischen Auftrieb erzeugen. Dieser Anlagentyp ist heutzutage der aktuelle Stand der Technik und anderen Bauformen deutlich überlegen (siehe Abbildung 2-6). Dies liegt unter anderem an der technischen Verfügbarkeit und dem hohen Entwicklungsstand horizontaler Anlagen, denn kein anderer Anlagentyp wurde mit solch einer Intensität erforscht und entwickelt wie die klassische Horizontal-Windkraftanlage.

Die Horizontal-Windkraftanlage wird meist mit drei Rotorblättern hergestellt (siehe Abbildung 2-7). Das hat mehrere Gründe: Die Energieausbeute ist bei größerer Rotorfläche höher. Aus diesem Grund werden drei Rotorblätter häufiger verwendet als zwei. Eine Anlage mit mehr als drei Rotorblättern erzeugt aber aufgrund von steigenden Bremsseffekten nicht genügend Energie, um die Kosten der einzelnen Blätter zu decken. Ein weiterer Grund ist die steigende Geschwindigkeit des Windes mit der Höhe, da bei einer Anlage mit zwei oder vier Blättern ein Rotorblatt voll vom Wind und das Gegenüberliegende von relativ wenig Wind getroffen wird. Das würde zu Schwingungen und einer zu hohen Belastung des Rotors führen. Hinzu kommt, dass die Anzahl der Rotorblätter die Geschwindigkeit des Rotors beeinflusst. Eine Anlage mit mehr Rotorblättern läuft langsamer und führt so automatisch zu einem geringeren Geräuschpegel. ([5], S.55ff)



Abbildung 2-7: Klassische Windkraftanlage (Foto Vestas) ([7], S. 72)

2 Physikalische Grundlagen

In Abbildung 2-8: Aufbau einer Horizontalanlage ist der Aufbau einer klassischen Horizontal-Windkraftanlage mit drei Rotorblättern dargestellt. Die Hauptbestandteile sind der Rotor, das Maschinengehäuse und der Turm. Im Maschinengehäuse, auch Gondel genannt, befinden sich elektrische Schaltungen und Regelungssysteme, meist ein Getriebe sowie der Antriebsstrang. Letzteres bezeichnet die Komponenten vom Rotor bis zum Generator, die zur Stromgewinnung notwendig sind.

Ein Teil der Windleistung wird vom Rotor aufgenommen und als mechanische Drehbewegung an das Getriebe weitergeleitet. Das Getriebe erhöht die Drehzahl und leitet die mechanische Leistung zum Generator weiter. Der Generator wandelt die mechanische in elektrische Energie um und gibt diese an den Umrichter weiter. Dort wird der Strom an die Netzfrequenz, Phasenlage und Spannung angepasst.

Um genau die benötigte Leistung zu liefern, die gefordert ist, können die Rotorblätter je nach Windstärke aus dem Wind oder in den Wind gedreht werden. Diese Regelung wird Pitchregelung genannt und dient der Leistungsregulierung.

Zur Verdeutlichung werden im Folgenden die Vor- und Nachteile einer Horizontal-Windkraftanlage zusammengefasst:

Vorteile:

- Hoher Wirkungsgrad
- Hohe Wirtschaftlichkeit
- Fortgeschrittener Entwicklungsstand

Nachteile:

- Notwendigkeit einer Windnachführung
- Erhebliche Sichtbehinderung

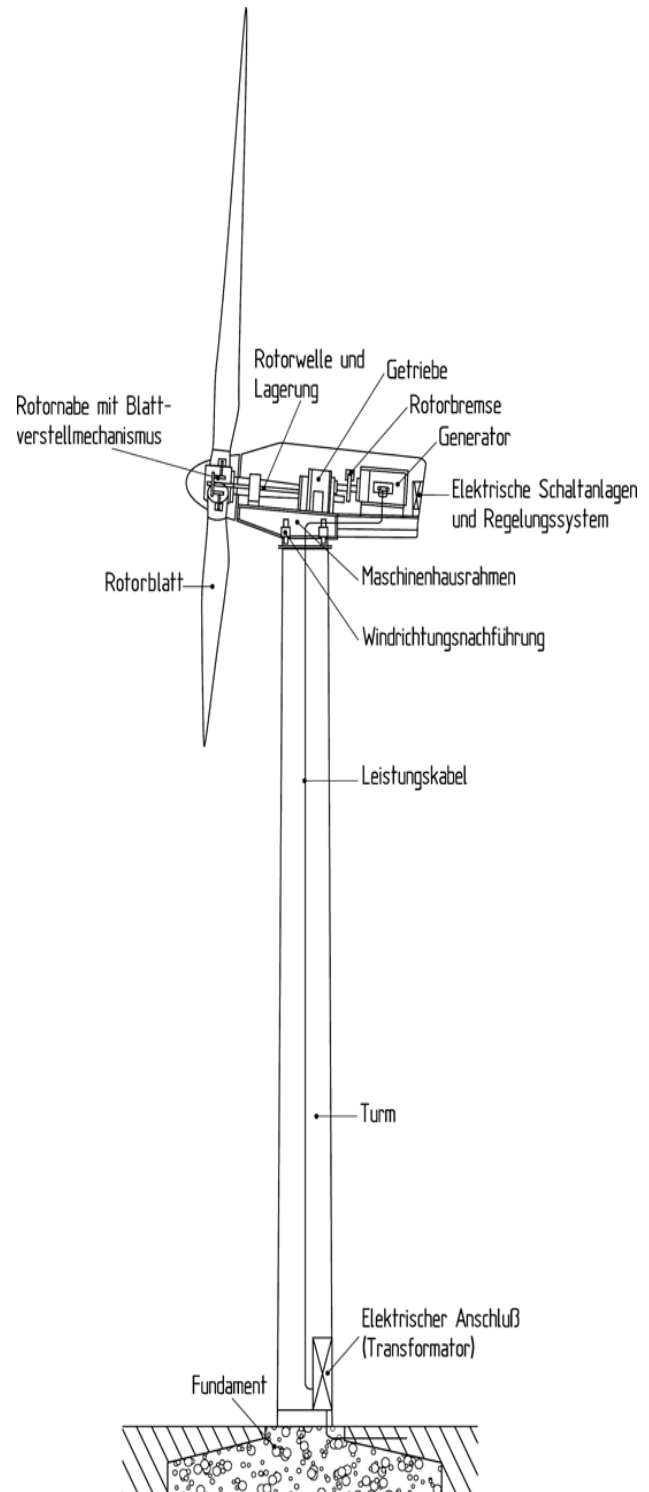


Abbildung 2-8: Aufbau einer Horizontalanlage ([7], S. 88)

2.3.2 Vertikalachsen-Rotoren

Ein Vertikalachsen-Rotor, auch VAWT (vertical axis wind turbine) genannt, ist eine Windturbine mit vertikaler Drehachse. Vertikale Windkraftanlagen stellen, insbesondere für Kleinwindanlagen, eine Alternative zu den Horizontalanlagen dar, deren Hauptvorteil die Unabhängigkeit der Windrichtung ist.

Die ersten entwickelten Windräder zur Nutzung des Windes waren mit einer vertikalen Achse ausgestattet und nutzten den Effekt des Widerstandes. In Abbildung 2-9 ist eine solche Anlage, die Persische Windmühle, zu sehen. Sie wurde schon vor dem 10. Jahrhundert zum Mahlen von Getreide genutzt. An der Rotorachse waren geflochtene Matten oder Holzplanken befestigt, die als Luftwiderstand dem Wind entgegengewirkt haben. Um den Effekt des Widerstandes zu nutzen und den Rotor damit in Bewegung zu setzen, wurde die eine Rotorhälfte durch eine Mauer vor dem Wind geschützt. An dieser Stelle ist festzustellen, dass die Persische Windmühle nur in eine Windrichtung ausgerichtet war und somit der Hauptvorteil der Windrichtungsunabhängigkeit der heutigen Vertikalrotoren nicht gegeben war. ([5], S.16f) Erst Anfang des 20. Jahrhunderts (1925) gelang es dem Franzosen Darrieus eine Form des Vertikalrotors zu entwickeln, der den aerodynamischen Auftrieb effektiv ausnutzte ([7], S 68). Nichtsdestotrotz haben Horizontalläufer einen enormen Entwicklungsvorsprung und sind aufgrund ihrer Effizienz und Wirtschaftlichkeit bei kommerziell eingesetzten Windkraftanlagen nicht von den Vertikalläufern zu verdrängen. Während Horizontalläufer Leistungsbeiwerte von mehr als 0,5 erreichen können, schaffen es gute Vertikalläufer auf gerade einmal 0,4 ([7], S.164) (siehe Abbildung 2-6). Für die Nutzung vertikaler Windkraftanlagen gibt es dennoch andere Gründe. Natürlich ist die Tatsache, den Wind aus jeder Richtung nutzen zu können, ein großer Vorteil. Hinzu kommt, dass die Schallemissionen sowie die Bauhöhe geringer sind und somit einen Aufbau einer Vertikalanlage in Stadtnähe erlauben, ohne die Bevölkerung zu sehr zu belasten. Die elektrischen sowie mechanischen Komponenten sind in Bodennähe angebracht, sodass im Gegensatz zu den Horizontalläufern eine einfachere Wartung möglich ist. ([8])

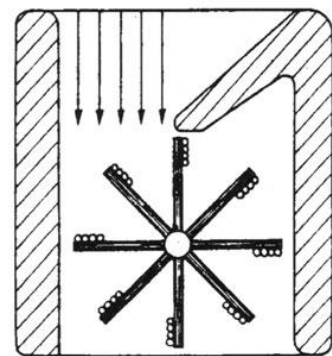
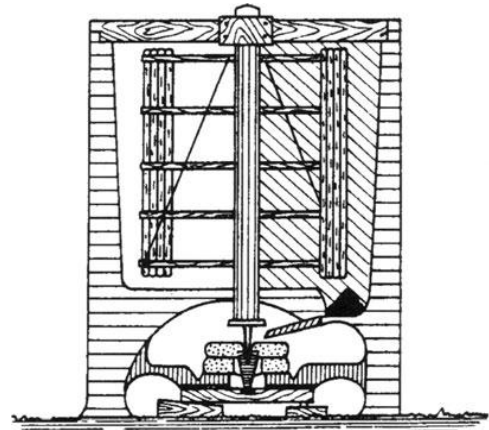


Abbildung 2-9: Persische Windmühle ([5], S.17)

2 Physikalische Grundlagen

Bei vertikalen Windkraftanlagen unterscheidet man zwischen drei Bauformen:

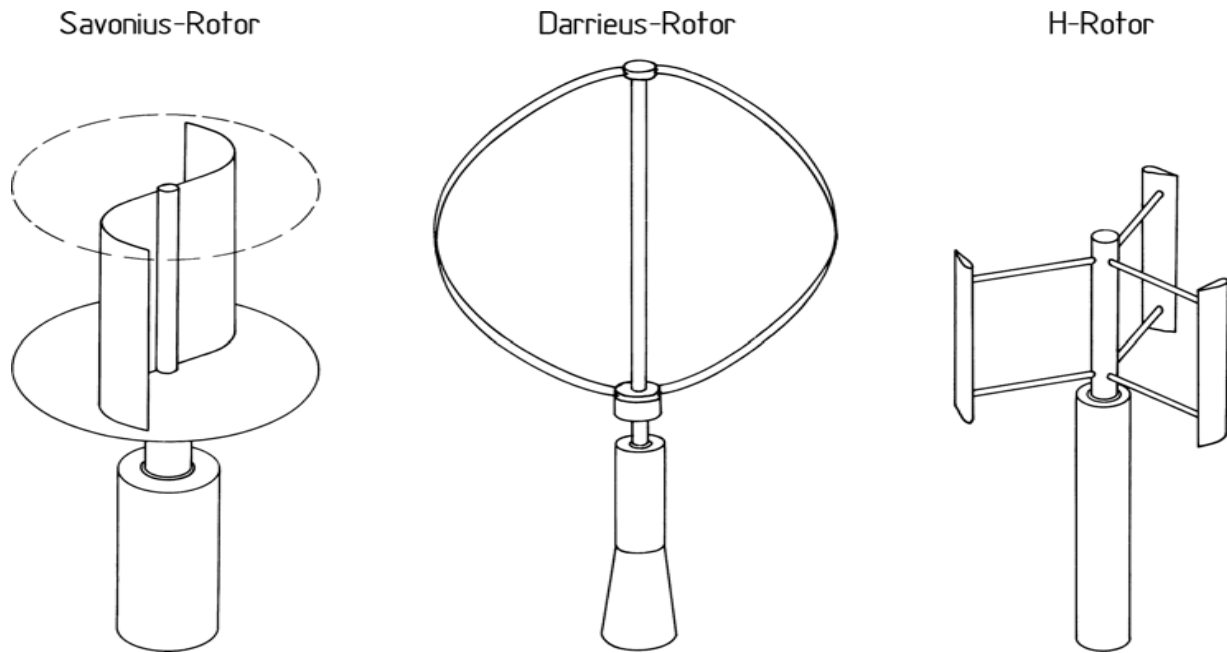


Abbildung 2-10: Rotorformen von vertikalen Windkraftanlagen ([7], S.68)

Der Savonius-Rotor (Abbildung 2-10, links) ist ein Widerstandsläufer mit zwei oder mehr schaufelförmigen Rotorblättern. Dabei bietet die aktive Rotorfläche, die offen zum Wind steht, dem Wind mehr Widerstand als die passive Rotorfläche und bringt den Rotor so in Bewegung. Er bewegt sich im Gegensatz zu Auftriebsläufern sehr langsam. Dementsprechend hat er nur einen geringen Wirkungsgrad (Abbildung 2-6) und findet für die kommerzielle Stromgewinnung keine Verwendung. Anwendung findet der Savonius-Rotor zum Beispiel als Lüfterrad auf Eisenbahnwaggons oder Kaminen.

Beim Darrieus-Rotor (Abbildung 2-10, Mitte) handelt es sich, wie oben kurz erwähnt, um einen Auftriebsläufer. Der Darrieus-Rotor besitzt zwei oder drei Rotorblätter, die am oberen und unteren Rand der Drehachse befestigt sind. Die Rotorblätter sind bogenartig gekrümmt und in ihrer Herstellung kompliziert und teuer. Die Umströmung der Rotorblätter führt hier wie bei der HAWT zu einer Auftriebskraft, die wesentlich höher ist als die Widerstandskraft. Der Rotor kann somit erheblich schneller als die Windgeschwindigkeit sein und Schnelllaufzahlen von vier bis sieben erreichen (Abbildung 2-6). Der Leistungsbeiwert liegt unter dem der HAWT bei circa 0,4, welcher für vertikale Windkraftanlagen nahezu optimal ist. Ein Nachteil dieser Bauform ist, dass ein Darrieus-Rotor nicht selbstanlaufend ist ([7], S. 68ff). Das bedeutet, der Generator muss zuerst als Motor eingesetzt werden und den Rotor auf eine bestimmte Drehzahl bringen. Zudem ist es bei Darrieus-Rotoren nicht möglich, die Rotorblätter wie bei der klassischen Dreiblattanlage zu verstellen und somit die Leistungsabgabe und die Drehzahl zu regeln.

2 Physikalische Grundlagen

Der H-Rotor (Abbildung 2-10, rechts) ist eine Abwandlung des Darrieus-Rotors und besitzt ebenfalls eine vertikale Drehachse. Der Unterschied liegt in der Form und Befestigung der Rotorblätter. Der H-Rotor besitzt zwei bis fünf Rotorblätter, die im Gegensatz zum Darrieus-Rotor nicht gebogen sind, sondern eine gerade Form aufweisen. Über Halterungen (Tragarme) sind diese mit der Drehachse verbunden. Zu den Gemeinsamkeiten gehören die Nutzung des Auftriebs und die Tatsache, dass beide nicht selbstständig anlaufen können. ([7], S.164)

In Abbildung 2-11 sind die Luftkräfte und Anströmverhältnisse eines H-Rotors mit zwei Rotorblättern dargestellt. Die beiden Rotorblätter liegen genau gegenüber und werden von oben vom Wind angeströmt. Sie haben ein symmetrisches Profil und stehen in einem Winkel von null Grad zur Rotorachse. Anders als bei Horizontalanlagen ist ein Winkel von null Grad möglich, da sich der Anstellwinkel α zum Wind während der Drehung laufend verändert. Die Funktionsweise des H-Rotors kann anhand des folgenden Bildes gut erläutert werden ([7], S. 162):.

