



Institut für Thermische Turbomaschinen
und Maschinendynamik



SEBASTIAN ELLECOSTA, B.Sc.

Untersuchungen an einem alternativen
Konzept einer Windturbine mit vertikaler
Achse unter Einbindung von Leitschaufeln

MASTERARBEIT

ZUR ERLANGUNG DES AKADEMISCHEN GRADES

DIPLOM-INGENIEUR

EINGEREICHT AN DER

TECHNISCHEN UNIVERSITÄT GRAZ

BETREUER/ BEURTEILER: UNIV.-DOZ. DIPL.-ING. DR. TECHN. EMIL GÖTTLICH

INSTITUT FÜR THERMISCHE TURBOMASCHINEN UND MASCHINENDYNAMIK

GRAZ, IM JÄNNER 2015

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG***AFFIDAVIT***

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Kurzfassung

Stichworte:

Windturbine; vertikale Achse; alternatives Konzept; Leitschaufeln
Leistungsmessung; Hysteresebremse.

In dieser Arbeit wird ein alternatives Konzept einer Windturbine mit vertikaler Achse untersucht. Diese Turbine weist zusätzliche Leitschaufeln auf, die den Wind optimal auf die Rotorscheaufeln leiten sollen. Speziell ist auch die Art und Weise, wie die Rotorscheaufeln sich entlang des Umfangs der Turbine bewegen. Die Turbine stellt eine Mischform zwischen Auftriebs- und Widerstandsläufer dar. Ziel der Arbeit war es, die Auswirkung der Leitschaufeln auf das Leistungsoutput dieser Turbine zu untersuchen. Dazu wurde das aerodynamische Wirkprinzip des alternativen Konzepts zuerst analytisch betrachtet, wodurch eine Ausgangskonfiguration für experimentelle Versuche gefunden werden konnte. Es wurde außerdem festgestellt, dass dem Wind der größte Teil der Leistung nach dem Auftriebsprinzip entzogen wird. Für die experimentellen Versuche an einer Modell-Turbine wurde ein Prüfstand entwickelt, mit dessen Hilfe Leistungsmessungen in einer zweidimensionalen Strömungssituation durchgeführt werden konnten. Für die Messungen wurde unter anderem eine Hysteresebremse verwendet. Aufgrund der Messergebnisse konnte eine optimale Konfiguration der Leitschaufeln ermittelt werden. Diese erzielte rund sechs Prozent an Leistungsgewinn gegenüber einer Ausführung der Turbine ohne Leitschaufeln. Durch die Einbindung der Leitschaufeln geht die Eigenschaft der Turbine verloren, sich schnell und einfach in Windrichtung auszurichten. Es gilt daher die moderate Leistungssteigerung gegenüber dem Verlust der einfachen Windnachführung abzuwiegen.

Abstract

Keywords: Wind turbine; vertical axis; alternative concept; guide vanes; power measurement; hysteresis brake.

In this work an alternative concept of a vertical axis wind turbine is examined. This turbine uses additional guide vanes that should lead the wind onto the rotor blades. Another particular feature is also the manner in which the rotor blades move along the circumference of the turbine. The turbine is a hybrid between lift-driven and drag-driven wind turbine. The aim of the study was to analyze the effects of the guide vanes on the power output of the turbine. Therefore, the aerodynamic principle of the alternative concept was observed from an analytical point of view which led to an initial configuration for experimental tests. It has also been established that the major part of the wind power is converted according to the lift-principle. To enable power measurements in a two-dimensional flow situation, a test stand for the experimental tests on a model turbine was developed. Amongst other things, a hysteresis brake was used for the measurements. Based on the results, an ideal configuration for the guide vanes could be determined resulting in an increase in efficiency of six percent compared to a turbine without guide vanes. Through the integration of guide vanes the turbine loses its ability to adjust to the wind direction in a simple and easy way. Thus the moderate increase in efficiency has to be weighed with the loss of the easy yaw system.

Danksagung

Ich möchte mich bei dem gesamten Team des Instituts für thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik mit dem Vorstand Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Franz Heitmeir für die uneingeschränkte Hilfsbereitschaft und das angenehme Arbeitsklima bedanken.

Besonders danken möchte ich dabei Herrn Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. techn. Emil Göttlich für die professionelle Betreuung meiner Arbeit und für die stets richtungsweisenden und motivierenden Gespräche.

Ein besonderer Dank gilt auch dem Werkstattleiter Herrn Martin Haubehofer und den Mitarbeitern Daniel Eisenkölbl und Florian Plank, die mir mit ihrer Erfahrung und den praktischen und effektiven Lösungen maßgeblich bei der Fertigung des Prüfstands geholfen haben.

Am Kompetenzzentrum *Virtuelles Fahrzeug* möchte ich den Mitarbeitern Mag. Dr. Bernhard Lechner und Oliver Mariani für die gute Zusammenarbeit, für die Leihgabe von Messgeräten und für die Hilfestellung bei der Messtechnik danken.

Bei der Firma *bionic surface technologies GmbH* bedanke ich mich ebenfalls für die gute Zusammenarbeit und für die Leihgabe der Messgeräte.

Ausdrücklich bedanke ich mich auch bei meinen Eltern Andreas und Anita mit Rupert, meinen Großeltern Robert, Maria, Rosa und Anton, meinen Freunden und meiner Freundin Magdalena für die konstruktiven Gespräche, die mich durch diese Arbeit begleitet haben, und für die bedingungslose Unterstützung in jeder Lebenslage.

Graz, 2015

Nomenklatur

A	Hauptachse
a	Induktionsfaktor
c_i	Windgeschwindigkeit, Absolutgeschwindigkeit an der Stelle i
c_D	Widerstandsbeiwert
c_L	Auftriebsbeiwert
c_P	Leistungsbeiwert
E	Kinetische Energie
e_i	Einheitsvektor
f_i	Fläche i
F_L	Aerodynamische Auftriebskraft
F_D	Aerodynamische Widerstandskraft
M	Drehmoment
\bar{M}	Spezifisches Drehmoment
m	Masse
\dot{m}	Massenstrom
n	Drehzahl
p_i	Druck an der Stelle i
P	Leistung
\bar{P}	Spezifische Leistung
r	Radius
r_m	Mittlerer Rotorradius
R	Schaufelachse
R_{Shunt}	Shunt-Widerstand
s	Schaufellänge
S	Schub
u_i	Umfangsgeschwindigkeit an der Stelle i
U	Spannung
w_i	Relativgeschwindigkeit an der Stelle i

x	Koordinate
α	Anstellwinkel
γ	Phasenwinkel
λ	Schnelllaufzahl
ρ	Dichte
φ	Umfangswinkel
ψ	Schaufelwinkel
ω	Winkelgeschwindigkeit des Rotors

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Ausgangssituation.....	3
2.1	Die Patentschrift der alternativen VAWT	3
2.2	Modellturbine.....	5
2.3	Ähnliche Konzepte.....	6
2.3.1	Eolienne à voilure tournante.....	6
2.3.2	AeroSeeD.....	7
2.4	Ergebnisse der Strömungssimulation	8
3	Aufgabenstellung	13
4	Physik der Windenergienutzung.....	14
4.1	Elementare Impulstheorie nach Betz.....	14
4.2	Einteilung der Windturbinen.....	18
4.3	Widerstandsläufer	20
4.4	Auftriebsläufer	22
4.5	Gegenüberstellung von Widerstands- und Auftriebsläufer.....	25
5	Theoretische Betrachtungen an der VAWT	26
5.1	Betrachtungen ohne Leitschaufeln.....	26
5.1.1	Analytische Drehmomentberechnung	26
5.1.2	Kinematische Betrachtung mittels GeoGebra	33
5.2	Mit Leitschaufeln	38
5.3	Zusammenfassung.....	39
6	Versuchsaufbau.....	40
6.1	Winderzeugung	40
6.2	Der Prüfstand	42
6.3	Messtechnik zur Leistungsmessung.....	44
6.3.1	Leistungsmessung nach De Prony.....	45
6.3.2	Leistungsmessung mittels Hysteresebremse.....	47
7	Messungen mittels De Prony'schem Prinzip	54
7.1	Versuchsdurchführung und Messergebnisse	54
7.2	Diskussion der Messergebnisse.....	55
8	Messungen mittels Hysteresebremse	56
8.1	Versuchsdurchführung.....	56

8.2	Kurzzeichen der Leitschaufelkonfigurationen	56
8.3	Referenzmessung	57
8.3.1	Messergebnis	57
8.3.2	Diskussion	59
8.3.3	Repräsentative Polynomfunktion	60
8.3.4	Messunsicherheit	62
8.4	Ausgangskonfiguration	64
8.4.1	Messergebnisse	64
8.4.2	Diskussion	65
8.5	Optimale Konfiguration	66
8.5.1	Messergebnisse	66
8.5.2	Diskussion	68
9	Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick	69
	Literaturverzeichnis	73
	Abbildungsverzeichnis	75
	Anhang	79
	Leistungsmessung nach De Prony	79
	Repräsentative Polynomfunktion	80
	Messunsicherheit	81
	Ergänzende Diagramme	82

1 Einleitung

Der weltweite Energiebedarf steigt beständig. Um ihn decken zu können und zugleich klimaschädliche CO₂-Emissionen zu verringern ist es unabkömmlich, auf erneuerbare Energien zu setzen. Hierbei kommt der Windkraft besondere Bedeutung zu, denn Windkraftanlagen verursachen während des Betriebs keine direkten Schadstoffemissionen und zeichnen sich durch einen geringen Stromverbrauch aus. Außerdem ist ihre Energie-Amortisationsdauer vergleichsweise gering, wie K.R. Haapala und P. Prempreeda von der *Oregon State University* beweisen konnten. Sie führten eine Lebenszyklusanalyse an einer zwei Megawatt Windturbine durch und veröffentlichten die Ergebnisse in dem Paper [1]. Sie ermittelten die benötigte Energie für Herstellung, Transport, Installation und Wartung der Turbine, wovon für Rohstoffgewinnung und Produktion 80 Prozent der Gesamtenergie verbraucht wurden. Bezogen auf eine erwartete Lebensdauer von 20 Jahren, ergab sich daraus eine Energie-Amortisationsdauer von sechs Monaten, eine beeindruckend positive Bilanz.

Dieses Ergebnis unterstreicht die Bedeutung der Suche nach effektiven Konzepten der Windenergiekonversion für die Stromproduktion aus erneuerbaren Energien.

In der EU soll bis zum Jahr 2020 der Anteil an erneuerbaren Energien am Gesamtenergieverbrauch auf 20 Prozent gesteigert werden. Dies ist eines der fünf aktuellen Kernziele der EU. Die österreichische Bundesregierung strebt aufgrund des enormen Wasserkraftpotentials Österreichs sogar 34 Prozent an erneuerbaren Energien am Gesamtenergieverbrauch an [2].

Global werden momentan 13% der Primärenergieversorgung und 19% der Stromproduktion durch erneuerbare Energien gedeckt [3]. Davon werden laut *World Wind Energy Association* rund vier Prozent durch Windenergie produziert[4].

Im Bereich der größeren Windkraftanlagen dominieren derzeit dreiflügelige horizontalachsige Windturbinen den kommerziellen Strommarkt. Sie zeichnen sich durch einen hohen Entwicklungsstand und Wirkungsgrad aus. Der Rotordurchmesser solcher Windturbinen ist in den letzten 20 Jahren von 30 m auf 150 m gestiegen, was eine Leistungssteigerung um den Faktor 25 bewirkt hat [5].

Im Bereich der Kleinwindkraft, zu dem laut Internationaler Norm IEC 61400-2 Windturbinen mit einer Rotorfläche unter 200 m² gehören, gibt es eine größere Bandbreite an etablierten Turbinenkonzepten. Dennoch ist es sinnvoll, alternative Konzepte der Windenergiekonversion zu untersuchen und durch einen wissenschaftlichen Zugang das Potential der jeweiligen Konzepte objektiv zu bewerten. Windturbinen mit vertikaler Achse stellen eine interessante Alternative zu den horizontalen Turbinen dar, da sie aufgrund ihrer Unabhängigkeit von der Windrichtung eine höhere Jahresarbeit erzielen können [6].

Im Jahr 2009 hatte der damalige Institutsvorstand des *Instituts für thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik*¹ Herr Em.Univ.-Prof. H. Jericha eine Idee für ein neuartiges Konzept

¹ Kurz TTM-Institut

einer Windturbine mit Vertikaler Achse (englisch: *Vertical Axis Wind Turbine*, kurz VAWT). Zusammen mit E. Göttlich und Prof. W. Sanz meldete Prof. H. Jericha am 15.09.2011 ein ausgearbeitetes Konzept dieser VAWT beim österreichischen Patentamt mit der Nummer 511 955 an [7]. Inhaber der Patentschrift ist die *Technische Universität Graz*. Die darin beschriebene neuartige VAWT besitzt Leitschaufeln, die den Wind optimal auf die Rotorscheaufeln leiten sollen.

Die Untersuchung der Leistungssteigerung durch die Einbindung der Leitschaufeln ist das Ziel der vorliegenden Arbeit. Dafür wird zu Beginn die Ausgangssituation erläutert. Dabei wird auf die Patentschrift [7] und auf die Inhalte des von H. Jericha et al. veröffentlichten Papers über die neuartige VAWT [6] eingegangen. Es folgt die Vorstellung zweier ähnlicher Konzepte.

Der theoretische Teil der Arbeit behandelt die Impulstheorie nach Betz und die Gegenüberstellung von Auftriebs- und Widerstandsläufern. Dazu wurden Standardwerke zur Windenergie von M. Hansen [8], H. Erich [9], R. Gasch [10] und A. P. Schaffarczyk [5] herangezogen.

In den nachfolgenden analytischen Betrachtungen erfolgt die Untersuchung des an der neuartigen VAWT wirkenden aerodynamischen Prinzips. Dabei werden das Drehmoment und die Leistung an einer umlaufenden Rotorscheaufel der VAWT ohne Leitschaufeln berechnet. Die Ergebnisse der analytischen Betrachtungen dienen einerseits dem Verständnis der Funktionsweise der neuartigen VAWT und stellen andererseits einen Ausgangspunkt für den experimentellen Teil der Arbeit dar.

Im experimentellen Teil der Arbeit wird schließlich ein Prüfstand entwickelt, der Messungen an einem VAWT-Modell ermöglicht. Dabei werden Leistungskurven ohne und mit Leitschaufeln gemessen, um die verschiedenen Versuchskonfigurationen nach ihrem Leistungsoutput bewerten zu können. Der Wirkungsgrad des VAWT-Modells, also der Leistungsbeiwert c_p , ist vorerst nicht von Bedeutung, da vordergründig die Auswirkung der Leitschaufeln auf das Leistungsoutput bewertet werden soll.

2 Ausgangssituation

Basierend auf der Idee der alternativen Windturbine mit vertikaler Achse von Prof. H. Jericha wurden erste Untersuchungen mittels CFD-Simulation durchgeführt, vorerst jedoch ohne Einbindung der Leitschaufeln. Des Weiteren wurde von H. Jericha et al. ein Paper [6] über diese neuartige Windturbine auf der ASME Turbo Expo 2012 in Kopenhagen veröffentlicht. Außerdem wurden verschiedene Bachelorarbeiten am TTM-Institut verfasst, die sich mit dem alternativen Konzept der VAWT befassen:

- *CFD-Berechnung einer neuartigen vertikalen Windturbine* (S. Seger)
- *Variantenkonstruktion der Blattverstellung einer Windkraftanlage mit vertikaler Achse* (M. Brandecker)
- *Konstruktion eines Demonstrationsmodells einer Windkraftanlage mit vertikaler Welle* (A. Gebert)
- *Konstruktion eines Demonstrationsmodells einer Windkraftanlage mit gesteuert bewegten Laufschaufeln* (D. Holzinger)
- *Optimierung eines Windturbinenmodells mit vertikaler Achse* (B. Egger)

Im Folgenden werden vorerst die wesentlichen Punkte der Patentschrift [7] angeführt. Anschließend wird das VAWT-Modell vorgestellt, das im Zuge verschiedener Bachelorarbeiten entstanden ist, und der vorliegenden Arbeit als Grundlage dient. Es folgt die Vorstellung zweier ähnlicher VAWT-Konzepte. Im Anschluss daran werden die wesentlichen Inhalte der Patentschrift erläutert. Zuletzt werden die Ergebnisse der CFD-Simulation besprochen, die im Paper [6] veröffentlicht wurden.

2.1 Die Patentschrift der alternativen VAWT

Eine schematische Draufsicht des neuartigen Konzeptes der VAWT ist in Abbildung 2-1 zu sehen. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf die genannte Abbildung.

Der Wind (16) strömt in die Windturbine ein und wird über Leitschaufeln (15) optimal auf die Rotorscheaufeln (3) geleitet. Die Rotorscheaufeln des Windrades rotieren auf dem Radius (r) um die Rotorachse (A). Jede davon dreht sich dabei zusätzlich um ihre eigene Achse (R), wobei die Drehzahl die Hälfte von jener des Rotors beträgt. Dies hat einerseits zur Folge, dass die Rotorscheaufel auf der rechten Seite quer zum Wind ausgerichtet ist und somit den maximalen Luftwiderstand generiert. Andererseits bedeutet dies, dass beide Profilkanten einer Schaufel im Laufe einer Umdrehung des Rotors sowohl Anström- als auch Abströmkanten sind. Daraus resultiert die Notwendigkeit eines symmetrischen Schaufelprofils. Die beiden Rotorscheaufeln, die

sich in der Abbildung links befinden, bewegen sich entgegen der Windrichtung und richten sich längs des Windes aus, um einen möglichst geringen Luftwiderstand zu erzeugen. Die linke Leitschaufel dient zum einen der optimalen Windbeaufschlagung der Rotorscheaufeln, zum anderen soll sie zusätzlich den folgenden Rotorscheaufeln Windschatten spenden, um somit ihren Luftwiderstand zu verringern.

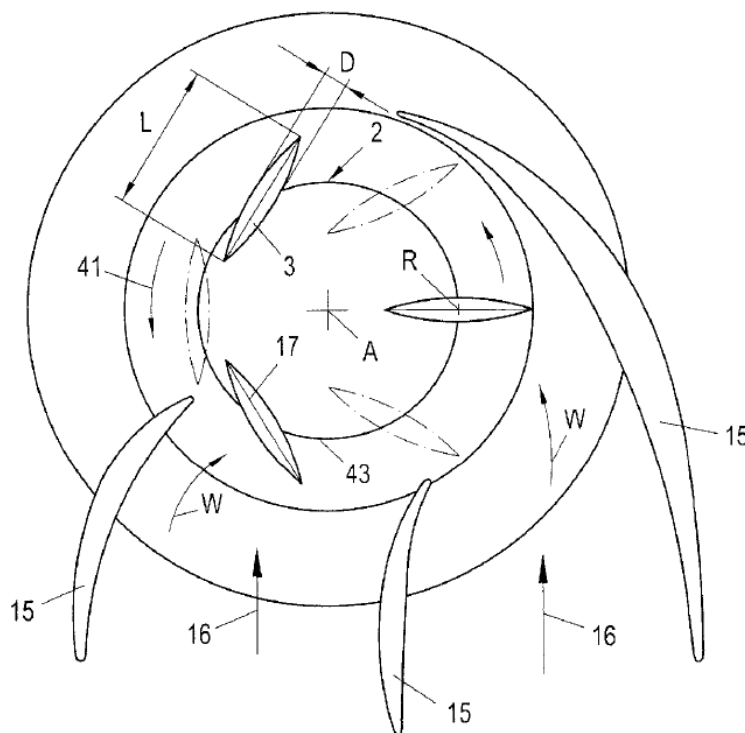


Abbildung 2-1: Schematische Draufsicht auf die Windturbine der Patentschrift [7]

Der beschriebene Bewegungsablauf der Schaufeln entlang des Umfangs wird durch ein Getriebe ermöglicht, das sich am Fuße der Turbine befindet. Somit sind sämtliche wartungsintensiven Komponenten der Turbine (Getriebe, Generator etc.) leicht zugänglich am Boden verbaut. In Abbildung 2-2 ist die Seitenansicht der Windturbine mit Schnitt durch das Getriebe ersichtlich. Die Windnachführung soll einerseits durch Verstellung der Rotorscheaufelwinkel und andererseits durch Rotation der Leitschaufeln auf dem Ring (26) um die Hauptachse (A) erfolgen.

Die Rotorscheaufeln der alternativen VAWT sollen 37,2 m lang sein und eine mittlere Sehnenlänge von 16 m aufweisen. Dies ermöglicht es, Höhen zu erreichen, in denen der Wind nicht stark von der Bodenreibung beeinflusst ist. Dabei sollen die Rotor- und Leitschaufeln um einen Winkel von 15 - 25° zur Rotorachse nach außen geneigt sein. Dadurch steigt die Umfangsgeschwindigkeit der Rotorscheaufeln mit zunehmender Schaufelhöhe in Übereinstimmung mit den höheren Windgeschwindigkeiten in zunehmender Höhe.

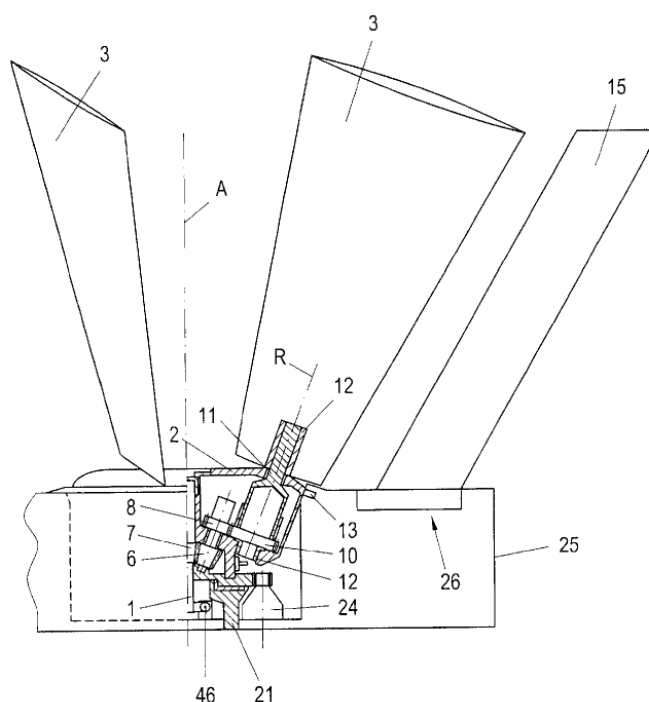


Abbildung 2-2: Schematische Seitenansicht der Windturbine der Patentschrift [7]

2.2 Modellturbine

Als Ergebnis der Arbeiten von M. Brandecker, A. Gebert und B. Egger ging ein VAWT-Modell hervor, das in vereinfachter Form die Turbine der Patentschrift widerspiegelt, allerdings ohne Leitschaufeln. Der vorliegenden Arbeit dient dieses Modell als konstruktive Grundlage.

In Abbildung 2-3 ist eine isometrische Ansicht des VAWT-Modells mit vier Rotorschaufeln (5) ersichtlich. Anstelle des in der Patentschrift verwendeten Kegelradgetriebes, wurde hierbei ein Zahnriementrieb (2) verbaut. Dieser sorgt dafür, dass die Winkelgeschwindigkeit der Rotorschaufeln $\dot{\psi}$ um ihre eigene Achse R halb so groß ist wie die Winkelgeschwindigkeit des Rotors ω um die Rotorachse A . Im Gegensatz zu der Patentschrift, in der symmetrisch geformte Strömungsprofile bei den Rotorschaufeln verwendet wurden, wurden diese am VAWT-Modell vereinfacht aus Stahlblech mit einer Stärke von 1 mm gefertigt. Des Weiteren weist das Modell eine Hauptwelle (4) auf, die wahrscheinlich einen starken Nachlauf verursacht. Die Windnachführung (1) ist durch eine Lagerung am oberen Ende der Turbine von deren Drehbewegung abgekoppelt, und richtet sich stets in Windrichtung aus. Der Zahnriemen verläuft auch über die Windnachführung, und hat somit zur Folge, dass sich die Rotorschaufeln stets zur optimalen Windrichtung ausrichten. Dabei richtet sich stets eine Schaufel quer zum Wind aus, wobei die gegenüberliegende Schaufel längs des Windes ausgerichtet ist. Der Rotorsteg (3) leitet das Drehmoment, das an den Rotorschaufeln durch Luftwiderstand und dynamischen Auftrieb entsteht, auf die Hauptwelle. Diese ist durch zwei Stehlager (6) am unteren Ende der Windturbine gelagert.

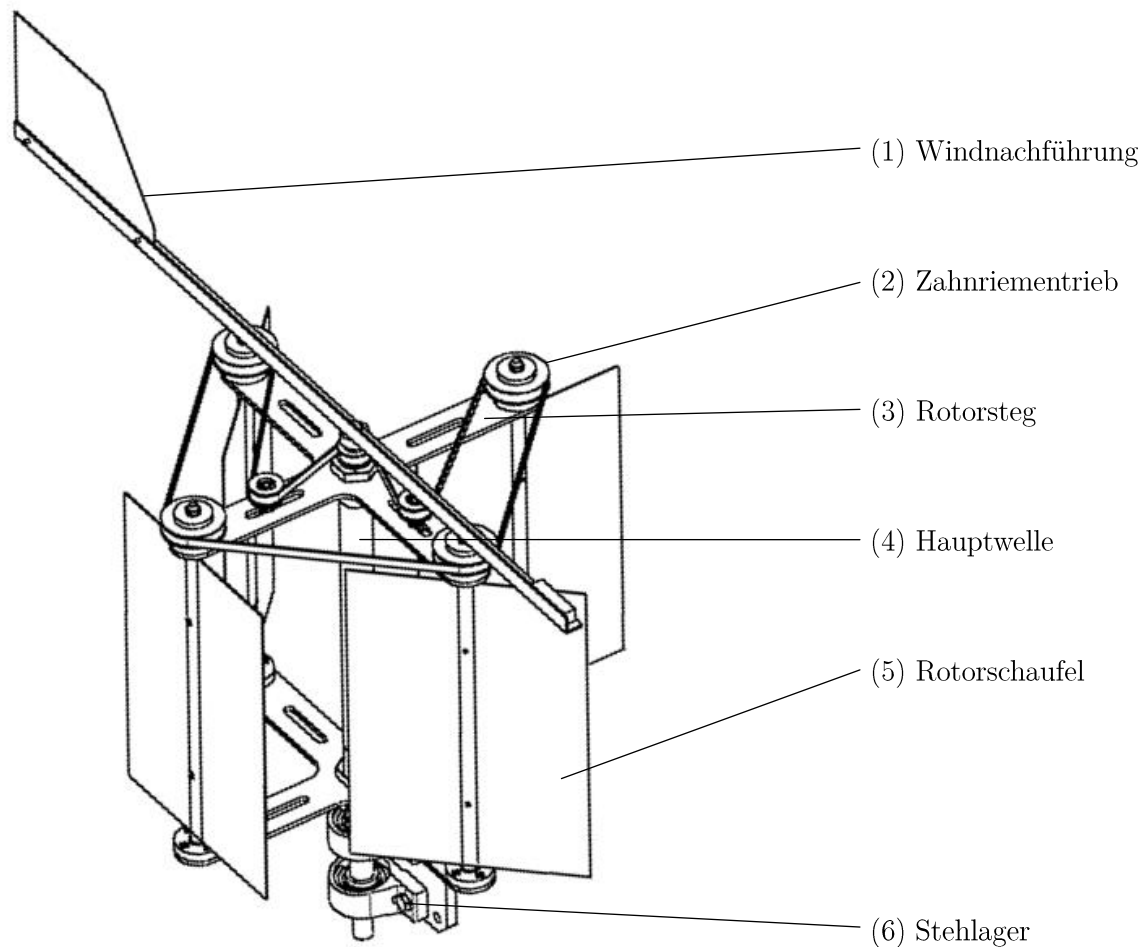


Abbildung 2-3: Isometrische Ansicht des Demonstrationsmodells der VAWT mit vier Schaufeln [11]

2.3 Ähnliche Konzepte

In diesem Kapitel werden zwei Konzepte von vertikalen Windturbinen kurz vorgestellt, die der in dieser Diplomarbeit untersuchten VAWT ähneln.

2.3.1 *Eolienne à voile tournante*

Der passionierte französische Segler Pierre Dieudonné meldete 2007 ein Patent einer neuartigen VAWT an. Er nannte es "eolienne à voile tournante", was übersetzt "Windrad mit sich drehenden Segeln" bedeutet. In Abbildung 2-4 ist ein Segelschiff dargestellt, das abhängig von seiner Fahrtrichtung sein Segel so zur Windrichtung ausrichtet, dass eine optimale Vorwärtsfahrt erzielt wird. Auf dieselbe Weise nehmen die Rotorschaukeln des Windrades von P. Dieudonné entlang des Umfangs genau diese Ausrichtungen ein. Bisweilen gibt es bis auf ein Modell keine Ausarbeitung und technische Umsetzung eines solchen Windrades. Ebenso wenig sind Angaben bezüglich Leistung und Wirkungsgrad bekannt.

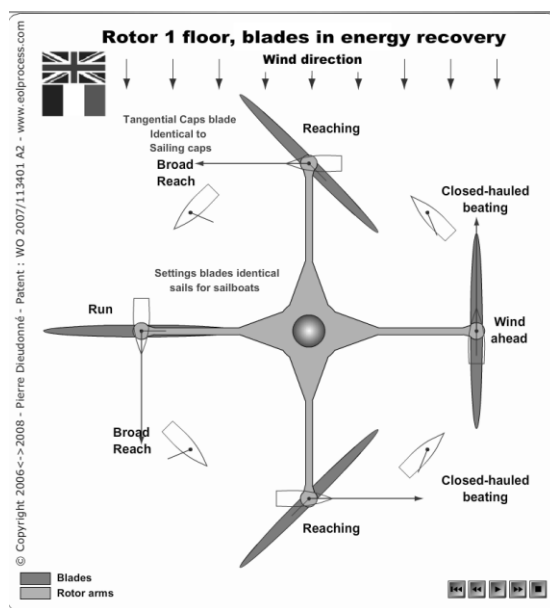


Abbildung 2-4: Konzept des Windrades mit drehenden Segeln [12]

2.3.2 AeroSeeD

Das französische Unternehmen *AeroSeeD* ist im Bereich der numerischen Simulation tätig. Neben der FEM-Simulation beschäftigt es sich auch mit der CFD-Simulation. Auf der Webseite des Unternehmens [13] wird unter anderem ein Konzept einer VAWT vorgestellt, das auf dem von P. Dieudonné aufzubauen scheint. Neben einigen rechnerischen Ergebnissen bezüglich der Leistung und dem Wirkungsgrad der Windturbine sind die gesamten Konstruktionszeichnungen unter einer GNU²-Lizenz auf der Webseite von *AeroSeeD* im Jahr 2014 veröffentlicht worden. Eine GNU-Lizenz ermöglicht das kostenlose Nutzen, Studieren, Ändern, und Verbreiten der Daten. Speziell an dem Konzept ist, dass die Drehzahl der Rotorscheaufeln um ihre eigene Achse entlang der Rotorumdrehung zwischen dem 0.25- und 4-Fachen der Rotordrehzahl variiert. Dies soll laut *AeroSeeD* zu einer Verdoppelung des Leistungsoutputs gegenüber einer VAWT ohne derartige Schaufelverstellung führen. Experimentelle Daten wurden bisher nicht veröffentlicht. Die VAWT der Patentschrift [7] weist eine konstante Drehzahl der Rotorscheaufeln um ihre eigene Achse entlang der Rotorumdrehung auf. Abbildung 2-5 zeigt eine dreidimensionale CAD-Zeichnung des Konzeptes. Am oberen Turbinenende ist eine Windnachführung ersichtlich wie sie in ähnlicher Form auch an der VAWT-Modellturbine von M. Brandecker, A. Gebert und B. Egger verbaut wurde. Gleich unterhalb der Windnachführung befindet sich ein elliptisches Getriebe, das die Variation der Schaufeldrehzahl zwischen dem 0.25- und 4-Fachen der Rotordrehzahl ermöglicht. Über ein Kegelradgetriebe wird die Drehbewegung zu den Rotorscheaufeln geführt. Am Fuße der Windturbine befindet sich der Generator.

² General Public Licence

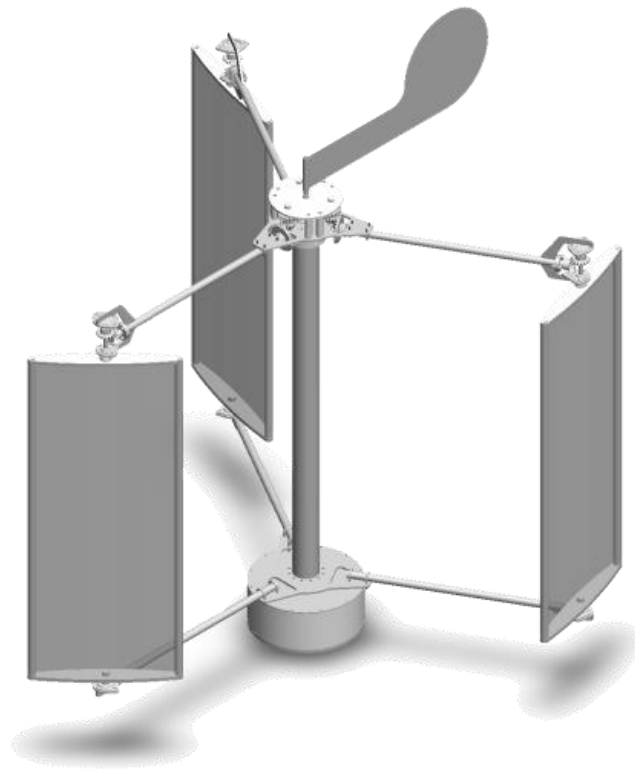


Abbildung 2-5: Konzept der VAWT des Unternehmens AeroSeed [13]

2.4 Ergebnisse der Strömungssimulation

Dieses Kapitel beinhaltet eine Zusammenfassung der Ergebnisse der CFD-Simulation, die von H. Jericha et al. im Paper [6] veröffentlicht wurden.

In *ANSYS CFX* wurde eine zweidimensionale Strömungssimulation an der neuartigen VAWT durchgeführt. Das Rechenetz ist in Abbildung 2-1 dargestellt, und besteht aus drei verschiedenen Netzen. Das äußere Netz ist mit einem groben Rechteckgitternetz modelliert und ist statisch. Darin rotiert der Rotor, in dem sich wiederum das Netz der Rotorscheaufeln dreht. Dieses innere Netz besteht aus einem O-Gitter und beinhaltet die Schaufelgeometrie. Abbildung 2-1 zeigt, dass die Positionierung der linken Leitschaufel in einem solchen Netzgitter bei der Strömungssimulation nicht möglich ist, denn die Leitschaufel müsste in das rotierende Netz ragen. Aus diesem Grund wurden sie bei der Simulation bisher nicht eingebunden.

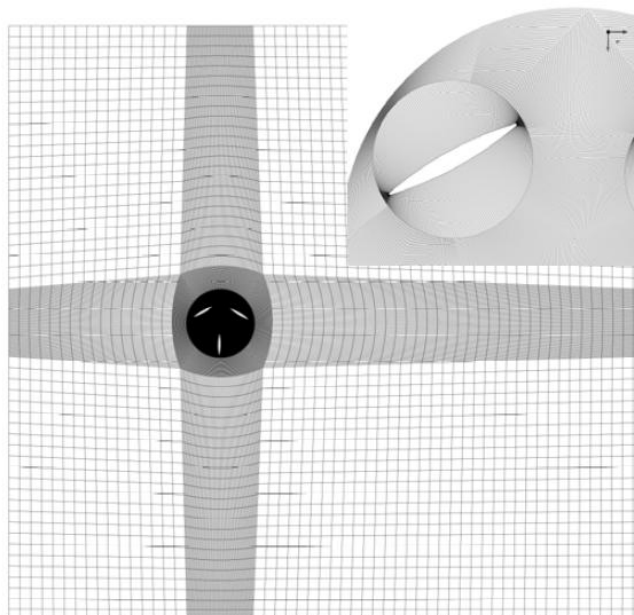


Abbildung 2-6: Rechengitter für die 2D-Simulation ohne Leitschaufeln [6]

Die Luft strömt mit einem Druck von 1.013 bar und einer Temperatur von 25°C in das Netz ein. Die Turbulenz wurde mittels SST $k-\omega$ Modell modelliert. Während der Simulation wird das Schaufeldrehmoment ausgegeben. Die Lösung ist konvergent, wenn das Drehmoment über die Zeit periodisch ist.

Berechnungen wurden für Windgeschwindigkeiten von 5 bis 36 m/s, und für Schnelllaufzahlen von 0.2 bis 0.6 durchgeführt. Die Schnelllaufzahl ist das Verhältnis zwischen der Umfangsgeschwindigkeit am mittleren Rotorradius und der Windgeschwindigkeit in der Zuströmung.

Um die Größe des Rechnetzes in Grenzen zu halten, wurde anstelle der mittleren Sehnenlänge der Schaufel von 16 m lediglich eine Sehnenlänge von 1 m verwendet. Dabei beträgt die Reynoldszahl $Re = 2.2 \cdot 10^6$ bei einer Windgeschwindigkeit von 36 m/s.

In Abbildung 2-7 ist der Verlauf des Drehmoments einer Schaufel über dem Umfangswinkel φ (circumferential position) bei einer Windstärke von 36 m/s und einer Schnelllaufzahl von $\lambda = 0.5$ dargestellt. Das Moment bezieht sich dabei auf den Radius mal Sehnenlänge mal Schaufelhöhe. Somit ergibt sich die Einheit zu kNm/m^3 . Das maximale Drehmoment von $1.43 \text{ kNm}/\text{m}^3$ tritt bei 290° auf, wobei es zweimal so groß ist wie jenes in Ausgangslage bei 0°. Von 90-195° tritt ein negatives Drehmoment auf. Betrachtet man das resultierende Moment aus den drei Schaufeln während einer Umdrehung, so ist ein durchschnittliches Drehmoment von $1.35 \text{ kNm}/\text{m}^3$ mit einer Fluktuation von +/- 12% ablesbar.

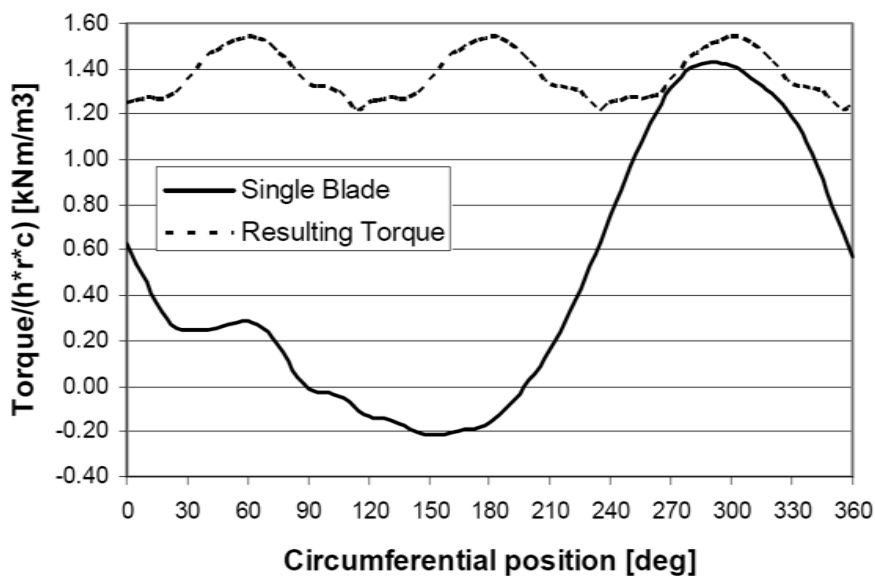


Abbildung 2-7: Drehmomentverlauf einer Schaufel und resultierender Verlauf dreier Schaufeln entlang der Umdrehung; Windgeschwindigkeit $c = 35$ m/s; Schnellaufzahl $\lambda = 0.5$ [6]

Die Geschwindigkeits- und Druckverteilung im Rotor sind in Abbildung 2-9 und Abbildung 2-10 in 30°-Abständen dargestellt. Die Geschwindigkeitsverteilung zeigt bei 0° eine starke Ablösung auf der Rückseite der Schaufel. Die dazugehörige Druckverteilung zeigt zwar eine Zone niedrigen Drucks an der Saugseite, jedoch zugleich einen geringen Überdruck auf der gegenüberliegenden Druckseite, wodurch kein ausschlaggebendes Drehmoment generiert wird. Von 30° bis 60° ist das Moment relativ konstant, bevor es bei 90° negativ wird. Die Druckdifferenz zwischen den Schaufelseiten ist gering. An den nächsten Positionen - 120°, 150° und 180° - herrscht im vorderen Teil der Schaufel eine positive Druckdifferenz zwischen Druck- und Saugseite, jedoch eine negative am hinteren Schaufelteil. Diese verursacht das negative Moment. Die Geschwindigkeitsfelder zeigen Gebiete starker Ablösung an der Saugseite. Bei 180° sollte die Schaufel ohne Anstellwinkel, also genau von vorne angeströmt werden. Aufgrund der Fluidumlenkung durch das vorhergehende Blatt ergibt sich ein Anstellwinkel und somit ein negatives Moment. An der nächsten Position bei 210° ist der Anstellwinkel klein, die Strömung liegt an, und das Moment ist wieder im positiven Bereich. Von dort an steigt das Moment kontinuierlich an, wobei zwischen den Positionen 270° und 300° das maximale Moment erreicht wird. An diesen Positionen ist in der Druckverteilung eine große Differenz zwischen Druck- und Saugseite. Bei 300° ist eine Zone hoher Geschwindigkeit an der Vorderkante ersichtlich, die sich zu den nächsten Positionen 330° und 0° vergrößert.

Für den Widerstandsläuferfall (siehe Kapitel 4.3) bei einem Umfangswinkel $\varphi = 0^\circ$ ist das optimale Geschwindigkeitsverhältnis zwischen Umfangs- und Windgeschwindigkeit $\lambda = 0.33$. Das neuartige Prinzip der VAWT ist jedoch eine Mischform zwischen Widerstands- und Auftriebsläufer. Darum wurde das Geschwindigkeitsverhältnis in der Simulation zwischen $\lambda = 0.2 - 0.6$ variiert, um das optimale Verhältnis zu ermitteln. In Abbildung 2-8 sind resultierende Drehmomentverläufe dreier Schaufeln für unterschiedliche Schnellaufzahlen dargestellt. Das maximale Drehmoment nimmt bei kleineren Schnellaufzahlen zu. Auch die

Fluktuationen nehmen dabei stark zu und betragen bei $\lambda = 0.2 \pm 35\%$. Die maximale mittlere Leistung von 24.7 kW/m^2 ergab sich bei einer Schnelllaufzahl von $\lambda = 0.5$ durch Mittelung des Drehmoments über eine Periode multipliziert mit der Winkelgeschwindigkeit. Dabei bezieht sich die Leistung auf die Fläche der Rotorschaukel. Der Leistungsbeiwert c_p einer Windturbine setzt die abgegebene Wellenleistung der Windturbine ins Verhältnis zu der im Wind enthaltenen kinetischen Energie. Der Leistungsbeiwert c_p beträgt bei der neuartigen vertikalen Windturbine im Optimum 0.36.

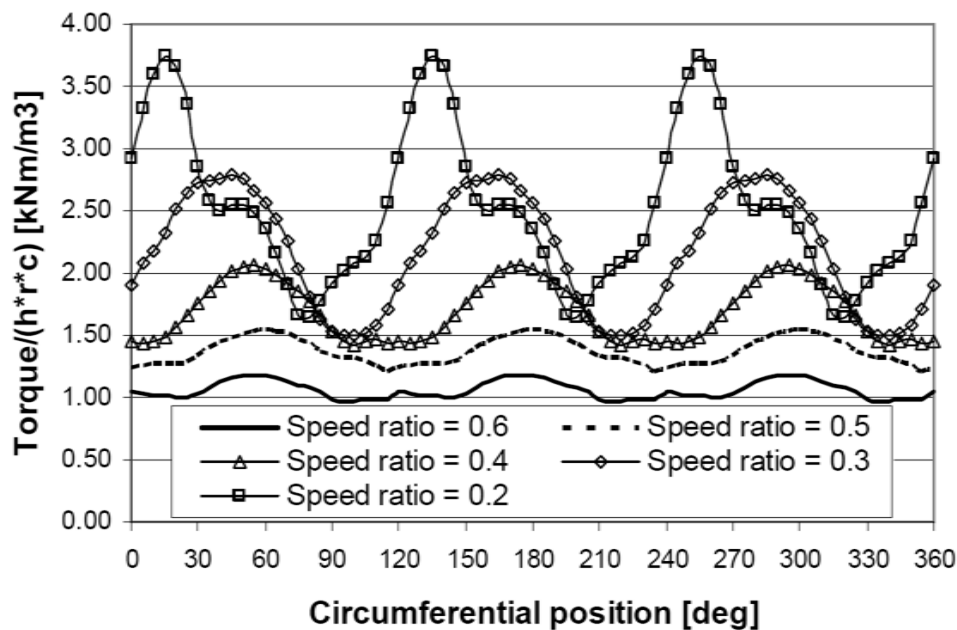


Abbildung 2-8: Resultierende Drehmomentverläufe dreier Schaufeln entlang einer Umdrehung für verschiedene Schnelllaufzahlen λ (speed ratio) [6]

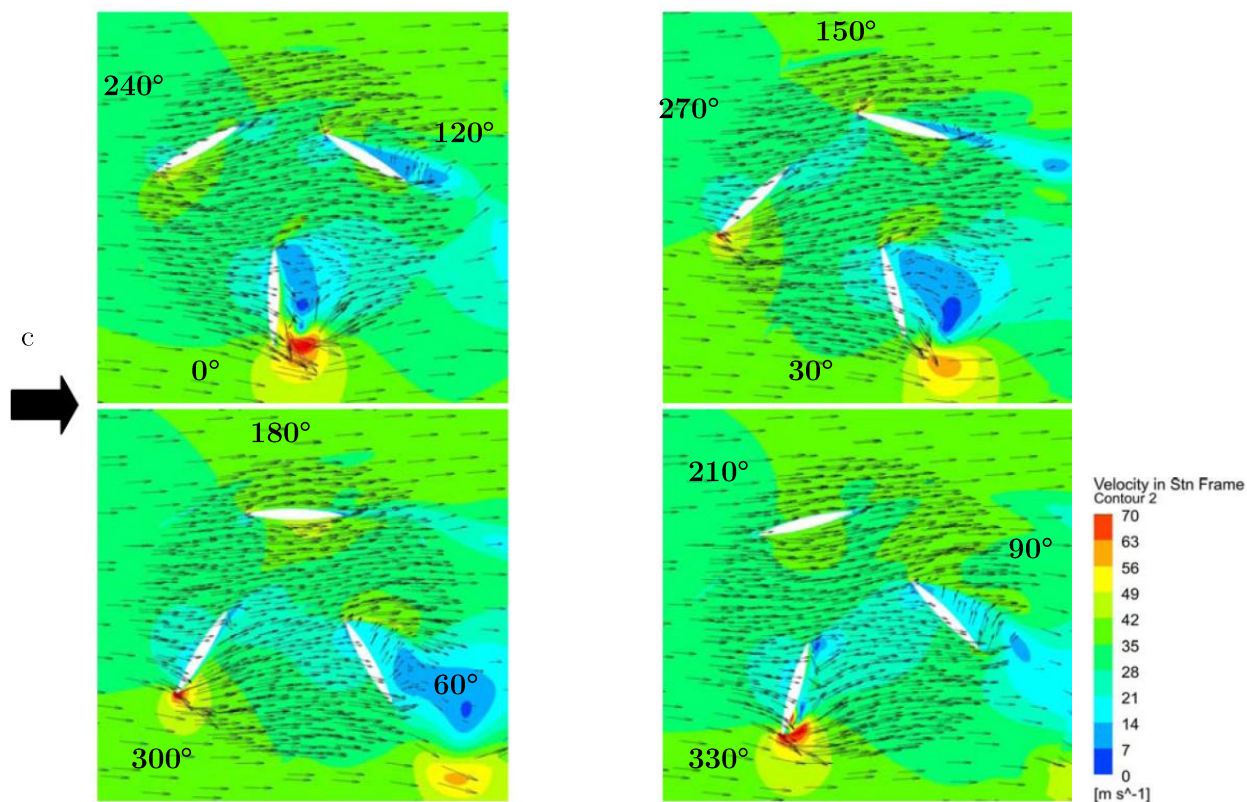


Abbildung 2-9: Geschwindigkeitsverteilung an verschiedenen Rotorpositionen; $c = 35$ m/s, $\lambda = 0.5$ [6]

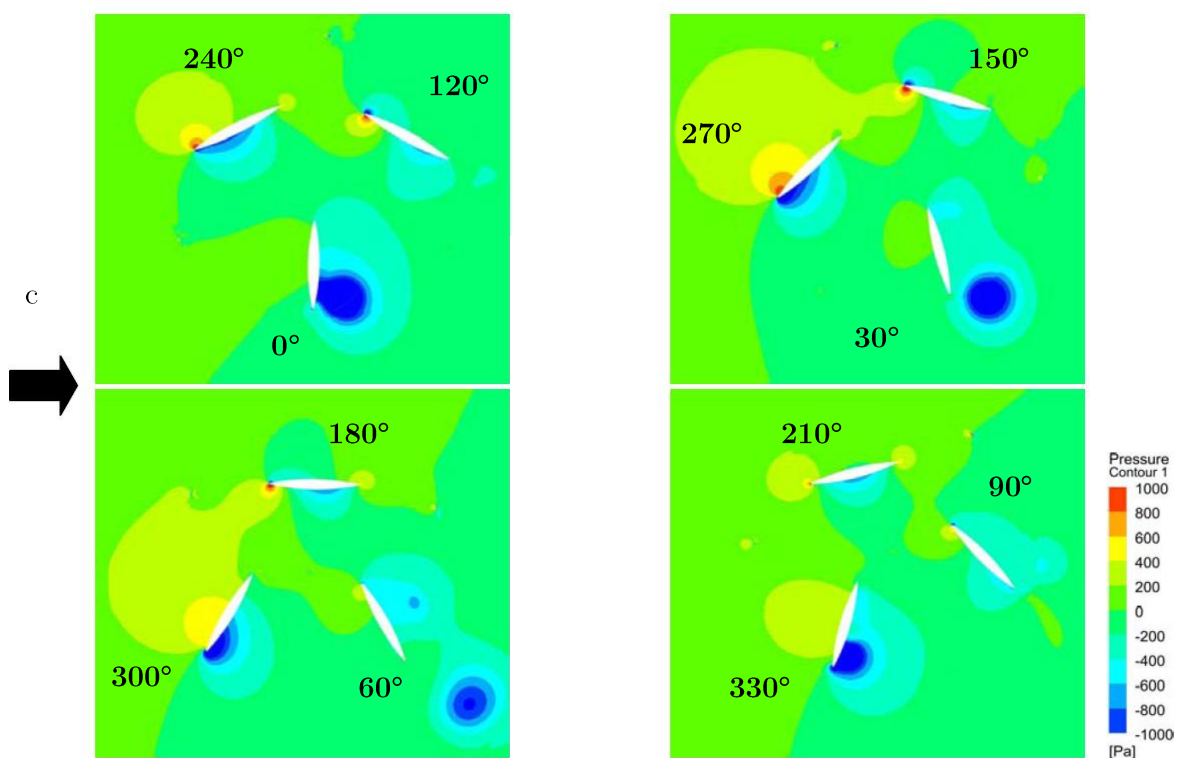


Abbildung 2-10: Druckverteilung an verschiedenen Rotorpositionen; $c = 35$ m/s, $\lambda = 0.5$ [6]

3 Aufgabenstellung

Im Zuge dieser Diplomarbeit soll an dem neuartigen Konzept der VAWT, das Gegenstand der Patentschrift [7] ist, das aerodynamische Wirkprinzip und die Leistungsausbeute mit und ohne Leitschaufeln untersucht werden.

Dazu sollen vorab jene theoretischen Grundlagen angeführt werden, die für das Verständnis der weiteren Ausführungen von Bedeutung sind.

Für das Verständnis des aerodynamischen Wirkprinzips sollen an einem vereinfachten Modell der VAWT analytische Betrachtungen durchgeführt werden. Die aus diesen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse stellen einen Ausgangspunkt für den experimentellen Teil der Arbeit dar.

Im experimentellen Teil sollen in der Auffahrtsrampe des TTM-Instituts Versuche an einem VAWT-Modell mit und ohne Leitschaufeln durchgeführt werden. Die Luft wird dabei von einem Axialgebläse in Bewegung gesetzt. Das verwendete VAWT-Modell ist im Zuge der Bachelorarbeiten von M. Brandecker [14], A. Gebert [11] und B. Egger [15] entstanden. Für die Versuche ist der Aufbau eines Prüfstands vorgesehen, der mit einem geeigneten Messsystem zur Leistungsmessung ausgestattet ist. Dabei gilt es ein System zu entwickeln mit dem Leitschaufeln in den Prüfstand eingebunden werden können, wobei auf deren einfache und vielseitige Verstellmöglichkeit geachtet werden soll. Für die Auslegung des Messsystems ist vorab der Leistungsbereich des VAWT-Modells unter den vorherrschenden Windbedingungen in der Auffahrtsrampe abzuschätzen. Dies soll auf einfache Art und Weise realisiert werden.

Bei den anschließenden experimentellen Versuchen soll vorab der Unterschied zwischen einer vier- und einer dreischaufeligen Ausführung der Modell-VAWT durch Leistungsmessung ermittelt werden. In weiterer Folge sollen die Auswirkung der Leitschaufeln auf die Leistungsausbeute untersucht werden. Dabei gilt es eine optimale Konfiguration der Leitschaufeln zu ermitteln.

4 Physik der Windenergienutzung

In diesem Kapitel sind die theoretischen Grundlagen angeführt, die für das Verständnis der vorliegenden Arbeit von Bedeutung sind. Vorab wird die Impulstheorie nach Betz erläutert. Es folgen eine Übersicht über verschiedene Windkonversionsmaschinen sowie eine Gegenüberstellung zwischen Widerstands- und Auftriebsläufer.

4.1 Elementare Impulstheorie nach Betz

Folgende Betrachtungen basieren auf der Betz'schen Impulstheorie, die M. Hansen in seinem Buch [8] anschaulich ausführt.

Eine Windturbine entnimmt der Luft kinetische Energie und wandelt diese in mechanische um. Betz nimmt an, dass der Rotor ideal arbeitet, was Reibungsfreiheit und Drallfreiheit in der Abströmung bedeutet. Der Rotor wirkt wie ein Widerstand, der den Wind mit der Geschwindigkeit c_0 - weit entfernt vor der Turbine - über eine Geschwindigkeit c - in der Turbine - auf eine Geschwindigkeit c_1 - weit hinter der Turbine - abbremst. Dazu müssen sich die Stromlinien aufweiten, wie in Abbildung 4-1 dargestellt. Der Widerstand entsteht durch den Druckabfall im Rotor. Kurz vor diesem steigt der atmosphärische Druck p_0 auf p_+ bevor der Druck *im* Rotor um Δp auf den Druck p_- fällt. Hinter dem Rotor gleicht sich der Druck wieder dem Ausgangsdruck p_0 an. Die Machzahl ist klein, die Dichte ist näherungsweise konstant und die Windgeschwindigkeit muss kontinuierlich von c_0 auf c_1 abgebremst werden.

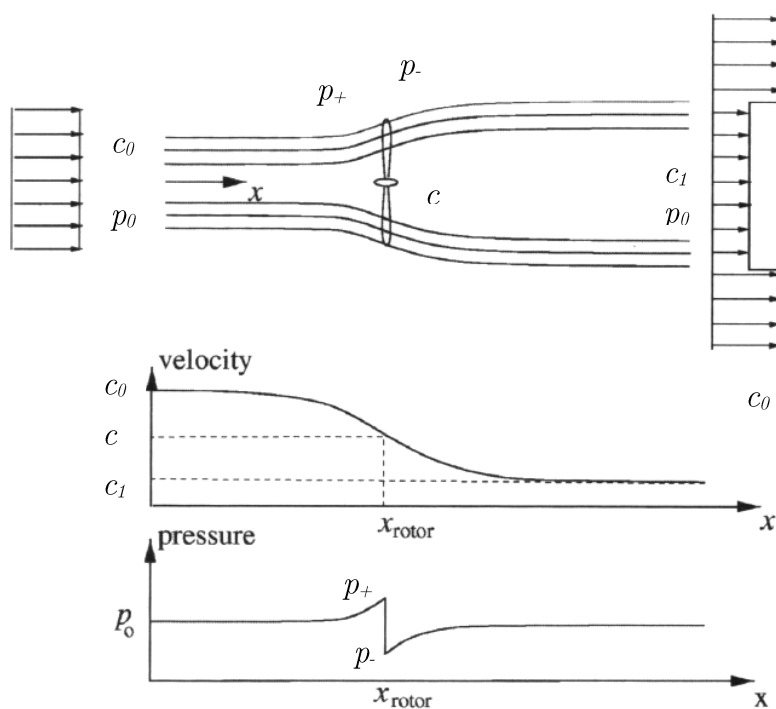


Abbildung 4-1: Stromlinienverlauf, Axialer Geschwindigkeitsverlauf und Druckverlauf entlang der Durchströmung eines Rotors; nach M. Hansen [8]

Mit den Annahmen eines idealen Rotors ist es möglich, einfache Beziehungen zwischen den Geschwindigkeiten c_0 , c und c_1 , dem Schub S und der abgegebenen Wellenleistung P_{mech} herzustellen. Der Schub ist die Kraft, die in Strömungsrichtung aus dem Druckabfall resultiert und auf die Rotorfläche f wirkt. Sie führt zur Verzögerung der Strömung von c_0 auf c_1 :

$$S = \Delta p f \quad (N) \quad (4-1)$$

Die Strömung ist stationär, inkompressibel und reibungsfrei und es wirken keine äußeren Kräfte auf das Fluid. Aus diesem Grund kann die Bernoulli-Gleichung in den Bereichen weit vor bis kurz vor dem Rotor und kurz nach bis weit hinter dem Rotor angewandt werden:

$$p_0 + \frac{\rho}{2} c_0^2 = p_+ + \frac{\rho}{2} c^2 \quad (Pa) \quad (4-2)$$

$$p_- + \frac{\rho}{2} c^2 = (p_+ - \Delta p) + \frac{\rho}{2} c^2 = p_1 + \frac{\rho}{2} c_1^2 \quad (Pa) \quad (4-3)$$

Aus den Formeln (4-2) und (4-3) folgt:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} (c_0^2 - c_1^2) \quad (Pa) \quad (4-4)$$

In Abbildung 4-2 wurde ein Kontrollvolumen (kurz CV) um den Strömungsraum des Windrades gelegt.

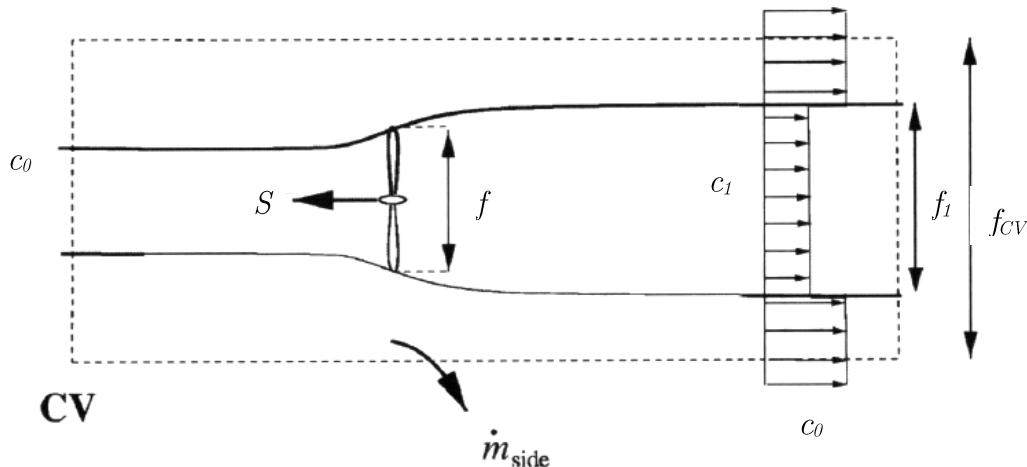


Abbildung 4-2: Kontrollvolumen (CV) um ein Windrad nach M. Hansen [8]

Der Impulssatz kann durch die Vereinfachungen eines idealen Rotors wie folgt angeschrieben werden:

$$\rho c_1^2 f_1 + \rho c_0^2 (f_{CV} - f_1) + \dot{m}_{side} c_0 - \rho c_0^2 f_{CV} = -S \quad (N) \quad (4-5)$$

Den verdrängten Massenstrom \dot{m}_{side} erhält man aus der Kontinuitätsgleichung:

$$\dot{m}_{side} = \rho f_1 (c_0 - c_1) \quad (kg/s) \quad (4-6)$$

Aus der Kontinuitätsgleichung erhält man auch den Zusammenhang zwischen den Flächen f_1 und f :

$$\dot{m} = \rho f c = \rho f_1 c_1 \quad (kg/s) \quad (4-7)$$

Aus den Formeln (4-6)(4-7) und (4-4) erhält man:

$$S = \rho f c (c_0 - c_1) = \dot{m} (c_0 - c_1) \quad (N) \quad (4-8)$$

Wenn der Schub durch den Druckabfall aus Gleichung (4-1), und der Druckabfall durch die Formel (4-4) ausgedrückt wird, kann folgendes festgestellt werden:

$$\begin{aligned} \Delta p f &= \frac{\rho}{2} (c_0^2 - c_1^2) f = \rho f c (c_0 - c_1) \\ &\rightarrow c = \frac{1}{2} \dot{m} (c_0 + c_1) \end{aligned} \quad (4-9)$$

Es ist ersichtlich, dass die Windgeschwindigkeit in der Rotorebene das Mittel aus Einström- und Abströmgeschwindigkeit ist.

Ein ähnliches Kontrollvolumen ist in Abbildung 4-3 dargestellt.

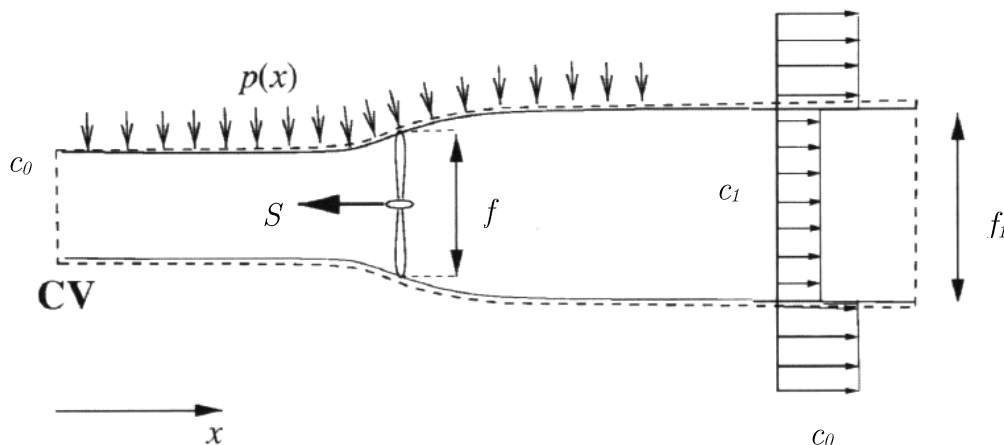


Abbildung 4-3: Alternatives Kontrollvolumen um eine Windturbinenrotorblende nach M. Hansen [8]

Die Kraft der Druckverteilung $p(x)$ entlang des Kontrollvolumens F_{druck} ist unbekannt. Es fließt dabei keine Masse über die Systemgrenze, da die seitlichen Grenzen den Stromlinien gleich sind. Der Impulssatz ergibt sich somit zu:

$$S = \rho f c (c_0 - c_1) + F_{druck} \quad (N) \quad (4-10)$$

Vergleicht man die beiden Formeln (4-8) und (4-10) unabhängig vom Kontrollvolumen, ist feststellbar, dass die Druckkraft F_{druck} entlang der Stromlinien gleich null sein muss.