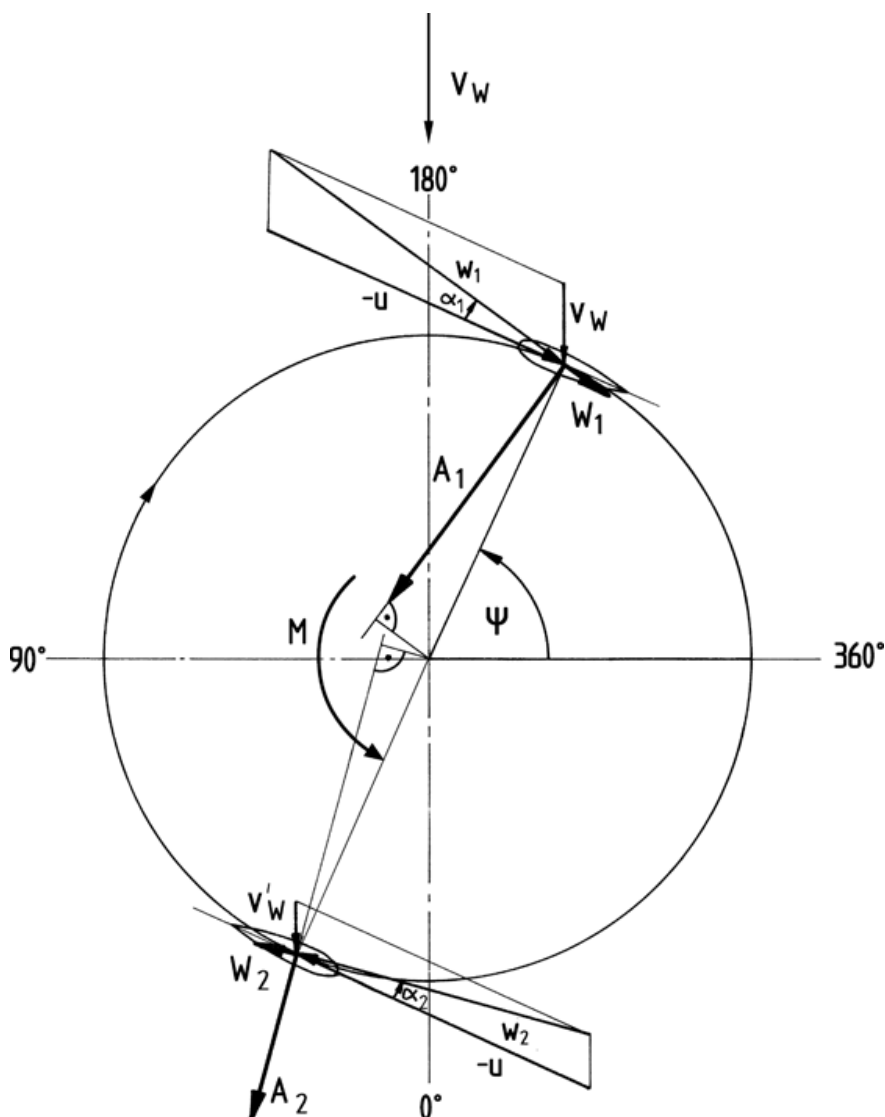


Abbildung 2-11: Anströmverhältnisse und Luftkräfte beim H-Rotor ([7], S. 162)

2 Physikalische Grundlagen

Eine Auftriebskraft (hier im Bild A_1 und A_2) entsteht nur bei einer Druckdifferenz (siehe Kap. 2.2.2 oben). Dafür muss der Anstellwinkel α zwischen dem Rotorblatt und der Windströmung größer als null sein. Ist der H-Rotor in Bewegung, wirkt auf das Rotorblatt nicht nur der ankommende Wind v_W , sondern auch eine Windgeschwindigkeit u . Diese entspricht der Umfangsgeschwindigkeit. Daraus resultiert eine Windströmung w , die mit dem Rotorblatt einen Anstellwinkel $\alpha > 0$ bildet und somit eine Auftriebskraft A und ein positives Drehmoment M erzeugt. Die Widerstandskräfte der Rotorblätter, die entgegen der Drehrichtung wirken, sind im Vergleich zu den Auftriebskräften sehr gering.

Zum Verständnis werden im Folgenden die Vor- und Nachteile einer VAWT mit dem Prinzip des aerodynamischen Auftriebs zusammengefasst:

Vorteile:

- Keine Windnachführung nötig
- Wenig Schallemissionen
- Geringe Sichtbehinderung

Nachteile:

- Kleinerer Wirkungsgrad als HAWT
- Nicht selbstanlaufend
- Niedriger Entwicklungsstand

3 Berechnung und Auslegung

Die Auslegung ist für das H-Rotorfunktionsmodell die grundlegende Basis. Jeder 3D-Druck ist kostenintensiv, sodass das Modell möglichst nur einmal gedruckt werden soll. Falls nach dem 3D-Druck Fehler in der Berechnung und Auslegung gefunden werden, sind diese nur noch sehr schwierig oder nicht mehr korrigierbar. Aus diesem Grund sollten hier möglichst keine Fehler unterlaufen.

3.1 Grundlage Experimentierkoffer

Als Basis der Versuche und Messungen dient ein Experimentierkoffer von leXsolar. Für die Versuche mit dem Experimentierkoffer stehen ein klassischer Dreiblattrotor sowie ein Savonius-Rotor zur Verfügung. Der zu entwickelnde H-Rotor soll mithilfe der Materialien und Messtechnik aus dem Experimentierkoffer getestet werden. Dabei sind die Anlageneigenschaften und Anlagenkennlinien zu vermessen und zu erfassen. Im Anschluss sollen die Ergebnisse mit denen des Dreiblattrotors und denen des Savonius-Rotors verglichen werden.

Der Experimentierkoffer bietet eine große Anzahl verschiedener Möglichkeiten an, Messungen und Versuche durchzuführen, die jedoch für die Versuche des H-Rotors nicht alle relevant sind. Die wichtigsten Elemente sind in folgendem Bild dargestellt:

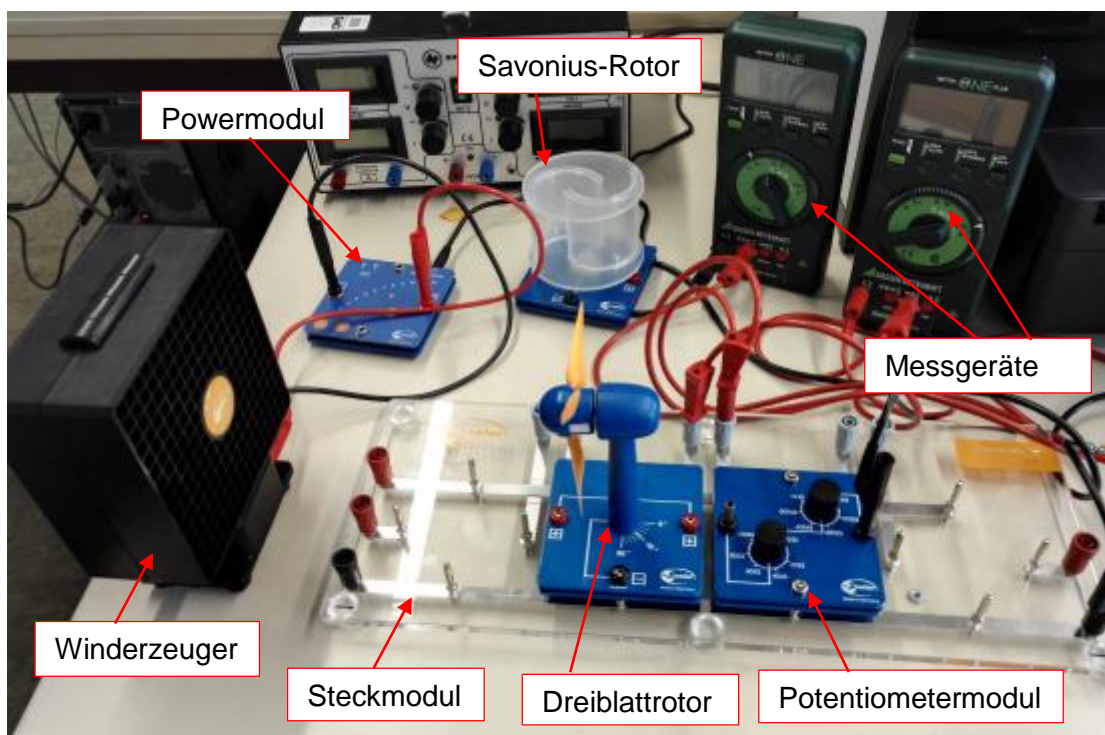


Abbildung 3-1: Aufbau des Versuchs

3 Berechnung und Auslegung

In Abbildung 3-1 ist der Aufbau der Messungen und Versuche dargestellt. Der einzige Unterschied wird der verwendete Rotor sein.

Ein wichtiger Bestandteil ist der Winderzeuger. Er dient zur kontrollierten Steuerung des Windes in eine bestimmte Richtung und kann einen Luftstrom von bis zu sieben Meter pro Sekunde erzeugen (siehe Experimentierhandbuch von leXsolar). Für die Inbetriebnahme muss der Winderzeuger mit dem Powermodul (Spannungsquelle) verbunden werden. Je nach Versuch wird dort auf einer Spannungsskala von einem Volt bis zwölf Volt die Windstärke reguliert. Das Steckmodul dient als Steckplatz für vier kleine Module. Für den Versuch sind das der Dreiblattrotor, der Savonius-Rotor sowie das Potentiometer. Das Potentiometer ist ein elektrisches Widerstandsbauelement, welches in unserem Versuch zur Drehzahlregelung beiträgt. Zusätzlich sind in Abbildung 3-1 noch zwei Messgeräte zu sehen. Sie messen den Strom und die Spannung.

3.2 Rotorgröße

Beim Vergleich des H-Rotors mit dem klassischen Dreiblatt-Rotor ist die Rotorleistung P_R der zu vergleichende Wert. Er gibt an, wie viel Leistung mit dem jeweiligen Rotor aus dem Wind entnommen wird. Die Rotorleistung P_{Rotor} wird definiert durch die Windleistung und dem anlagenspezifischen Leistungsbeiwert cp :

$$P_{Rotor} = \frac{1}{2} \rho \cdot v^3 \cdot A \cdot cp$$

Für den Versuch sollen gleiche Bedingungen gelten. Um die Leistungsbeiwerte und somit auch die Rotorleistung vergleichen zu können, muss die Windleistung der beiden Rotoren annähernd gleich groß sein. Dabei wird die Luftdichte ρ als konstant angenommen. Die Windgeschwindigkeit v ist unterschiedlich, es werden jedoch nur Versuche gleicher Windstärken miteinander verglichen. Somit muss die überstrichene Rotorfläche A der beiden Rotoren möglichst identisch sein:

$$P_{0,DR} = P_{0,HR} = \frac{1}{2} \rho \cdot v^3 \cdot A$$

$$\frac{1}{2} \rho \cdot v^3 \cdot A_{DR} = \frac{1}{2} \rho \cdot v^3 \cdot A_{HR}$$

$$A_{DR} = A_{HR}$$

3 Berechnung und Auslegung

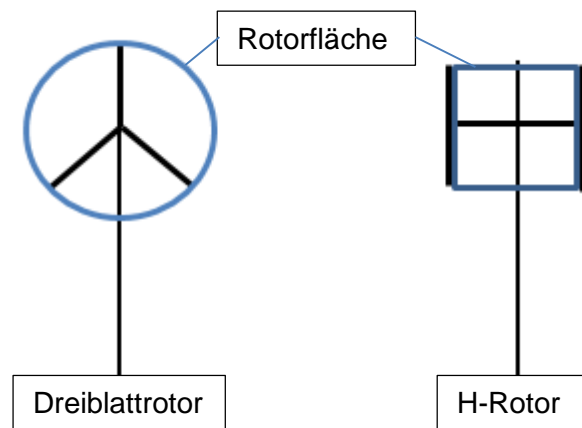


Abbildung 3-2: Überstrichene Rotorflächen

In Abbildung 3-2: Überstrichene Rotorflächen sind die überstrichenen Rotorflächen des Dreiblattrotors und des H-Rotors dargestellt. Wie zu erkennen ist, hat der Dreiblattrotor als überstrichene Rotorfläche eine Kreisfläche und der H-Rotor eine Rechteckfläche.

Zuerst wird die überstrichene Rotorfläche A_{DR} des klassischen Dreiblatt-Rotors berechnet. Für die Kreisfläche gilt:

$$A_{DR} = \pi \cdot r_{DR}^2$$

Die interessante Größe ist hier der Rotorradius r_{DR} . Der Radius wurde gemessen und liegt bei:

$$r_{DR} = 0,065m$$

Es folgt:

$$A_{DR} = \pi \cdot 0,065^2m = 0,0133m^2$$

Die Rotorfläche des Dreiblatt-Rotors beträgt somit circa $0,013 m^2$ und dient sogleich als Maß für die überstrichene Rotorfläche A_{HR} des H-Rotors. Die Rechteckfläche wird bestimmt aus dem Durchmesser d_{HR} und der Höhe h_{HR} :

$$A_{HR} = d_{HR} \cdot h_{HR}$$

$$A_{HR} = 0,013m^2 = d_{HR} \cdot h_{HR}$$

Für den Versuch ist es wichtig, dass der Wind auch die volle Breite des H-Rotors trifft. Das dafür vorgesehene Windgerät aus dem Experimentierkoffer wurde vermessen und ist 12,5 cm breit, sodass der Rotordurchmesser auf zehn Zentimeter festgelegt wird:

$$h_{HR} = \frac{0,013m^2}{0,1m} = 0,13m$$

Damit beträgt die Höhe des H-Rotors 13 cm und das Verhältnis von Höhe zu Durchmesser 1,3.

3.3 Rotorblatt

Die Rotorblätter einer Windkraftanlage sind ein elementarer Bestandteil und ohne sie könnte der Strömung keine Energie entnommen werden. Im Folgenden wird die Rotorblattanzahl ausgelegt und das Rotorblattprofil ausgewählt.

3.3.1 Rotorblattanzahl

H-Rotoren gibt es in vielen Varianten, meist mit zwei, drei oder fünf Rotorblättern (siehe Abbildung 3-3). Für die Auswahl einer geeigneten Anzahl an Rotorblättern ist zu beachten, dass mehr Rotorblätter auch mehr Auftrieb erzeugen.

Unendlich viele Rotorblätter bedeuten aber nicht, dass der Auftrieb und die Leistung immer besser werden. Im Gegenteil: Es dürfen nicht zu viele sein, da mit steigender Anzahl von Rotorblättern der Wind immer weniger Platz zum Durchströmen des Rotors hat und somit weniger Auftrieb erzeugt. Ein weiteres Problem einer zu hohen Anzahl an Rotorblättern sind die Kosten, die für den 3D-Druck nicht unerheblich sind.

Ferner sollte die Anzahl der Rotorblätter nicht gerade sein, da sich sonst immer zwei Rotorblätter genau gegenüberstehen und sich gegenseitig bremsen. Die Belastung für die Rotorachse ist ziemlich hoch, wenn nur eines der beiden Rotorblätter voll vom Wind getroffen wird. Bei drei oder fünf Rotorblättern läuft die Anlage gleichmäßiger.

Um auch in dem kleinen Maßstab möglichst viel Auftrieb zu erzeugen, wird der H-Rotor fünf Rotorblätter erhalten.

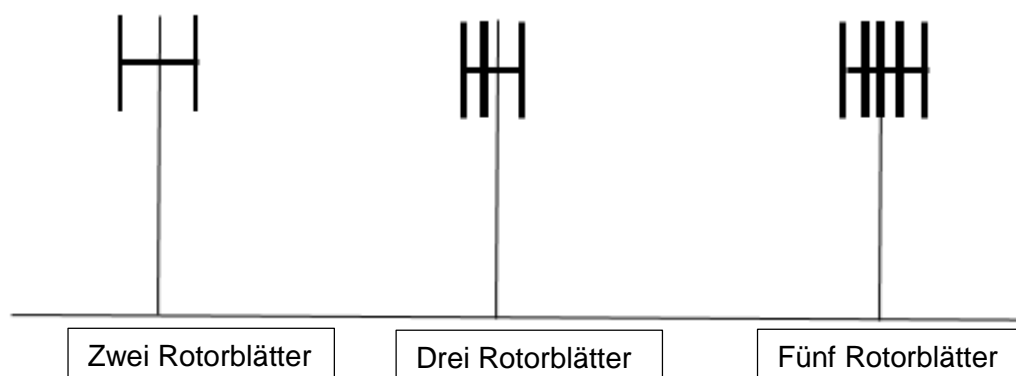


Abbildung 3-3: H-Rotoren mit verschiedener Anzahl an Rotorblättern

In Abbildung 3-2 sind die verschiedenen H-Rotortypen mit jeweils zwei, drei und fünf Blättern schematisch dargestellt. Hier ist leicht zu erkennen: Je mehr Rotorblätter eine Anlage besitzt, desto weniger Platz hat die Luftströmung.

3 Berechnung und Auslegung

Die fünf Rotorblätter werden in gleichem Abstand voneinander mit Tragarmen befestigt. Der Abstand ist abhängig vom dazwischenliegenden Winkel α und wird mit der Blattzahl B berechnet mit:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{B} = \frac{360^\circ}{5} = 72^\circ$$

3.3.2 Rotorblatttiefe

In der folgenden Tabelle sind verschiedene Horizontal- und Vertikalrotoren gelistet. Hier sind unter anderem die Laufeigenschaften, der zu erreichende Leistungsbeiwert c_p und die sogenannte „Solidarity“ der einzelnen Rotoren zusehen.

Die „Solidarity“, also die Völligkeit des Rotors, ist hier das ausschlaggebende Maß für die Auslegung des Rotorblattes. Für den H-Rotor (engl. Gyromill) wird in der letzten Zeile der Tabelle eine Völligkeit von 15 % - 40 % empfohlen [4].