Die Strömung wird als reibungsfrei angenommen, somit ändert sich die innere Energie vom Einlass zum Auslass nicht, und die Wellenleistung P_{mech} kann aus der Energiegleichung wie folgt berechnet werden:

$$P_{mech} = \dot{m} \left(\frac{1}{2} c_0^2 + \frac{p_0}{\rho} - \frac{1}{2} c_1^2 - \frac{p_0}{\rho} \right) = \frac{1}{2} \rho f c (c_0^2 - c_1^2) \quad (W) \quad (4-11)$$

Der axiale Induktionsfaktor a ist definiert als:

$$c = (1 - a) c_0 \quad (m/s) \quad (4-12)$$

Für die Geschwindigkeit c_1 gilt mit Formel (4-12) und (4-9):

$$c_1 = (1 - 2a) c_0 \quad (m/s) \quad (4-13)$$

Diese zwei letzteren Formeln ergeben mit Formel (4-11):

$$P_{mech} = 2 \rho f c_0^3 a (1 - a)^2 \quad (W) \quad (4-14)$$

Die kinetische Energie einer Luftmasse m , die sich mit der Geschwindigkeit c bewegt, lässt sich ausdrücken als:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m c_0^2 \quad (Nm) \quad (4-15)$$

Betrachtet man die Fläche f , die von der Luft mit der Dichte ρ in einer bestimmten Zeit t mit der Geschwindigkeit c durchströmt wird, so ergibt sich der Luftmassenstrom zu:

$$\dot{m} = f \rho \frac{dx}{dt} = f \rho c_0 \quad (kg/s) \quad (4-16)$$

Aus dem Ansatz für die kinetische Energie ergibt die strömende Energie durch die Querschnittsfläche f pro Zeit die Leistung P_{wind} :

$$P_{wind} = \dot{E} = \frac{1}{2} \dot{m} c_0^2 = \frac{1}{2} f \rho c_0^3 \quad (W) \quad (4-17)$$

Setzt man die mechanische Wellenleistung P_{mech} ins Verhältnis zur im Wind enthaltenen Leistung P_{wind} , erhält man den dimensionslosen Leistungsbeiwert c_p :

$$c_p = \frac{P_{mech}}{P_{wind}} = \frac{P_{mech}}{\frac{1}{2} f \rho c_0^3} \quad (-) \quad (4-18)$$

Mit dem Induktionsfaktor a ergibt sich der Leistungsbeiwert c_P zu:

$$c_P = \frac{2 \rho f c_0^3 a (1-a)^2}{\frac{1}{2} f \rho c_0^3} = 4 a (1 - a)^2 \quad (-) \quad (4-19)$$

Diese Funktion abgeleitet nach dem Induktionsfaktor ergibt:

$$\frac{dc_P}{da} = 4a (1 - a) (1 - 3a) \quad (4-20)$$

Der maximale Leistungsbeiwert $c_P^{max} = c_{P,Betz} = 16/27 = 0.593$ ergibt sich für ein Induktionsverhältnis $a = 1/3$. Dies bedeutet, dass sich laut Betz maximal 59 % der im Wind enthaltenen Energie in mechanische Energie umgewandelt werden kann. Dabei setzt er eine reibungsfreie, inkompressible Strömung und einen verlustfrei arbeitenden unummantelten Energiewandler voraus. Nur unter Verwendung eines Diffusors lässt sich das Betz'sche Limit überschreiten. Die Prinzipien, mit welchen dem Wind Leistung entzogen wird, wurden bisher nicht berücksichtigt. Im Folgenden wird auf die verschiedenen aerodynamischen Prinzipien bei Windturbinen eingegangen.

4.2 Einteilung der Windturbinen

Die unter diesem Punkt angeführten Inhalte entstammen dem Buch von E. Hau [9], sofern keine andere Quelle angeführt ist.

Windenergiekonverter lassen sich zum einen hinsichtlich ihrer aerodynamischen Wirkungsweise unterscheiden, zum anderen nach ihrer konstruktiven Bauweise. Die Unterscheidung nach konstruktiven Gesichtspunkten ist jedoch praktikabler und somit gebräuchlicher. Dabei ist das ausschlaggebendste Merkmal die Lage der Rotorachse. Hierbei können Horizontal- und Vertikalachser unterschieden werden. Bei der aerodynamischen Wirkungsweise kann zwischen Widerstandsläufer und Auftriebsläufer unterschieden werden. Ersterer generiert den größten Teil der Leistung durch den Luftwiderstand seiner im Luftstrom bewegten Flächen. Der Auftriebsläufer hingegen durch den aerodynamischen Auftrieb bei der Umströmung von geeignet profilierten Flächen.

In Abbildung 4-4 ist eine Einteilung der gängigsten Windturbinen dargestellt. Neben den dort angeführten gibt es eine breite Palette an Konzepten und Patenten, die eingereicht wurden. Meistens bleibt die praktische Verwendbarkeit dieser „Windkraftanlagen“ jedoch weit hinter den Erwartungen der Erfinder zurück.

In Abbildung 4-5 sind die c_P -Werte der gängigsten Windturbinen über der Schnelllaufzahl λ aufgetragen. Die Schnelllaufzahl λ ist als das Verhältnis der Umfangsgeschwindigkeit u zur Windgeschwindigkeit c definiert:

$$\lambda = \frac{u}{c} \quad (-) \quad (4-21)$$

Bei den Horizontalachsen wird definitionsgemäß die Blattspitzengeschwindigkeit als Umfangsgeschwindigkeit u verwendet. Bei den Verikalachsen hingegen die Geschwindigkeit am mittleren Rotorradius. Die praktischen Leistungsbeiwerte liegen bei widerstandsnutzenden Anlagen unter $c_p = 0.2$ (9). Bei auftriebsnutzenden Anlagen liegen diese deutlich höher bei $c_p = 0.5$. In der Abbildung ist der Betz-Faktor $c_{p,Betz} = 0.593$ (1) eingezeichnet. Darunter befindet sich die Glauert oder Schmitz Linie (2). Während Betz davon ausging, dass die Strömung ohne Änderung ihrer axialen Richtung auf die Geschwindigkeit $c_2 = c_1/3$ hinter dem Rotor verzögert wird, berücksichtigen Glauert und Schmitz die Drallkomponente in Umfangsrichtung. Dieser Nachlaufdrall entsteht zwangsläufig aufgrund der Leistungsentnahme und ist bei kleinen Schnelllaufzahlen größer als bei hohen Schnelllaufzahlen. [10]

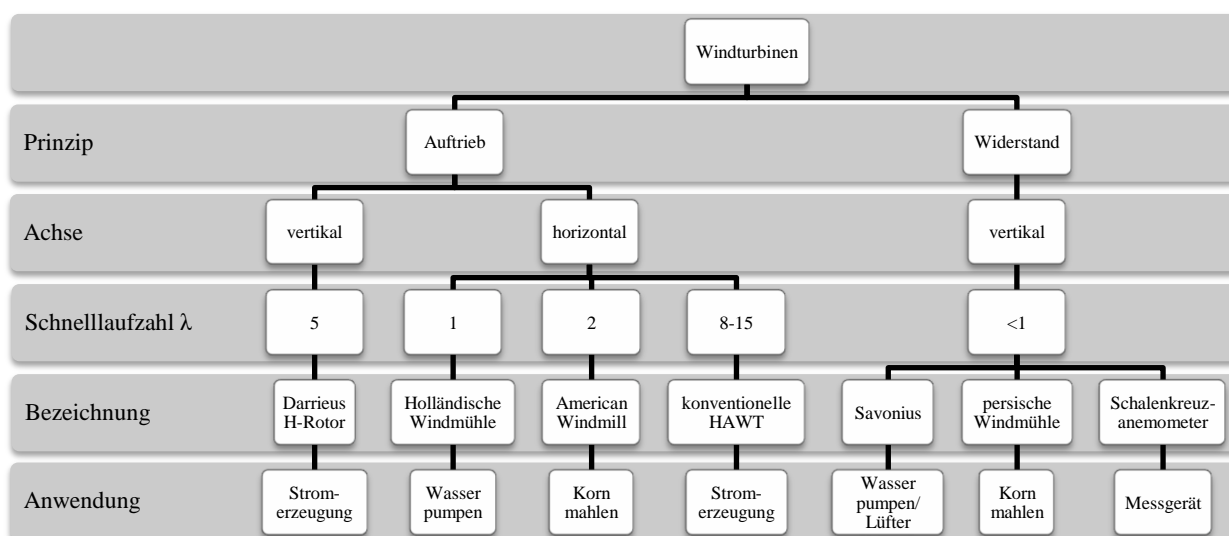


Abbildung 4-4: Einteilung der Windturbinen

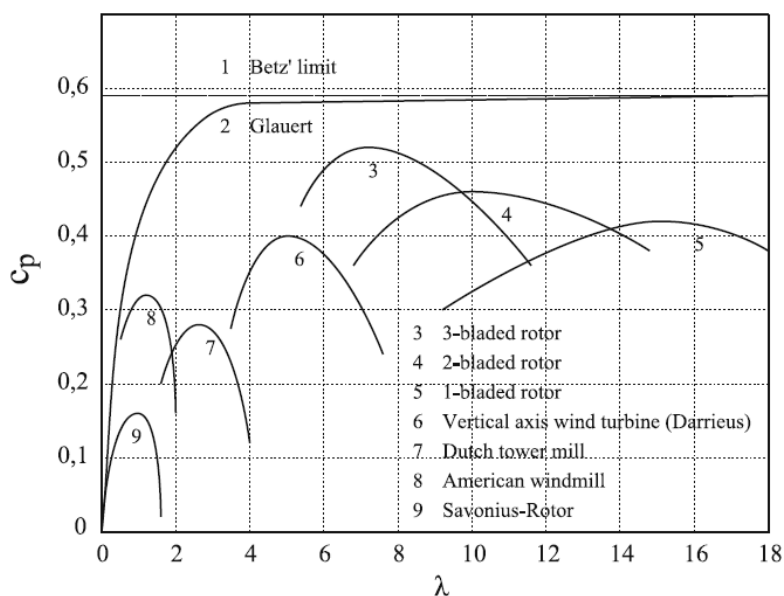


Abbildung 4-5: Leistungsfaktor c_p über der Schnelllaufzahl λ verschiedener Bauformen [5]

Im Folgenden sollen Auftriebs- und Widerstandsläufer genauer beschrieben werden, um einerseits den Grund für die bessere Leistungsausbeute bei Auftriebsläufern gegenüber Widerstandsläufern erklären zu können und andererseits die wirkenden Prinzipien am alternativen Konzept der VAWT zu erläutern.

4.3 Widerstandsläufer

Die unter diesem Punkt angeführten Inhalte entstammen dem Buch von R. Gasch und J. Tvele [10], sofern keine andere Quelle angegeben wird.

Laut H. Sigloch [16] setzt sich in einer Strömung ohne Dichteänderung der Gesamtwiderstand F_D (D von *Drag* aus dem Englischen, bedeutet *Widerstand*) bei der Umströmung eines Körpers wie folgt zusammen:

$$F_D = F_R + F_K \quad (N) \quad (4-22)$$

Dabei stellt F_R den Flächenwiderstand und F_K den Formwiderstand dar. Ersterer entsteht durch Reibung zwischen Fluid und Körperaußenfläche. Der Formwiderstand F_K hingegen wird in erster Linie von der Form des umströmten Körpers bestimmt. Dabei gilt: je größer das Totraumgebiet bzw. Ablösungsgebiet hinter dem umströmten Körper, desto höher der Formwiderstand. Bei einer quer angeströmten Platte ist der Flächenwiderstand $F_R \approx 0$ und der Formwiderstand maximal.

Wie bereits angesprochen "lebt" der Widerstandsläufer von der Kraft, die entsteht, wenn eine Fläche f quer zum Wind steht. Die als Formwiderstand oder auch als Luftwiderstandskraft bezeichnete Kraft

$$F_D = c_D \frac{\rho}{2} f w^2 \quad (N) \quad (4-23)$$

ist dem Widerstandsbeiwert c_D , der Fläche f , der Dichte ρ , und dem Quadrat der Relativgeschwindigkeit w proportional. Der Widerstandsbeiwert ist abhängig von der Anströmrichtung, also vom Anstellwinkels α . In Abbildung 4-8 sind experimentell ermittelte Widerstandsbeiwerte verschiedener ebener Platten, abhängig von deren Anstellwinkel α zur Anströmung angeführt. In Tabelle 4-1 sind die maximalen c_D -Werte verschiedener Körper angeführt, die bei dessen Queranströmung auftreten.







Körper		c_D
Halbkugelschale, offen, entgegen der Strömung	→ 	1,33
Halbkugelschale, mit Deckfläche, entgegen der Strömung	→ 	1,17
Halbkugelschale, mit Deckfläche	→ 	0,4
Kreisscheibe	→ 	1,11
Rechteckstreifen $b : h = \infty$	→ 	2,01
$b : h = 4$	→ 	1,19

Tabelle 4-1: c_D -Werte verschiedener Körper nach [17]

A. P. Schaffarczyk betrachtet in seinem Buch [5], eine Fläche f , die sich translatorisch mit der Geschwindigkeit u bewegt und in Bewegungsrichtung von einer Windgeschwindigkeit c angeströmt wird. Dabei ergibt sich die Leistung P mit Formel (4-23) zu:

$$\begin{aligned}
 P &= F_D u = c_D \frac{\rho}{2} f (c - u)^2 u = \\
 &= \frac{\rho}{2} f c^3 \left\{ c_D \left(1 - \frac{u}{c} \right)^2 \frac{u}{c} \right\} \\
 &= \frac{\rho}{2} f c^3 c_P
 \end{aligned} \tag{4-24}$$

Die Antriebsleistung ist - wie die im Wind enthaltene Leistung - der Fläche f und der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit c proportional. In geschwungener Klammer steht der Leistungsbeiwert c_P , der den aerodynamischen Wirkungsgrad darstellt. Er gibt an, welcher Anteil der im Wind enthaltenen Energie in der Windturbine in mechanische Leistung umgesetzt werden kann. Dieser Beiwert ist stets kleiner als der von Betz definierte Maximalwert $c_{P,Betz} = 0.59$ und hängt vom Verhältnis der Umfangsgeschwindigkeit u zur Windgeschwindigkeit c ab, welches als Schnelllaufzahl λ in Formel (4-21) definiert wurde. Wenn für die Leistung P die maximal entziehbare Leistung $P_{Betz} = P_{wind} \cdot c_{P,Betz}$, und für die Windleistung P_{wind} Formel (4-17) eingesetzt wird, so erhält man:

$$c_{P,Betz} = c_D \frac{u}{c} \left(1 - \frac{u}{c} \right)^2 \quad (-) \tag{4-25}$$

Das Maximum der Funktion $c_{P,Betz}(u/c)$ ergibt sich durch $\frac{dc_{P,Betz}}{d(u/c)} = 0$ zu:

$$c_{P,Betz}^{max} = c_D \frac{4}{27} \quad \text{bei } (u/c)_{opt} = \lambda_{opt} = 1/3 \tag{4-26}$$

Laut Tabelle 4-1 ergibt sich der experimentell ermittelte Widerstandsbeiwert einer Rechteckplatte mit einem Seitenverhältnis $b : h = 4$ zu $c_D = 1.19$. Aus Formel (4-26) folgt, dass ein Widerstandsläufer mit solchen Rechteckplatten einen maximalen Leistungsbeiwert $c_P^{max} \approx 0.17$ haben kann. Dieser Vereinfachung am nächsten kommt die persische Windmühle,

die in Abbildung 4-6 (links) vereinfacht dargestellt ist. Rechts davon ist die Funktion $c_p(\lambda)$ für jene vereinfachte Windmühle dargestellt. Im Stillstand $\lambda = 0$ wird keine Leistung abgegeben, ebenso wenig wenn der Rotor sich im Leerlauf $\lambda_{leer} = 1$ dreht. In letzterem Fall bewegt sich die Rotorschaukel gleich schnell wie der Wind. Zwischen diesen Extremen liegt der optimale Leistungsbeiwert c_p^{max} bei $\lambda_{opt} \approx 0.33$.

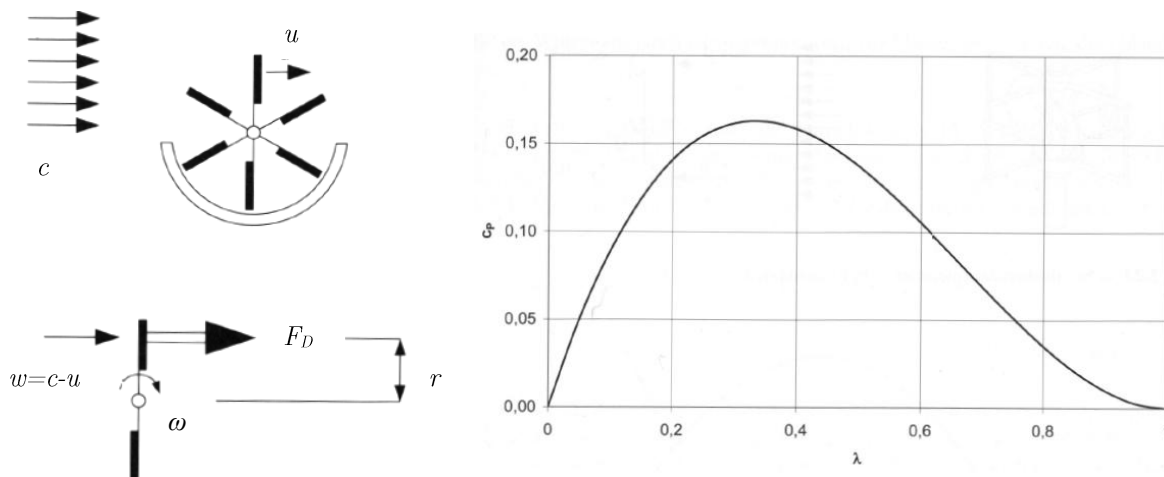


Abbildung 4-6: Vereinfachte persische Windmühle mit vertikaler Achse (links), mit dazugehöriger Funktion $c_p(\lambda)$ (rechts) nach [10].

4.4 Auftriebsläufer

Bei vielen Körpern, wie Tragflügelprofilen oder auch schräg angestellten Platten, bewirkt die Anströmung nicht nur eine Widerstandskraft F_D in deren Richtung, sondern auch eine senkrecht dazu gerichtete Komponente, die als dynamische Auftriebskraft F_L (L von *Lift* aus dem Englischen, bedeutet *Auftrieb*) bezeichnet wird. In Abbildung 4-7 sind diese Kräfte dargestellt.

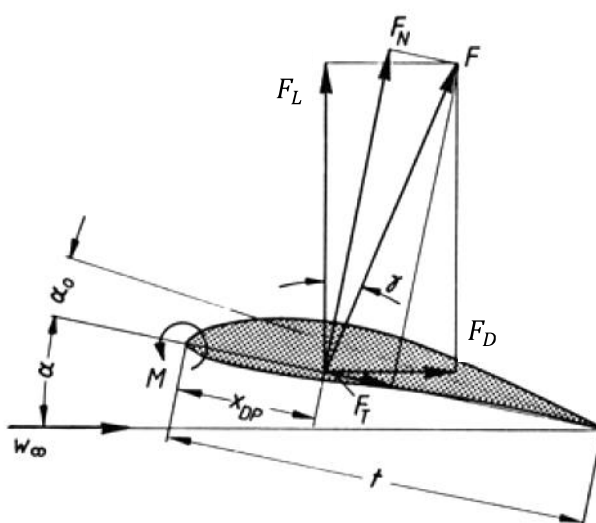


Abbildung 4-7: Kräfte am Flügel nach [17]

Die dynamische Auftriebskraft F_L ist der Fläche $f = t \cdot l$ des Flügels und dem Staudruck $\rho/2 w^2$ proportional:

$$F_L = c_L \frac{\rho}{2} f w^2 \quad (N) \quad (4-27)$$

Sie greift etwa ein Viertel der Flügeltiefe t hinter der Flügelnase an, solange der Anstellwinkel klein ist. In Abbildung 4-8 sind die von X. Ortiz et al. [18] ermittelten c_D - und c_L -Werte abhängig vom Anstellwinkel α der ebenen Platten mit verschiedenen Seitenverhältnissen³ angegeben. Die Windgeschwindigkeit bei den Messungen betrug 19 m/s. Dabei ist erkennbar, dass der Auftriebsbeiwert c_L im Bereich bis $\alpha = 25^\circ$ diesem proportional ist. Die c_D - und c_L -Werte aus den Versuchen von X. Ortiz et al. beziehen sich auf die Fläche der angeströmten Platte.

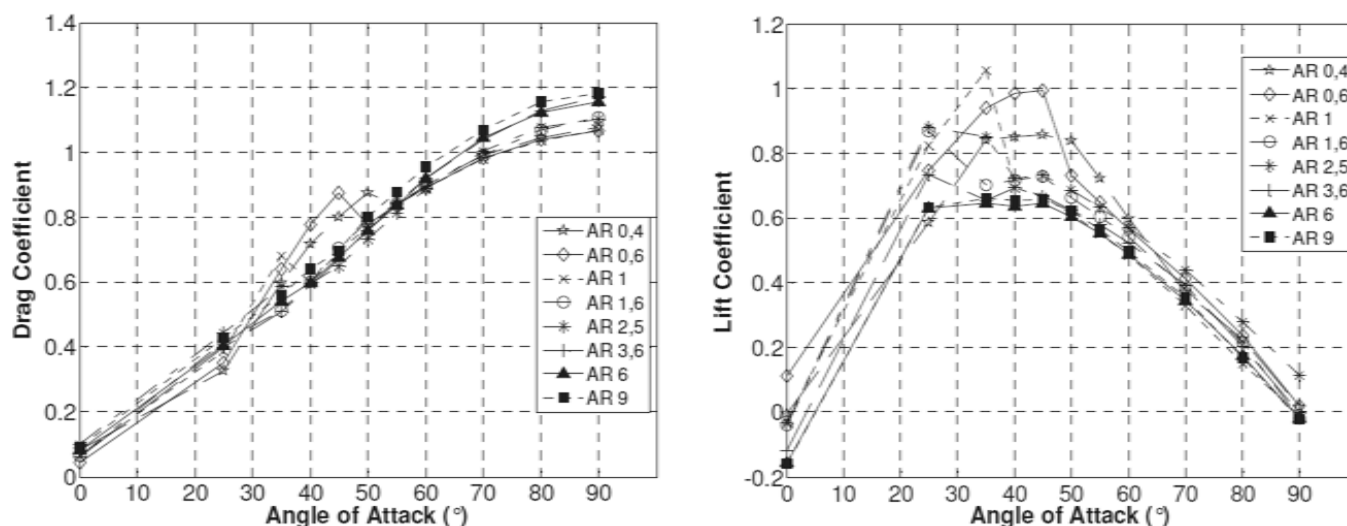


Abbildung 4-8: Windkanalmessungen von c_D (Drag Coefficient) und c_L (Lift Coefficient) abhängig vom Anstellwinkel α (Angle of Attack) ebener Platten mit unterschiedlichen Seitenverhältnissen (Aspectratios AR) [18]

Im Gegensatz zu den Messergebnissen an einer ebenen Platte in Abbildung 4-8, ist der c_D - und c_L -Verlauf über den Anstellwinkel α aerodynamischer Profile in Abbildung 4-9 dargestellt. Der Auftriebsbeiwert c_L steigt bis etwa $\alpha = 15^\circ$ linear an. Der maximale Auftriebsbeiwert am aerodynamischen Profil ist erwartungsgemäß höher als jener der ebenen Platte. Der Widerstandsbeiwert c_D weist bei kleinen Winkeln bis $\alpha = 15^\circ$ geringe Werte auf, steigt anschließend stark an, und erreicht sein Maximum bei $\alpha = 90^\circ$.

³ Seitenverhältnis im Englischen *Aspect Ratio*, kurz *AR*

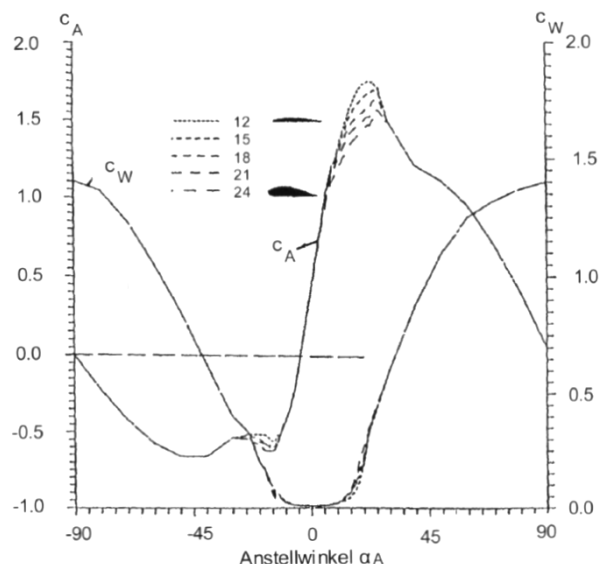


Abbildung 4-9: Widerstandsbeiwerte (c_A anstelle von c_L) und Auftriebsbeiwerte (c_W anstelle von c_D) der Profile NACA 4412 bis 4424 in Abhängigkeit des Anstellwinkels (α_a anstelle von α) aus Windkanalmessungen [10]

Bei den Auftriebsläufern ist die Auftriebskraft die treibende Kraft. Um sie mit den Widerstandsläufern besser vergleichen zu können, soll das Prinzip der auftriebsnutzenden Windturbinen am Beispiel des Darrieus-Rotors erklärt werden. Dieser weist eine für Widerstandsläufer typische vertikale Achse auf. Die Schnelllaufzahl λ ist bei diesem Rotor deutlich höher als bei den zuvor diskutierten Widerstandsläufern, bei denen sie maximal $\lambda = 1$ betragen kann. Somit werden die betrachteten Tragflächen in Abbildung 4-10 (rechts) mit kleinem Anstellwinkel angeströmt. Die Auftriebskraft F_L ist dabei um ein Vielfaches größer als die Widerstandskraft und damit die relevante Kraft für den Antrieb des Rotors. Wie bereits angesprochen steht sie senkrecht zur Relativanströmung w und erzeugt über den Hebel h das Drehmoment.

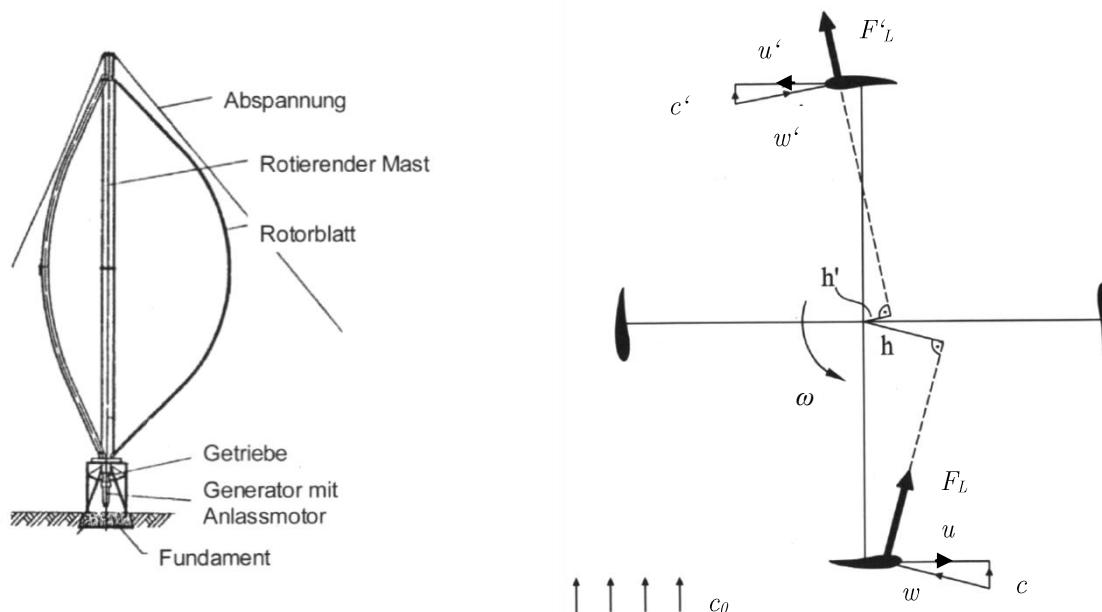


Abbildung 4-10: Prinzipskizze des Darrieus-Rotors (links) und dessen Antriebsprinzip (rechts) [10]

4.5 Gegenüberstellung von Widerstands- und Auftriebsläufer

Die unter diesem Punkt angeführten Inhalte entstammen dem Buch von R. Gasch und J. Twele [10], sofern keine andere Quelle angegeben wird.

Die Ursache für die bessere Leistungsausbeute bei Auftriebsläufern gegenüber Widerstandsläufern liegt in der Größe der Luftkräfte, die mit der gleichen Flügelfläche f erreichbar sind. Zwar sind die Luftkraftbeiwerte $c_{D,max}$ und $c_{L,max}$ etwa von gleicher Größe, aber in der Anströmgeschwindigkeit, also der Relativgeschwindigkeit w , unterscheiden sich die beiden Prinzipien fundamental. Beim Widerstandsläufer ist die Anströmgeschwindigkeit $w = c - u = c(1 - \lambda)$ immer kleiner als die Windgeschwindigkeit c , weil sie um die Umfangsgeschwindigkeit reduziert wird. Beim Auftriebsläufer hingegen ergibt sich die Anströmgeschwindigkeit $w = \sqrt{(c^2 + u^2)} = c\sqrt{(1 + \lambda^2)}$ durch geometrische Addition der Windgeschwindigkeit und der Umfangsgeschwindigkeit. Somit ist sie stets größer als die Windgeschwindigkeit. Je nach Schnelllaufzahl λ beträgt die Relativgeschwindigkeit w ein Vielfaches der Windgeschwindigkeit. Die Größe der Luftkraft, in die die Relativgeschwindigkeit w quadratisch eingeht, beträgt bei gleichem Flächeneinsatz f also bei Auftriebsläufern ein Vielfaches verglichen mit den Widerstandsläufern. Die Luftkräfte, die sich nach dem Widerstandsprinzip im Rotor realisieren lassen, sind zu gering, um auch nur annähernd in die Nähe einer Leistungsausbeute von 59% zu kommen. Dass auch die Auftriebsläufer nicht an diesen Idealwert herankommen, hängt damit zusammen, dass die Betrachtungen von Betz einige Verluste außer Acht lassen, die in der realen Strömung von Relevanz sind:

- Drallverluste, durch den Drall im Nachlauf (Glauert und Schmitz berücksichtigen diese)
- Profilverluste durch Luftwiderstand, die Betz in seiner Optimalauslegung nicht berücksichtigt weil $c_D \ll c_L$
- Tip-Verluste, Verluste durch Umströmung der Blattspitze von der Druck- auf die Saugseite

Abschließend kann gesagt werden, dass sich aufgrund der geringen Schnelllaufzahl und dem somit geringen Wirkungsgrad reine Widerstandsläufer, wie der Savonius-Rotor, für die Stromproduktion nicht eignen. Windturbinen mit horizontaler Achse (engl. Horizontal Axis Wind Turbine, kurz HAWT) erreichen heutzutage Leistungsbeiwerte bis zu $c_{P,max} = 0.5$. Dem theoretischen Grenzwert nach Betz $c_{P,Betz} = 0.59$ kommen sie also am nächsten. Diese Leistungsbeiwerte gehen jedoch von einer konstanten Windrichtung aus. In Regionen mit sich schnell ändernder Windrichtung eignen sich darum Turbinen mit vertikaler Achse aufgrund deren Windrichtungsunabhängigkeit besser. Unter den Vertikalachsen ist der Darrieus Rotor der bedeutendste. Dieser weist noch unausgeschöpftes Entwicklungspotential auf. [9]

5 Theoretische Betrachtungen an der VAWT

Dieses Kapitel beinhaltet eine eingehende Untersuchung der aerodynamischen Funktionsweise des alternativen VAWT-Prinzips, das Gegenstand der Patentschrift [7] ist.

Zu Beginn soll eine überschlägige analytische Berechnung des Drehmoments durchgeführt werden, das durch eine umlaufende Schaufel generiert wird. Anhand dieser können die an der VAWT wirkenden aerodynamischen Prinzipien erläutert werden. In weiterer Folge werden Betrachtungen anhand Geschwindigkeitsdreiecken mit der dynamischen Geometrie-Software *GeoGebra* durchgeführt. In dieser ist es möglich, geometrisch komplexe Beziehungen anschaulich darzustellen. Das Verhältnis zwischen mittlerem Rotorradius r_m und Schaufellänge s soll dabei dasselbe sein, wie jenes der CFD-Simulation des Papers von H. Jericha et al. [6]. Dadurch ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet. Vorerst werden Betrachtungen ohne Leitschaufeln angestellt. In weiterer Folge soll die VAWT unter Einbindung von Leitschaufeln untersucht werden.

5.1 Betrachtungen ohne Leitschaufeln

5.1.1 Analytische Drehmomentberechnung

Die in diesem Kapitel angeführte Berechnung soll die aerodynamische Drehmomententstehung am alternativen Konzept der VAWT qualitativ verständlich machen und ist keine Berechnung mit direkt praktischem Bezug. Es werden folgende Vereinfachungen bei der Berechnung angenommen:

- Die Berechnung der Auftriebs- und Widerstandskraft an der jeweiligen Schaufelposition erfolgt nach Formel (4-23) und (4-27). Für die Relativgeschwindigkeit wird vereinfacht die Relativanströmung an der Schaufelmitte herangezogen.
- Für die Berechnung werden die Abmessungen der Modell-VAWT, Schaufellänge $s = 0.25 \text{ m}$, Schaufelhöhe $h = 0.37 \text{ m}$ und mittlerer Radius $r_m = 0.2 \text{ m}$ verwendet.
- Der Wind strömt mit konstanter Geschwindigkeit $c = 36 \text{ m/s}$ und konstanter Richtung auf die jeweilige Schaufelposition entlang des Umfangs.
- Es wird eine einzelne Schaufel entlang der Umdrehung betrachtet, d.h. die Schaufeln beeinflussen sich nicht untereinander und es herrscht dadurch keine Strömungsinterferenz
- Eine qualitative Annäherung des von X. Ortiz et al. [18] ermittelten c_D - und c_L -Verlaufs aus Abbildung 4-8, erfolgt durch die folgenden Funktionen:

$$c_L(\alpha) = |0.85 \sin(2\alpha) + 0.2 \sin(4\alpha)| \quad (5-1)$$

$$c_D(\alpha) = 1.1 \sin^2(\alpha) + 0.05 \quad (5-2)$$

In Abbildung 5-1 ist der Verlauf der beiden Näherungsfunktionen $c_L(\alpha)$ und $c_D(\alpha)$ in Gegenüberstellung zu den Messungen von X. Ortiz et al. [18] dargestellt. An dieser Stelle sei

nochmals darauf hingewiesen, dass das Ziel der getroffenen Annahmen eine anschauliche und einfache Darstellung der aerodynamischen Drehmomententstehung an der VAWT ist, und keine exakte Berechnung zur Beurteilung des Wirkungsgrades darstellt.

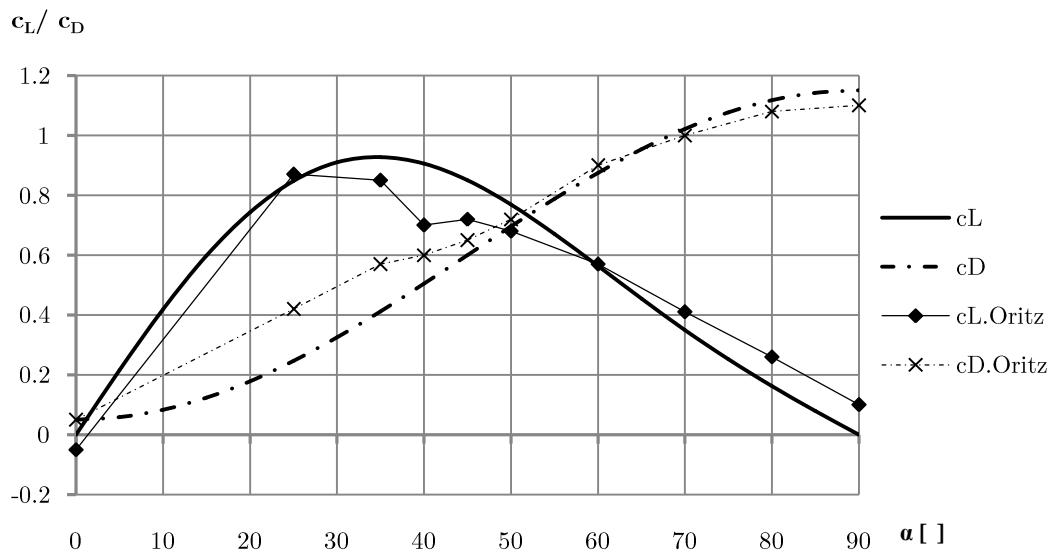


Abbildung 5-1: Näherungsfunktionen $c_L(\alpha)$ und $c_D(\alpha)$

Die folgenden Formeln beziehen sich auf eine Schaufel in allgemeiner Lage, die in Abbildung 5-2 dargestellt ist. Dabei wird ein Koordinatensystem in Schaufelachse R gelegt, wobei der Einheitsvektor \vec{e}_s entlang der Schaufel zeigt, und der Einheitsvektor \vec{e}_ψ senkrecht dazu steht. Sämtliche Winkel verlaufen im Uhrzeigersinn positiv.

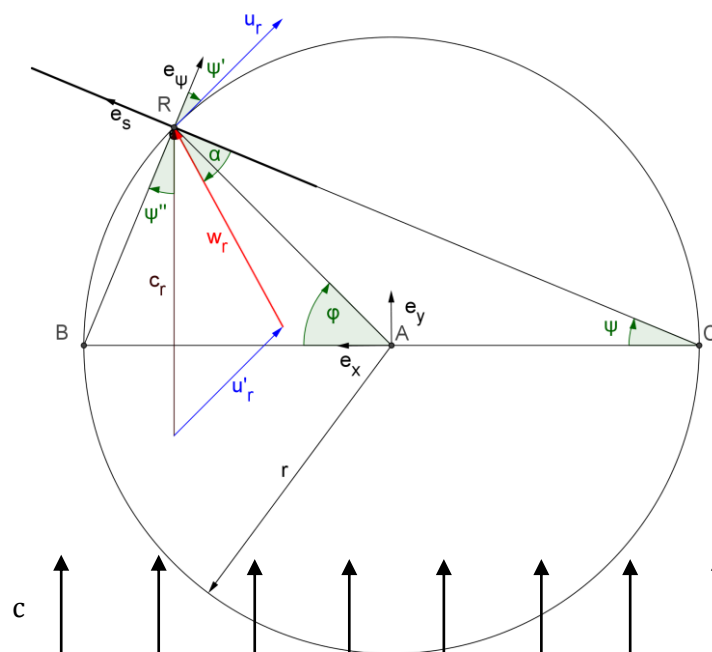


Abbildung 5-2: Rotorschaukel in allgemeiner Lage; $\lambda = 0.5$

In der Abbildung sind die drei Winkel ψ , ψ' und ψ'' identisch. Der Zusammenhang zwischen dem Umfangswinkel φ und dem Schaufelwinkel ψ ist gegeben durch $\psi = \frac{\varphi}{2}$. Die Ableitung des Umfangswinkels $\dot{\varphi}$ entspricht der Rotorwinkelgeschwindigkeit ω . Der in \vec{e}_ψ -Richtung wirkende Anteil der Umfangsgeschwindigkeit \vec{u}_r ergibt sich zu:

$$u_\psi = \dot{\psi} \overline{CR} = \frac{\omega}{2} (2 r \cos(\psi)) = \omega r \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (m/s) \quad (5-3)$$

Der in \vec{e}_s -Richtung wirkende Anteil der Umfangsgeschwindigkeit \vec{u}_r ergibt sich durch zeitliche Ableitung der Strecke \overline{CR} :

$$u_s = \frac{d(\overline{CR})}{dt} = \frac{d(2 r \cos(\frac{\varphi}{2}))}{dt} = -\omega r \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (m/s) \quad (5-4)$$

Die Komponente der Relativgeschwindigkeit \vec{w}_r in \vec{e}_ψ -Richtung ergibt sich durch die Beziehung $\vec{w} = \vec{c} - \vec{u}$ zu:

$$\vec{w}_\psi = \vec{c}_\psi - \vec{u}_\psi = c_r \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) - \omega r \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (m/s) \quad (5-5)$$

Die Komponente der Relativgeschwindigkeit \vec{w}_r in \vec{e}_s -Richtung ergibt sich analog dazu:

$$\vec{w}_s = \vec{c}_s - \vec{u}_s = c_r \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) + \omega r \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (m/s) \quad (5-6)$$

Der Betrag der Relativgeschwindigkeit $|\vec{w}_r|$ berechnet sich durch:

$$|\vec{w}_r| = \sqrt{\vec{w}_\psi^2 + \vec{w}_s^2} \quad (m/s) \quad (5-7)$$

Der Anstellwinkel α zwischen der Schaufel s und der Relativgeschwindigkeit \vec{w}_r berechnet sich wie folgt:

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{w_\psi}{w_r}\right) \quad (^\circ) \quad (5-8)$$

Die Auftriebskraft F_L und Widerstandskraft F_D , können somit aus dem Winkel α und der Relativanströmung w_r mit den Formeln (4-23) und (4-27) berechnet werden. Deren in Umfangsrichtung wirkende Komponenten ergeben sich folgendermaßen:

$$F_{Lu} = \left| F_L \cos\left(\alpha - \frac{\varphi}{2}\right) \right| \quad (N) \quad (5-9)$$

$$F_{Du} = F_D \sin\left(\alpha - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (N) \quad (5-10)$$

Das dabei entstehende Drehmoment berechnet sich durch Kraft mal Hebelarm:

$$M = (F_{Lu} + F_{Du}) r \quad (Nm) \quad (5-11)$$

Das Drehmoment M wird durch Bezug auf Schaufelhöhe mal Schaufellänge mal Hebelarm in ein spezifisches Drehmoment \bar{M} übergeführt, um es mit der CFD-Simulation aus [6] vergleichen zu können:

$$\bar{M} = \frac{M}{h s r} \quad (Nm/m^3) \quad (5-12)$$

Das über eine Umdrehung gemittelte Moment M_{mittel} multipliziert mit der Schaufelanzahl von drei und der Winkelgeschwindigkeit ω ergibt die mechanische Leistung der VAWT:

$$P = 3 M_{mittel} \omega \quad (W) \quad (5-13)$$

Für die Vergleichbarkeit mit der CFD-Simulation wird auch die Leistung P durch Bezug auf Schaufelhöhe mal Schaufellänge in die spezifische Leistung \bar{P} übergeführt:

$$\bar{P} = \frac{P}{h s} \quad (W/m^2) \quad (5-14)$$

Der Verlauf der durch Luftwiderstand erzeugten Umfangskraft F_{Du} einer umlaufenden Schaufel ist in Abbildung 5-4 für verschiedene Schnelllaufzahlen λ dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die maximale Umfangskraft F_{Du} durch Queranströmung der Schaufel bei $\varphi = 0^\circ$ bzw. 360° gegeben ist. Des Weiteren ist ein abnehmen des Maximums von F_{Du} mit zunehmender Schnelllaufzahl feststellbar. Dies ist auf die abnehmende Relativgeschwindigkeit bei zunehmender Umfangsgeschwindigkeit zurückzuführen. Im Extremfall bei $\lambda = 1$ ist keine Relativgeschwindigkeit an der Position $\varphi = 0^\circ$ bzw. 360° vorhanden. Es wirkt eine über den ganzen Umfang negative Umfangskraft F_{Du} . Des Weiteren ist bei allen Verläufen ein symmetrisches Verhalten zwischen 0° - 180° und 180° - 360° erkennbar.

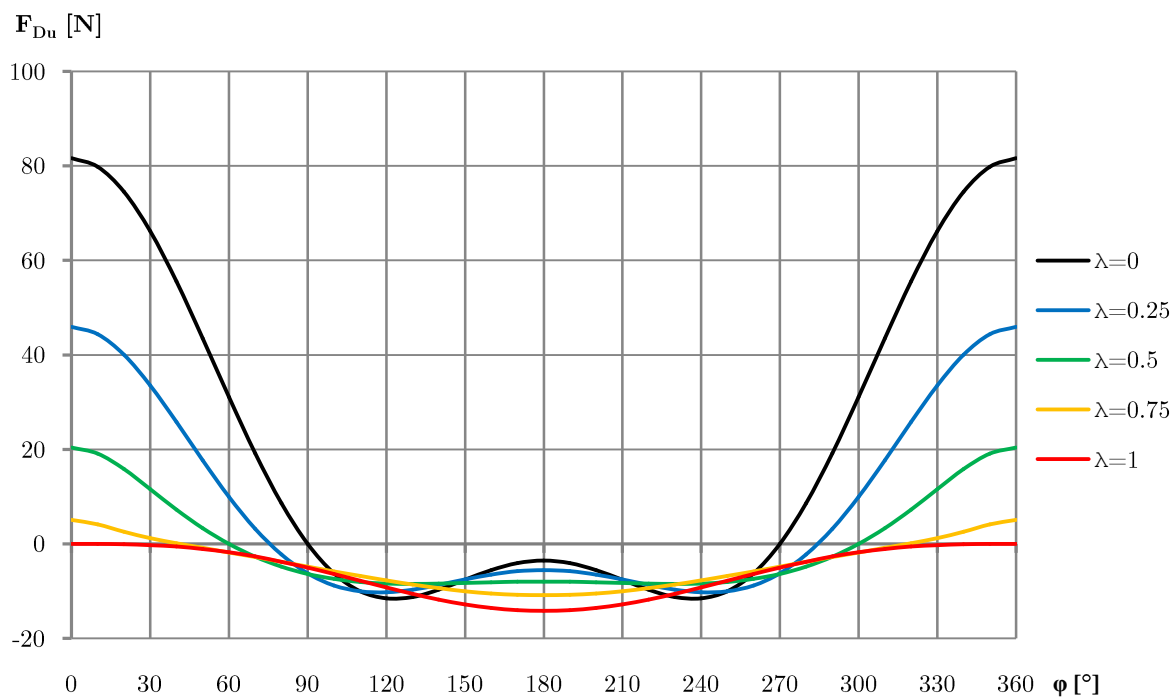


Abbildung 5-3: Verlauf der Umfangskraft F_{Du} einer umlaufenden Schaufel für verschiedene Schnelllaufzahlen λ ; $c = 36$ m/s

In Abbildung 5-3 ist der Verlauf der durch Auftrieb erzeugten Umfangskraft F_{Lu} dargestellt. Es sind zwei Maxima bei etwa $\varphi = 90^\circ$ und 270° feststellbar, da an jenen Positionen der Anstellwinkel für eine maximale Auftriebskraft optimal ist. In Kapitel 4.5 wurde der Vergleich von Widerstandsläufern zu Auftriebsläufern diskutiert. Dabei wurde festgestellt, dass bei Auftriebsläufern durch die höheren Schnelllaufzahlen die entstehenden Luftkräfte bedeutend größer ausfallen als bei Widerstandsläufern. Betrachtet man jedoch den Verlauf der Kraft F_{Lu} bei unterschiedlichen Schnelllaufzahlen an der VAWT, trifft diese Behauptung nicht zu. Nur kurzzeitig steigt bei steigender Schnelllaufzahl auch die entstehende Auftriebskraft F_{Lu} an ($\lambda = 0.25$). Dies kann durch Betrachtung der Abbildung 5-5 begründet werden, die den Verlauf des Anstellwinkels α entlang der Umdrehung einer Schaufel bei verschiedenen Schnelllaufzahlen λ darstellt. Mit zunehmender Schnelllaufzahl flacht der Anstellwinkel α zunehmend ab. Somit kann trotz der steigenden Relativgeschwindigkeit (Abbildung 5-6) die Umfangskraft F_{Lu} nicht zunehmen. Der Extremfall ergibt sich bei $\lambda = 1$. Dabei ist der Anstellwinkel über den gesamten Umfang gleich null, die somit entstehende Auftriebskraft ist ebenfalls gleich null. Auch bei dem Verlauf der Umfangskraft F_{Lu} ist ein symmetrisches Verhalten zwischen 0° - 180° und 180° - 360° erkennbar.

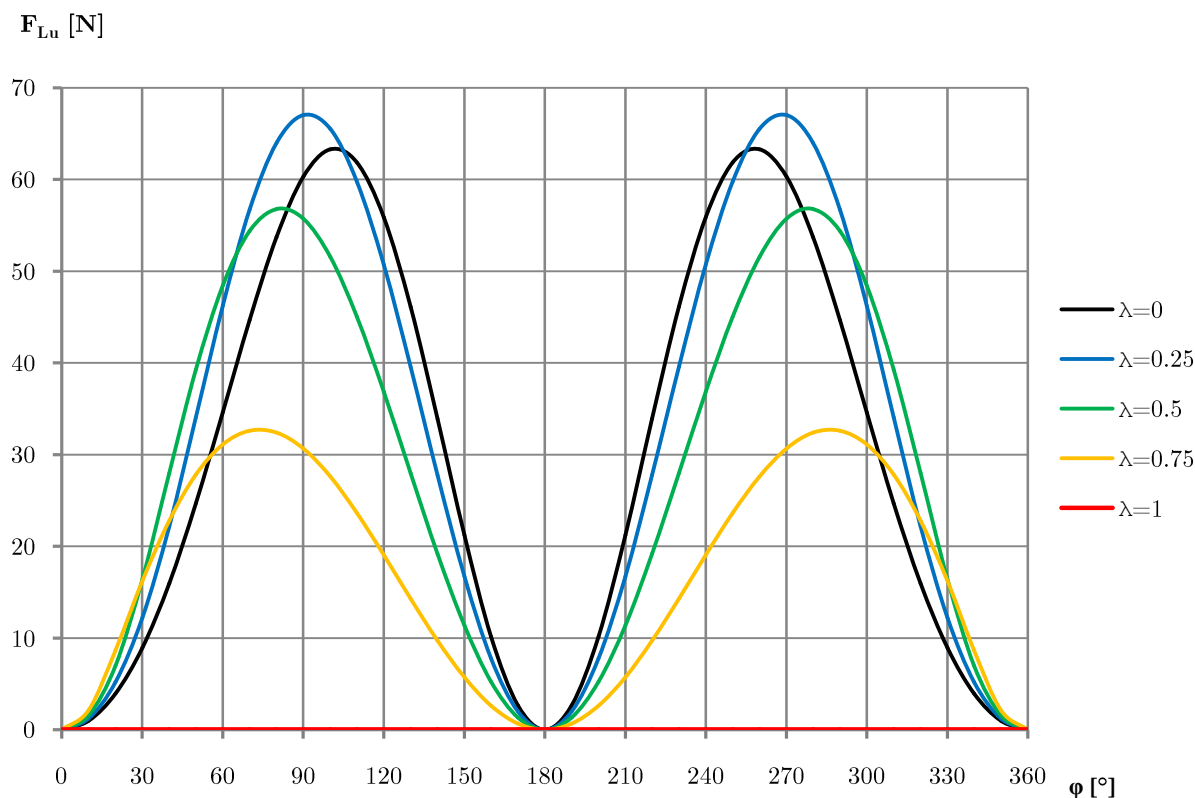


Abbildung 5-4: Verlauf der Umfangskraft F_{Lu} einer umlaufenden Schaufel für verschiedene Schnelllaufzahlen λ ; $c = 36$ m/s

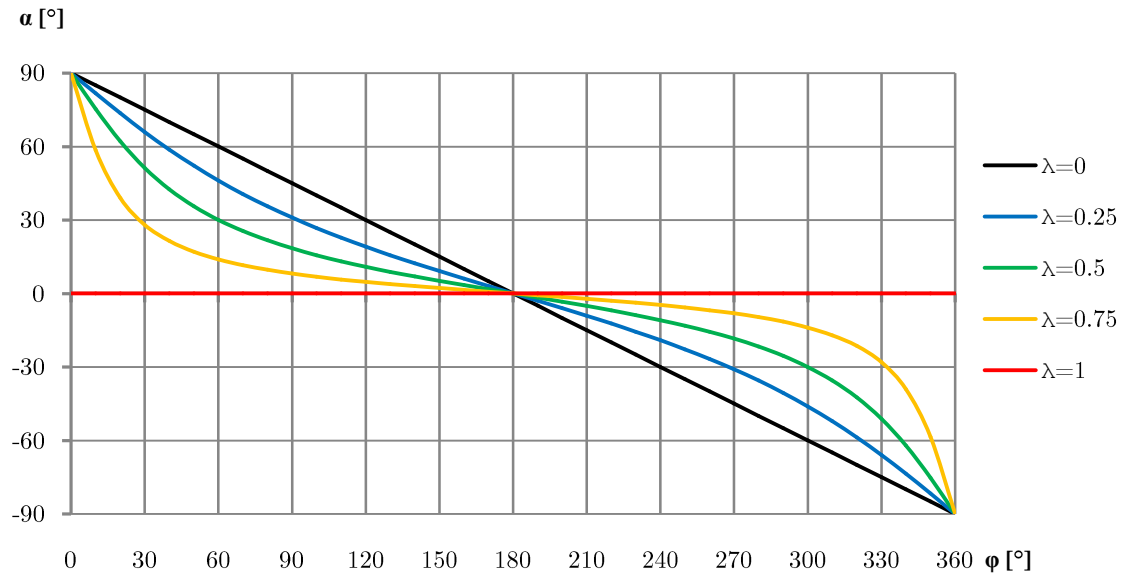


Abbildung 5-5: Verlauf des Anstellwinkels α einer umlaufenden Schaufel für verschiedene Schnellaufzahlen λ ; $c = 36$ m/s

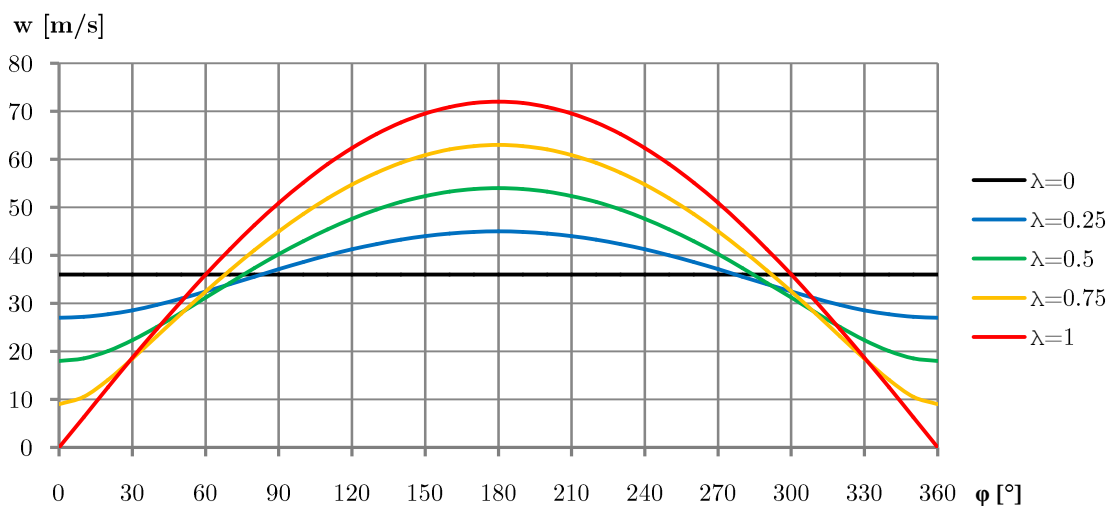


Abbildung 5-6: Verlauf der Relativgeschwindigkeiten w einer umlaufenden Schaufel für verschiedene Schnellaufzahlen λ ; $c = 36$ m/s

Der sich aus den beiden Umfangskräften F_{Lu} und F_{Du} ergebende Drehmomentverlauf, abhängig von der Schnellaufzahl λ , ist in Abbildung 5-7 dargestellt, wobei sich das Moment auf Schaufellänge s mal Schaufelhöhe h mal mittlerem Radius r_m bezieht. Vergleicht man die verschiedenen Kurven, ist ersichtlich, dass der durch Widerstandskraft entstehende Drehmomentanteil in der Nähe von $\varphi = 0^\circ$ bzw. $\varphi = 360^\circ$ bei $\lambda = 0$ maximal ist. Dort ist die treibende Relativgeschwindigkeit w_r für die Widerstandskraft F_D , maximal. Dies bedeutet, dass auf ein gutes Anfahrverhalten bei geringen Windgeschwindigkeiten geschlossen werden kann. Mit zunehmender Rotordrehzahl und somit steigender Schnellaufzahl λ sinkt der durch Widerstandskraft entstehende Drehmomentanteil im Verhältnis zu dem durch Auftriebskraft entstehenden Anteil. Bei $\lambda = 1$ ist der gesamte Drehmomentverlauf negativ.

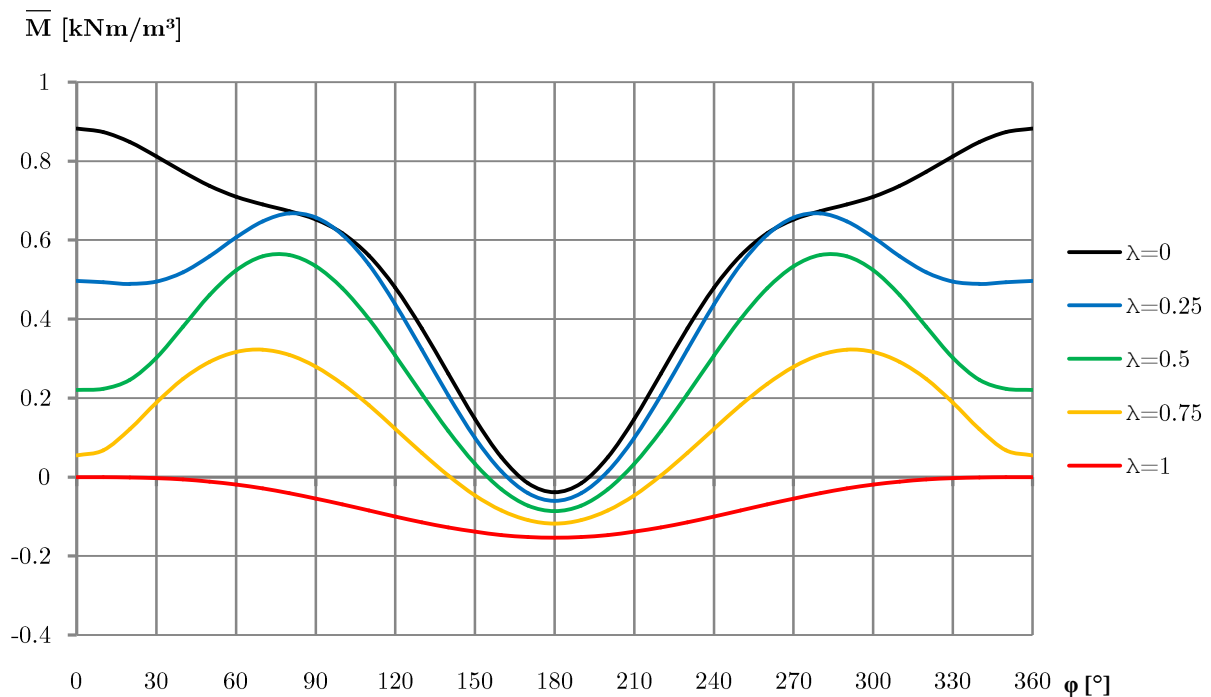


Abbildung 5-7: Verlauf des Drehmoments einer umlaufenden Schaufel für verschiedene Schnelllaufzahlen λ ; $c = 36$ m/s

In Abbildung 5-8 ist der gemittelte Leistungsverlauf dreier Schaufeln abhängig von der Schnelllaufzahl λ dargestellt. Bei beginnender Bewegung $\lambda = 0$ ist die Leistung gleich null. Mit steigender Drehzahl, und somit steigender Schnellläufigkeit nimmt die Leistung zu. Bei $\lambda = 0,5$ befindet sich das Maximum der Leistungsausbeute von 16 kW/m². Anschließend fällt die Leistung mit zunehmender Drehzahl wieder ab. Bei einer Schnellläufigkeit $\lambda = 0,9$ wird die Grenzdrehzahl der VAWT aufgrund der negativen Umfangskraft infolge des Luftwiderstands, und der kleinen Umfangskraft infolge des dynamischen Auftriebs erreicht.

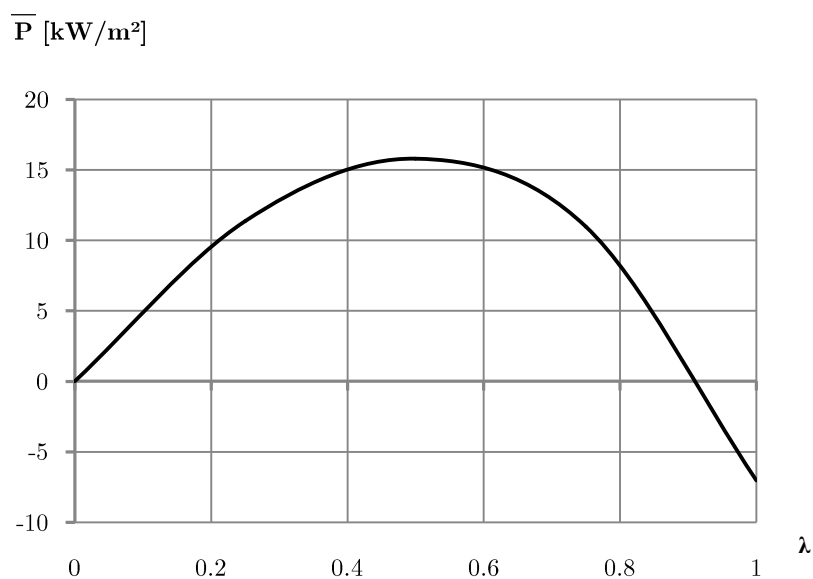


Abbildung 5-8: Gemittelte Leistung dreier Schaufeln abhängig von der Schnelllaufzahl; $c = 36$ m/s

5.1.2 Kinematische Betrachtung mittels GeoGebra

In diesem Kapitel werden die Geschwindigkeitsdreiecke an der Anströmkannte, Schaufelmitte und an der Abströmkannte betrachtet. Dafür wird die dynamische Geometrie-Software *GeoGebra* verwendet. Auch hierbei gelten vereinfachende Annahmen:

- Die Geschwindigkeitsdreiecke stellen punktuelle Betrachtungen der Anströmung dar
- Die betrachteten Punkte weisen keine Wechselwirkung untereinander auf
- Der Wind strömt mit konstanter Geschwindigkeit $c = 36 \text{ m/s}$ und konstanter Richtung auf die jeweiligen Punkte.
- Es wird jeweils eine einzelne Schaufel entlang der Umdrehung betrachtet, d.h. die Schaufeln beeinflussen sich nicht untereinander und es herrscht dadurch keine Strömungsinterferenz

In Abbildung 5-9 ist die Schaufelstellung in Abhängigkeit vom Umfangswinkel φ entlang der Umdrehung dargestellt. Geschwindigkeitsdreiecke sind an der Position $\varphi = 315^\circ$ an der Anströmkannte, Schaufelmitte und an der Abströmkannte abgebildet. Dabei stellen die \vec{c}_i -Vektoren die Windgeschwindigkeit an der jeweiligen Position dar. Der Zusammenhang zwischen den Umfangsgeschwindigkeiten \vec{u}_i an den Radien r_i , und der Winkelgeschwindigkeit ω des Rotors um die Achse A , ergibt sich zu:

$$\dot{\varphi} = \omega = r_i \vec{u}_i \quad (5-15)$$

Der Zusammenhang zwischen den Umfangsgeschwindigkeiten \vec{v}_i , der Winkelgeschwindigkeit $\dot{\psi}$ der Rotorschaukeln um die eigene Achse und der halben Schauffellänge s ergibt sich zu:

$$\dot{\psi} = \frac{\dot{\varphi}}{2} = \frac{s}{2} \vec{v}_i \quad (5-16)$$

Die Geschwindigkeiten \vec{u}_i und \vec{v}_i ergeben zusammen die resultierende Geschwindigkeit \vec{uv}_i :

$$\vec{uv}_i = \vec{u}_i + \vec{v}_i \quad (5-17)$$

Die Relativgeschwindigkeit \vec{w}_i ergibt sich aus den Geschwindigkeiten \vec{c}_i und \vec{uv}_i zu:

$$\vec{w}_i = \vec{c}_i - \vec{uv}_i \quad (5-18)$$

Das Verhältnis der Umfangsgeschwindigkeit am mittleren Radius r_m zur Windgeschwindigkeit \vec{u}_r/\vec{c}_r ist als die Schnelllaufzahl λ definiert. In Abbildung 5-9 beträgt die Schnelllaufzahl $\lambda = 0.5$.