Type	Performance characteristic	Manufacturing requirements	Cp	Solidarity 6	t.s.r.* (Optimum)
Horizontal axis —					
Cretan sail or flat paddles	Medium starting torque and low speed	Simple	0.05 to 0.15	50% 1.5-2.0	1.5-2.0
Cambered plate fan (American)	High starting torque and low speed	Moderate	0.15 to 0.30	50 to 80%	1-1.5
Moderate speed aero-generator	Low starting torque and moderate speed	Moderate, but with some precision	0.20 to 0.35	5 to 10%	3-5
High speed aero-gen.	Almost zero starting torque and high speeds	Precise	0.30 to 0.45	under 5%	5-10
Vertical axis —					
Panemone	Medium starting torque and low speed	Simple	under 0.10	50%	.4-.8
Savonius rotor	Medium starting torque and moderate speed	Moderate	0.15	100%	.8-1
Darrieus rotor	Zero starting torque and moderate speed	Precise	0.25 to 0.35	10% to 20%	3-5
VGVAWT or Gyromill	Zero or small starting torque and moderate speed	Precise	0.20 to 0.35	15% to 40%	2-3

Abbildung 3-4: Vergleich verschiedener Rotortypen [4]

3 Berechnung und Auslegung

Die „Solidarity“ σ ist das Verhältnis der Gesamtbreite aller Rotorblätter zum Umfang ([4]). Die Gesamtbreite aller Rotorblätter setzt sich aus der Blattanzahl B und der Profiltiefe t zusammen. Die Profiltiefe beschreibt dabei die Entfernung von Profilnase bis Profilhinterkante (siehe Abbildung 3-6). Der Umfang wird mit dem Rotordurchmesser berechnet:

$$\sigma = \frac{B \cdot t}{D \cdot \pi} = \frac{5 \cdot 0,02m}{0,1m \cdot \pi} = 0,3183$$

Wenn die Profiltiefe auf zwei Zentimeter festgelegt wird, beträgt die „Solidarity“ circa 31,8 %. Sie liegt damit im empfohlenen Bereich von 15 %-40 %.

3.3.3 Profilauswahl

Das aerodynamische Profil ist ausschlaggebend für die Leistung eines H-Rotors. Für Hersteller von H-Rotoren ist das optimale Rotorblattprofil der Kern ihrer Arbeit, sodass über die geeignetsten Profile nur wenig in der Literatur zu finden ist. Die Profilauswahl der Rotorblätter beschränkt sich nun auf Erfahrungswerte und Messergebnisse.

In folgendem Beispiel ([9]) (siehe Abbildung 3-5) sind einige Profile der Naca-Familie (national advisory committee for aeronautics) erfolgreich getestet worden. Naca-Profile sind aerodynamische Profile aus der Luftfahrt, die für den Entwurf von Tragflächen entwickelt worden sind. Es gibt viele Variationen von Naca-Profilen, die in sogenannten Profilkatalogen zusammengefasst sind. Diese beinhalten Tabellen, in denen geometrische Daten und Profilwerte dargestellt werden.([7], S: 129ff) Aufgrund der Informationsmenge über Naca-Profile und der Tatsache, dass sie heutzutage öfter in H-Rotoren Verwendung finden ([9]), soll eines dieser Profile ausgewählt werden:

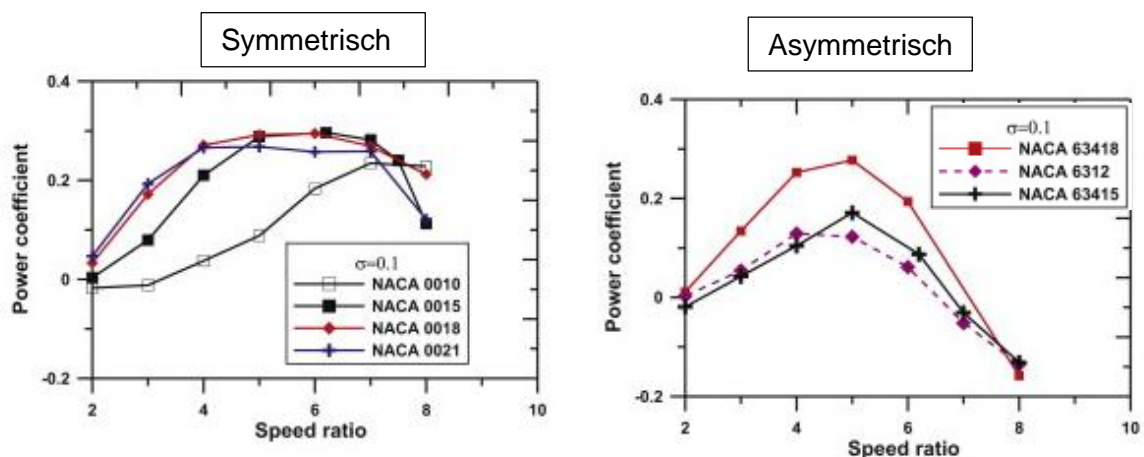


Abbildung 3-5: Vergleich verschiedener Naca-Profile [9]

In der Abbildung 3-5 sind Messergebnisse von verschiedenen Naca-Profilen dargestellt. Die Diagramme zeigen den Verlauf des Leistungsbeiwertes c_p über der Schnelllaufzahl λ .

3 Berechnung und Auslegung

Dabei sind im linken Diagramm symmetrische und im rechten asymmetrische Naca-Profile zu sehen. Die beiden Diagramme sind für die Profilauswahl sehr wichtig. Der H-Rotor soll bei einer Schnelllaufzahl von circa zwei bis drei laufen [4], sodass möglichst ein Profil ausgewählt wird, welches in dem Bereich einen hohen Leistungsbeiwert aufweist. Im Vergleich der beiden Diagramme ist das bei den symmetrischen Profilen im linken Diagramm der Fall. Für den H-Rotor wird das rote Profil „Naca-0018“ ausgewählt, da es bei einer Schnelllaufzahl von zwei bis drei optimale Werte liefert und auch im weiteren Verlauf stabil erscheint.

Die vier Ziffern des Naca-Profils haben jeweils ihre eigene Bedeutung. Die erste und zweite Ziffer stehen jeweils für die maximale Wölbung und die Wölbungsrücklage. Beim „Naca-0018“ sind beide null, sodass wir ein vollkommen symmetrisches Profil haben. Die dritte und vierte Ziffer steht gemeinsam für die maximale Dicke d in Prozent der Tiefe ([7], S. 130):

$$d = 0,18 \cdot 2\text{cm} = 0,36\text{cm}$$

Bei einer Profiltiefe t von zwei Zentimeter haben wir somit eine Profildicke von 0,36 cm. In der Abbildung 3-6 ist der Querschnitt eines Naca-Profils zu sehen. Auf der linken Seite sitzt die Profilnase, auf der rechten Seite die Profilhinterkante. Die Entfernung dazwischen wird als Profiltiefe t bezeichnet. Die Profildicke d beschreibt bei einem symmetrischen Profil wie dem „Naca-0018“ den größten Durchmesser.



Abbildung 3-6: Profilquerschnitt

3.4 Rotorachse und Tragarme

Nachdem die Rotorblätter und das Rotorblattprofil ausgewählt worden sind, sollen nun die Tragarme und die Rotorachse ausgelegt werden. Für jedes Rotorblatt sind zwei Tragarme vorgesehen, sodass man auf eine Gesamtanzahl von zehn Tragarmen kommt.

3.4.1 Tragarme

Die Tragarme sind die Verbindungstücke zwischen Rotorachse und Rotorblatt. Sie müssen die einzelnen Rotorblätter halten können, damit der H-Rotor funktionieren kann. Für die Dimensionierung eines Tragarmes wird ein einseitig eingespannter Balken mit statischer Beanspruchung am anderen Ende angenommen (siehe Abbildung 3-7). Die Querkraft F in Abbildung 3-7 soll die Gewichtskraft des Rotorblattes darstellen.

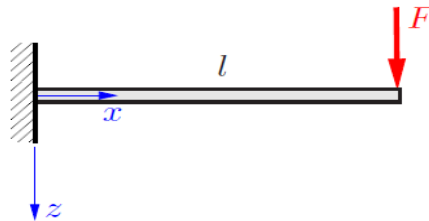


Abbildung 3-7: Einseitig eingespannter Balken ([6], S.114)

Für den 3D-Druck wird ein Acrylharz mit Photopolymer verwendet. Dessen maximale Biegespannung σ_{max} liegt bei 75,8 MPa (siehe Datenblatt). Zur Berechnung der Biegespannung σ_{max} wird folgende Formel verwendet ([6], S.113):

$$\sigma_{max} = \frac{M}{W}$$

Die Biegespannung ist abhängig von dem Biegemoment M und dem Widerstandsmoment W . Das Biegemoment M berechnet sich mit der Querkraft F und dem Abstand zur Einspannung x (siehe Abbildung 3-7, l statt x). Die Querkraft F ist hier die halbe Gewichtskraft F_G eines Rotorblattes, da jedes Rotorblatt mit zwei Tragarmen gehalten wird ([6], S. 114):

$$M = x \cdot F = x \cdot \frac{F_G}{2} = x \cdot \frac{mg}{2}$$

Die Masse m wird mit dem Volumen V und der Dichte ρ berechnet. Zur Vereinfachung der Berechnung des Volumens V wird ein Quader angenommen. Als Kantenlängen werden die Rotorblatthöhe h , die Profildicke d und die Profiltiefe t verwendet:

$$m = V \cdot \rho = h \cdot d \cdot t \cdot \rho$$

$$m = 0,13m \cdot 0,0036m \cdot 0,02m \cdot 1200 \frac{kg}{m^3} = 0,0112kg$$

Mit $x = r_{DR}$ und der Erdbeschleunigung g folgt als Biegemoment M :

$$M = r_{DR} \cdot \frac{m \cdot g}{2} = 0,065m \cdot \frac{0,0112kg \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}}{2} = 0,00357Nm$$

3 Berechnung und Auslegung

Das Widerstandsmoment W ist durch das Flächenträgheitsmoment I und α_{max} definiert. α_{max} beschreibt dabei den größten Abstand einer Randfaser zur neutralen Faser (hier: x-Achse in der Mitte des Balkens) ([6], S.112):

$$W = \frac{I}{\alpha_{max}} \quad \text{mit} \quad I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad \text{und} \quad \alpha_{max} = \frac{h}{2}$$

Es ergibt sich:

$$W = \frac{\frac{b \cdot h^3}{12}}{\frac{h}{2}} = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

Für die Dimensionierung folgt nun:

$$\sigma_{max} = 75800000Pa > \frac{M}{W} = \frac{0,00357Nm}{\frac{b \cdot h^2}{6}}$$

$$b \cdot h^2 > 2,826 \cdot 10^{-10}m^3$$

Die Berechnung ergibt, dass Höhe und Breite eines Tragarmes nicht groß sein müssen, um die statische Belastung des Rotorblattes auszuhalten. Der aus Kunststoff bestehende H-Rotor soll jedoch auch bei höheren Drehzahlen standhalten und nicht bei einer kleinen Berührung in sich zerfallen, sodass man sich für eine Höhe von 0,07 m und einer Breite von 0,05 m entschieden hat. Daraus folgt eine Biegespannung von:

$$\frac{M}{W} = \frac{0,00357Nm}{\frac{0,05m \cdot 0,07^2m}{6}} = 87,429Pa < 75800000$$

3.4.2 Rotorachse

Die Rotorachse ist die Mitte des Rotors, an dem die Tragarme befestigt sind. Sie muss stabil genug sein, um den Rest des Rotors zu halten. Allerdings darf die Rotorachse auch nicht zu massiv sein, da das Gewicht eine tragende Rolle in Bezug auf die Reibung spielt.

Die Höhe der Rotorachse ist mit 13 cm klar definiert. Der Durchmesser allerdings muss so angepasst werden, dass sich die Tragarme mit einer Presspassung und, wenn nötig, ein wenig Sekundenkleber montieren lassen. Der Durchmesser wird im folgenden Kapitel in der Konstruktion festgelegt.

4 Konstruktion und Fertigung

Bevor der H-Rotor mithilfe des 3D-Druckers gefertigt werden kann, muss das Modell konstruiert werden. Die Konstruktion des H-Rotors erfolgt mithilfe eines CAD-Systems (computer aided design) und ist wichtig für die Qualität des 3D-Drucks. Da die Fertigung in einem 3D-Drucker ziemlich kostenintensiv ist, sollte mit hoher Genauigkeit an der Konstruktion gearbeitet werden.

4.1 CAD-Konstruktion

Die Konstruktion des H-Rotors erfolgt in dem CAD-Programm „CATIA“. Für die systematische Vorgehensweise werden die Rotorachse, der Tragarm sowie das Rotorblatt jeweils nur einmal konstruiert und je nach benötigter Anzahl vervielfacht. Das bedeutet, dass nach der Einzelteilkonstruktion der Tragarm verzehnfacht und das Rotorblatt verfünffacht wird.

4.1.1 Konstruktion des Rotorblattes

Als Rotorblattprofil wurde das „Naca-0018“ ausgewählt (siehe Kap. 3.3.3). Für die Konstruktion werden Koordinatenpunkte benötigt, die das zweidimensionale Blattprofil im CAD-System darstellen. Für die Koordinatenpunkte der Naca-Profile gibt es spezielle Datenbanken. Dort lassen sich die Profildaten vorhandener und selbsterstellter Naca-Profile anzeigen und zur Veranschaulichung sofort als Modell zeichnen lassen. Die Genauigkeit der Rotorblattkonstruktion ist von großer Bedeutung, da sich ein hoher Widerstand durch die Oberflächenrauheit und Unebenheiten ergeben kann. Dieser Widerstand wirkt sich negativ auf die Drehung des Rotors aus, sodass eine flache und ebene Oberfläche erzeugt werden muss. Für die Erzeugung des Rotorblattprofils werden insgesamt 80 Koordinatenpunkte verwendet, die sich auf die obere und untere Seite aufteilen. ([1]) In Abbildung 4-1 ist das erstellte Rotorblattprofil mit den einzelnen Koordinatenpunkten zu sehen:

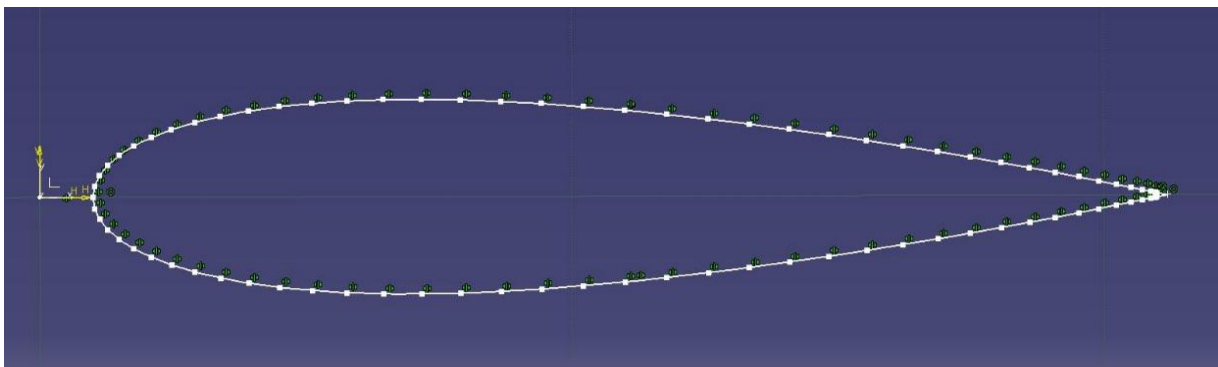


Abbildung 4-1: Koordinatenpunkte des Rotorblattprofils

4 Konstruktion und Fertigung

Anschließend wird das Profil extrudiert. Das bedeutet, die zweidimensionale Skizze wird zu einem Volumenkörper ausgedehnt. Die Tiefe der Ausdehnung ist gleich der Gesamthöhe des H-Rotors und beträgt 13 cm. In der Abbildung 4-2 ist das fertige Modell des Rotorblatts dargestellt:

Zur Montierung der Tragarme ist jeweils oben und unten eine Tasche eingearbeitet, die einen Millimeter länger und breiter ist als die Halterung selber. Das etwas größere Maß der Tasche ist als Platz für den Sekundenkleber gedacht und sichert somit den Zusammenhalt des Rotors. Die Tiefe beträgt zwei Millimeter, welche ungefähr die Hälfte der Profildicke ausmacht. Um den Rotor später auf einer Fläche bzw. einem Generator sicher montieren zu können, ist die untere Tasche an den unteren Rand der Rotorblätter gelegt worden. Für den Fall, dass die alleinige Befestigung an der Rotorachse nicht ausreicht, können so die unteren Tragarme zusätzlichen Halt geben. Am oberen Rand ist das nicht notwendig, sodass hier ein Abstand von 0,5 cm eingehalten wird. Da für den H-Rotor kein konstruktiver Anstellwinkel zur Rotorachse nötig ist (siehe Kap. 2.3.2), liegen die großen Anliegeflächen der Taschen parallel zu der XZ-Ebene (Ebene des Rotorblatts).

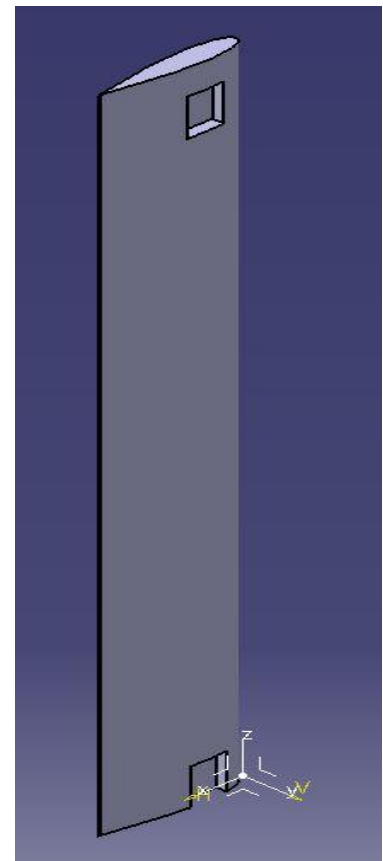


Abbildung 4-2: Rotorblattmodell

4.1.2 Konstruktion der Tragarme und der Rotorachse

Die Rotorachse ist in der Mitte des Rotors und hält das Gesamtmodell zusammen. Die Höhe ist mit 13 cm klar definiert, der Durchmesser allerdings nicht. Er muss groß genug sein, um die jeweils fünf Taschen der Tragarme ohne Überlagerungen zu beinhalten. Zwischen den Taschen muss genügend Platz sein, damit die Tragarme festmontiert werden können und sich nicht gegenseitig den Weg versperren. Die Taschen haben eine Tiefe von drei Millimetern, sodass ein Durchmesser von 15 Millimetern ausreichend ist (siehe Abbildung 4-4).

Der Tragarm ist ein Quader und folglich das einfachste Modell. Er ist in Abbildung 4-3 dargestellt und hat eine Höhe von sieben und eine Breite von fünf Zentimetern (siehe Kap. 3.4.1). Die Tiefe berechnet sich aus dem Gesamtrorradius, dem Rotorachsenradius sowie den Taschentiefen und beträgt 4,35 Zentimeter.

$$0,05m - (0,0075m - 0,003m) - 0,002m = 0,0435m$$

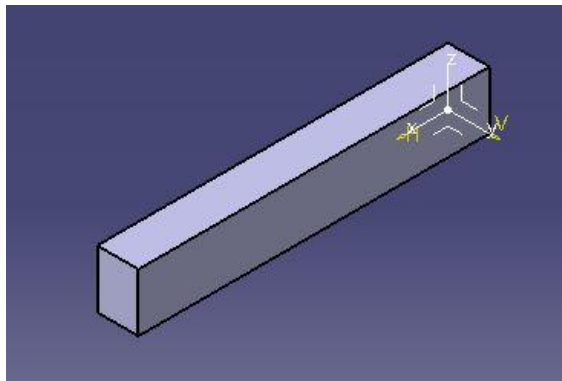


Abbildung 4-3: Tragarmmodell

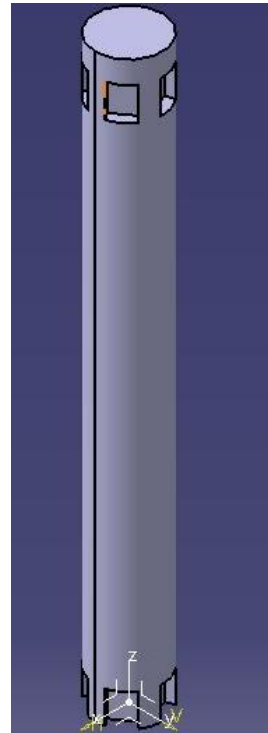


Abbildung 4-4: Rotorachsenmodell

Am Ende werden die fehlenden Rotorblätter und Tragarme durch Kopien vom ersten Modell erstellt und für den 3D-Druck im richtigen Format gespeichert.

4.2 3D-Druck

Mit dem 3D-Drucker, auch „Rapid-Prototyping“ genannt, lassen sich dreidimensionale Gegenstände herstellen, die schichtweise aufgebaut werden. Als Grundlage dient ein CAD-Modell, welches hier vorher erstellt wurde. Das verwendete Material ist Acrylharz (siehe Anhang: Datenblatt). Acrylharze werden auch oft in Klebstoffen wie Sekundenklebern verwendet, sodass eine nachträgliche Befestigung der Tragarme an der Rotorachse mit eben diesem Sekundenkleber keine Probleme darstellt.

Ein 3D-Drucker baut ein Modell wie oben erwähnt in vielen Schichten von unten nach oben auf. Dazu verwendet er zwei verschiedene Materialien. Das eigentliche Modell besteht aus dem Haupt- bzw. Trägermaterial. Sind im CAD-Modell allerdings Lücken zwischen Bauteilen in der vertikalen Richtung vorhanden, so werden diese mit einem Stützmaterial ausgefüllt. Wäre das nicht so, würden die Schichten oberhalb der Lücken einfach herunterfallen. Bei dem H-Rotor gibt es diese Lücken jeweils zwischen den beiden Tragarmen. Um die Kosten nicht unnötig in die Höhe zu treiben, bietet es sich an, die Teile einzeln drucken zu lassen. Hinzukommt, dass die Teile nun liegend (horizontal) gedruckt werden können und somit eine erhebliche Zeitersparnis erreicht wird.

4 Konstruktion und Fertigung

Für den 3D-Druck müssen CAD-Dateien im STL-Format vorliegen. Dieses Dateiformat wird von fast allen CAD-Systemen unterstützt und stellt der Rapid Prototyping Maschine die benötigten Daten lesbar zur Verfügung. Der Druck der Bauteile verlief reibungslos und innerhalb weniger Stunden, sodass sie noch am selben Tag gereinigt werden konnten. Die gedruckten Bauteile besitzen am Rand und in den Taschen noch Stützmaterial, welches manuell entfernt werden muss. Zur groben Reinigung wird ein Zahnstocher benutzt und das Stützmaterial abgekratzt. Anschließend säubert man mit einem Wasserstrahl die Oberfläche und befreit die Bauteile so vom letzten Rest. In Abbildung 4-5 ist der Aufbau des H-Rotors dargestellt:

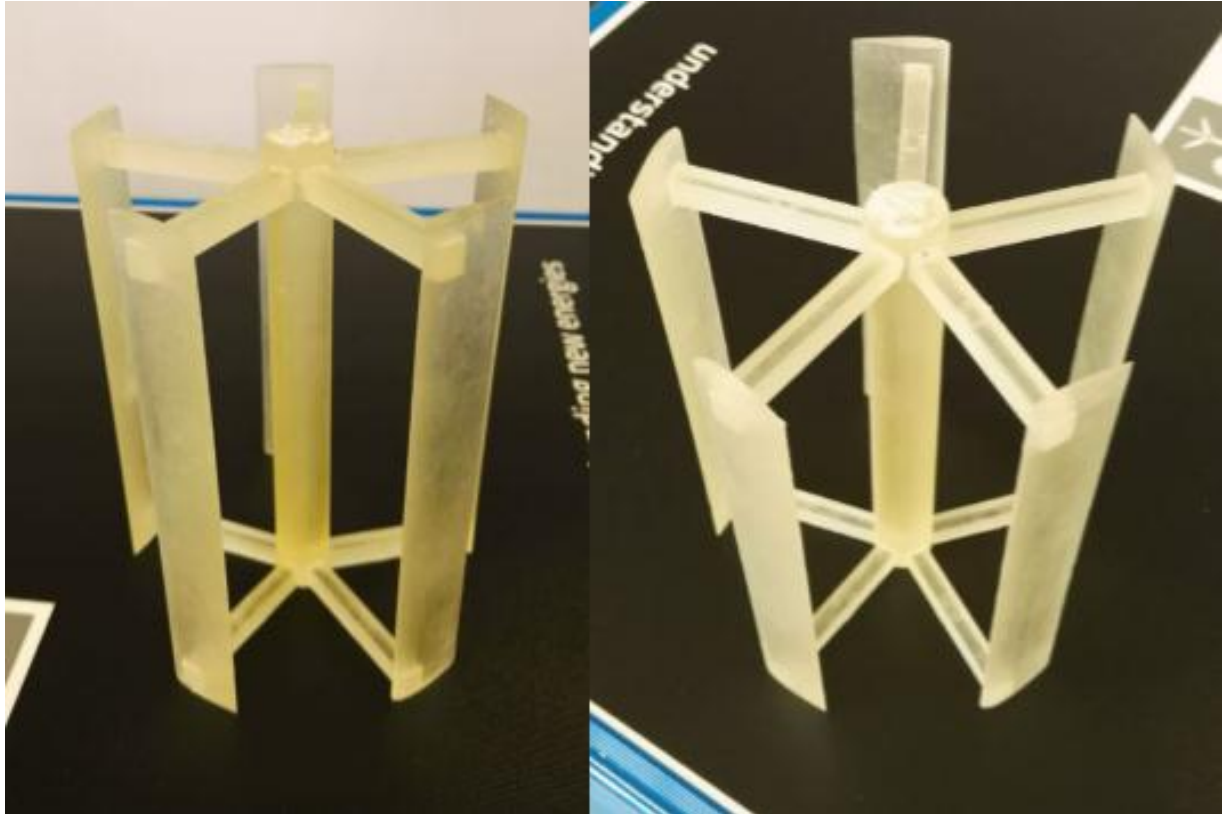


Abbildung 4-5: H-Rotor in verschiedenen Ansichten

Zur Befestigung der Tragarme ist Sekundenkleber verwendet worden. Die Bauteile sind nun fest miteinander verbunden und das Modell ist nun zum Vermessen und Testen bereit.

5 Versuch

Im Versuch soll der H-Rotor nun auf seine Funktionsweise getestet und seine Anlageneigenschaften und Anlagenkennlinien vermessen werden. Dazu gehören unter anderem die Rotorleistung P_{Rotor} , der Leistungsbeiwert c_p , die Drehzahl n und die Schnelllaufzahl λ . Die Ergebnisse des H-Rotors sind anschließend mit den Ergebnissen der klassischen Dreiblatt-Windenergieanlage und des Savonius-Rotors in einer c_p - λ -Kennlinie zu vergleichen.

5.1 Vermessung des H-Rotors

Bevor die Vermessung der Anlageneigenschaften starten kann, muss der H-Rotor auf Funktionsfähigkeit getestet werden. Der Test gilt als bestanden, wenn der H-Rotor bei einer konstanten Windgeschwindigkeit läuft und erst nach Ausschaltung des Winderzeugers zum Stillstand kommt. Da der H-Rotor nicht selbstanlaufend ist, soll er von einer außenstehenden Person manuell angedreht werden, um die benötigte Anfangsrotation zu erhalten.

5.1.1 H-Rotor (Savonius-Generator)

Für die Umwandlung der entzogenen mechanischen Leistung aus dem Wind in elektrische Leistung muss ein Generator verwendet werden. Allerdings ist für den Versuch kein eigener Generator angeschafft worden, sodass hier die Verwendung des Savonius-Rotors aus dem Labor vorgegeben ist (siehe Kap.3.1). Der Savonius-Rotor und der Dreiblattroter besitzen einen Generator, der jeweils im Steckmodul eingebaut ist. Da der Savonius-Rotor ebenfalls um die vertikale Drehachse rotiert und an der oberen Seite eine ebene Fläche zum Befestigen des Modells besitzt, eignet sich sein integrierter Generator auch für den H-Rotor.

Der H-Rotor wird mit doppelseitigem Klebeband auf der Oberseite des Savonius-Rotors befestigt. Dabei ist zu beachten, dass die Rotorachse genau in der Mitte steht und mit der Mittelachse des Savonius-Rotors eine Linie bildet, um die Schwingungen so gering wie möglich zu halten. In Abbildung 5-1 ist das aufgebaute Testmodell zu sehen. Für den Versuch ist der Winderzeuger mit dem Powermodul verbunden und auf gleicher Höhe des H-Rotors ausgerichtet. Das Powermodul mit einer Skala von einem Volt bis zu zwölf Volt wird auf die höchste Stufe eingestellt, sodass der erzeugte Wind eine gemessene Geschwindigkeit von 6,3 m/s erreicht. Der Abstand zum H-Rotormodell beträgt 15 Zentimeter und deckt damit die Querschnittsfläche des H-Rotors komplett ab. Das Ergebnis des Versuches fällt allerdings negativ aus, da der H-Rotor sich im Wind nicht von alleine weiterdreht.

5 Versuch

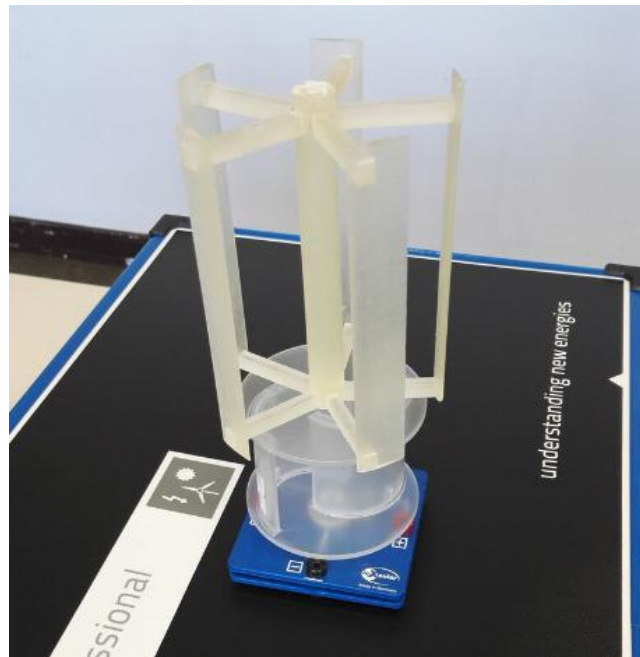


Abbildung 5-1: Savonius-Rotor als Generator des H-Rotors

Der Grund dafür könnte eine zu geringe Anlaufgeschwindigkeit bzw. Anfangsdrehzahl sein. Um zu testen, ob der Rotor sich bei einer höheren Anfangsdrehzahl von alleine dreht, soll der Rotor nun auf eine höhere Drehzahl gebracht werden. Der integrierte Generator des Savonius-Rotors kann auch als Motor eingesetzt werden und ist so in der Lage, den Rotor zu beschleunigen. Ziel dieses Versuches ist es, den H-Rotor auf eine so hohe Drehzahl zu beschleunigen, dass der Motor ausgeschaltet werden kann und er sich alleine im Wind des Winderzeugers weiterdreht. Dafür wird der Savonius-Rotor an ein Netzgerät angeschlossen. Das Schema des Versuches sieht dann wie folgt aus:

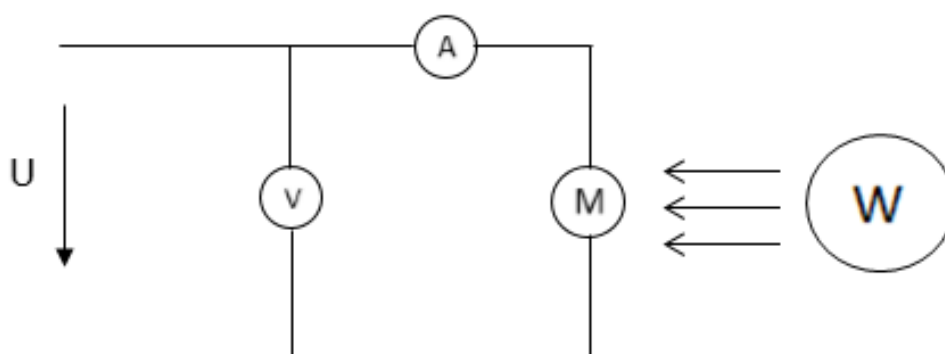


Abbildung 5-2: Versuchsaufbauschema H-Rotor (Savonius-Rotor)

Das Voltmeter V und das Amperemeter A stehen hier für die Spannungsmessung und Strommessung. Der Wind W trifft an der Stelle des Motors M auf den Rotor. Für den Versuch soll das Netzgerät auf die für den Motor angegebene Höchstspannung von $U = 12V$ gestellt werden (siehe Datenblatt von leXsolar) und der H-Rotor eine möglichst hohe Drehzahl erreichen. Die

5 Versuch

Drehzahl wird mithilfe eines Drehzahlmessgerätes bestimmt. Dafür wird der H-Rotor mit einem kleinen Stück Folie beklebt, die das Licht des Lasers reflektiert.

Bei der eingestellten Spannung von zwölf Volt traten beim Testmodell starke Schwingungen auf, sodass das Netzgerät aus Sicherheitsgründen ausgeschaltet werden musste. Die letzte Messung ergab eine Drehzahl von 400 U/min, die hier jedoch auch nicht ausreichend war, um den H-Rotor bei voller Windgeschwindigkeit ohne Antrieb laufen zu lassen. Der Rotor stoppte circa zwei Sekunden später, nachdem der Motor ausgeschaltet wurde. Der Savonius-Rotor erreicht ohne den H-Rotor eine Drehzahl von über 700 U/min. Jedoch wird das Gesamtgewicht des Modells einfach zu hoch und nicht für diesen Generator ausgelegt sein. Somit gilt auch dieser Test als nicht erfolgreich.

Um nun herauszufinden, welche Drehzahl der H-Rotor zum Anlaufen benötigt, wird die Berechnung der Schnelllaufzahl herangezogen. Die Schnelllaufzahl λ berechnet sich durch die Umfangsgeschwindigkeit u der Rotorblätter und der Windgeschwindigkeit v . Die Umfangsgeschwindigkeit u ist abhängig von der Winkelgeschwindigkeit ω und dem Rotorradius r_{HR} :

$$\lambda = \frac{u}{v} = \frac{\omega \cdot r_{HR}}{v}$$

In Abbildung 3-4 ist für den H-Rotor eine optimale Schnelllaufzahl von mindestens zwei angegeben, die hier als Anhaltspunkt dienen soll. Die Windgeschwindigkeit liegt bei 6,3 m/s und der Rotorradius bei fünf Zentimetern. Als erforderliche Drehzahl n ergibt sich dann:

$$\omega = \lambda \cdot \frac{v}{r_{HR}} \quad \text{mit} \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot n$$

$$n = \lambda \cdot \frac{v}{r_{HR} \cdot 2 \cdot \pi} = 2 \cdot \frac{6,3 \frac{m}{s}}{0,05m \cdot 2 \cdot \pi} = 40,11 \frac{U}{s}$$

$$n = 2406,42 \frac{U}{min}$$

Die benötigte Drehzahl n beträgt circa 2406 Umdrehungen pro Minute, die man mit dem Generator des Savonius-Rotors einfach nicht erreichen kann. Aufgrund von Zeitmangel und aus Kostengründen ist ein neuer, stärkerer Gleichstrommotor (Generator und Motor) nicht mehr zu beschaffen. Nach einwöchiger Suche sind gleich zwei Gleichstrommotoren gefunden worden, die für die Versuche zur Verfügung stehen. Sie unterscheidet nur die Scheibengröße auf der Welle, auf die der H-Rotor befestigt werden soll.