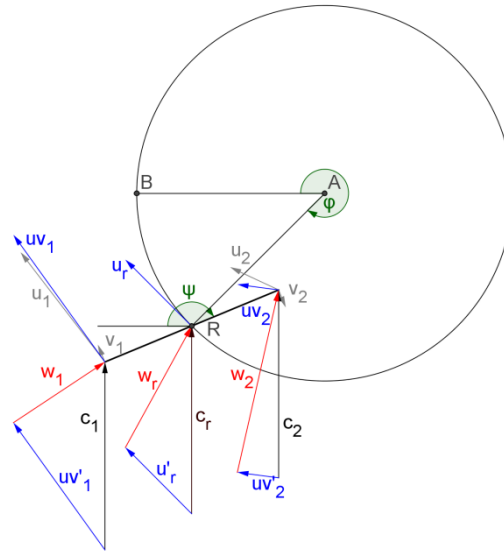


Abbildung 5-9: Schaufel mit Geschwindigkeitsdreiecken an den Positionen Schaufelachse, Anströmseite und Abströmseite bei einem Winkel $\varphi = 315^\circ$; $\lambda = 0.5$

In Abbildung 5-10 ist die Relativgeschwindigkeit \vec{w}_r entlang einer Umdrehung in 45° -Abständen dargestellt. Dabei wurden auf die Geschwindigkeitsvektoren jeweils Geraden gelegt, die in grauer Farbe dargestellt sind. Ein symmetrisches Drehmomentverhalten zwischen 0° - 180° und 180° - 360° , wurde bereits bei der analytischen Berechnung unter 5.1.1 erkannt. Betrachtet man die Schaufel an Position $\varphi_1 = 45^\circ$ und $\varphi_2 = 315^\circ$, ist erkennbar, dass die Relativgeschwindigkeiten, die Anstellwinkel α , und der Hebelarm (rechtwinkliger Abstand h zwischen Relativgeschwindigkeit und Rotorachse) in beiden Fällen von gleicher Größe sind. Dies würde in weiterer Folge bedeuten, dass das entstehende Drehmoment in beiden Fällen gleich groß sein müsste. Somit kann das symmetrische Verhalten der analytischen Berechnung bestätigt werden.

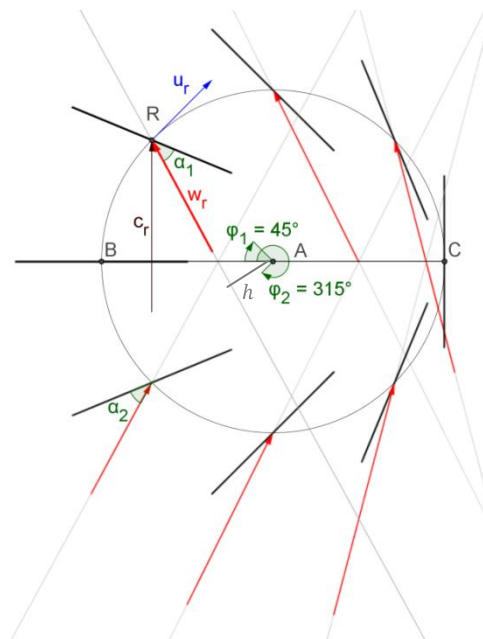


Abbildung 5-10: Relativgeschwindigkeit w_r entlang des Umfangs; $\lambda = 0.5$

Bei der analytischen Berechnung wurden zwei Maxima im Drehmomentverlauf an den Positionen $\varphi_1 = 70^\circ$ und $\varphi_2 = 290^\circ$ gefunden. Betrachtet man an diesen Positionen die Verteilung der Relativgeschwindigkeit \vec{w}_i entlang der Schauffellänge s in Abbildung 5-11, so ist erkennbar, dass die Vektoren im ersteren Fall auseinander laufen. Im Gegensatz dazu konzentrieren sich an der Position $\varphi_2 = 290^\circ$ die Relativgeschwindigkeiten \vec{w}_i auf der Schaufel. Die unterschiedlichen Relativgeschwindigkeiten kommen einerseits durch die Rotation der Schaufeln um ihre eigene Achse R , und andererseits durch die mit zunehmendem Radius r höhere Umfangsgeschwindigkeit \vec{u}_i zustande (Abbildung 5-9). Bei größer werdendem Verhältnis von mittlerem Radius zu Schauffellänge r_m/s nähert sich die Relativanströmung entlang der Schaufel dem Fall der Parallelströmung. Das an den beiden Positionen entstehende Drehmoment kann nicht gleich groß sein. Es kann davon ausgegangen werden, dass das Drehmoment an der Position $\varphi_2 = 290^\circ$ höher ist, als jenes an der Position $\varphi_1 = 70^\circ$. Diese Annahme bestätigt der unter Kapitel 2.4 angeführte Drehmomentverlauf der CFD-Simulation aus dem Paper von H. Jericha et al. [6]. In Abbildung 5-12 ist ein Plot der Relativgeschwindigkeiten an der Position $\varphi = 70^\circ$ aus der CFD-Simulation dargestellt. Lediglich geringe Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Druck- und Saugseite sind feststellbar, wodurch sich kein markanter Druckunterschied ausbildet und die dadurch entstehenden Umfangskräfte ebenfalls gering ausfallen. An der Position $\varphi = 290^\circ$ (Abbildung 5-13) sind dagegen hohe Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Druck- und Saugseite feststellbar, wodurch auch deutlich höhere Umfangskräfte entstehen. Die Schnelllaufzahl beträgt $\lambda = 0.5$ und die Windgeschwindigkeit $c = 36 \text{ m/s}$.

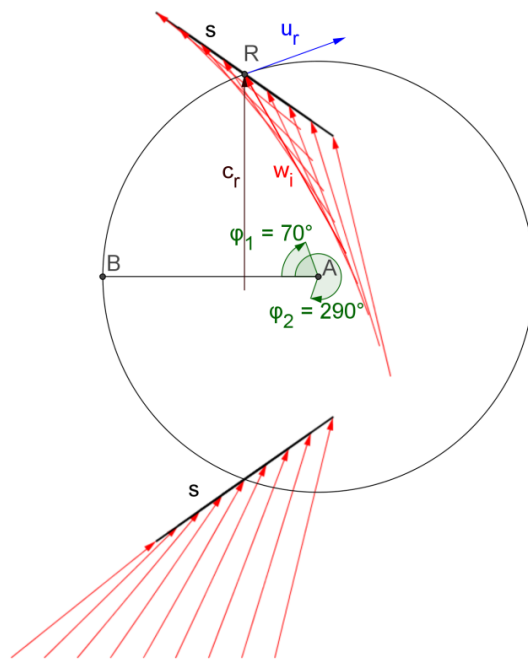
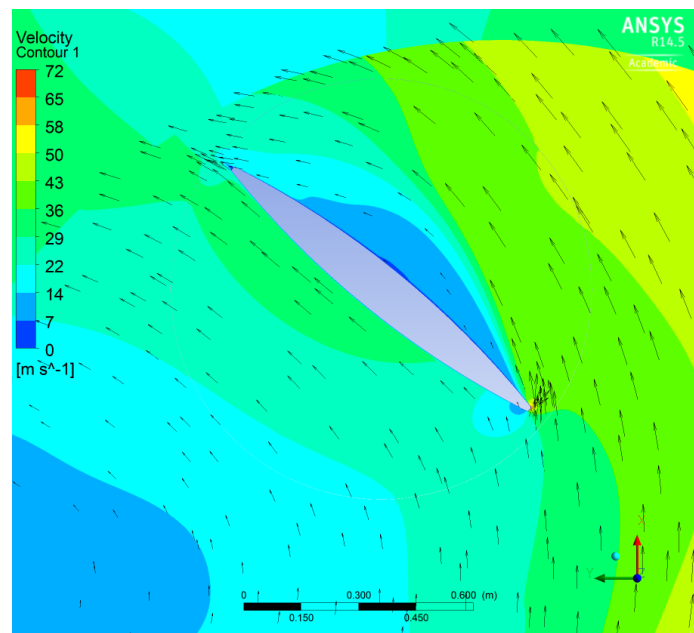
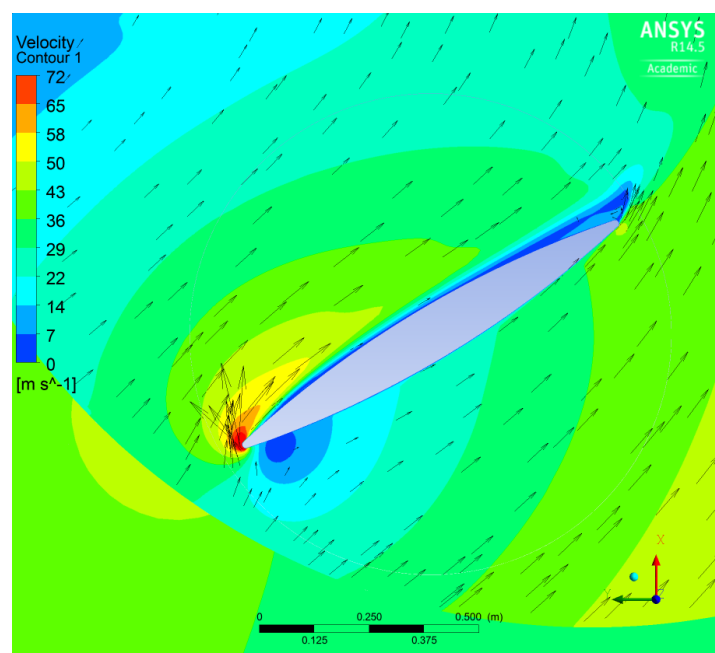


Abbildung 5-11: Relativgeschwindigkeitsverteilung entlang der Schaufel s an den Positionen $\varphi_1 = 70^\circ$ und $\varphi_2 = 290^\circ$; $\lambda = 0.5$



c ↑

Abbildung 5-12: Größe und Richtung der Relativgeschwindigkeiten um die Schaufel an der Position $\varphi = 70^\circ$; $\lambda = 0.5$; $c = 36$ m/s



c ↑

Abbildung 5-13: Größe und Richtung der Relativgeschwindigkeiten um die Schaufel an der Position $\varphi = 290^\circ$; $\lambda = 0.5$; $c = 36$ m/s

Der unter Kapitel 2.4 angeführte Drehmomentverlauf aus dem Paper von H. Jericha et al. [6], bestätigt diese Aussage. Dabei tritt, verglichen mit der analytischen Berechnung, nur ein Drehmoment-Maximum an der Position $\varphi = 290^\circ$ auf. Ein weiterer Grund für das geringe Drehmoment an der Position $\varphi = 70^\circ$ ist die Berücksichtigung der Strömungsbeeinflussung der

Rotorschaukeln untereinander in der CFD-Simulation. Betrachtet man Abbildung 2-9, in der die Geschwindigkeitsverteilung an verschiedenen Rotorpositionen dargestellt ist, scheint es plausibel, dass die Schaufel an der Position $\varphi = 290^\circ$ die Schaufel an der Position $\varphi = 70^\circ$ strömungstechnisch abschattet und dadurch nur ein geringes Drehmoment an letzterer Position entstehen kann. Eine Vergrößerung des Verhältnisses des mittleren Turbinenradius r_m zur Schaufellänge s würde die Versperrung vermindern, und wahrscheinlich zu einer Steigerung des Drehmoments an der Position $\varphi = 70^\circ$ führen. Eine Variation dieses Verhältnisses wurde in der CFD-Simulation nicht untersucht, und ist auch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Die Position des maximalen Drehmoments ist in Abbildung 5-14 mit den dazugehörigen Geschwindigkeitsdreiecken und dem Anstellwinkel an der Schaufelmitte $\alpha_r \approx 25^\circ$ dargestellt. Des Weiteren ist die Auftriebskraft F_L und die Widerstandskraft F_D qualitativ an der Schaufelmitte eingezeichnet.

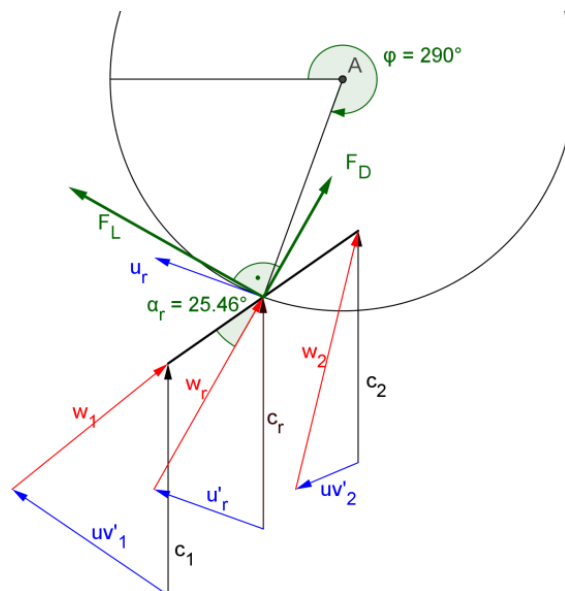


Abbildung 5-14: Position des maximalen Drehmoments laut CFD-Simulation bei $\varphi = 290^\circ$; Geschwindigkeitsdreiecke an Anström- kante, Schaufelmitte und Abström- kante; $\lambda = 0.5$

Aus den angestellten Betrachtungen in diesem Kapitel kann eine Fragestellung formuliert werden, die für die Einbindung der Leitschaufeln essentiell ist:

Kann durch eine gezielte Anordnung der Leitschaufeln das maximale Drehmoment entlang weiterer Teile des Umfangs aufrecht erhalten und der durch Auftriebskraft entstehende Drehmomentanteil vergrößert werden?

5.2 Mit Leitschaufeln

In Bezug auf die vorhergehenden Fragestellung, soll nun durch die Einbindung der Leitschaufeln die Strömungssituation die im Punkt des maximalen Drehmoments bei $\varphi = 290^\circ$ herrscht, auf weitere Teile des Umfangs übertragen werden. Dabei werden wiederum einige Annahmen zur Vereinfachung getroffen:

- Es wird jeweils eine einzige Schaufel betrachtet, d.h. die Schaufeln beeinflussen sich nicht untereinander.
- An jeder Schaufelposition soll der Anstellwinkel an der Schaufelmitte $\alpha_r = 25^\circ$ betragen.
- Es wird die Anströmung an der Schaufelmitte betrachtet
- Die Windgeschwindigkeit $|\vec{c}_i| = \textit{konstant}$.

Diese Annahmen führen zu einer Verteilung der Windgeschwindigkeiten \vec{c}_r entlang des Umfangs wie sie in Abbildung 5-15 dargestellt ist. Um die Rotorschaukeln auf diese Weise mit dem Wind beaufschlagen zu können, sollen Leitschaufeln verwendet werden. Die dargestellte Konfiguration der Leitschaufeln wird als Ausgangskonfiguration bei den experimentellen Versuchen herangezogen.

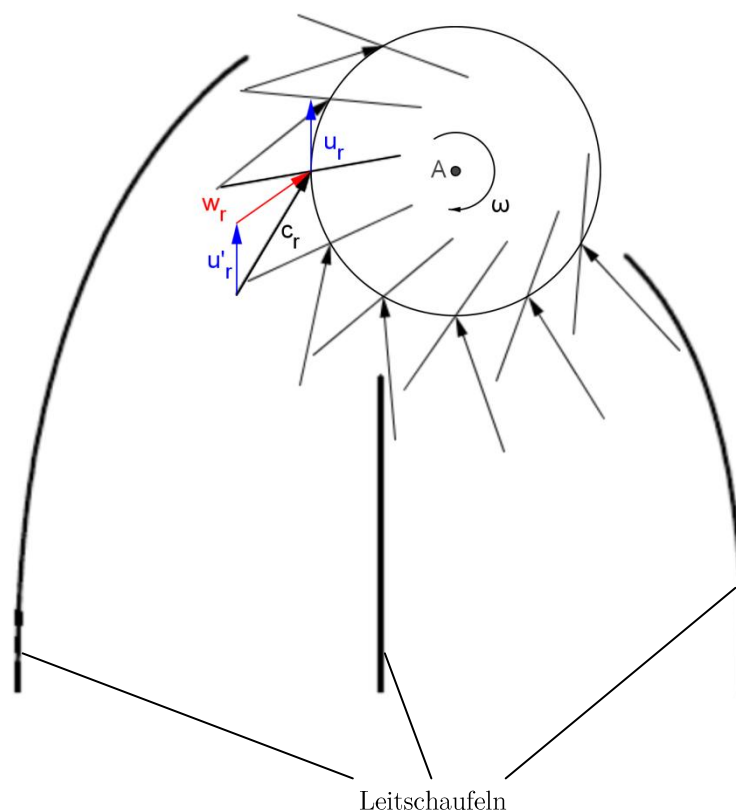


Abbildung 5-15: Ausgangskonfiguration der Leitschaufeln; $\lambda = 0.5$

5.3 Zusammenfassung

Unter Kapitel 4.5 wurde der Unterschied zwischen Auftriebs- und Widerstandsläufer erläutert. Die am Auftriebsläufer entstehenden Luftkräfte übertreffen jene, die mit einem Widerstandsläufer erzeugt werden, deutlich. Dies ist auf die höheren Relativgeschwindigkeiten bei Auftriebsläufern zurückzuführen. Daher ist das aerodynamische Auftriebsprinzip zu bevorzugen.

Durch die analytischen Betrachtungen kann die aerodynamische Wirkungsweise der VAWT auf einfache und nachvollziehbare Weise qualitativ erklärt werden. Es wurde festgestellt, dass das neuartige Konzept der VAWT eine Mischung zwischen Auftriebs- und Widerstandsläufer ist, wobei der maßgebende Anteil der Leistung durch den aerodynamischen Auftrieb erzeugt wird. Jedoch kann bei steigender Schnellläufigkeit, und somit steigender Relativgeschwindigkeit aufgrund des dabei sinkenden Anstellwinkels die Umfangskraft infolge dynamischen Auftriebs nicht gesteigert werden. Das Leistungsoptimum wurde sowohl bei der CFD-Simulation [6], als auch bei der analytischen Berechnung bei einer Schnelllaufzahl von $\lambda_{opt} = 0.5$ festgestellt. Unter Kapitel 4.3, in dem der Widerstandsläufer behandelt wurde, ist die optimale Schnellläufigkeit eines solchen mit $\lambda_{opt} = 0.33$ bestimmt worden. Dies bedeutet, dass die Drehmomenterzeugung nach dem Widerstandsprinzip bei der VAWT nicht mit der optimalen Schnelllaufzahl erfolgt. Aufgrund des hohen Drehmoments bei beginnender Bewegung $\lambda = 0$, das nach dem Luftwiderstandsprinzip entsteht, kann von einem sehr guten Anlaufverhalten der neuartigen VAWT ausgegangen werden. Des Weiteren wurde die Versperrungsproblematik kurz angesprochen, die sich bei kleinen Verhältnissen von mittlerem Turbinen r_m zu der Schauffellänge s ergeben kann.

Abschließend geht aus der analytischen Betrachtung eine Ausgangskonfiguration der Leitschaufeln für die Messungen am Prüfstand hervor. Dabei wird versucht, das maximale Drehmoment, das aufgrund des aerodynamischen Auftriebs entsteht, über weitere Teile des Umfangs aufrecht zu erhalten.

6 Versuchsaufbau

Dieses Kapitel beinhaltet eine Beschreibung der einzelnen Komponenten des Versuchsaufbaus.

6.1 Winderzeugung

Um die Versuche im Zuge dieser Diplomarbeit an der Windturbine durchführen zu können, ist ein kontinuierlicher, gleichmäßiger Luftstrom von Bedarf. Eine Prüfung im Luftstrom eines Windkanals wäre dazu geeignet, da in diesem gleichmäßige Strömungsverhältnisse über den Kanalquerschnitt herrschen. Die Versuche müssen jedoch in einem iterativen Prozess durchgeführt werden. Dabei wird der Versuchsaufbau nach jeder Messung modifiziert, um anschließend die Auswirkungen der Modifikationen auf die Leistungsausbeute zu ermitteln. Aus diesem Grund können zwischen den einzelnen Versuchen längere Zeiträume liegen. Somit ist das Prüfen in einem Windkanal aus Zeit- und Kostengründen vorerst ausgeschlossen. Eine günstige Alternative dazu bietet die Auffahrtsrampe des TTM-Instituts, in der die Luft mittels eines 30 kW Axial-Gebläses in Bewegung gesetzt wird. Die Auffahrtsrampe muss für Fahrzeuge im Normalfall befahrbar sein. Aus diesem Grund, und nicht zuletzt weil der Prüfstand keine Wetterfestigkeit aufweist, kann der Versuch nicht permanent aufgebaut bleiben. Um einen einfacheren Auf- und Abbau zu ermöglichen, sind auf dem Gestell des Gebläses geeignete Rollen angebracht worden.

Nach ersten Windgeschwindigkeitsmessungen entlang der Rampe sind böige Windverhältnisse klar ersichtlich. Diese ungleichmäßigen Windgeschwindigkeiten beruhen einerseits auf dem Drall, den der Wind durch das Gebläse erhält, und andererseits auf dem Verwirbeln der beschleunigten mit der ruhenden Luft. Zur Minderung des Dralls wird ein Gleichrichter benötigt. Die gute Kooperation zwischen dem TTM-Institut und dem Kompetenzzentrum *Virtuelles Fahrzeug* aus Graz ermöglichte es, einen Gleichrichter zu erhalten, der sich für die Anwendung am 30 kW Axial-Gebläse als geeignet herausstellte. Dieser besteht aus einer Anordnung von 1 m langen Rohren mit einem Durchmesser von 0.2 m. In Abbildung 6-2 ist die Auffahrtsrampe mit positioniertem Gebläse und Gleichrichter ersichtlich, zu denen sich im Abstand von 6.88 m der Prüfstand befindet.

Die Geschwindigkeitsverteilung entlang der Kanalbreite in einer Höhe von 1.2 m ist in Abbildung 6-1 für drei verschiedene Entfernungen vom Gleichrichter dargestellt. An jedem Messpunkt wurde die Windgeschwindigkeit c_{mittel} über 60 s mit einem Flügelradanemometer (Testovent 4300 von *testo*) gemessen und gerätintern gemittelt. Betrachtet man die Geschwindigkeiten im Abstand von 3.12 m vom Gleichrichter, ist die Windstärke bei 0 m wesentlich geringer als jene bei +/- 0.3 m ausgehend von der Kanalmitte. Dies ist auf die Nachlaufdelle der Gebläsenabe zurückzuführen, die einen beträchtlichen Durchmesser von 0.5 m aufweist. Trotz der geringeren Böigkeit in Nähe des Gebläses, eignet sich diese ungleichmäßige Verteilung entlang der Kanalbreite nicht für Vergleichsmessungen zwischen verschiedenen Versuchskonfigurationen. Die Geschwindigkeitsverteilung bei 6.88 m ist wesentlich homogener entlang der Breite und eignet sich daher für die Messungen an der VAWT. Der Mittelwert der

Messungen bei 6.88 m beträgt $\bar{c} = 15.53 \text{ m/s}$ und wird für die Berechnung der c_p -Werte herangezogen.

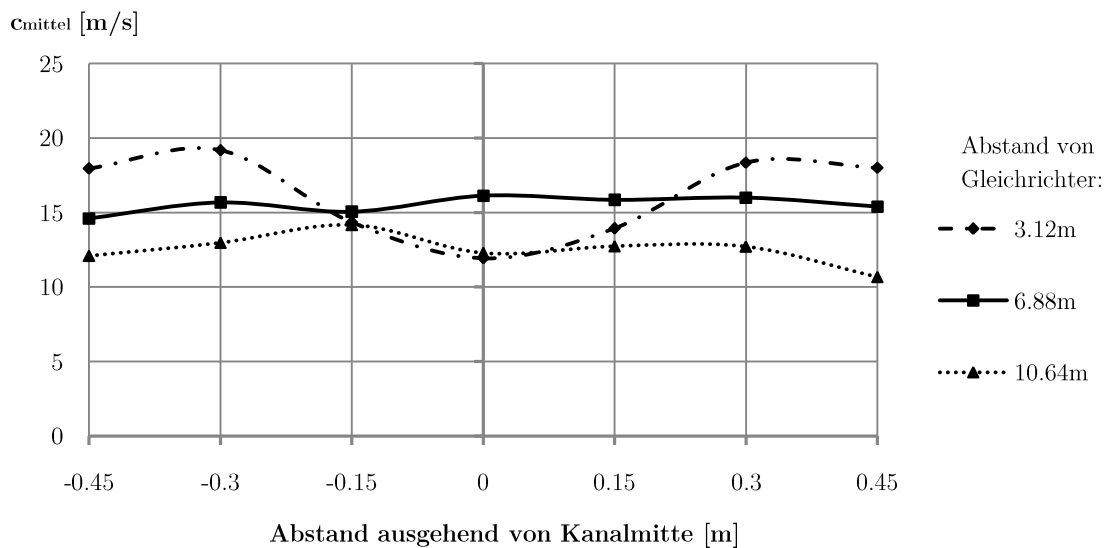


Abbildung 6-1: Über 60 s Gemittelte Windgeschwindigkeiten entlang der Kanalbreite in einer Höhe von 1.2 m, gemessen an drei Abständen vom Gleichrichter

In der folgenden Abbildung 6-2 ist der Versuchsaufbau mit dem Gebläse (1), dem Gleichrichter (2) und dem Prüfstand (3) ersichtlich.

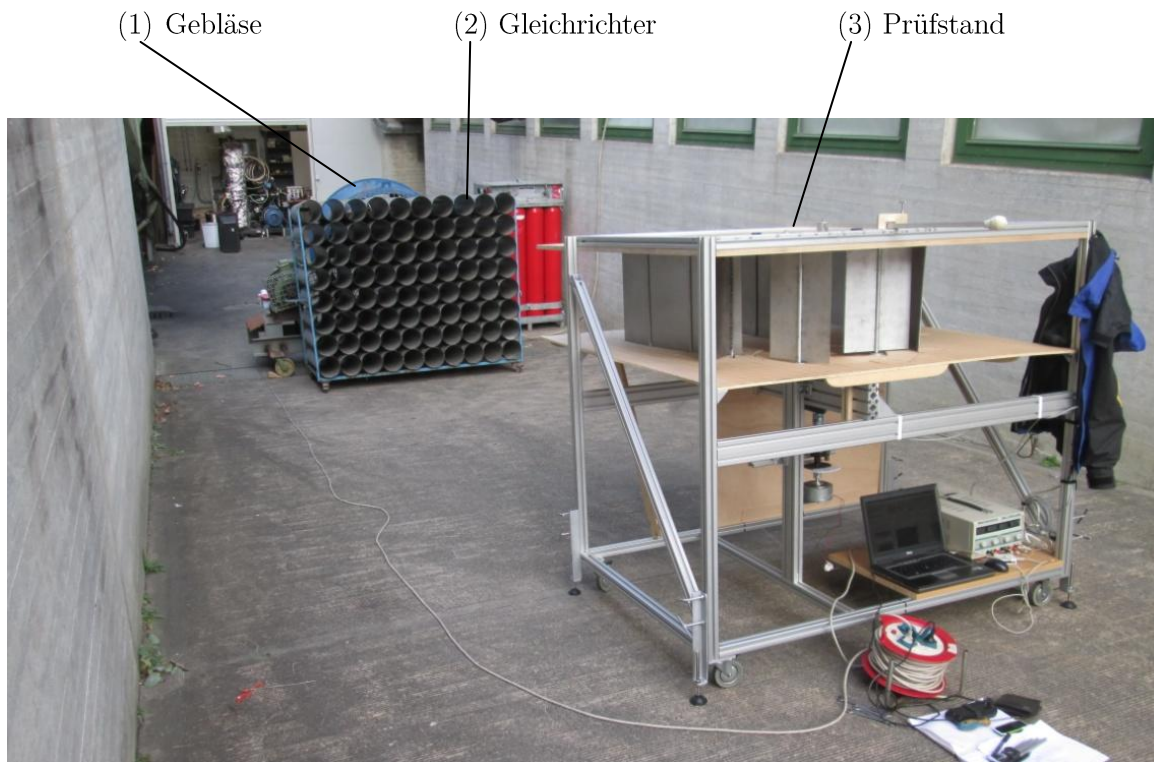


Abbildung 6-2: Gebläse mit Gleichrichter und Prüfstand positioniert in der Auffahrtsrampe des TTM-Instituts

6.2 Der Prüfstand

Der Prüfstand für diese Arbeit soll folgende Anforderungen erfüllen:

- Eingliederung der bestehenden VAWT-Modellturbine (siehe Kapitel 2.2)
- 2D-Strömungssituation um die Vergleichbarkeit zur CFD-Simulation zu ermöglichen
- Eingliederung der Leitschaufeln und deren einfache Verstellmöglichkeit
- Mobilität, zum einfachen Versuchsauf- und -abbau

Unter Einbeziehung dieser Anforderungen, wurde ein Prüfstand konstruiert, der in Abbildung 6-3 als isometrische Ansicht schematisch dargestellt ist, wobei die lose Platte (4) für das bessere Verständnis transparent erscheint. Das Grundgerüst besteht aus Item-Profilen (1) auf dem sämtliche Komponenten befestigt werden. Zur Realisierung einer 2D-Strömungssituation soll der Strömungsraum durch eine obere fixe Platte (3) und eine untere lose Platte (4) begrenzt werden. Die Platten weisen einen Abstand von 380 mm zueinander auf. Zwischen den Platten erfolgt die Anströmung der 370 mm hohen Rotorscheufeln der VAWT (2), wobei die zusätzlichen Leitschaufeln (7) den Wind optimal herbeiführen sollen. Die obere Platte ist fix mit dem Item-Profil-Gestell verbunden. Die Untere wird nur durch die Leitschaufelspanner (6) an die Leitschaufelbleche angepresst und somit festgespannt. Die Leitschaufeln können dadurch sehr einfach und schnell innerhalb der Langlöcher (5) verschoben, und so in verschiedene Positionen gebracht werden.