5.1.2 H-Rotor (Gleichstrommotor)

In der Hoffnung, mit einem dieser Gleichstrommotoren in den Bereich der geforderten Drehzahl zu gelangen, wurde der Motor (M) mit der größeren Auflagefläche ausgewählt. Mit steigender Drehzahl erhöhen sich auch die auf den H-Rotor wirkenden Kräfte, sodass die Rotorachse und die unteren Tragarme mit Doppelklebeband und Sekundenkleber am Gleichstrommotor befestigt werden können. Das Versuchsaufbauschema ist in folgendem Bild zu sehen:

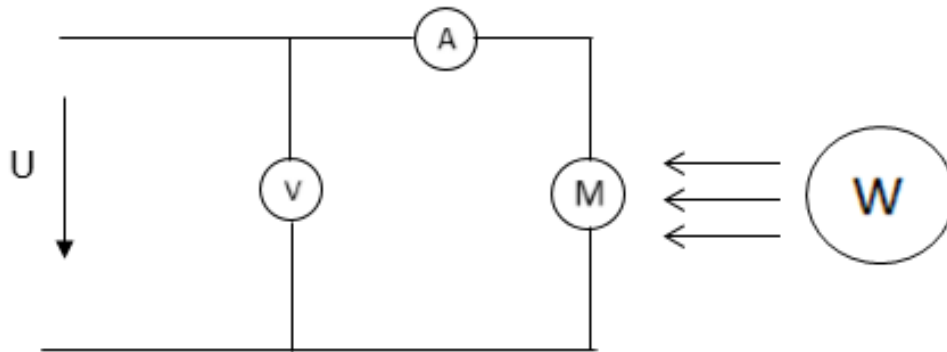


Abbildung 5-3: Versuchsaufbauschema H-Rotor (Gleichstrommotor)

Der Versuchsaufbau hat sich zum vorherigen Versuch nur geringfügig geändert. Der Unterschied liegt im verwendeten Generator/ Gleichstrommotor:

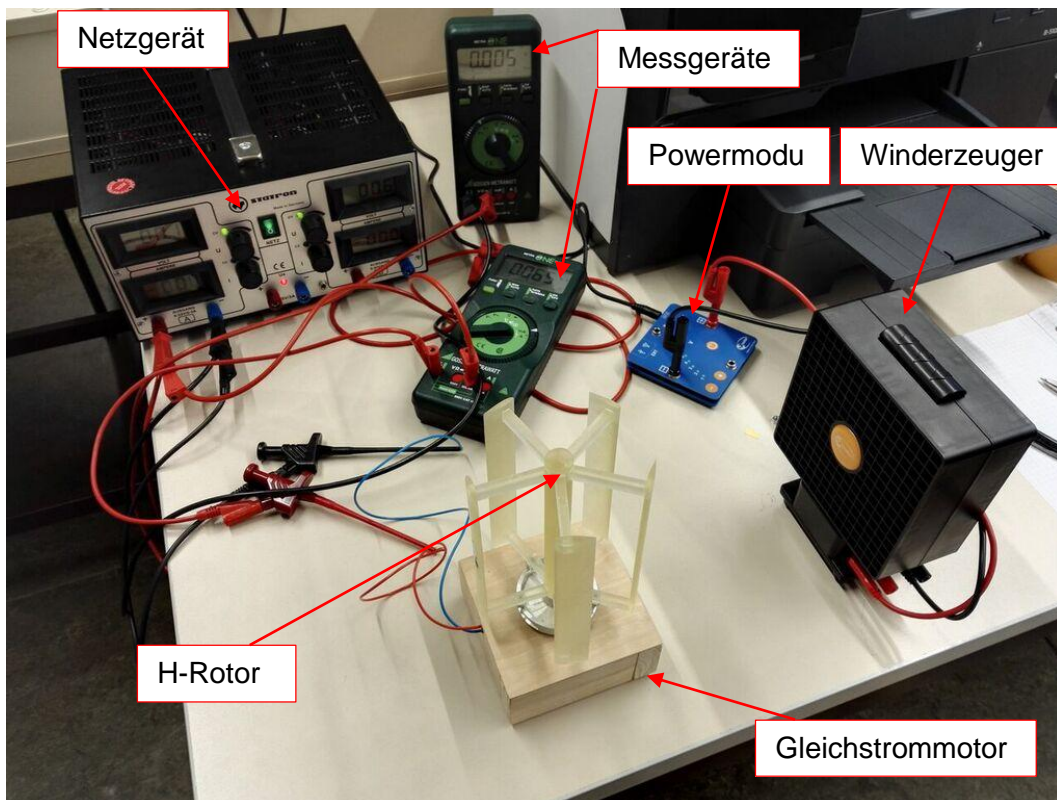


Abbildung 5-4: Versuchsaufbau H-Rotor (Gleichstrommotor)

5 Versuch

Dieser Versuch wird wie der letzte Versuch durchgeführt. Der Gleichstrommotor ist am Netzgerät angeschlossen und soll den Rotor auf eine hohe Drehzahl bringen. Der Winderzeuger wird angeschaltet und direkt auf den H-Rotor gerichtet. Doch auch hier ist das gewünschte Ergebnis nicht eingetreten. Der H-Rotor schafft es bis zu einer Drehzahl von knapp über 600 U/min, danach fängt er sehr stark an zu schwingen und reißt sich langsam von der Aufliegefläche ab. Lässt man den H-Rotor allerdings bei einer Drehzahl von 600 U/min laufen und stellt dann den Motor aus, so dreht sich der Rotor noch circa 10 s im Wind weiter und stoppt somit nicht sofort wie beim letzten Versuch.

Der H-Rotor scheint unter diesen Bedingungen nicht genügend Auftriebskraft zu erzeugen, die er für die alleinige und dauerhafte Rotation im Wind benötigt. Um nun zu zeigen, dass mit diesem H-Rotormodell dem Wind mechanische Leistung entzogen wird, soll ein neuer Versuch gestartet werden. In diesem Versuch bringt der Gleichstrommotor den H-Rotor auf eine bestimmte Drehzahl. Ist die gewünschte Drehzahl erreicht, so wird die Stromstärke I_1 und die Spannung U_1 anhand der Messgeräte erfasst und die Motorleistung P_{Motor1} berechnet:

$$P_{Motor1} = U_1 \cdot I_1$$

Die Rotorleistung P_{Rotor1} wird aus der Motorleistung P_{Motor1} mit den abfallenden Kupferverlusten P_{Cu1} und Bürstenverlusten P_{B1} berechnet:

$$P_{Rotor1} = P_{Motor1} - P_{Cu1} - P_{B1}$$

Anschließend wird der Wind aktiviert, was eine Drehzahlerhöhung des Rotors mit sich führt. Um die Rotordrehzahl wieder auf den alten Wert zu regulieren, wird die Spannung heruntergedreht. Daraus resultiert eine kleinere Motorleistung P_{Motor2} und gleichzeitig eine geringere Rotorleistung P_{Rotor2} :

$$P_{Motor2} = U_2 \cdot I_2$$

$$P_{Rotor2} = P_{Motor2} - P_{Cu2} - P_{B2}$$

Aus der Leistungsdifferenz von P_{Rotor1} und P_{Rotor2} ergibt sich dann die vom Wind erzeugte Leistung P_{Wind} :

$$P_{Wind} = \Delta P = P_{Rotor1} - P_{Rotor2}$$

Um im Anschluss eine cp - λ -Kennlinie zu erstellen, müssen noch der Leistungsbeiwert cp und die Schnelllaufzahl λ bestimmt werden. Der Leistungsbeiwert berechnet sich aus der vom Wind erzeugten Leistung P_{Wind} am Rotor und der Windleistung P_0 aus der ungestörten Luftströmung durch die überstrichene Rotorfläche A des H-Rotors (siehe Kap. 2.1):

5 Versuch

$$cp = \frac{P_{Wind}}{P_0} = \frac{P_{Wind}}{\frac{1}{2} \rho v^3 A}$$

Die Schnelllaufzahl λ ist definiert durch:

$$\lambda = \frac{u}{v} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot r_{HR}}{v}$$

Der Versuch wurde mit Drehzahlen von 200-600 U/min in Hunderterschritten durchgeführt. Aufgrund der Messungenauigkeit sind für jede Drehzahl jeweils fünf Messungen ohne und mit Wind durchgeführt worden. Daraus werden dann die Mittelwerte bestimmt, die für die weiteren Berechnungen benutzt werden (siehe Anhang A). Als Beispiel sind die Durchschnittsmesswerte für eine Drehzahl von 400 U/min in folgender Tabelle dargestellt:

Wind	n [U/min]	U [V]	I [mA]	P _{Motor} [mW]	P _{Cu} [mW]	P _B [mW]	P _{Rotor} [mW]	P _{Wind} [mW]	cp	λ
Nein	400	3,844	8,20	31,52	1,63	2,46	27,43	3,87	0,002	0,332
Ja	400	3,756	7,18	26,97	1,25	2,15	23,56			

Tabelle 5-1: Messwerte bei einer Drehzahl von 400U/min

Anhand dieser Messwerte wird im Folgenden eine Beispielrechnung durchgeführt. Der Kupferwiderstand R_{Cu} wurde mit 24,46 Ohm am Gleichstrommotor gemessen. Der Bürstenspannungsverlust U_B wird mit 0,3 Volt angenommen ([10], S.659):

Mit $P_{Cu} = R_{Cu} \cdot I^2$ und $P_B = U_B \cdot I$ ergibt sich:

$$P_{Rotor1} = (U_1 \cdot I_1) - P_{Cu1} - P_{B1} = (3,844V \cdot 8,2mA) - 1,63mW - 2,46mW = 27,43mW$$

Für die Rotorleistung P_{Rotor2} mit dem Wind ergibt sich analog zu P_{Rotor1} :

$$P_{Rotor2} = (U_2 \cdot I_2) - P_{Cu2} - P_{B2} = (3,756V \cdot 7,18mA) - 1,25mW - 2,15mW = 23,57mW$$

Die entzogene Leistung aus dem Wind beträgt dann:

$$P_{Wind} = P_{Rotor1} - P_{Rotor2} = 27,43mW - 23,57mW = 3,86mW$$

Damit ist gezeigt, dass der Rotor mechanische Leistung aus dem Wind entnehmen kann. Das Powermodul für den Winderzeuger ist auf höchster Stufe eingestellt, sodass mit einer Windgeschwindigkeit v von 6,3 m/s gerechnet wird. Die Luftdichte wird mit 1,2041 kg/m³ angenommen ([3]). Der Leistungsbeiwert cp ist:

$$cp = \frac{P_{Wind}}{P_0} = \frac{P_{Wind}}{\frac{1}{2} \rho v^3 A} = \frac{3,87mW}{\frac{1}{2} \cdot 1,2041 \frac{kg}{m^3} \cdot 6,3^3 \frac{m}{s} \cdot 0,013m^2} = 0,00198$$

5 Versuch

Die Schnelllaufzahl beträgt:

$$\lambda = \frac{u}{v} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot r_{HR}}{v} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 400 \frac{1}{\text{min}} \cdot 0,05\text{m}}{6,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,332$$

Die Messwerte bei anderen Drehzahlen lassen sich analog zu der Beispielrechnung bestimmen (siehe Anhang A). In Abbildung 5-5 ist die gemessene Leistung P über der Schnelllaufzahl λ dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die entnommene Leistung des H-Rotors mit steigender Schnelllaufzahl erheblich größer wird. Der Graph lässt vermuten, dass die Leistung bei höheren Schnelllaufzahlen von $\lambda > 0,5$ noch weiter steigen würde.

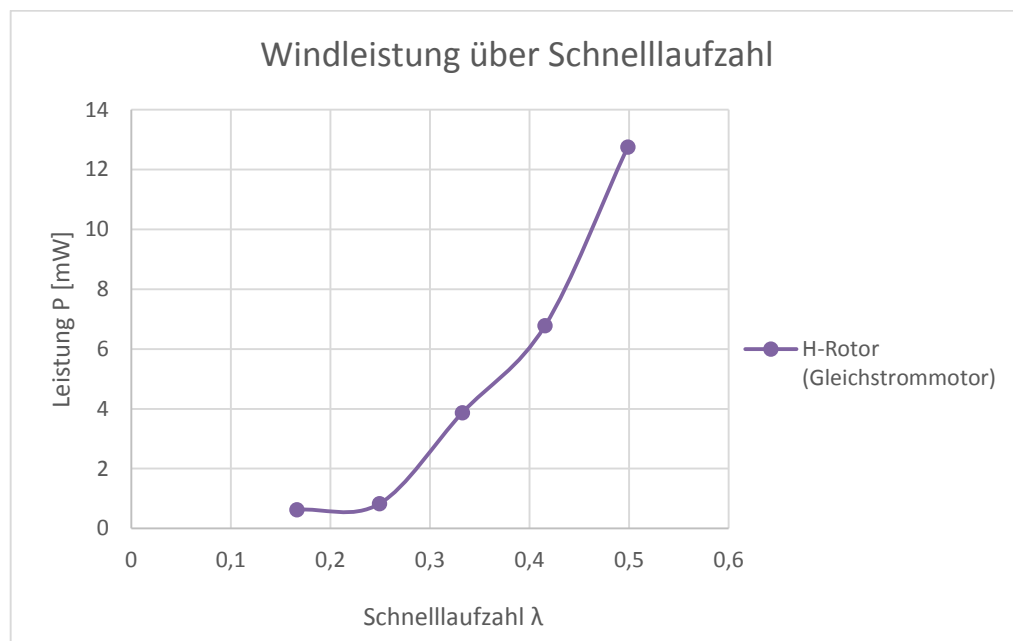


Abbildung 5-5: P- λ –Kennlinie H-Rotor (Gleichstrommotor)

5.1.3 H-Rotor (beidseitig)

Um die Schwingungen aus dem letzten Versuch zu minimieren und eine höhere Drehzahl zu erreichen, wird der H-Rotor nun in einem neuen Versuch auf der anderen Seite zusätzlich stabilisiert. Dafür wird der zweite Gleichstrommotor verwendet. Dieser wird nicht an das Netzgerät angeschlossen, sodass er nur zur Stabilisierung des Testmodells dient. Das Versuchsaufbauschema hat sich gegenüber des letzten Versuchs nicht verändert (siehe Abbildung 5-3). In Abbildung 5-6 ist der Versuchsaufbau zu sehen. Man erkennt, dass die Rotorachse des H-Rotors jetzt horizontal ausgerichtet ist. Nur so ist es möglich, die Gleichstrommotoren auf beiden Seiten zu befestigen. Für den Versuch hat dieser Aufbau allerdings keinen Nachteil, da der Wind immer noch seitlich auf die Rotorblätter zuströmt. Um dem Rotor die volle Windströmung zukommen zu lassen, muss die Höhe der Luftströmung noch angepasst und der Winderzeuger um 90° zur Seite gedreht werden.

5 Versuch

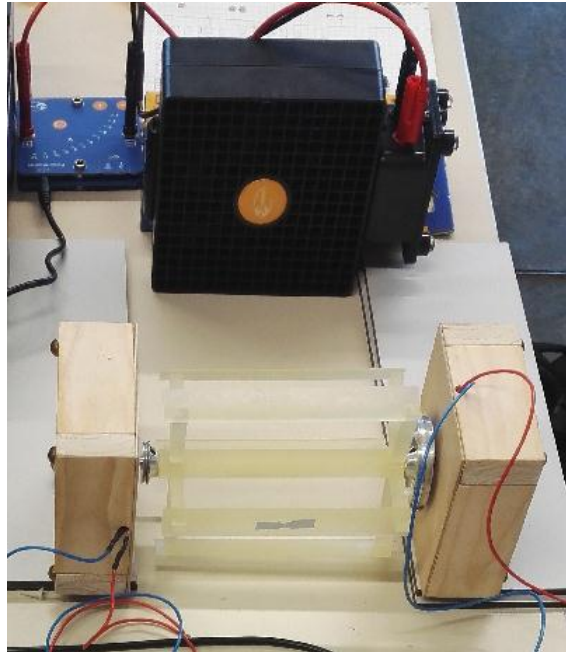


Abbildung 5-6: Versuchsaufbau H-Rotor (beidseitig)

Bei diesem Versuchsaufbau ist eine Drehzahl von 900 U/min erreicht worden (siehe Anhang B). Das entspricht gleichzeitig einer höheren Schnelllaufzahl λ . Wider Erwarten ist die Leistung P (hier grün) nicht über den Maximalwert des letzten Versuchs gestiegen, sondern sinkt wieder in den Bereich von der Anfangsschnelllaufzahl. Der Grund dafür ist vermutlich die erhöhte Reibung des zweiten Gleichstrommotors. Im folgenden Diagramm sind die Leistungen der beiden Versuche im Vergleich über der Schnelllaufzahl dargestellt:

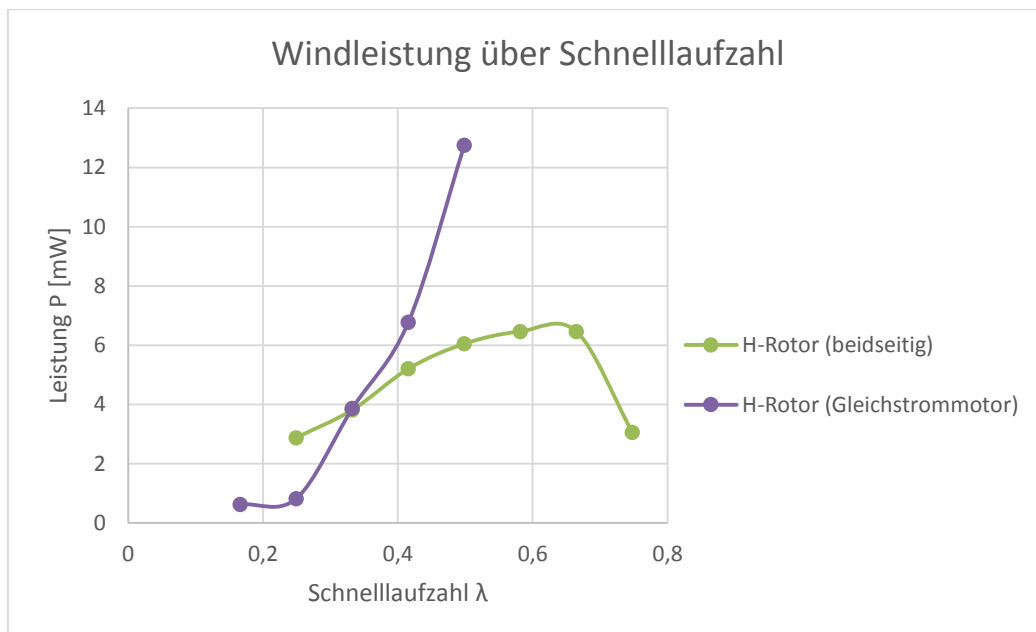


Abbildung 5-7: P- λ -Kennlinie H-Rotoren

Im obiger Abbildung ist zu erkennen, dass die vermessenen Schnelllaufzahlen deutlich unter den angestrebten Werten liegen (siehe Abbildung 3-4).

5.2 Dreiblattrotor

Um die Messergebnisse des H-Rotors zu vergleichen, werden sowohl der Dreiblattrotor als auch der Savonius-Rotor vermessen. Bei beiden Versuchen wird kein Netzteil benötigt, da sich der Rotor jeweils alleine im Wind dreht. Der Versuchsaufbau beim Dreiblattrotor ist in Abbildung 5-8 dargestellt:

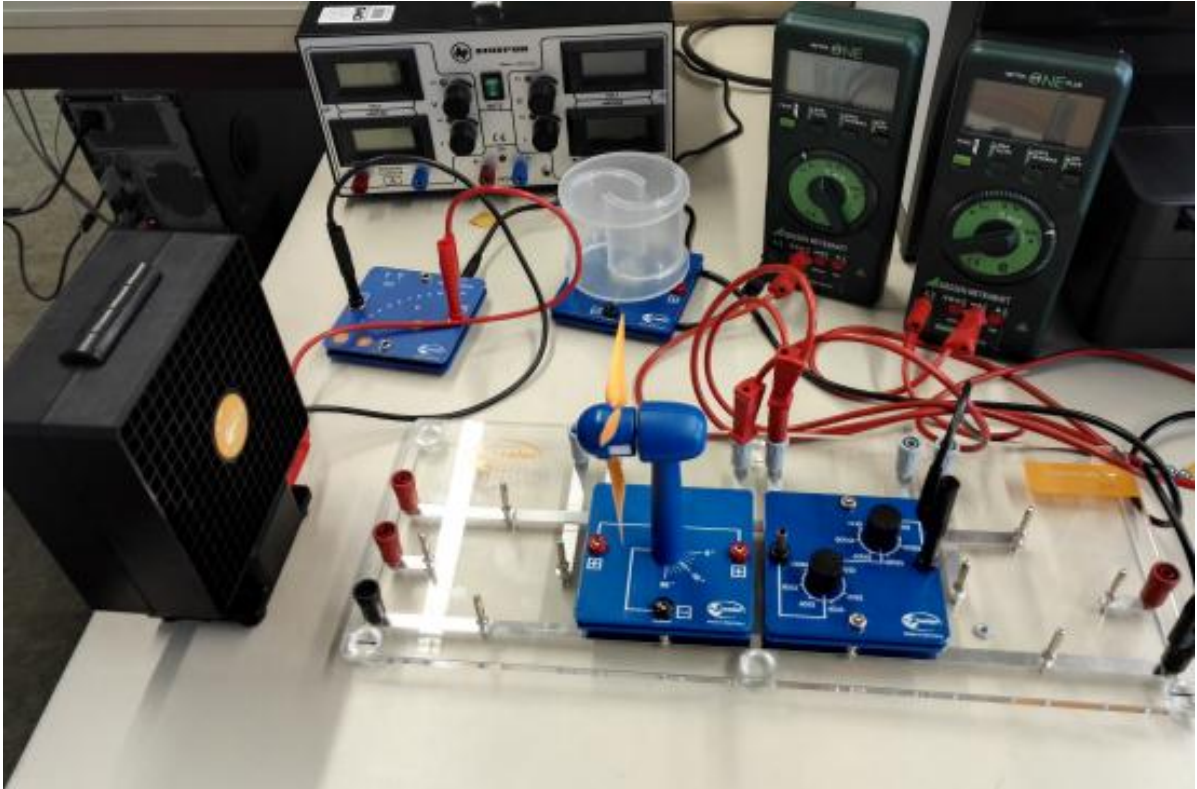


Abbildung 5-8: Versuchsaufbau Dreiblattrotor

Der Dreiblattrotor wird hier von links vom Wind getroffen. Die Messgeräte messen die Spannung U und die Stromstärke I , während mit dem Potentiometer der Widerstand und somit die Drehzahl des Rotors verändert wird. Das Versuchsaufbauschema sieht dann wie folgt aus:

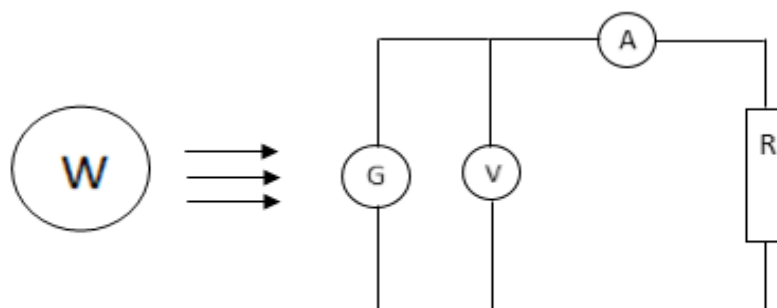


Abbildung 5-9: Versuchsaufbauschema Dreiblattrotor

5 Versuch

Damit die Versuche vergleichbar sind, wird auch hier die Windgeschwindigkeit auf 6,3 m/s gestellt. Der Dreiblattrotor erreicht je nach Widerstand des Potentiometers eine Drehzahl von circa 3900 U/min bis zu 5800 U/min. Die Drehzahlen liegen deutlich über denen des H-Rotors, was sich auch in der Rotorleistung widerspiegelt (siehe Anhang C).

In Abbildung 5-10 ist die vom Wind erzeugte Leistung am Dreiblattrotor zu sehen. Im Gegensatz zum H-Rotor (circa 13 mW) ist die Leistung vom Dreiblattrotor deutlich höher und beträgt über 140 mW.

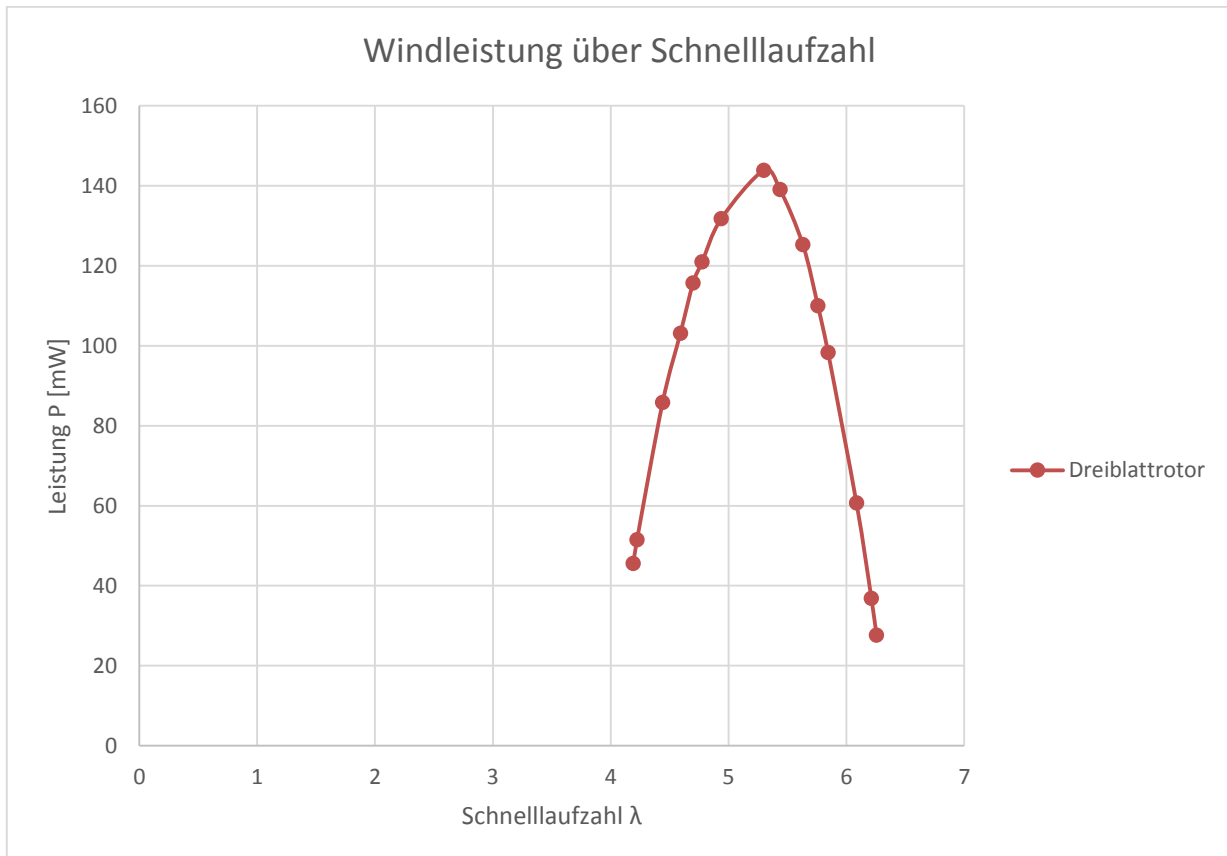


Abbildung 5-10: P- λ -Kennlinie Dreiblattrotor

5.3 Savonius-Rotor

Im letzten Versuchsteil soll jetzt der Savonius-Rotor vermessen werden. Der Versuchsaufbau ist in folgendem Bild dargestellt:

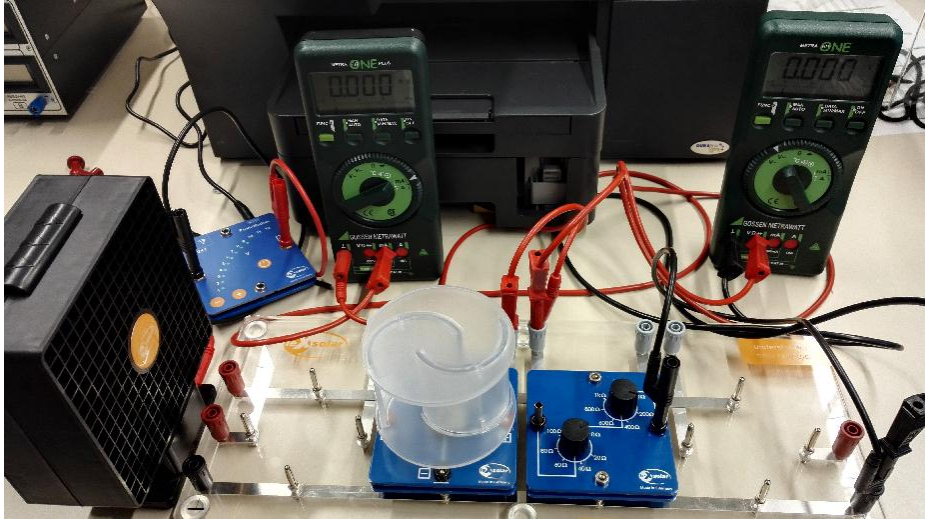


Abbildung 5-11: Versuchsaufbau Savonius-Rotor

Der Savonius-Rotor ist ein Widerstandläufer und sollte dementsprechend eine geringere mechanische Leistung als die beiden Auftriebsläufer erzielen. Die Drehzahl liegt je nach Widerstand des Potentiometers zwischen circa 950 U/min bis 1060 U/min. Aus den Messwerten (siehe Anhang D) ist folgende P - λ -Kennlinie bestimmt worden:

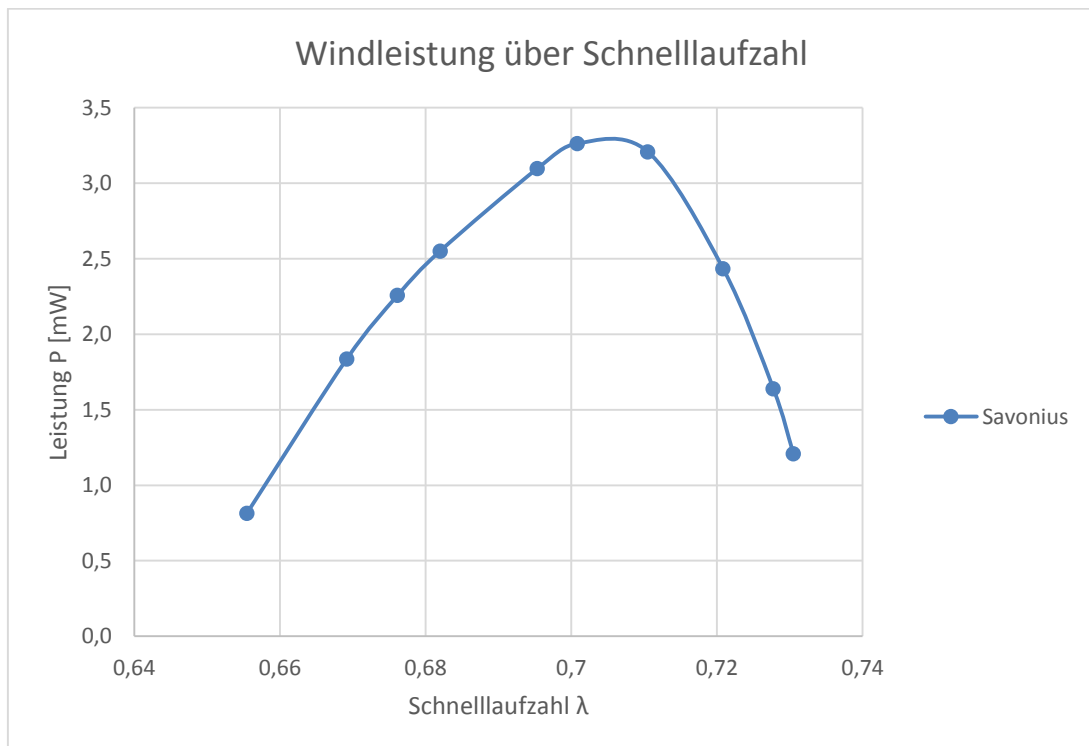


Abbildung 5-12: P - λ -Kennlinie Savonius-Rotor

5 Versuch

Wie in Abbildung 5-12 zu sehen, beträgt die maximal erreichte Rotorleistung beim Savonius-Rotor circa 3,25 mW. Die erreichten Schnelllaufzahlen im Bereich von ungefähr 0,65 bis 0,73 liegen im erwarteten Bereich (siehe Abbildung 3-4).

5.4 Vergleich der Messergebnisse

Zum Vergleich der drei verschiedenen Rotorarten werden zwei Anlagenkennlinien miteinander verglichen. Die erste Kennlinie ist die bereits für jeden Versuch dargestellte P - λ -Kennlinie: Die dem Wind entzogene Leistung wird über der Schnelllaufzahl dargestellt. Eine Darstellung über der Schnelllaufzahl ist hier sinnvoller als über der Drehzahl, da so auch die Windgeschwindigkeit und der Rotorradius mit einbezogen werden. Wie zu erwarten, ist in Abbildung 5-13 ein deutlicher Unterschied der Leistungsentnahme zu erkennen. Der Dreiblattrotor ist seinem Entwicklungsvorsprung gerecht geworden und entzieht dem Wind die höchste mechanische Leistung. Um die Graphen des H-Rotors und des Savonius-Rotors besser zu sehen, sind diese zusätzlich in einem Ausschnitt dargestellt. In beiden Versuchen des H-Rotors wird eine höhere Leistung erzielt als beim Savonius-Rotor.