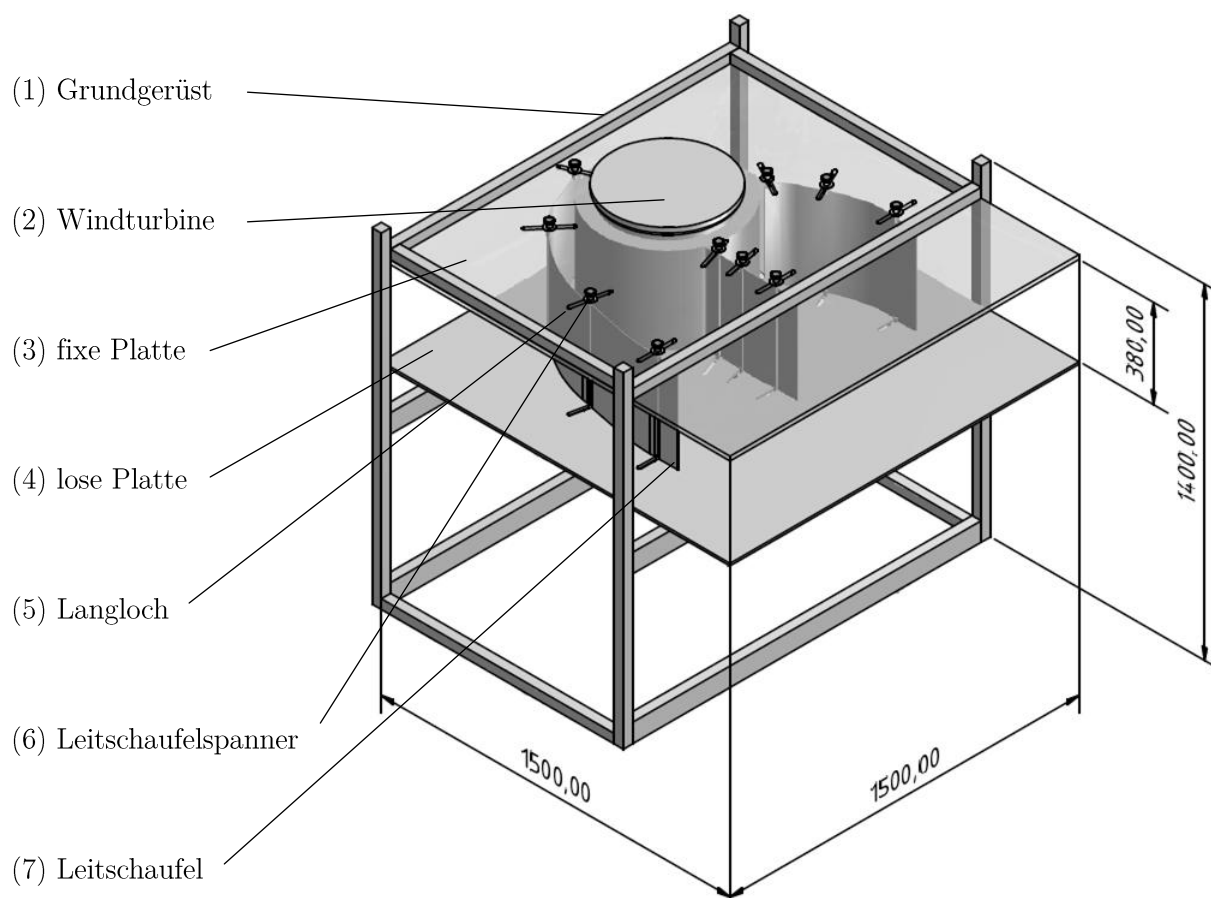


Abbildung 6-3: Schematische isometrische Ansichten des Prüfstandes von oben

In der folgenden Abbildung 6-4 ist der Prüfstand von unten dargestellt, wobei die Befestigung (8) der Windturbine ersichtlich ist. Die untere lose Platte erscheint transparent.

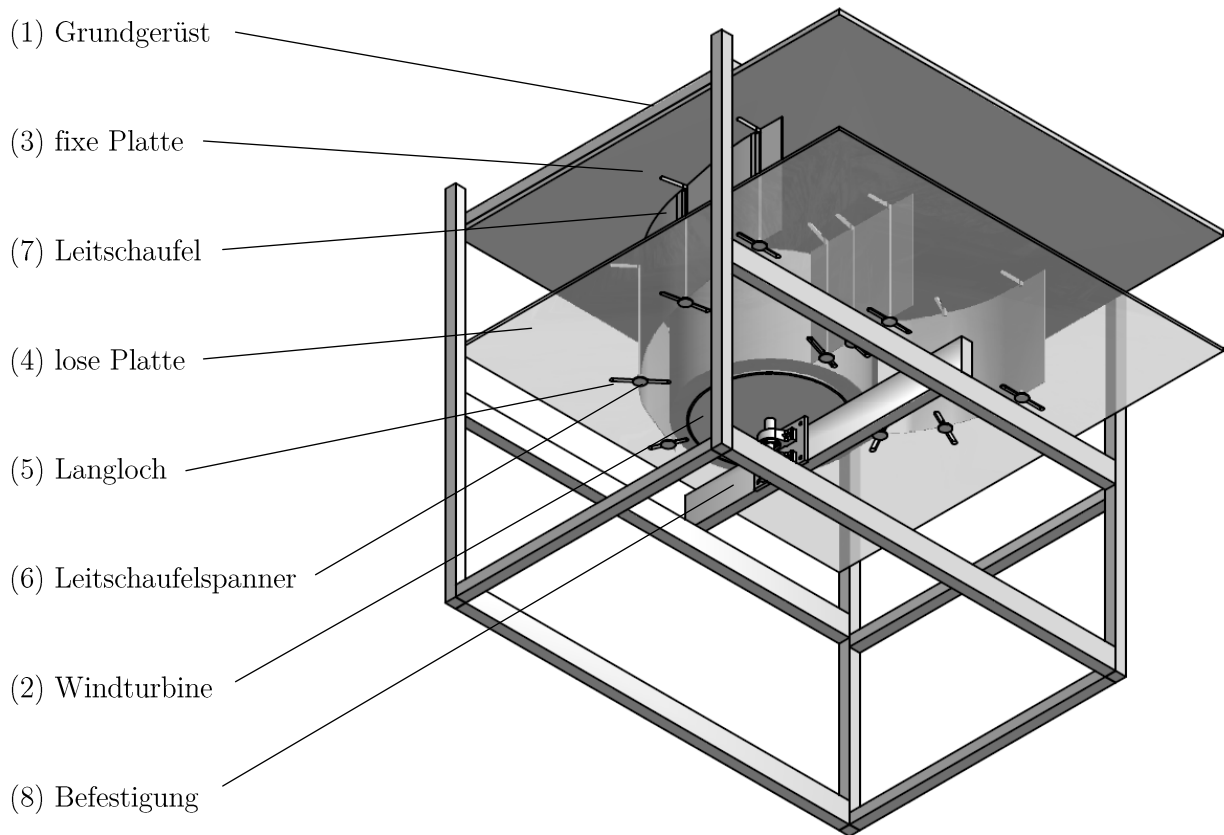


Abbildung 6-4: Schematische isometrische Ansichten des Prüfstandes von unten

Ein Detailschnitt dieses Spannsystems ist in Abbildung 6-5 ersichtlich. Bei gelöstem Gewindeknauf (9) ist der Abstand zwischen den Holzplatten größer als die Leitschaufelhöhe, und die Leitschaufelposition kann innerhalb der Langlöcher (5) verändert werden. Die Leitschaufeln werden dabei von der Leitschaufelführung (10) in Schlitzen geführt. Durch das Festschrauben des Gewindeknaufs (9) wird die lose Platte (4) nach oben bewegt und spannt das 2 mm dicke Leitschaufelblech (7) gegen die beiden Holzplatten.

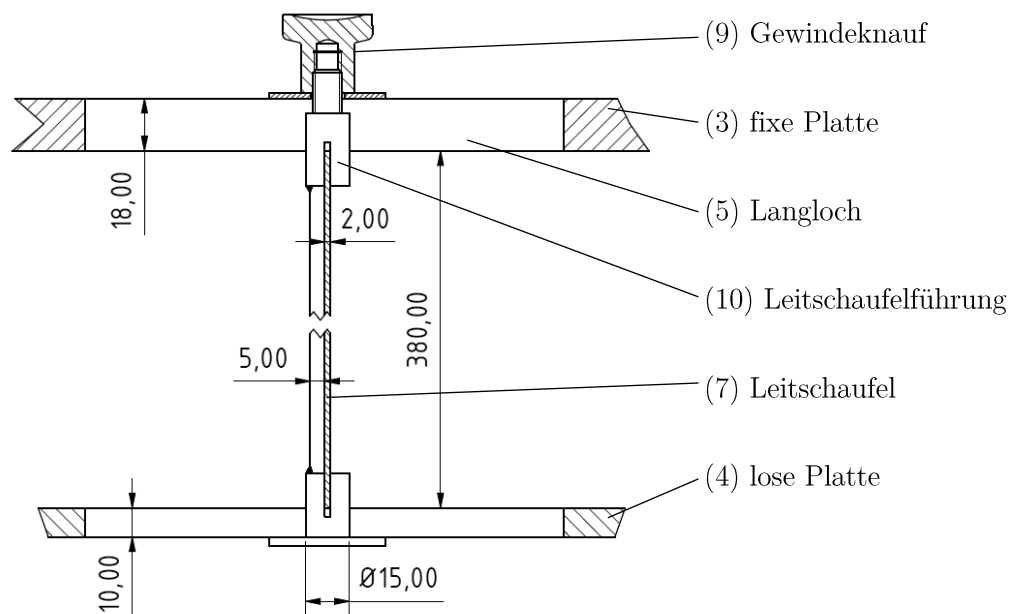


Abbildung 6-5: Detailschnitt durch einen Leitschaufelspanner (6)

6.3 Messtechnik zur Leistungsmessung

Die Leistung an einer drehenden Welle ist wie folgt definiert:

$$P = M \omega \quad (W) \quad (6-1)$$

Dabei ist M das an der Welle wirkende Drehmoment, und ω dessen Winkelgeschwindigkeit. Um die Leistung also ermitteln zu können, muss einerseits die Winkelgeschwindigkeit gemessen und andererseits die Windturbine mit einem einstellbaren Drehmoment gebremst werden. Dies kann durch eine Vielzahl von Möglichkeiten an der Welle erfolgen. Laut Wikipedia [19], können sie wie folgt grob unterteilt werden:

- Magnetische Bremsen:
 - Magnetarder
 - Magnetpulverbremse
 - Hysteresebremse
- Elektrische Bremsen:
 - Wirbelstrombremse
 - Elektromotorische Bremse
- Strömungsbremsen, Fluidbremsen
 - Retarder
 - Wasserwirbelbremsen
- Mechanische Bremsen
 - De Prony Zaum

Im Folgenden werden die an der VAWT angewandten Methoden zur Leistungsmessung beschrieben. Um das endgültige Messsystem auszulegen, wird im vorab die Leistung mittels dem De Prony'schem Prinzip abgeschätzt. Für die weiteren Messungen am VAWT-Prüfstand bietet sich die Verwendung einer Hysteresebremse, aufgrund des einfach einstellbaren Drehmoments über einen Erregerstrom an. Dadurch wäre ein automatisierbarer Messzyklus realisierbar.

6.3.1 Leistungsmessung nach De Prony

Das nach Gaspard de Prony (1755–1839) benannte Bremsdynamometer stellt eine einfache und kostengünstige Möglichkeit dar, ein definiertes Bremsmoment auf eine Welle aufzubringen. In Abbildung 6-6 ist das Prony'sche Messprinzip schematisch dargestellt. Durch die Schrauben an den Bremsbacken kann das Bremsmoment M eingestellt werden. Die Bremsbacken sind mit einem Hebel der Länge l verbunden, an dessen Ende ein Kraftmesser oder Belastungsgewicht befestigt ist.

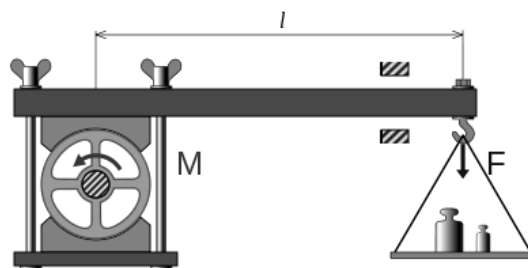


Abbildung 6-6: Prony'scher Zaum [20]

Inspiziert durch diese einfache und funktionale Möglichkeit die Leistung an einer drehenden Welle messen zu können, wurde das Prony'sche Prinzip am VAWT-Prüfstand verwendet um eine vorläufige Leistungsabschätzung durchzuführen. Die vertikale Stellung der Welle erforderte jedoch einige Anpassungen. Das Messprinzip der Drehmomentmessung an der VAWT mittels Bremsriemen ist in Abbildung 6-7 dargestellt.

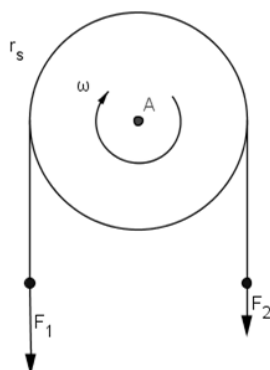


Abbildung 6-7: Prinzip der Drehmomentmessung mittels Bremsriemen

Das Drehmoment M kann wie folgt berechnet werden:

$$M = F_u r_s = (F_1 - F_2) r_s = g (m_1 - m_2) r_s \quad (Nm) \quad (6-2)$$

Dabei ist F_u die Umfangskraft, g die Erdbeschleunigung, m_i die Masse, und r_s der Scheibenradius.

Die Leistung P , kann mit der Drehzahl n wie folgt berechnet werden:

$$P = M \omega = M 2\pi \frac{n}{60} = g (m_1 - m_2) r_s 2\pi \frac{n}{60} \quad (W) \quad (6-3)$$

Dabei werden die Gewichtskräfte m_1 und m_2 durch handelsübliche digitale Messwaagen (Typ Wei Heng – Portable Electric Scale) gemessen. Die Erfassung der Drehzahl n erfolgt mittels eines optischen Handdrehzahlmessers (Testo Typ 470).

Der realisierte Messaufbau ist in Abbildung 6-8 zu sehen. In der linken Abbildung ist die Gewindespindel ersichtlich, über die der Riemen gespannt bzw. gelockert, und somit das Bremsmoment eingestellt werden kann. Die Messung der Seilkräfte erfolgt über zwei handelsübliche digitale Hangwaagen. Die rechte Abbildung zeigt den Lederriemen, der die Riemenscheibe umschlingt.



Abbildung 6-8: Gewindespindel und Hangwaagen (links), Lederriemen um Riemenscheibe (rechts)

6.3.2 Leistungsmessung mittels Hysteresebremse

Durch die Messungen mittels De Prony'schem Messprinzip, die unter Kapitel 7 dokumentiert sind, ist der Leistungsbereich der Modell-Turbine ohne Leitschaufeln bei einer Windgeschwindigkeit von 15.53 m/s ermittelt worden. Das Maximale Drehmoment liegt bei knapp 3 Nm, die maximale Drehzahl bei knapp 500 U/min. Somit kann nun mit der Auslegung des eigentlichen Leistungsmesssystems begonnen werden. Aus Gründen der einfachen Weiterverarbeitung digitaler Daten, wird hierbei eine rechnergestützte Messwerterfassung angewandt. Eine kostengünstige und einfache Möglichkeit stellt die Messkarte USB-6009 von National Instruments dar. Mit dieser können analoge Spannungssignale im Bereich von +/- 10 V mit einer maximalen Sample-Rate von 48 kS/s und einer Auflösung von 13 Bit digitalisiert und am PC aufgezeichnet werden. Als Messsoftware wird *LabView* verwendet.

Nach Formel (6-1) ist zur Leistungsberechnung eine Drehmoment- und Drehzahlmessung notwendig. Für die Drehzahlmessung eignet sich die Verwendung eines optoelektrischen Sensors, und einer Impulsgeberscheibe. Die Drehzahl kann dann in *LabView* aus den Impulsen pro Zeit berechnet werden. Für eine elektronische Drehmomentmessung in kleinen Leistungsbereichen von etwa 100 W ist das Institut für thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik nicht ausgestattet. Eine dauerhafte Anschaffung einer entsprechenden Bremse für den Leistungsbereich der VAWT scheint zu diesem Zeitpunkt nicht sinnvoll. Die gute Zusammenarbeit des TTM-Instituts mit dem Unternehmen *bionic surface technologies GmbH* ermöglichte die Leihgabe einer Hysteresebremse, die zur Entwicklung von Windrädern verwendet wird.

Die Bezeichnung der Hysteresebremse des Herstellers *mobac* lautet HB-250M-2. Aus dem Datenblatt, das auf der Homepage des Unternehmens [21] angeführt ist, kann entnommen werden, dass die Bremse mit einem maximalen Drehmoment von 2.3 Nm beaufschlagt werden darf. Aus den Ergebnissen der Vergleichsmessungen zwischen einem Rotor mit vier Schaufeln und einem mit drei Schaufeln (Kapitel 7) geht hervor, dass das maximal erreichte Drehmoment bei knapp 3 Nm liegt. Durch Einbindung der Leitschaufeln sind noch höhere Drehmomente zu erwarten. Aus diesem Grund ist die Verwendung einer Getriebeübersetzung zwischen Windrad und Hysteresebremse notwendig, die das Drehmoment an der Bremse herabsetzt und zugleich die Drehzahl steigert. Dabei fand ein Planetengetriebe mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:4 Verwendung.

In Abbildung 6-9 ist die Schaltung des Messaufbaus dargestellt. Die Hysteresebremse (1), die über Klauenkupplungen (2) und das Planetengetriebe (3) mit dem Windrad (4) verbunden ist, wird durch ein Netzteil (5) mit einer Gleichspannung von 0-25 V versorgt. Die am Shunt-Widerstand (6) anliegende Spannung U_{Shunt} wird von der USB-6009-Messkarte (7) gemessen. Über das Ohmsche Gesetz $U_{Shunt} = R_{Shunt} \cdot I$ kann auf den Strom I rückgeschlossen werden, wenn der Widerstand R_{Shunt} bekannt ist. Aus der Spannung U_{Shunt} kann anschließend am Laptop (8) in *LabView* ein Drehmoment errechnet werden. Die genauere Beschreibung der Signalwandlung wird zu einem Späteren Zeitpunkt genauer erklärt. Zur Drehzahlmessung werden ein optoelektrischer Sensor (9) und eine Impulsgeberscheibe (10) verwendet. Der Sensor, der von dem Netzteil mit einer 10 V-Gleichspannung versorgt wird, liefert ein Rechtecksignal mit zwei steigenden Flanken pro Umdrehung, woraus in *LabView* die Drehzahl berechnet wird. Aus

Drehmoment und Drehzahl kann somit die Leistung nach Formel (6-3) berechnet werden. Wie die Spannungs-Rohsignale in *LabView* in die Messwerte umgerechnet werden, wird zu einem späteren Zeitpunkt im Zusammenhang mit dem Messprogramm erläutert.

Bisher wurden die Schaufeln immer so entlang der Umdrehung geführt, dass sie in Ausgangslage $\varphi = 0^\circ$ quer zum Wind, und bei $\varphi = 180^\circ$ in Windrichtung stehen. Dies gewährleistet die Windnachführung, die in Abbildung 2-3 ersichtlich ist. Verändert man jedoch die Position der Windnachführung um den Winkel γ , weisen die Schaufeln eine Winkeldifferenz γ zur Normalausrichtung auf. In Abbildung 6-10 ist der als Phasenwinkel γ bezeichnete Winkel dargestellt. Durch das Potentiometer (12) kann die Verstellung der Windnachführung (11), und somit der Phasenwinkel gemessen werden. Es wird vom Netzteil mit einer 5 V-Geichspannung versorgt. Der Spannungsabfall am Potentiometer wird abgegriffen und in *LabView* in einen Winkel umgerechnet.

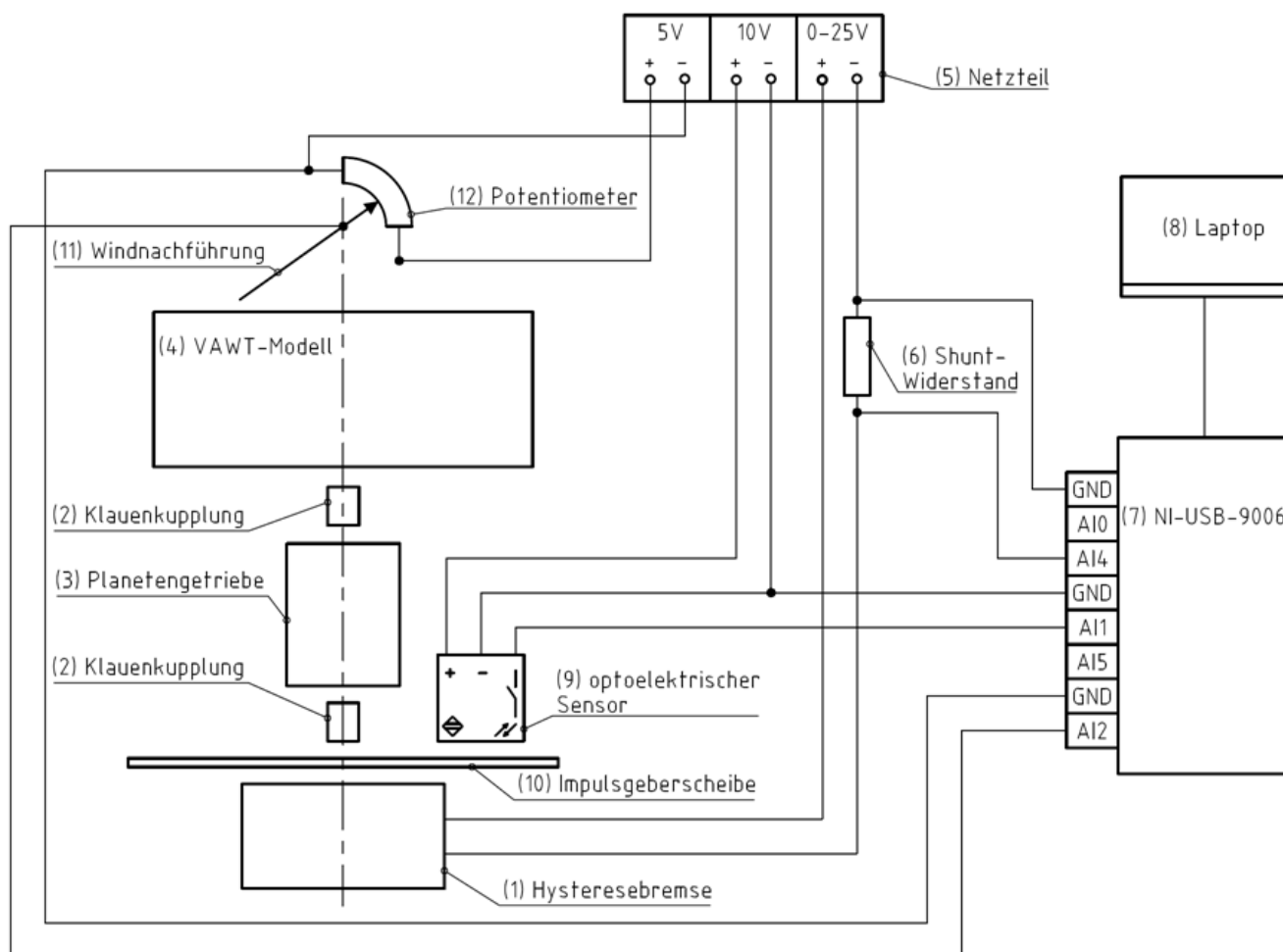


Abbildung 6-9: Schaltung des Messaufbaus

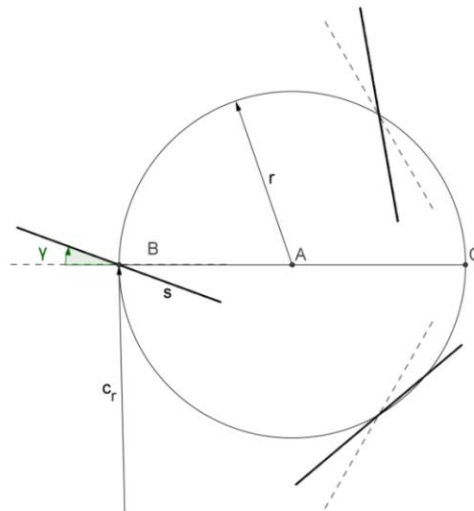
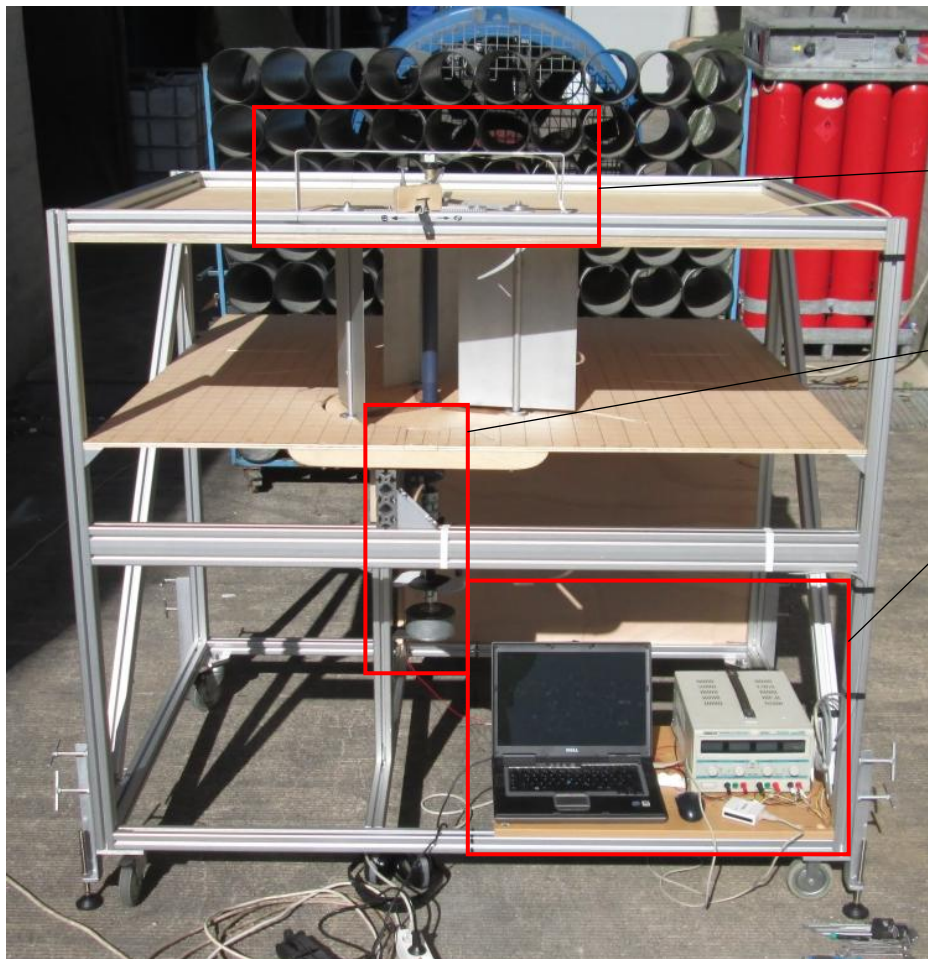


Abbildung 6-10: Definition des Phasenwinkels γ



(13) Phasenwinkel-
erfassung

(14) Leistungsmess-
einheit

(15) Stromversorgung
und Datenerfassung-
einheit

Abbildung 6-11: Prüfstands-aufbau – Leistungsmessung mittels Hysteresebremse, optoelektrischen Sensoren und Datenlogsystem

Der realisierte Prüfstand der VAWT mit Leistungsmessung mittels Hysteresebremse, optoelektrischen Sensors und Messwerterfassung ist in Abbildung 6-11 dargestellt. Im Bereich (13) wird der Phasenwinkel mittels Potentiometer gemessen. Eine detailliertere Darstellung findet sich in Abbildung 6-12. Im Bereich (14) ist die Leistungsmesseinheit untergebracht, welche aus der Hysteresebremse, dem 1:4 Planetengetriebe, dem Drehzahlgeber und zwei Klauenkupplungen besteht. Diese Komponenten sind in Abbildung 6-13 detaillierter dargestellt. Die Stromversorgung und Datenerfassungseinheit sind im Bereich (15) ersichtlich. In Abbildung 6-14 sind diese detaillierter dargestellt.

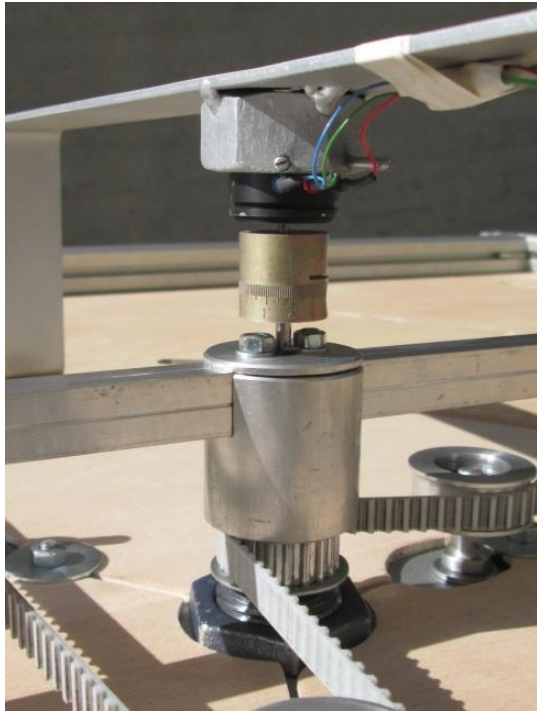


Abbildung 6-12: Detail der Phasenwinkelerfassung (13)



Abbildung 6-13: Detail der Leistungsmesseinheit (14)

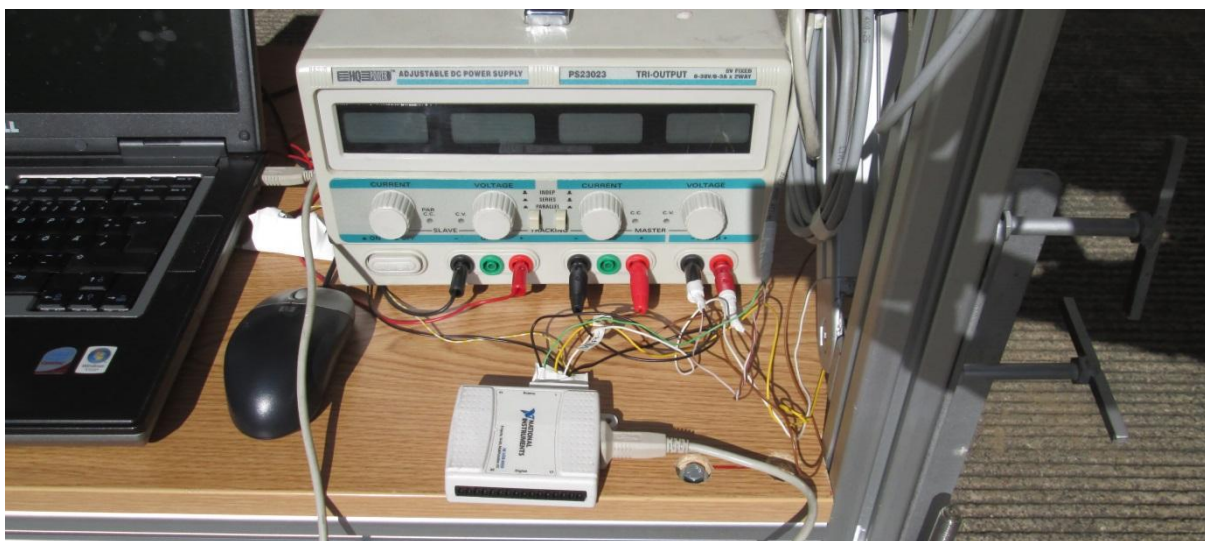


Abbildung 6-14: Detail der Stromversorgung und Datenerfassungseinheit (15)

Die analogen Spannungssignale werden in der NI-6009-Messkarte kontinuierlich mit einer Frequenz von 1 kHz in 500 Sample-Blöcken digitalisiert und an *LabView* weitergeleitet. Dort werden sie im Messprogramm verarbeitet, welches als Blockdiagramm in Abbildung 6-17 dargestellt ist. Die zwei Spannungsrohsignale der Hysteresebremse und des Potentiometers werden durch Skalierungen in die Messwerte umgerechnet.

Das Spannungs-Rohsignal des optoelektronischen Sensors ist ein Rechtecksignal, aus dem mittels Frequenzanalyse die Frequenz ermittelt wird. Wenn diese durch die zwei steigenden Flanken pro Umdrehung dividiert wird, erhält man die Drehzahl der Hysteresebremse in U/s. Multipliziert mit 2π ergibt sich die Winkelgeschwindigkeit der Hysteresebremse, die zur Berechnung der Leistung benötigt wird. Dividiert man die Drehzahl der Hysteresebremse durch das Übersetzungsverhältnis des Planetengetriebes (1:4), kann auf die Drehzahl des Windrades zurückgerechnet werden.