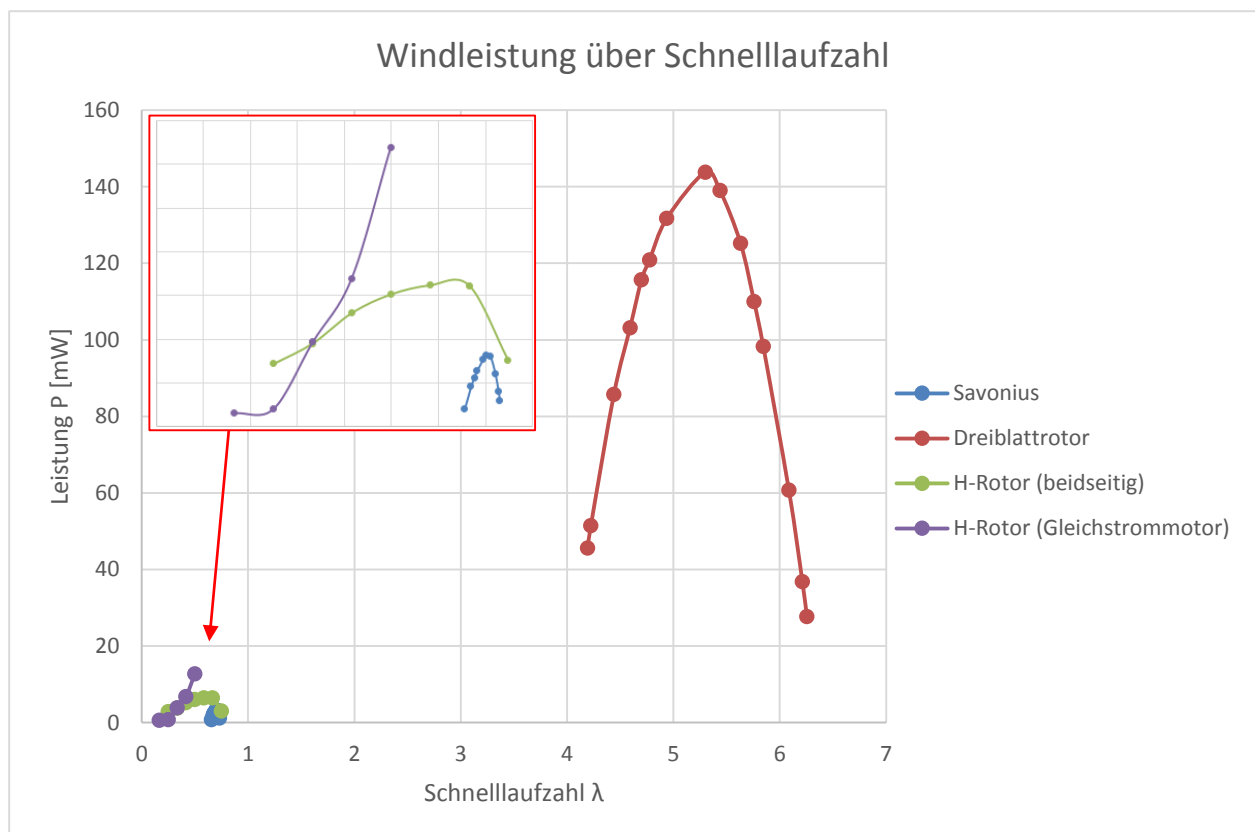


Abbildung 5-13: Vergleich der P - λ -Kennlinien

5 Versuch

Um nun den aerodynamischen Wirkungsgrad der drei Rotortypen zu vergleichen, wird der Leistungsbeiwert c_p über der Schnelllaufzahl λ dargestellt:

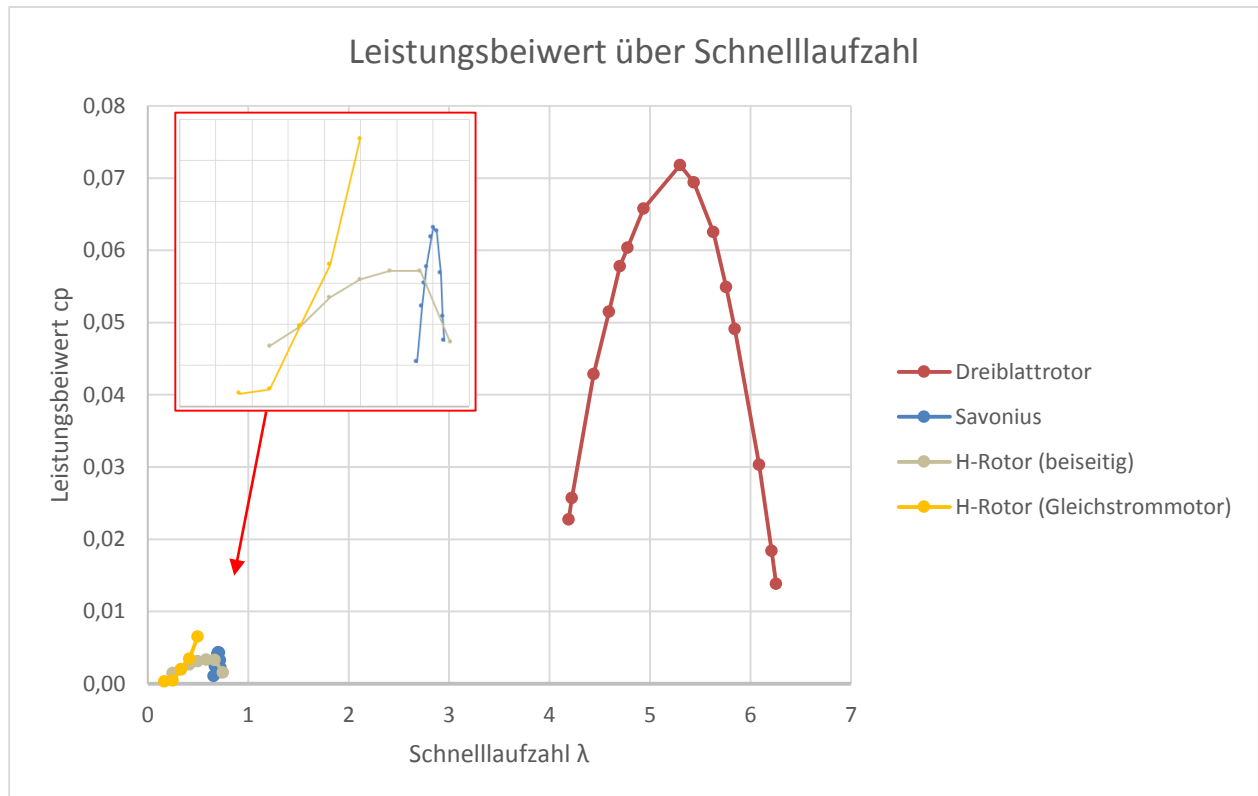


Abbildung 5-14: Vergleich der c_p - λ -Kennlinien

In der Abbildung 5-14 ist zu sehen, dass keine der drei Anlagentypen annähernd die gewöhnlichen Leistungsbeiwerte ihrer Bauform erreichen (siehe Abbildung 2-6). Der Grund dafür sind die kleineren Modelle und die im Vergleich dazu hohen Verluste durch Reibung. Die c_p - λ -Kennlinie ist der P - λ -Kennlinie sehr ähnlich. Das Verhältnis der Graphen des H-Rotors zu dem Graphen des Dreiblattrotors hat sich kaum verändert. Der Leistungsbeiwert c_p hängt von der Rotorleistung P und der Nettowindleistung P_0 der ungestörten Luftströmung durch die überstrichene Rotorfläche ab. Da die überstrichenen Rotorflächen des H-Rotors und des Dreiblattrotors nahezu identisch sind und die jeweiligen Versuche mit der gleichen Windgeschwindigkeit durchgeführt werden, ist hier kein Unterschied zu merken. Im Gegensatz dazu ist zu sehen, dass der Graph des Savonius-Rotors sich nach oben verschoben hat. Das liegt an der geringeren Rotorfläche, durch die der Wind strömt. Hinzu kommt, dass der H-Rotor, wenn er nur an dem einen antreibenden Gleichstrommotor befestigt ist, einen größeren Leistungsbeiwert als der Savonius-Rotor besitzt.

6 Ursache der Funktionsunfähigkeit

Wie im vorherigen Kapitel gezeigt, kann das H-Rotorfunktionsmodell nicht alleine laufen und somit ohne Antrieb eines Motors auch keine mechanische Leistung aus der Windkraft entziehen. Die möglichen Gründe für die Funktionsunfähigkeit des Rotors lassen sich nur vermuten und werden im Folgenden dargestellt:

Die erste und wahrscheinlichste Ursache ist die Größe des H-Rotors. Der H-Rotor misst mit 0,13 m Höhe und 0,1 m Breite sehr kleine Maße und ist deshalb mit bestehenden H-Rotoren nur schwer vergleichbar. Das Gewicht ist mit 82,8 Gramm gering, aber bezogen auf die kleine Größe und Kompaktheit des H-Rotors spielt es eine große Rolle. Das Verhältnis von Gewicht zu Größe ist bei größeren H-Rotoren einfach niedriger. Moderne Anlagen besitzen Rotorblätter, die einen Hohlraum haben und somit deutlich leichter sind als Blätter aus Vollmaterial. Beim H-Rotor-Modell war das aufgrund der Fertigungsweise nicht möglich. Die Auftriebskräfte an den Rotorblättern sind wegen der kleinen Maße des H-Rotors ziemlich gering. Dafür sind die Reibungsverluste und die Verluste innerhalb des Generators in Bezug auf die Rotorgröße aber ziemlich hoch. Infolgedessen reichen die Auftriebskräfte des Modells nicht aus, um den Rotor alleine laufen zu lassen und die Verluste zu kompensieren.

Ein weiter Grund könnte die zu geringe Schnelllaufzahl sein. Nach den Messdaten zufolge ist der H-Rotor höchstens bei einer Schnelllaufzahl von $\lambda = 0,75$ gelaufen (siehe Anhang B). Das liegt deutlich unter den oben angegebenen Schnelllaufzahlen von zwei bis drei (siehe Abbildung 2-6) und zeigt somit, dass die benötigte Schnelllaufzahl nicht mal annähernd erreicht wurde.

7 Fazit und Ausblick

Um einen Vergleich zu der klassischen Dreiblatt-Windenergieanlage herzustellen zu können, war die Zielsetzung der Arbeit, ein funktionsfähiges H-Rotormodell zu entwickeln. Das Sammeln von Informationen über die Auslegung eines H-Rotors hat sich als schwierig erwiesen, da der Entwicklungsstand von Vertikal-Windkraftanlagen, insbesondere von H-Rotoren, noch nicht ausgeprägt ist. Das spiegelt sich auch in der seltenen Verwendung von H-Rotoren zur kommerziellen Stromgewinnung wieder. Dort finden fast ausschließlich nur Horizontal-Windkraftanlagen Verwendung. Hinzu kommt, dass die wenigen Hersteller von H-Rotoren ihre Kenntnisse über die Auslegung ihrer selbstgebauten Anlagen nicht herausgeben und somit eine erfolgreiche Konstruktion im allerersten Versuch sehr schwierig machen.

Das in dieser Arbeit entwickelte H-Rotormodell kann nicht genügend Auftriebskraft erzeugen, um sich selbst im Wind zu drehen. Allerdings ist mit einem antreibenden Gleichstrommotor gezeigt worden, dass der H-Rotor dem Wind Energie entzieht. Die entzogene mechanische Leistung des H-Rotors ist größer als die Leistung des Savonius-Rotors. Da der Savonius-Rotor eine höhere Widerstandskraft als ein H-Rotor besitzt, kann der H-Rotor seine mechanische Leistung nicht als Widerstandsläufer aus dem Wind entnommen haben. Damit ist gezeigt, dass der entwickelte H-Rotor nach dem Auftriebsprinzip funktioniert.

Da in der Optik des Modells keine Auffälligkeiten und groben Fehler zu anderen H-Rotoren festzustellen sind, kann mit den Ergebnissen dieser Arbeit weiter entwickelt und geforscht werden. Für diesen Fall sind einige Änderungsvorschläge zu nennen. Es sollte überlegt werden, den H-Rotor aus anderen Materialien zu bauen und somit ein anderes Fertigungsverfahren zu wählen. Das kann durch einen Hohlraum in den Rotorblättern und einer Rotorachse mit geringerem Durchmesser zu einer erheblichen Gewichtsreduzierung führen. Zusätzlich sollte es die Möglichkeit geben, die Ausrichtung und Abstände der Bauteile zueinander verändern zu können. Mit dem 3D-Druckmodell ist eine nachträgliche Veränderung nicht möglich gewesen. Zudem ist ein Generator von Vorteil, der für den Gebrauch eines solchen H-Rotors ausgelegt ist und auf dem der H-Rotor fest montiert werden kann.

Literaturverzeichnis

- [1] „**Airfoil Tools**,“ 2016. [Online]. Available: <http://airfoiltools.com/>. [Zugriff am 05 12 2015].
- [2] „**Bundesverband WindEnergie**,“ [Online]. Available: <https://www.windenergie.de/themen/technik-anlagen>. [Zugriff am 01 02 2016].
- [3] „**Chemie.de**,“ [Online]. Available: <http://www.chemie.de/lexikon/Luftdichte.html>. [Zugriff am 05 02 2016].
- [4] „**Food and Agriculture Organization of the United Nations**,“ [Online]. Available: <http://www.fao.org/docrep/010/ah810e/AH810E10.htm#Fig.%20121>. [Zugriff am 24 02 2016].
- [5] **R. Gasch und J. Twele**, Windkraftanlagen: Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb, 8. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [6] **D. Gross, W. Hauger, J. Schröder und W. A. Wall**, Technische Mechanik 2 - Elastostatik, Berlin: Springer Vieweg, 2014.
- [7] **E. Hau**, Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit, 5. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.
- [8] „**Klein-Windkraftanlagen**,“ 13 12 2011. [Online]. Available: <http://www.kleinwindkraftanlagen.com/news/vertikale-windkraftanlagen-im-vergleich-mit-horizontalen-anlagen/>. [Zugriff am 03 02 2016].
- [9] **M. Mohamed**, „<http://www.sciencedirect.com/>,“ 30 09 2012. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544212006755>. [Zugriff am 25 02 2016].
- [10] **R. Richter**, Elektrische Maschinen Band II: Synchronmaschinen und Einankerumformer, Zweite Auflage, Basel: Springer Basel AG, 1953.

Anhang

A Messdaten H-Rotor (Gleichstrommotor)

200 Messung		U[V]	I[mA]	P(Motor)[W]	P(Kupfer) [W]	P (Bürste) [W]	P (Gesamt) [W]		
ohne Wind	1	2,004	5,3	0,01062	0,00068	0,00159	0,00835	R (Cu) [ω]	V Wind
	2	2,007	5,1	0,01024	0,00063	0,00153	0,00807	24,26	6,3
	3	2,002	5,1	0,01021	0,00063	0,00153	0,00805	UB[V]	V Rotor
	4	2,004	5,1	0,01022	0,00063	0,00153	0,00806	0,3	1,04719755
	5	2,004	5,1	0,01022	0,00063	0,00153	0,00806		
	\emptyset	2,0042	5,14	0,01030	0,00064	0,00154	0,00812	Windleistung [mW]	8,11849324
mit Wind	1	1,98	4,8	0,00950	0,00056	0,00144	0,00751	0,62976	
	2	1,983	4,8	0,00952	0,00056	0,00144	0,00752	Windleistung [%]	Lambda
	3	1,974	4,8	0,00948	0,00056	0,00144	0,00748	7,76	0,16622183
	4	1,975	4,8	0,00948	0,00056	0,00144	0,00748	cp	
	5	1,971	4,8	0,00946	0,00056	0,00144	0,00746	0,00032	
	\emptyset	1,9766	4,8	0,00949	0,00056	0,00144	0,00749		7,4887296
300 Messung		U[V]	I[mA]	P(Motor)[W]	P(Kupfer) [W]	P (Bürste) [W]	P (Gesamt) [W]		
ohne Wind	1	2,894	6,6	0,01910	0,00106	0,00198	0,01606		
	2	2,895	6,6	0,01911	0,00106	0,00198	0,01607		
	3	2,892	6,6	0,01909	0,00106	0,00198	0,01605		V Rotor
	4	2,901	6,7	0,01944	0,00109	0,00201	0,01634		1,57079633
	5	2,892	6,7	0,01938	0,00109	0,00201	0,01628		
	\emptyset	2,8948	6,64	0,01922	0,00107	0,00199	0,01616	Windleistung [mW]	16,1598681
mit Wind	1	2,874	6,6	0,01897	0,00106	0,00198	0,01593	0,82871	
	2	2,874	6,2	0,01782	0,00093	0,00186	0,01503	Windleistung [%]	Lambda
	3	2,868	5,9	0,01692	0,00084	0,00177	0,01431	5,13	0,24933275
	4	2,871	6,3	0,01809	0,00096	0,00189	0,01523	cp	
	5	2,874	6,7	0,01926	0,00109	0,00201	0,01616	0,00042	
	\emptyset	2,8722	6,34	0,01821	0,00098	0,00190	0,01533		15,3311557

400 Messung		U[V]	I[mA]	P(Motor)[W]	P(Kupfer) [W]	P (Bürste) [W]	P (Gesamt) [W]		
ohne Wind	1	3,85	8,3	0,03196	0,00167	0,00249	0,02779		
	2	3,85	8,3	0,03196	0,00167	0,00249	0,02779		
	3	3,84	8,1	0,03110	0,00159	0,00243	0,02708		V Rotor
	4	3,84	8,2	0,03149	0,00163	0,00246	0,02740		2,0943951
	5	3,84	8,1	0,03110	0,00159	0,00243	0,02708		
	∅	3,844	8,2	0,03152	0,00163	0,00246	0,02743		27,4297635
mit Wind	1	3,76	7,3	0,02745	0,00129	0,00219	0,02397	Windleistung [mW]	
	2	3,76	7,4	0,02782	0,00133	0,00222	0,02428		3,86635
	3	3,76	7,1	0,02670	0,00122	0,00213	0,02334	Windleistung [%]	Lambda
	4	3,75	7	0,02625	0,00119	0,00210	0,02296		14,10 0,33244367
	5	3,75	7,1	0,02663	0,00122	0,00213	0,02327	cp	
	∅	3,756	7,18	0,02697	0,00125	0,00215	0,02356		0,00198 23,5634148
500 Messung		U[V]	I[mA]	P(Motor)[W]	P(Kupfer) [W]	P (Bürste) [W]	P (Gesamt) [W]		
ohne Wind	1	4,79	10,6	0,05077	0,00273	0,00318	0,04487		
	2	4,79	10,5	0,05030	0,00267	0,00315	0,04447		
	3	4,79	10,5	0,05030	0,00267	0,00315	0,04447		V Rotor
	4	4,79	10,5	0,05030	0,00267	0,00315	0,04447		2,61799388
	5	4,79	10,6	0,05077	0,00273	0,00318	0,04487		
	∅	4,79	10,54	0,05049	0,00270	0,00316	0,04463	Windleistung [mW]	44,6294596
mit Wind	1	4,68	8,6	0,04025	0,00179	0,00258	0,03587		6,77329
	2	4,72	9,6	0,04531	0,00224	0,00288	0,04020	Windleistung [%]	Lambda
	3	4,69	8,9	0,04174	0,00192	0,00267	0,03715		15,18 0,41555458
	4	4,7	9,2	0,04324	0,00205	0,00276	0,03843	cp	
	5	4,7	9	0,04230	0,00197	0,00270	0,03763		0,00346
	∅	4,698	9,06	0,04257	0,00199	0,00272	0,03786		37,8561736
600 Messung		U[V]	I[mA]	P(Motor)[W]	P(Kupfer) [W]	P (Bürste) [W]	P (Gesamt) [W]		
ohne Wind	1	5,7	13,2	0,07524	0,00423	0,00396	0,06705		
	2	5,71	13,4	0,07651	0,00436	0,00402	0,06814		
	3	5,71	13,4	0,07651	0,00436	0,00402	0,06814		V Rotor
	4	5,71	13,5	0,07709	0,00442	0,00405	0,06861		3,14159265
	5	5,72	13,7	0,07836	0,00455	0,00411	0,06970		
	∅	5,71	13,44	0,07674	0,00438	0,00403	0,06833	Windleistung [mW]	68,3285884
mit Wind	1	5,58	10,7	0,05971	0,00278	0,00321	0,05372		12,74885
	2	5,6	11	0,06160	0,00294	0,00330	0,05536	Windleistung [%]	Lambda
	3	5,6	11	0,06160	0,00294	0,00330	0,05536		18,66 0,4986655
	4	5,6	11	0,06160	0,00294	0,00330	0,05536	cp	
	5	5,63	11,5	0,06475	0,00321	0,00345	0,05809		0,00651
	∅	5,602	11,04	0,06185	0,00296	0,00331	0,05558		55,5797415

B Messdaten H-Rotor (beidseitig)

300 Messung		U[V]	I[mA]	P(Motor)[W]	P(Kupfer) [W]	P (Bürste) [W]	P (Gesamt) [W]				
ohne Wind	1	3,36	15,6	0,05242	0,00590	0,00468	0,04183	R (Cu) [ω]	Stufe	24,26	12
	2	3,34	14,9	0,04977	0,00539	0,00447	0,03991				
	3	3,33	14,5	0,04829	0,00510	0,00435	0,03883	UB[V]	V Wind	6,3	1957,03035
	4	3,31	14,1	0,04667	0,00482	0,00423	0,03762				
	5	3,31	13,9	0,04601	0,00469	0,00417	0,03715				
	\emptyset	3,33	14,6	0,04863	0,00518	0,00438	0,03907	Windleistung [mW]	V rotor		39,0692107
mit Wind	1	3,32	14,1	0,04681	0,00482	0,00423	0,03776			2,88241	1,57079633
	2	3,3	13,8	0,04554	0,00462	0,00414	0,03678	Windleistung [%]	Lambda	7,38	0,00147285
	3	3,29	13,5	0,04442	0,00442	0,00405	0,03594				
	4	3,28	13,3	0,04362	0,00429	0,00399	0,03534				
	5	3,28	13,2	0,04330	0,00423	0,00396	0,03511				
	\emptyset	3,294	13,58	0,04474	0,00448	0,00407	0,03619				36,1867992
400 Messung		U[V]	I[mA]	P(Motor)[W]	P(Kupfer) [W]	P (Bürste) [W]	P (Gesamt) [W]				
ohne Wind	1	4,13	14,9	0,06154	0,00539	0,00447	0,05168				
	2	4,13	14,8	0,06112	0,00531	0,00444	0,05137				
	3	4,12	14,3	0,05892	0,00496	0,00429	0,04967				
	4	4,12	14,5	0,05974	0,00510	0,00435	0,05029				
	5	4,12	14,5	0,05974	0,00510	0,00435	0,05029				
	\emptyset	4,124	14,6	0,06021	0,00517	0,00438	0,05066				50,6589739
mit Wind	1	4,1	13,6	0,05576	0,00449	0,00408	0,04719	Windleistung [mW]	V rotor	3,81645	2,0943951
	2	4,1	13,7	0,05617	0,00455	0,00411	0,04751				
	3	4,08	13,5	0,05508	0,00442	0,00405	0,04661	Windleistung [%]	Lambda	8,09	0,00195012
	4	4,08	13,4	0,05467	0,00436	0,00402	0,04630				
	5	4,08	13,5	0,05508	0,00442	0,00405	0,04661				
	\emptyset	4,088	13,54	0,05535	0,00445	0,00406	0,04684				46,8425231

500 Messung		U[V]	I[mA]	P(Motor)[W]	P(Kupfer) [W]	P (Bürste) [W]	P (Gesamt) [W]				
ohne Wind	1	4,96	15,7	0,07787	0,00598	0,00471	0,06718				
	2	4,94	15,4	0,07608	0,00575	0,00462	0,06570				
	3	4,95	15,2	0,07524	0,00561	0,00456	0,06507				
	4	4,94	15,2	0,07509	0,00561	0,00456	0,06492				
	5	4,95	15,2	0,07524	0,00561	0,00456	0,06507				
	Ø	4,948	15,34	0,07590	0,00571	0,00460	0,06559	Windleistung [mW]	V rotor		65,591512
mit Wind	1	4,92	14,6	0,07183	0,00517	0,00438	0,06228	5,20659	2,61799388		
	2	4,9	14,2	0,06958	0,00489	0,00426	0,06043	Windleistung [%]	Lambda	cp	
	3	4,91	14,1	0,06923	0,00482	0,00423	0,06018	7,94	0,41555458	0,00266046	
	4	4,9	13,9	0,06811	0,00469	0,00417	0,05925				
	5	4,91	14	0,06874	0,00475	0,00420	0,05979				
	Ø	4,908	14,16	0,06950	0,00487	0,00425	0,06038				60,3849174
600 Messung		U[V]	I[mA]	P(Motor)[W]	P(Kupfer) [W]	P (Bürste) [W]	P (Gesamt) [W]				
ohne Wind	1	5,79	16,8	0,09727	0,00685	0,00504	0,08538				
	2	5,79	16,7	0,09669	0,00677	0,00501	0,08492				
	3	5,79	16,8	0,09727	0,00685	0,00504	0,08538				
	4	5,79	16,7	0,09669	0,00677	0,00501	0,08492				
	5	5,79	16,7	0,09669	0,00677	0,00501	0,08492				
	Ø	5,79	16,74	0,09692	0,00680	0,00502	0,08510	Windleistung [mW]	V rotor		85,1042202
mit Wind	1	5,75	15,6	0,08970	0,00590	0,00468	0,07912	6,05114	3,14159265		
	2	5,76	15,5	0,08928	0,00583	0,00465	0,07880	Windleistung [%]	Lambda	cp	
	3	5,75	15,7	0,09028	0,00598	0,00471	0,07959	7,11	0,4986655	0,003092	
	4	5,75	15,6	0,08970	0,00590	0,00468	0,07912				
	5	5,75	15,5	0,08913	0,00583	0,00465	0,07865				
	Ø	5,752	15,58	0,08962	0,00589	0,00467	0,07905				79,0530791

700 Messung		U[V]	I[mA]	P(Motor)[W]	P(Kupfer) [W]	P (Bürste) [W]	P (Gesamt) [W]				
ohne Wind	1	6,65	18,5	0,12303	0,00830	0,00555	0,10917				
	2	6,65	18,9	0,12569	0,00867	0,00567	0,11135				
	3	6,65	19,1	0,12702	0,00885	0,00573	0,11243				
	4	6,65	18,9	0,12569	0,00867	0,00567	0,11135				
	5	6,65	18,9	0,12569	0,00867	0,00567	0,11135				
	Ø	6,65	18,86	0,12542	0,00863	0,00566	0,11113	Windleistung [mW]	V rotor		111,130796
mit Wind	1	6,62	17,8	0,11784	0,00769	0,00534	0,10481	6,46620	3,66519143		
	2	6,62	18	0,11916	0,00786	0,00540	0,10590	Windleistung [%]	Lambda	cp	
	3	6,62	17,7	0,11717	0,00760	0,00531	0,10426	5,82	0,58177642	0,00330409	
	4	6,62	17,7	0,11717	0,00760	0,00531	0,10426				
	5	6,61	17,7	0,11700	0,00760	0,00531	0,10409				
	Ø	6,618	17,78	0,11767	0,00767	0,00533	0,10466				104,664595
800 Messung		U[V]	I[mA]	P(Motor)[W]	P(Kupfer) [W]	P (Bürste) [W]	P (Gesamt) [W]				
ohne Wind	1	7,54	21,5	0,16211	0,01121	0,00645	0,14445				
	2	7,54	21,5	0,16211	0,01121	0,00645	0,14445				
	3	7,53	21,7	0,16340	0,01142	0,00651	0,14547				
	4	7,54	21,6	0,16286	0,01132	0,00648	0,14507				
	5	7,54	21,7	0,16362	0,01142	0,00651	0,14568				
	Ø	7,538	21,6	0,16282	0,01132	0,00648	0,14502	Windleistung [mW]	V rotor		145,02166
mit Wind	1	7,52	20,6	0,15491	0,01029	0,00618	0,13844	6,45991	4,1887902		
	2	7,51	20,7	0,15546	0,01040	0,00621	0,13885	Windleistung [%]	Lambda	cp	
	3	7,51	20,7	0,15546	0,01040	0,00621	0,13885	4,45	0,66488733	0,00330087	
	4	7,51	20,6	0,15471	0,01029	0,00618	0,13823				
	5	7,52	20,6	0,15491	0,01029	0,00618	0,13844				
	Ø	7,514	20,64	0,15509	0,01034	0,00619	0,13856				138,561749
900 Messung		U[V]	I[mA]	P(Motor)[W]	P(Kupfer) [W]	P (Bürste) [W]	P (Gesamt) [W]				
ohne Wind	1	8,39	23,9	0,20052	0,01386	0,00717	0,17949				
	2	8,37	23,1	0,19335	0,01295	0,00693	0,17347				
	3	8,38	23,4	0,19609	0,01328	0,00702	0,17579				
	4	8,38	23,2	0,19442	0,01306	0,00696	0,17440				
	5	8,37	23,1	0,19335	0,01295	0,00693	0,17347				
	Ø	8,378	23,34	0,19554	0,01322	0,00700	0,17532	Windleistung [mW]	V rotor		175,324636
mit Wind	1	8,38	23,1	0,19358	0,01295	0,00693	0,17370	3,05828	4,71238898		
	2	8,37	22,8	0,19084	0,01261	0,00684	0,17138	Windleistung [%]	Lambda	cp	
	3	8,37	22,9	0,19167	0,01272	0,00687	0,17208	1,74	0,74799825	0,00156271	
	4	8,38	23,1	0,19358	0,01295	0,00693	0,17370				
	5	8,36	22,7	0,18977	0,01250	0,00681	0,17046				
	Ø	8,372	22,92	0,19189	0,01275	0,00688	0,17227				172,26636

C Messdaten Dreiblattrotor

Drehzahl [U/min]	Stufe [V]	U [V]	I [mA]	R [Ω]	P [mW]	V_{wind} [m/s]	Windleistung P_0 [mW]	cp	V_{rotor} [m/s]	λ
3880	12	0,366	124,5	3	45,57	6,3	2002,19	0,023	26,41	4,19
3909	12	0,42	122,6	3	51,49	6,3	2002,19	0,026	26,61	4,22
4110	12	0,77	111,4	7	85,78	6,3	2002,19	0,043	27,98	4,44
4250	12	1,005	102,6	10	103,11	6,3	2002,19	0,052	28,93	4,59
4350	12	1,21	95,6	13	115,68	6,3	2002,19	0,058	29,61	4,70
4420	12	1,33	90,9	15	120,90	6,3	2002,19	0,060	30,09	4,78
4570	12	1,62	81,3	20	131,71	6,3	2002,19	0,066	31,11	4,94
4905	12	2,084	69	30	143,80	6,3	2002,19	0,072	33,39	5,30
5033	12	2,344	59,3	40	139,00	6,3	2002,19	0,069	34,26	5,44
5212	12	2,717	46,1	59	125,25	6,3	2002,19	0,063	35,48	5,63
5330	12	2,972	37	80	109,96	6,3	2002,19	0,055	36,28	5,76
5410	12	3,13	31,4	100	98,28	6,3	2002,19	0,049	36,82	5,85
5633	12	3,55	17,1	208	60,71	6,3	2002,19	0,030	38,34	6,09
5750	12	3,88	9,5	408	36,86	6,3	2002,19	0,018	39,14	6,21
5790	12	4,07	6,8	599	27,68	6,3	2002,19	0,014	39,41	6,26

D Messdaten Savonius-Rotor

Drehzahl [U/min]	Stufe [V]	U [V]	I [mA]	R [Ω]	P [mW]	V _{wind} [m/s]	Windleistung P ₀	cp	V _{rotor} [m/s]	λ
950,2	12	0,046	17,7	3	0,8142	6,3	749,6931658	0,001086044	4,12944552	0,65546754
970,1	12	0,125	14,7	9	1,8375	6,3	749,6931658	0,002451003	4,21592833	0,66919497
980,2	12	0,175	12,9	14	2,2575	6,3	749,6931658	0,003011232	4,25982161	0,67616216
988,7	12	0,22	11,6	19	2,552	6,3	749,6931658	0,003404059	4,29676151	0,68202564
1008	12	0,356	8,7	41	3,0972	6,3	749,6931658	0,00413129	4,3806368	0,69533917
1016	12	0,447	7,3	61	3,2631	6,3	749,6931658	0,004352581	4,41540375	0,70085774
1030	12	0,563	5,7	99	3,2091	6,3	749,6931658	0,004280551	4,47624593	0,71051523
1045	12	0,716	3,4	211	2,4344	6,3	749,6931658	0,003247195	4,54143398	0,72086254
1055	12	0,82	2	410	1,64	6,3	749,6931658	0,002187562	4,58489268	0,72776074
1059	12	0,863	1,4	616	1,2082	6,3	749,6931658	0,001611593	4,60227616	0,73052003
Drehzahl [U/min]	Stufe [V]	U [V]	I [mA]	R [Ω]	P [mW]	V _{wind} [m/s]	Windleistung P ₀	cp	V _{rotor} [m/s]	λ
730,5	9	0,028	10,4	3	0,2912	5,1	397,7154221	0,000732182	3,17465792	0,62248194
746,2	9	0,077	9,5	8	0,7315	5,1	397,7154221	0,001839255	3,24288807	0,63586041
756	9	0,118	8,9	13	1,0502	5,1	397,7154221	0,002640582	3,2854776	0,64421129
768,8	9	0,172	8,2	21	1,4104	5,1	397,7154221	0,003546254	3,34110473	0,65511857
789,9	9	0,272	6,9	39	1,8768	5,1	397,7154221	0,004718952	3,43280258	0,67309855
808,5	9	0,352	5,9	60	2,0768	5,1	397,7154221	0,005221824	3,51363576	0,68894819
836,2	9	0,458	4,6	100	2,1068	5,1	397,7154221	0,005297255	3,63401636	0,71255223
864,1	9	0,588	3	196	1,764	5,1	397,7154221	0,004435332	3,75526613	0,73632669
885,4	9	0,691	1,69	409	1,16779	5,1	397,7154221	0,002936245	3,84783315	0,75447709
894,8	9	0,729	1,22	598	0,88938	5,1	397,7154221	0,002236222	3,88868433	0,76248712

E CD-ROM



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: _____

Vorname: _____

dass ich die vorliegende _____ – bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der _____ ist erfolgt durch:

Ort

Datum

Unterschrift im Original