Das Spannungs-Rohsignal der Hysteresebremse wird über eine Polynomfunktion in ein Drehmoment umgerechnet. Der Hersteller *mobac* legt der Hysteresebremse aufgrund des Hysterese-Verhaltens jeweils eine Drehmoment-Strom-Kurve bei steigendem und fallendem Erregerstrom bei, die im Zuge der Kalibrierung gemessen wurden. Am Prüfstand der VAWT wird nur bei ansteigender Stromstärke gemessen. Weil mit der NI-USB-6009 jedoch keine Ströme gemessen werden können, ist die Verwendung eines Mess-Shunt-Widerstands notwendig. Er soll einen möglichst kleinen und konstanten Widerstand aufweisen. Ein Hochleistungswiderstand wurde mittels Vierleitertechnik am Institut für elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung vermessen, wobei 2.38Ω ermittelt wurden. Dadurch kann die Drehmoment-Strom-Kurve des Herstellers *mobac* in eine Drehmoment-Spannungs-Kurve übergeführt werden. Daraus kann in weiterer Folge ein Polynom sechsten Grades ermittelt werden, die in *LabView* zur Umrechnung des Spannungs-Rohsignals in ein Drehmoment hinterlegt wird. In Abbildung 6-15 ist diese Drehmoment-Spannungskurve für steigende Stromstärke mit der Polynomfunktion y sechsten Grades dargestellt. Da bei der Drehzahlberechnung kontinuierlich aus 500 Samples eine durchschnittliche Drehzahl ermittelt wird, ist es ausreichend ein Drehmoment aus 500 Samples zu berechnen. Dies geschieht durch eine arithmetische Mittelwertbildung von 500 Drehmoment-Messwerten.

Aus der Winkelgeschwindigkeit der Hysteresebremse und deren Drehmoment kann nach Formel (6-1) die Leistung berechnet werden.

Das Spannungs-Rohsignal des Potentiometers wird über eine Geradengleichung, die im Messprogramm hinterlegt ist, in den Phasenwinkel γ umgerechnet. Es folgen eine Tiefpassfilterung (Grenzfrequenz 5 Hz) und eine arithmetische Mittelwertbildung.

Aufgezeichnet werden zum einen sämtliche Rohsignale und zum anderen Drehzahl, Leistung und Phasenwinkel in einem getrennten File.

In Abbildung 6-16 ist die Benutzeroberfläche des Messprogramms ersichtlich. Die Aufnahme der Messwerte kann durch Drücken des OFF-Buttons aktiviert, und durch wiederholtes Drücken deaktiviert werden.

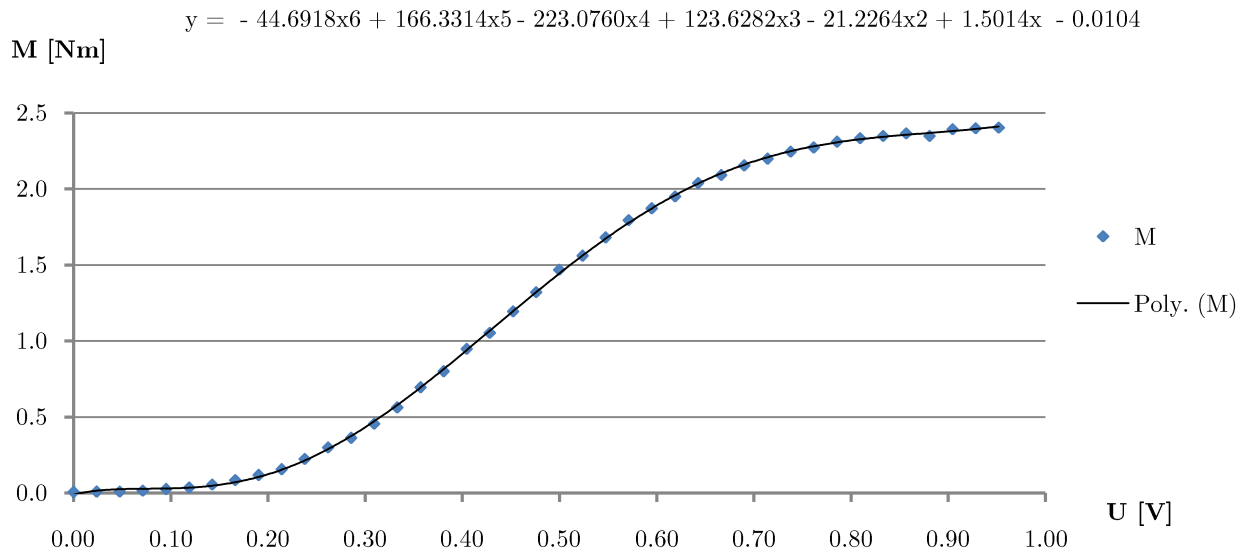


Abbildung 6-15: Drehmoment-Spannungskurve für steigende Stromstärke mit der Polynomfunktion y 6. Grades

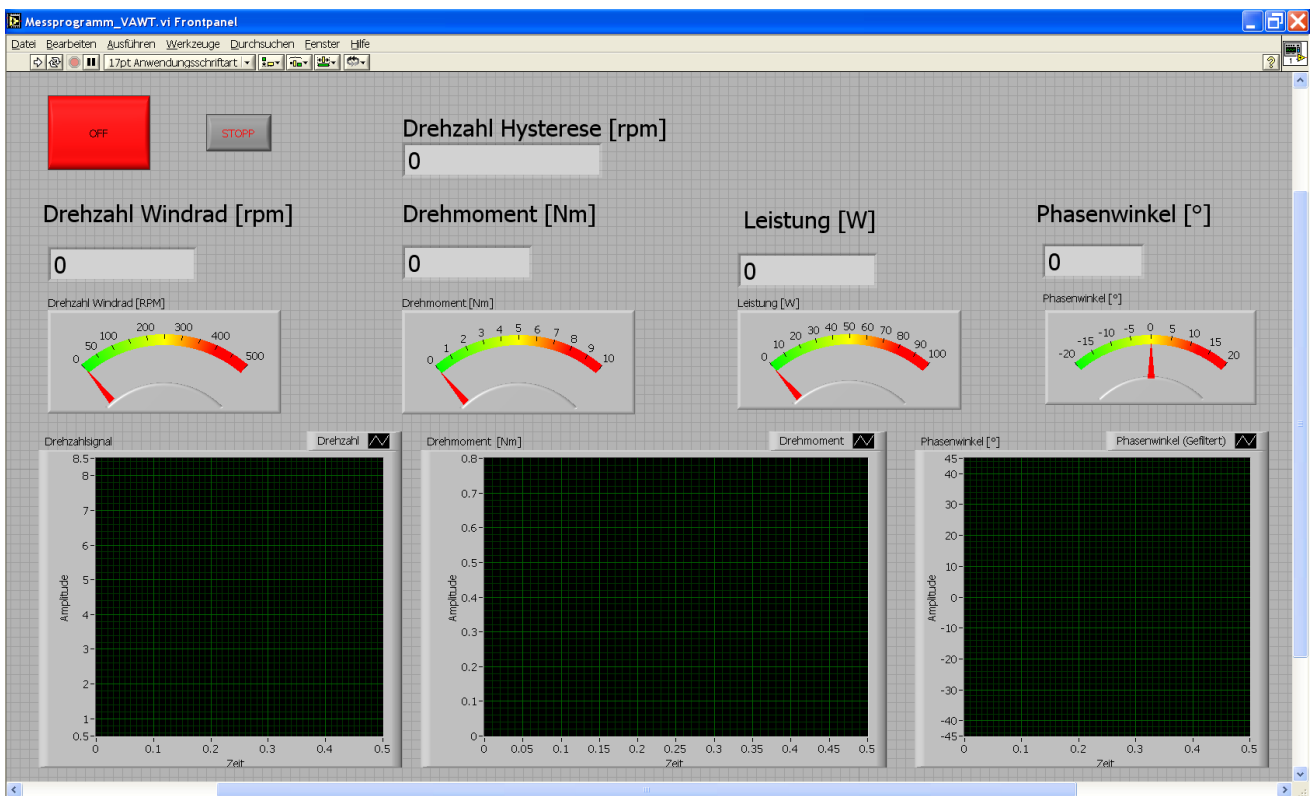


Abbildung 6-16: Benutzeroberfläche des Messprogramms in LabView

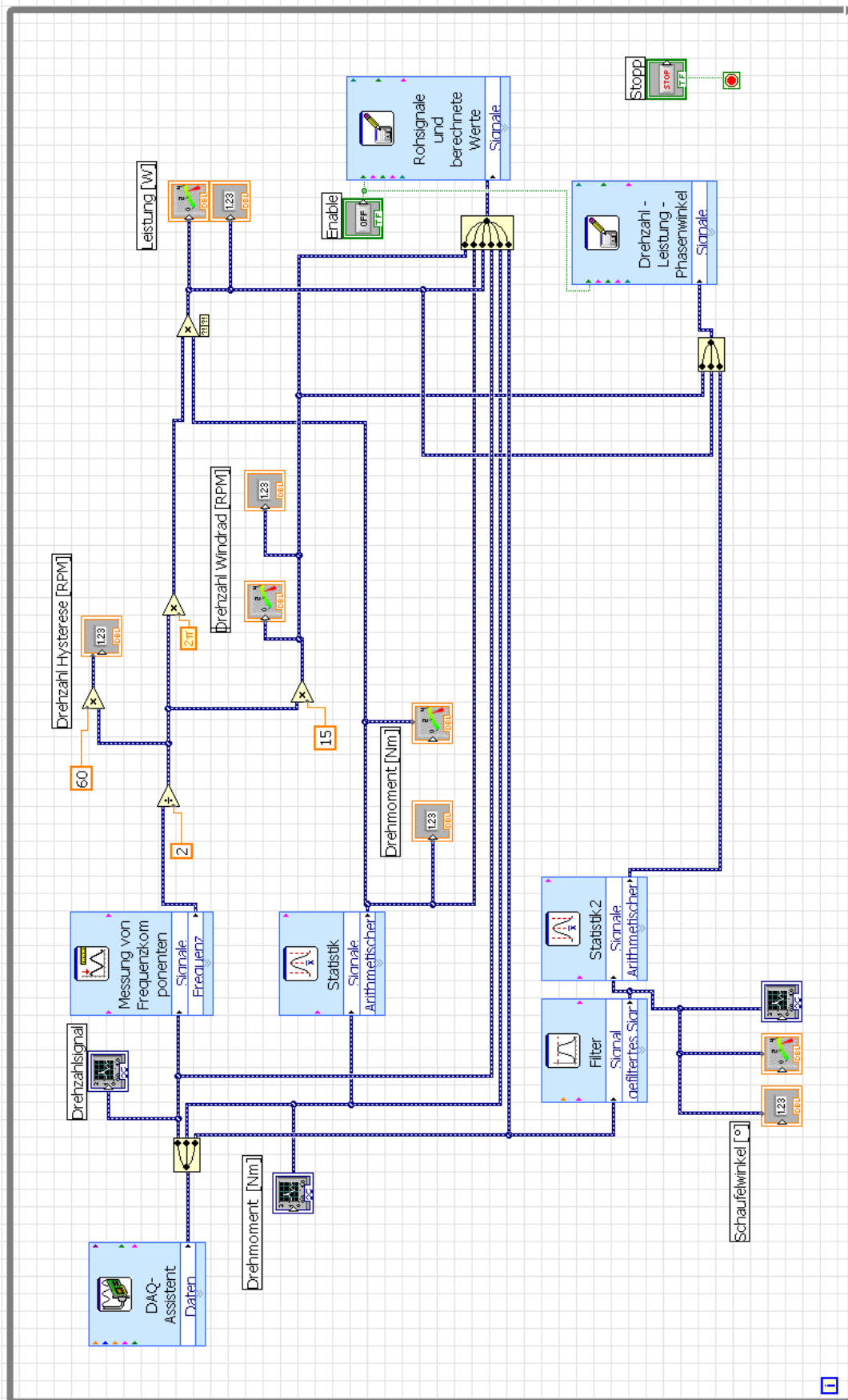


Abbildung 6-17: Blockdiagramm des Messprogramms

7 Messungen mittels De Prony'schem Prinzip

Dieses Kapitel beinhaltet die vergleichende Untersuchung eines Rotor mit vier- und eines mit drei Schaufeln mittels De Prony'schem Messprinzip, das unter 6.3.1 erläutert wurde.

Die Ausführung der VAWT mit vier Schaufeln stellt das Demonstrationsmodell von M. Brandecker und A. Gebert dar. Für die dreiblättrige Ausführung werden die Rotorstege neu gefertigt und die restlichen Komponenten des Demonstrationsmodells verwendet.

7.1 Versuchsdurchführung und Messergebnisse

Der Prüfstand wird in 6.88 m Entfernung vom Gleichrichter positioniert. Für eine bessere Stabilität werden dessen Rollen durch das Absenken von Standfüßen vom Boden gehoben. In 6.88 m Entfernung herrscht eine durchschnittliche Windgeschwindigkeit von $\bar{c} = 15.53 \text{ m/s}$. Anfangs werden die Hangwaagen tariert und anschließend der Bremsriemen gespannt. Nun kann das Gebläse in Gang gesetzt werden. Der Bremsriemen wird Schritt für Schritt gelockert, wobei jeweils die Messwerte der Drehzahl und der zwei Gewichtskräfte aufgenommen werden, sobald sich ein stationärer Zustand eingestellt hat. Aus den gemessenen Werten kann nach den unter 6.3.1 angeführten Formeln die Leistung berechnet werden. In Abbildung 7-1 ist die berechnete Leistung P über der Drehzahl n der vier- und dreischaufeligen VAWT-Ausführung gegenübergestellt.

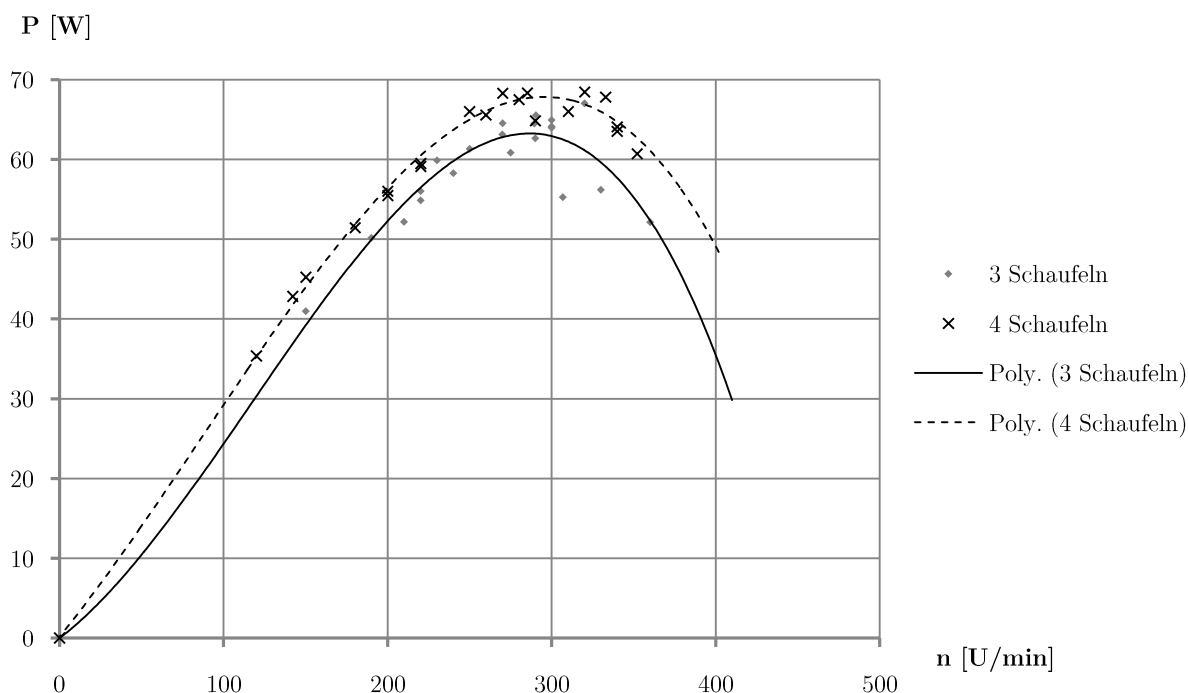


Abbildung 7-1: Leistung P über Drehzahl n ; Vier Rotorschaufeln vs. drei Rotorschaufeln an der Modell-VAWT; $c = 15.53 \text{ m/s}$; Polynome 4. Ordnung

7.2 Diskussion der Messergebnisse

Aus den Messungen, die in Abbildung 7-1 ersichtlich sind geht hervor, dass die Variante mit drei Schaufeln bei einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von $\bar{c} = 15.53 \text{ m/s}$ rund 5W weniger Leistung abgibt als die vierschaufelige. Prozentuell ist das eine Differenz von knapp 8%. Die Messwerte wurden durch eine Polynomfunktion 4. Ordnung interpoliert.

Eine Ausführung mit nur drei Schaufeln weist jedoch einen geringeren Materialaufwand und technischen Aufwand auf, weswegen eine 8% geringere Leistungsausbeute akzeptiert werden kann. Zudem könnte sich eine größere Versperrung des Strömungsraumes durch eine vierte Schaufel bei den Versuchen mit Leitschaufeln negativ auf das Leistungsoutput auswirken. Aus diesen Gründen wird in den nachkommenden Messungen, wie im Patent [7], ausschließlich die dreischaufelige Ausführung untersucht.

Die Ermittlung der Leistung nach dem De Prony'schem Prinzip ist einfach und kostengünstig, jedoch nicht sehr genau. Am Prüfstand der VAWT wurden stets zuerst die Drehzahl und anschließend die Gewichtskräfte gemessen. Aus dieser zeitlichen Versetzung der Messwertaufnahme folgt wahrscheinlich die größte Messunsicherheit, da sich ein stationärer Zustand an der VAWT nicht einstellte. Dies ist einerseits auf den böigen Luftstrom des Gebläses und andererseits auf die sich ständig verändernden Reibeffekte zwischen dem Riemen und der Riemenscheibe zurückzuführen. Besonders bei höheren Drehzahlen gestaltete sich die Messung schwierig. Der zwischen dreischaufeliger und vierschaufeliger Variante ermittelten Leistungsdifferenz von 8 % darf daher aufgrund der Messunsicherheiten nicht allzu viel Gewicht beigemessen werden. Für eine Leistungsabschätzung zur Auslegung eines Leistungsmesssystems ist diese Messmethode jedoch genau genug.

8 Messungen mittels Hysteresebremse

In diesem Kapitel wird der Unterschied in der Leistungsausbeute zwischen der VAWT ohne Leitschaufeln und jener mit Leitschaufeln untersucht. Die Leistungsmessung erfolgt mittels Hysteresebremse und mit dem unter Kapitel 6.3.2 beschriebenen Datenlogsystem.

Vorab soll die Vorgehensweise erläutert werden, nach der sämtliche Versuche dieses Kapitels durchgeführt wurden. Es folgen die Referenzmessung mit den Ergebnissen und die Diskussion derselben. Schließlich werden die Messergebnisse der Ausgangskonfiguration und der effektivsten Konfiguration der Leitschaufeln dargestellt und diskutiert.

8.1 Versuchsdurchführung

Für einen gelingenden Versuch ist eine stabile Wetterlage Voraussetzung. Um die Vergleichbarkeit der Versuche untereinander zu ermöglichen ist es wichtig, den Versuch an den verschiedenen Messtagen gleich aufzubauen. Der Prüfstand wird in 6.88 m Entfernung vom Gleichrichter mittels der Standfüße stabil positioniert. Anschließend wird die zu prüfende Leitschaufelkonfiguration eingestellt. Die Leitschaufeln müssen für eine Vergleichbarkeit der Versuche so positioniert werden, dass die Eintrittsöffnung eine Breite von 1 m aufweist und somit die Eintrittsfläche konstant bleibt. Des Weiteren werden die Leitschaufeln in einem Abstand von 0.01 m zu den vorbeilaufenden Rotorscheaufeln arretiert. Sobald auch die Messeinrichtung aktiviert wurde kann das Gebläse in Gang gesetzt werden. Es gilt nun im Leerlauf der Modellturbine den optimalsten Phasenwinkel γ zu ermitteln, bei dem die Drehzahl des Rotors maximal wird. Mit dem ermittelten optimalen Phasenwinkel wird anschließend die Leistungskurve gemessen. Dafür werden verschiedene Drehmomente eingestellt und zusammen mit der sich einstellenden Drehzahl aufgezeichnet. Aus dem jeweiligen Drehmoment und der Drehzahl wird im Messprogramm die Leistung berechnet. Bei jedem eingestellten Drehmoment wird die Aufzeichnung der Messwerte über eine Dauer von 20 s aktiviert. Wichtig ist beim Einstellen eines neuen Drehmoments die langsame Steigerung der Spannung, die an der Hysteresebremse anliegt. Ansonsten wäre eine Verfälschung der Messergebnisse die Folge. Ist das Drehmoment so stark, dass es einen Stillstand der Modell-VAWT zur Folge hat, wird die Messung beendet. Die Spannung an der Hysteresebremse wird langsam bis zum vollständigen Leerlauf der Turbine auf 0 V herabgesetzt, und das Gebläse kann ausgeschaltet werden. Nun kann aus den aufgezeichneten Werten eine Leistungs-Drehzahlkurve in Excel mittels eines Polynoms vierten Grades ermittelt werden.

8.2 Kurzzeichen der Leitschaufelkonfigurationen

Aus Gründen der Einfachheit wird jede Leitschaufelkonfiguration mit einer Kurzbezeichnung versehen. Dabei erhalten die Schaufeln die Abkürzung L für die linke Leitschaufel, R für die rechte Leitschaufel und M für die mittlere. Zusätzlich zu den Abkürzungen L, R, M werden jeweils Zahlen für die unterschiedlichen Positionen der Schaufeln vergeben. Die folgende Abbildung 8-1 stellt die verschiedenen Leitschaufelstellungen mit den jeweiligen Kurzzeichen dar.

Zusätzlich sind die unterschiedlichen Phasenwinkel γ der Rotorscheaufeln von -20° , 0° , 20° und 40° eingezeichnet.

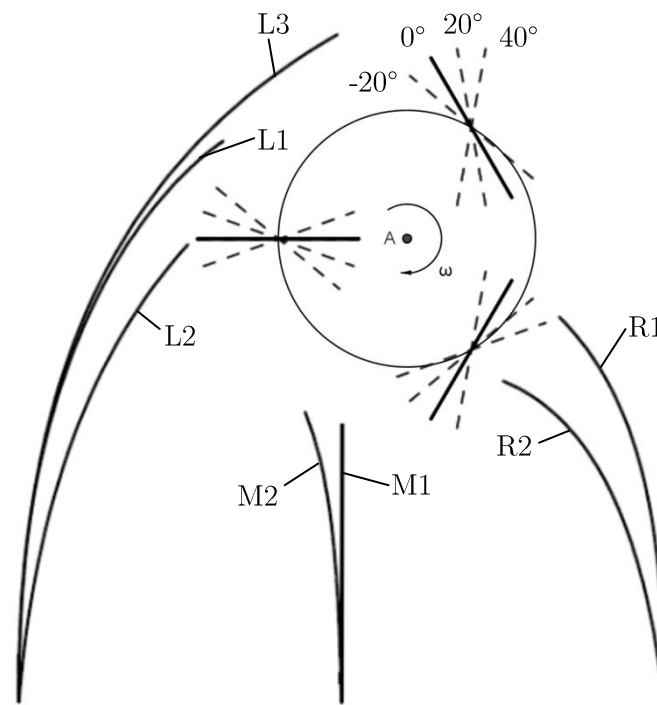


Abbildung 8-1: Kurzzeichen der Leitschaufelkonfigurationen

8.3 Referenzmessung

Um die unterschiedlichen Leitschaufelkonfigurationen qualitativ vergleichen zu können, muss vorab eine Leistungskurve an der VAWT ohne Einbindung der Leitschaufeln gemessen werden. Diese dient den darauffolgenden Messungen mit Leitschaufeln als Referenzmessung.

8.3.1 Messergebnis

In Abbildung 8-2 sind die Messpunkte der Referenzmessung als Leistung P über der Drehzahl n dargestellt. In einer Trendlinie vierten Grades wurden sie interpoliert. Darunter ist in Abbildung 8-3 das Drehmoment M über der Drehzahl n aufgetragen.

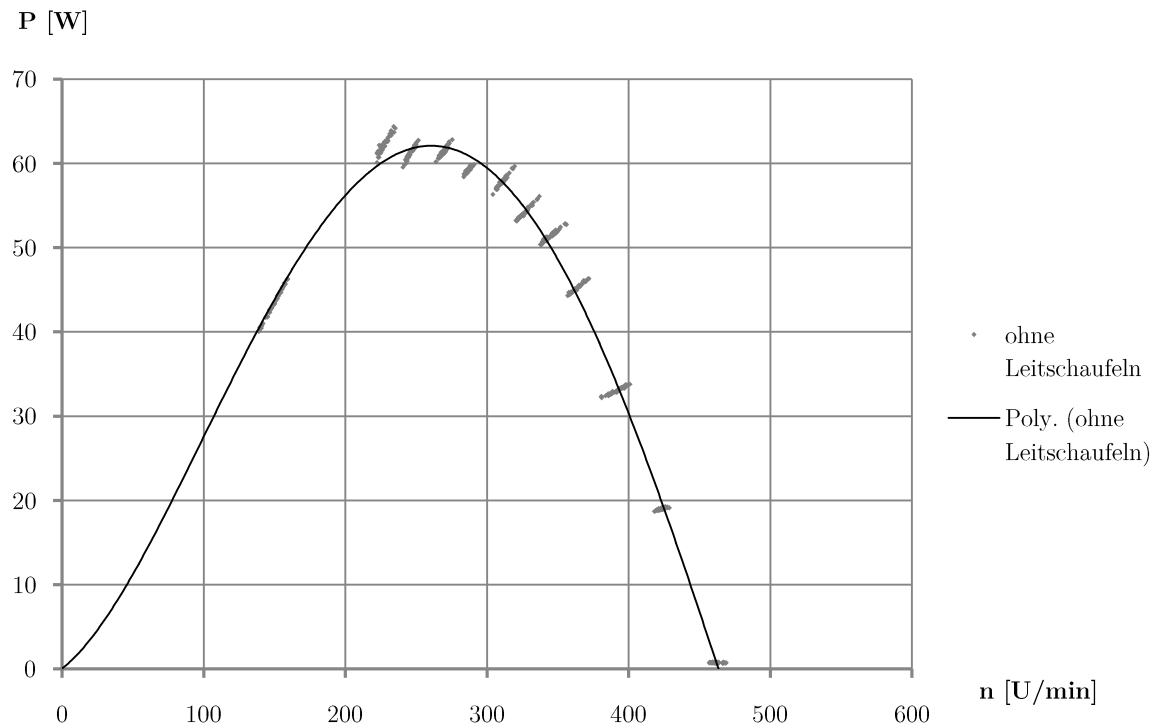


Abbildung 8-2: Leistung P über Drehzahl n der Modell-VAWT ohne Leitschaufeln; $c = 15.53$ m/s; Referenzkurve für folgende Versuche; Trendlinie: Polynom 4. Grades

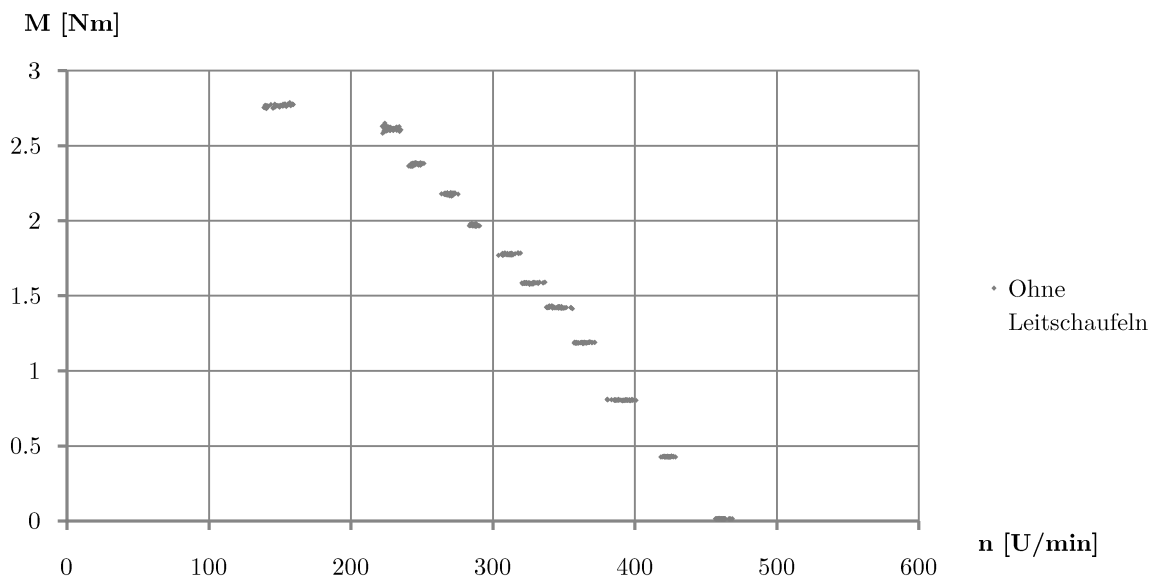


Abbildung 8-3: Drehmoment M über Drehzahl n der Modell-VAWT ohne Leitschaufeln; $c = 15.53$ m/s

Die P-n-Kurve kann durch den Leistungsbeiwert c_p (Formel(4-18)) und die Schnelllaufzahl λ (Formel (4-21)) in eine dimensionslose c_p - λ -Kurve übergeführt werden:

$$c_p = \frac{P}{P_{wind}} = \frac{P}{\frac{1}{2} f \rho c^3}$$

$$\lambda = \frac{u}{c} = \frac{\omega r}{c} = \frac{2\pi n}{c \cdot 60}$$

Die Bezugsfläche f berechnet sich aus dem mittleren Rotordurchmesser zuzüglich einer halben Schaufelbreite multipliziert mit der Schaufelhöhe der Modell-VAWT:

$$f = (0.4 \text{ m} + 0.125 \text{ m}) \cdot 0.37 \text{ m} = 0.194 \text{ m}^2$$

Bei Standardbedingungen (20°C und 1 bar) beträgt die Dichte von Luft $\rho = 1.184 \text{ kg/m}^3$. Für c wird die mittlere gemessene Windgeschwindigkeit von $c = 15.53 \text{ m/s}$ verwendet. Die dimensionslose c_p - λ -Kurve ist in Abbildung 8-4 dargestellt.

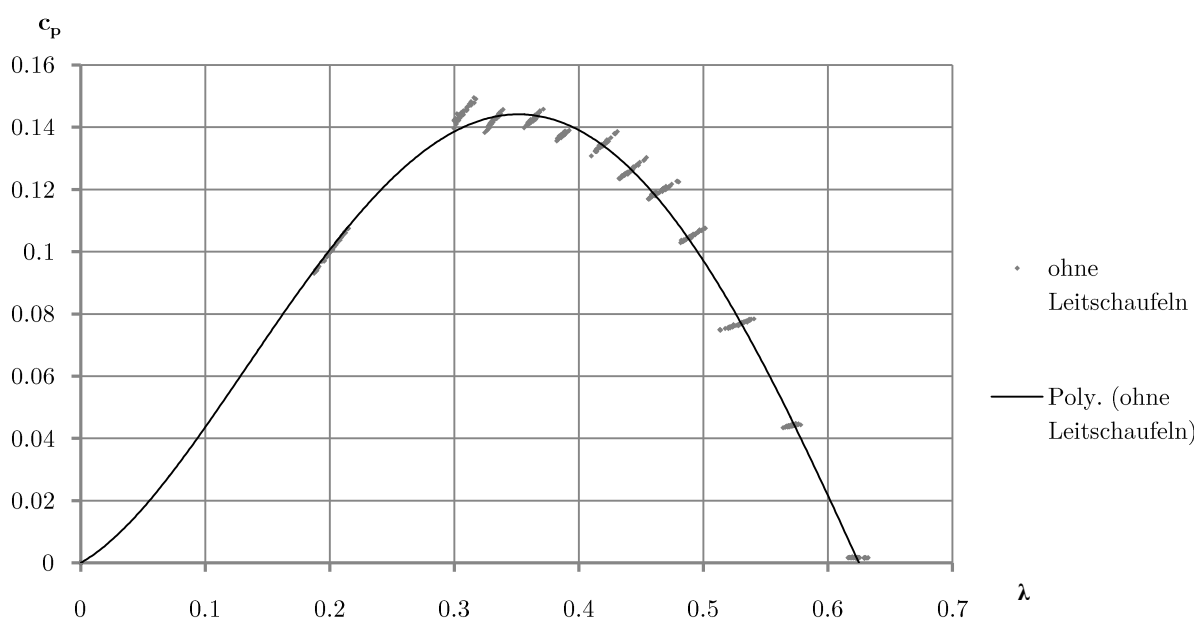


Abbildung 8-4: Leistungsbeiwert c_p über Schnellläufigkeit λ der Modell-VAWT ohne Leitschaufeln; $c = 15.53 \text{ m/s}$; Trendlinie: Polynom 4. Grades

8.3.2 Diskussion

In der P-n-Kurve in Abbildung 8-2 sind die unterschiedlichen Betriebspunkte bei verschiedenen Drehmomenten ersichtlich. Die Messpunkte, die bei einem eingestellten Drehmoment über eine Dauer von 20 s aufgezeichnet wurden, häufen sich stets entlang einer Geraden. Dies kann durch den linearen Zusammenhang zwischen dem Drehmoment und der Winkelgeschwindigkeit

$P = M \omega$ erklärt werden. Demzufolge müssen die Messpunkte bei konstant eingestelltem Moment und variierender Drehzahl, die durch variierende Windverhältnisse hervorgerufen wird, auf einer Gerade liegen.

Unter 200 U/min gestaltete sich die Aufnahme von Messpunkten schwierig, da ein geringes Anheben des Drehmoments schnell den Rotor zum Stillstand brachte (Abbildung 8-3).

Bei einer Windgeschwindigkeit von $c = 15.53 \text{ m/s}$ liegt der optimale Betriebspunkt der Modell-VAWT ohne Leitschaufeln bei einer Drehzahl von 260 U/min, wobei die Leistungsausbeute 62 W beträgt.

Bei den Ergebnissen der CFD-Simulation und der analytischen Berechnung an der VAWT betrug die optimale Schnelllaufzahl $\lambda_{opt} = 0.5$. Abbildung 8-4 zeigt die dimensionslose c_p - λ -Kurve der Modellturbine ohne Leitschaufeln. Die optimale Schnelllaufzahl beträgt dabei $\lambda_{opt} = 0.35$. Dies ist auf die Reibung in den Lagern, den Klauenkupplungen, dem Zahnriemen und dem Planetengetriebe, und nicht zuletzt auf den schlechten aerodynamischen Eigenschaften einer ebenen Platte zurückzuführen. Dementsprechend gering ist der Leistungsbeiwert c_p der Modellturbine, der bei 14.5% liegt. Dies ist jedoch für den Vergleich des Leistungsoutputs zwischen dem VAWT-Modell mit und jenem ohne Leitschaufeln nicht von Belang. Laut den CFD-Ergebnissen, die in dem Paper von H. Jericha et al. [6] veröffentlicht wurden, beträgt der Leistungsbeiwert der alternativen VAWT $c_p = 0.36$.

8.3.3 Repräsentative Polynomfunktion

In Abbildung 8-5 sind die aufgezeichneten Messpunkte des VAWT-Modells ohne Leitschaufeln dargestellt. An jedem Betriebspunkt wurden innerhalb 20 s etwa 40 Messwerte aufgezeichnet, wobei in jedem Betriebspunkt die Standardabweichung der Drehzahl und der Leistung als Balken eingetragen sind. Die Berechnung der Standardabweichungen für den Betriebspunkt bei 270 U/min ist exemplarisch im Anhang angeführt. Die Streuung der Messwerte kommt hauptsächlich durch die Drehzahlschwankungen zustande. Des Weiteren ist in der Abbildung eine Trendlinie ersichtlich, die durch ein Polynom 4. Ordnung zustande kommt. Betrachtet man Abbildung 8-6, sind die aufgespannten Flächen durch die Standardabweichung der Leistung und der Drehzahl des jeweiligen Betriebspunktes detaillierter dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass diese aufgespannten Flächen, bis auf die Ausreißer bei den Drehzahlen 225 U/min und 285 U/min, von der Trendlinie geschnitten werden. Somit werden die Messwerte genügend genau durch eine Polynomfunktion 4. Ordnung repräsentiert und diese somit für die nachfolgenden Versuche zur Beurteilung des Leistungsoutputs herangezogen.

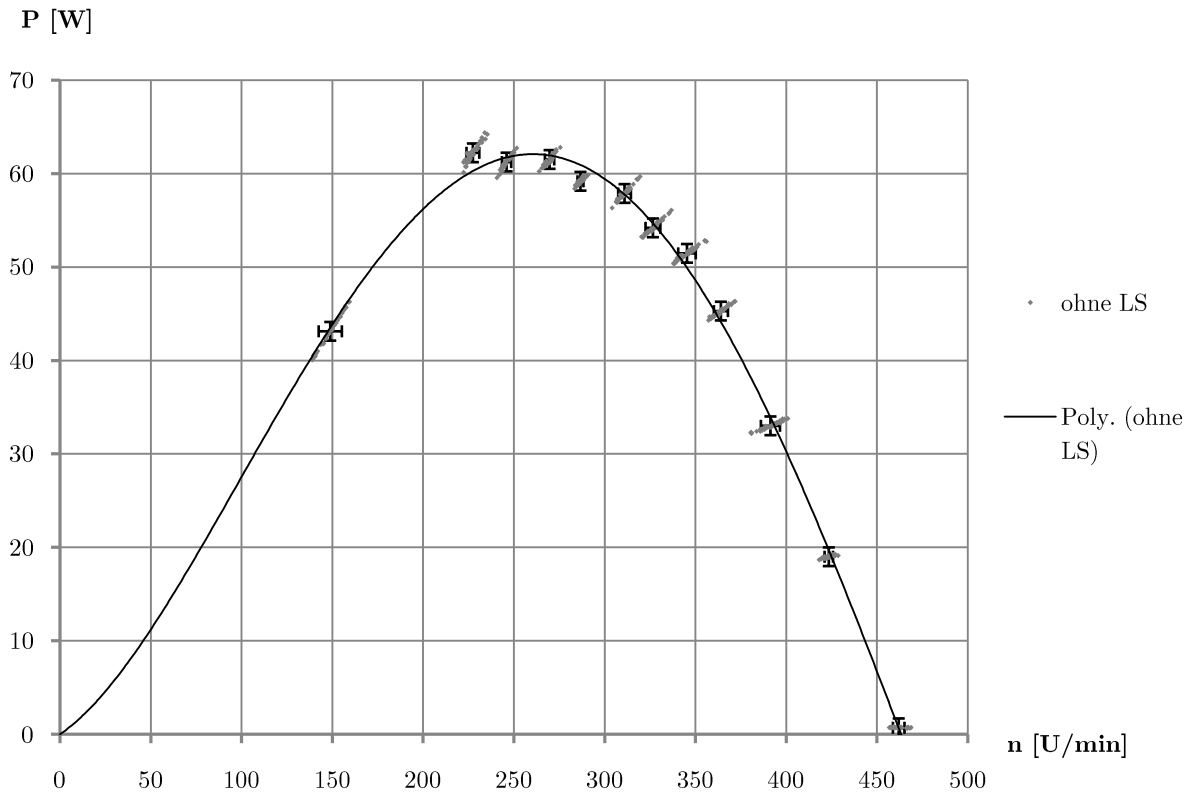


Abbildung 8-5: Standardabweichungen der Drehzahl n und der Leistung P ; Referenzmessung ohne Leitschaufeln (LS)

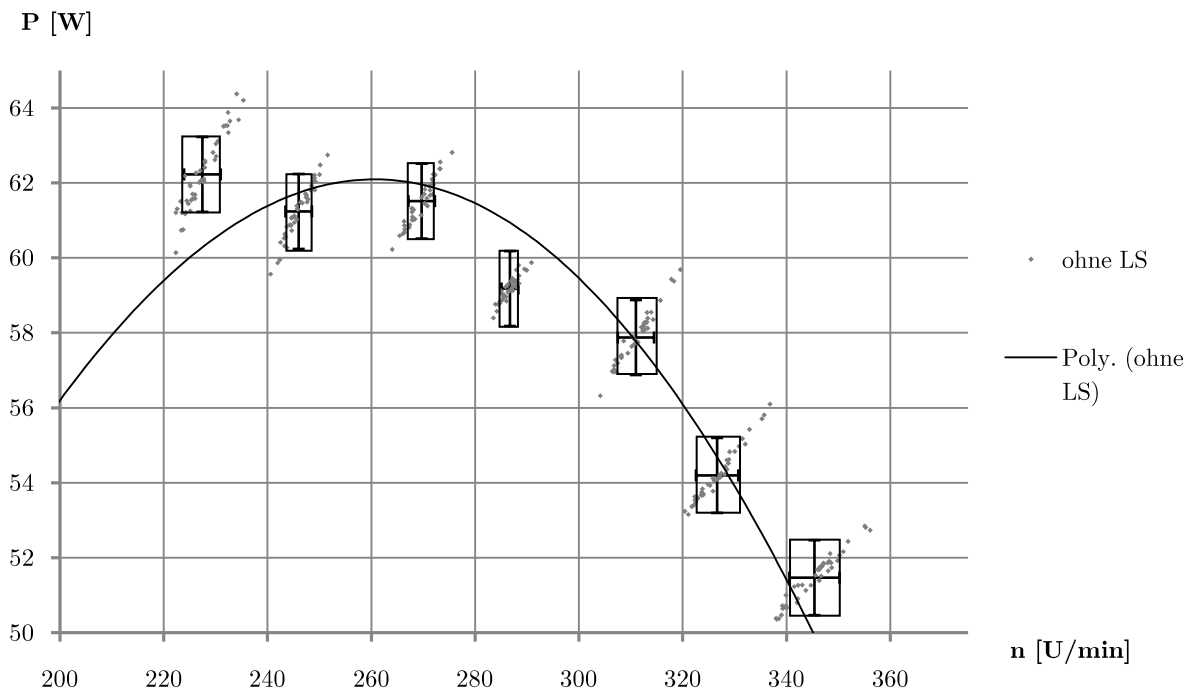


Abbildung 8-6: Detail der Standardabweichungen der Drehzahl n und der Leistung P ; Referenzmessung ohne Leitschaufeln (LS)

8.3.4 Messunsicherheit

In der vorliegenden Arbeit werden Aussagen bezüglich des Leistungsoutputs durch den Vergleich verschiedener Konfiguration der VAWT getroffen. Die verbleibende Messunsicherheit aus der Kalibrierung des Herstellers wird demzufolge nicht in die Messunsicherheit miteinbezogen, da bei einem Back-to-Back-Vergleich verschiedener Konfigurationen dieser nicht ins Gewicht fällt.

Die Messkarte USB-6009 von *National Instruments* die für die Messungen in dieser Diplomarbeit verwendet wurde, weist laut Hersteller im Messbereich von ± 1 V eine absolute Genauigkeit von 1.57 mV auf.

Die Wiederholgenauigkeit des eingestellten Drehmoments an der Hysteresebremse liegt laut dem Hersteller *mobac* über den gesamten Messbereich bei kleiner 1 %.

Die abgegebene Leistung an der drehenden Welle der VAWT errechnet sich, wie bereits besprochen über den Zusammenhang $P = M \cdot \omega$. Dabei wird das Drehmoment aus der Spannung, die am Shunt-Widerstand anliegt, über eine Polynomfunktion sechsten Grades berechnet. Bei der gemessenen Spannung U wird die Unsicherheit der Messkarte $\Delta U = 1.57$ mV miteinbezogen. Somit ergeben sich mit der Polynomfunktion eine obere und eine untere Fehlergrenze des Drehmoments:

$$M_{o/u} = -44.69(U \pm \Delta U)^6 + 166.33(U \pm \Delta U)^5 - 223.07(U \pm \Delta U)^4 + 123.62(U \pm \Delta U)^3 - 21.22(U \pm \Delta U)^2 + 1.50(U \pm \Delta U) - 0.010 \quad (8-1)$$

Hinzu kommt noch die Unsicherheit bezüglich der Drehmoment-Reproduzierbarkeit an der Hysteresebremse von kleiner 1 %:

$$M_{o/u,gesamt} = M_{o/u} \pm \left(\frac{M_{o/u}}{100} \right) \quad (8-2)$$

Daraus kann nun eine obere und untere Fehlergrenze für die Leistung über den Zusammenhang $P_{o/u,gesamt} = M_{o/u,gesamt} \cdot \frac{n \cdot \pi}{30}$ ermittelt werden.

Nach diesem Schema wurde die Berechnung der oberen und unteren Grenze der Leistungsunsicherheit an den Messergebnissen der VAWT ohne Leitschaufeln durchgeführt. Dabei sind die Mittelwerte der Drehzahl und der Leistung des jeweiligen Betriebspunktes als Ausgangspunkt verwendet worden. In Abbildung 8-7 ist der Unsicherheitsbereich als Balken am jeweiligen Betriebspunkt dargestellt. Im Mittel beträgt die Leistungsunsicherheit ± 1.18 W. Zwei zusätzliche Polynomfunktionen sind in der Abbildung ersichtlich, die diese mittlere Leistungsunsicherheit veranschaulichen. Für die folgenden Versuche muss also zwischen zwei unterschiedlichen Konfigurationen mindestens ein Leistungsunterschied von 2.36 W vorhanden sein, um eine verlässliche Aussage bezüglich der Leistungsdifferenz treffen zu können. Eine Tabelle mit den berechneten Werten ist im Anhang angeführt.

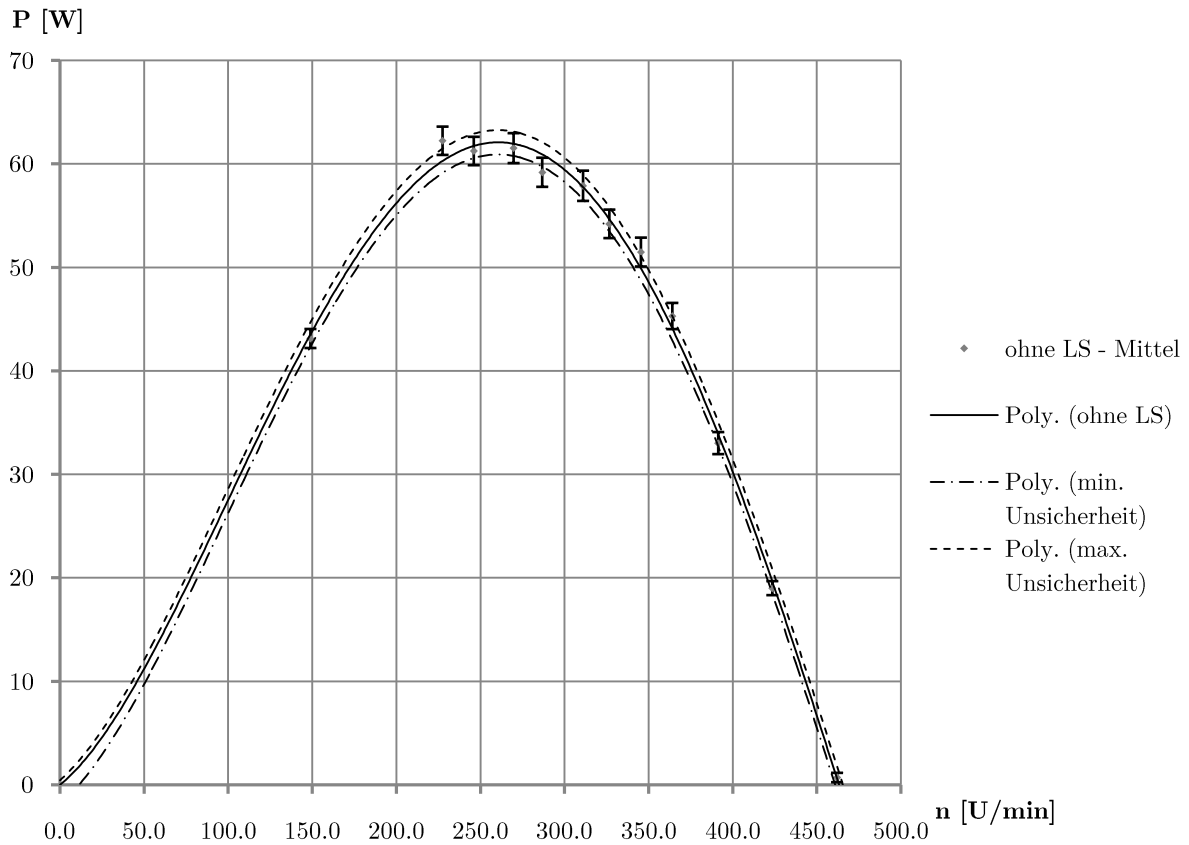


Abbildung 8-7: Zufällige Messfehler im jeweiligen Betriebspunkt mit gemittelter oberer und unterer Messunsicherheitsgrenze; Referenzmessung ohne Leitschaufeln (LS)

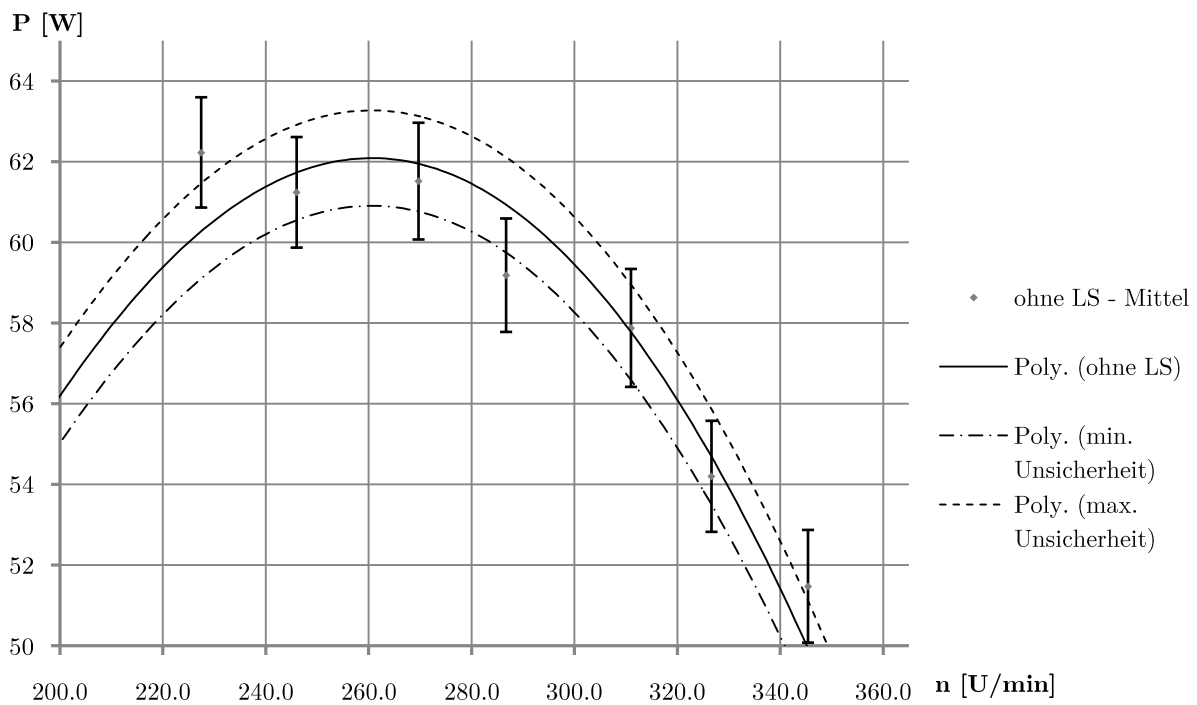


Abbildung 8-8: Detail der zufälligen Messfehler im jeweiligen Betriebspunkt mit gemittelter oberer und unterer Messunsicherheitsgrenze; Referenzmessung ohne Leitschaufeln (LS)

8.4 Ausgangskonfiguration

Die unter Kapitel 5.2 angestellten analytischen Betrachtungen lieferten als Ergebnis eine Leitschaufelkonfiguration, die für die Messungen an der VAWT mit Leitschaufeln als Ausgangskonfiguration herangezogen wird. Bei den analytischen Betrachtungen betrug die optimale Schnellläufigkeit, ebenso wie bei der CFD-Simulation $\lambda_{opt} = 0.5$. Bei der Referenzmessung an dem VAWT-Modell ohne Leitschaufeln betrug sie jedoch nur $\lambda_{opt} = 0.35$. Um dabei dennoch den mittleren Anstellwinkel $\alpha_m = 25^\circ$ entlang des Umfangs zu erhalten, muss ein Phasenwinkel $\gamma = -20^\circ$ eingestellt werden. Diese Strömungssituation ist in der folgenden Abbildung 8-9 dargestellt.

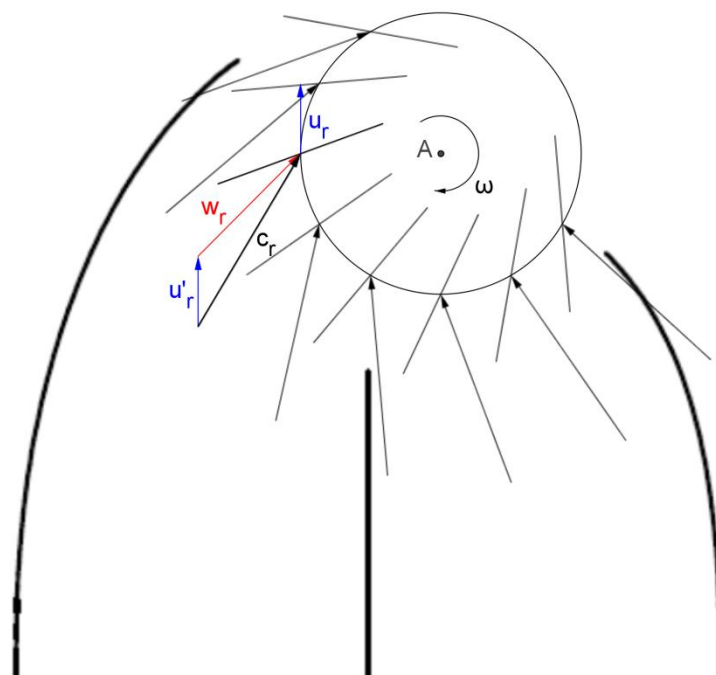


Abbildung 8-9: Ausgangskonfiguration der Leitschaufeln; $\lambda = 0.35$; $\gamma = -20$

8.4.1 Messergebnisse

In der folgenden Abbildung 8-10 ist die Ausgangskonfiguration L1-R1-M1 mit einem Phasenwinkel von $\gamma = 20^\circ$ dargestellt, welcher sich während dem Versuch als der optimale bei dieser Konfiguration herausstellte. Darunter sind in Abbildung 8-11 die Messergebnisse dieser Konfiguration dargestellt.

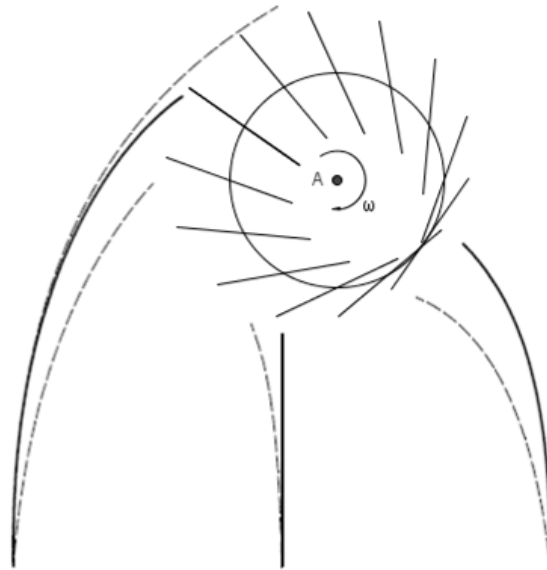


Abbildung 8-10: Ausgangskonfiguration L1-R1-M1; $\gamma = 20^\circ$ (durchgezogene Linie)

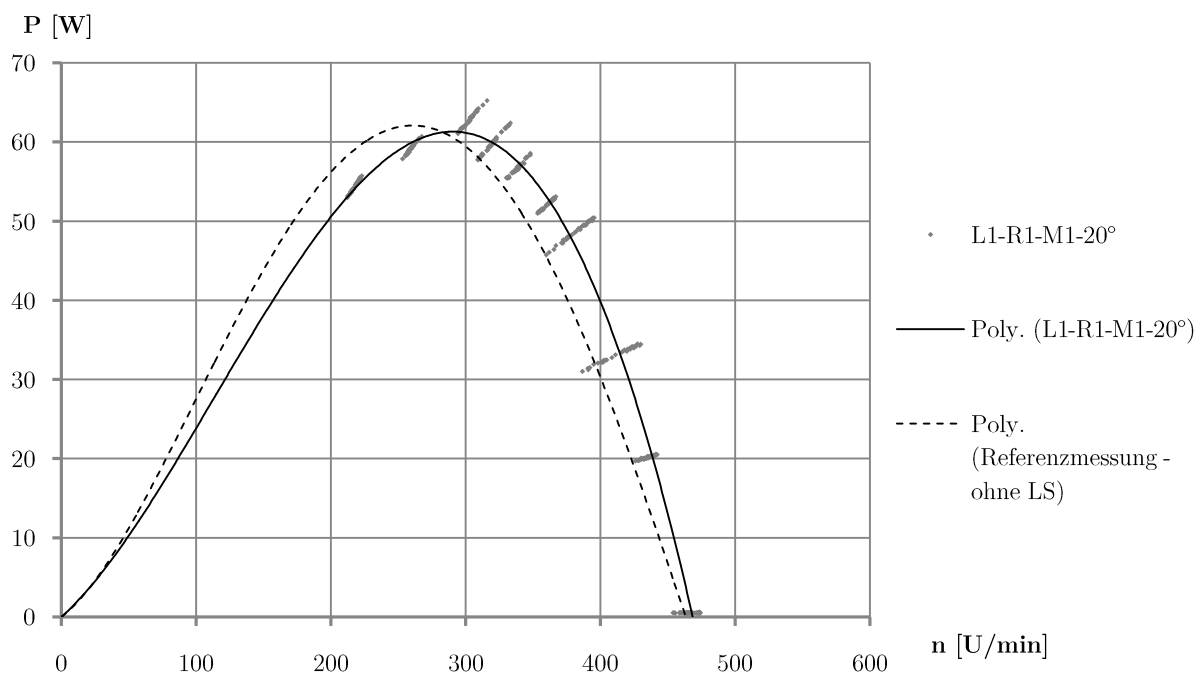


Abbildung 8-11: Leistung P über Drehzahl n der Ausgangskonfiguration L1-R1-M1 mit Referenzmessung; $\gamma = 20^\circ$; Trendlinien: Polynom 4. Ordnung

8.4.2 Diskussion

Durch das Einstellen unterschiedlicher Phasenwinkel konnte der optimale Phasenwinkel ermittelt werden, bei dem das Leistungsoutput ein Maximum erreichte. Das Optimum der Leistungsausbeute bei der Ausgangskonfiguration L1-R1-M1 lag nicht wie in Abbildung 8-9

ermittelt bei einem Phasenwinkel von $\gamma = -20^\circ$ sondern bei $\gamma = 20^\circ$. Im Anhang befindet sich eine weitere Leistungskurve, die an der Konfiguration L1-R1-M1 und bei einem Phasenwinkel von $\gamma = 40^\circ$ gemessen wurde. Daraus ist ersichtlich, dass für diesen Fall die maximale Leistung nur 52 W beträgt.

In Abbildung 8-12 ist die Strömungssituation bei einem Phasenwinkel von $\gamma = 20^\circ$ anhand der Relativgeschwindigkeiten entlang der Umdrehung vereinfacht dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Relativanströmung w_r einen Anstellwinkel $\alpha \approx 60^\circ$ zur Schaufel aufweist. Es kann somit darauf geschlossen werden, dass mit dieser Leitschaufelkonfiguration das Drehmoment hauptsächlich nach dem Luftwiderstandsprinzip entsteht, und nicht wie angenommen nach dem Auftriebsprinzip. Die Leistungsausbeute ist trotz der größeren Eintrittsfläche kaum gestiegen.

Ein weiteres Problem ist vermutlich auch der Luftaustritt aus der Turbine. Ohne Leitschaufeln ändert sich die Richtung der Strömung zwischen Aus- und Eintritt der Turbine nicht (Abbildung 2-9), wohingegen Leitschaufeln zu einer Konzentration der Strömung in der Turbine führen, und somit die Abströmung behindern dürften.

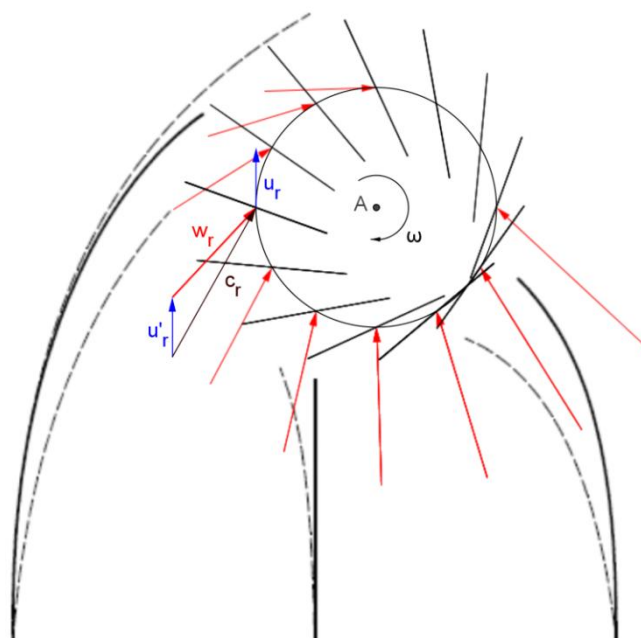


Abbildung 8-12: Strömungssituation abgeleitet von den Messergebnissen an der Konfiguration L1-R1-M1-20°; Relativgeschwindigkeiten entlang des Umfangs; $\lambda = 0.35$

8.5 Optimale Konfiguration

8.5.1 Messergebnisse

In Abbildung 8-13 ist die optimale Konfiguration L2-R1-M1 der Leitschaufeln mit einem Phasenwinkel $\gamma = 20^\circ$ dargestellt. Darunter sind in Abbildung 8-14 die Messergebnisse bei dieser Konfiguration dargestellt.

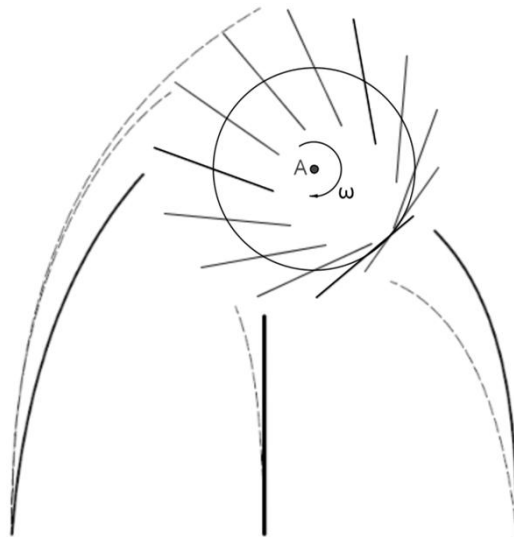


Abbildung 8-13: Optimale Konfiguration L2-R1-M1-20°

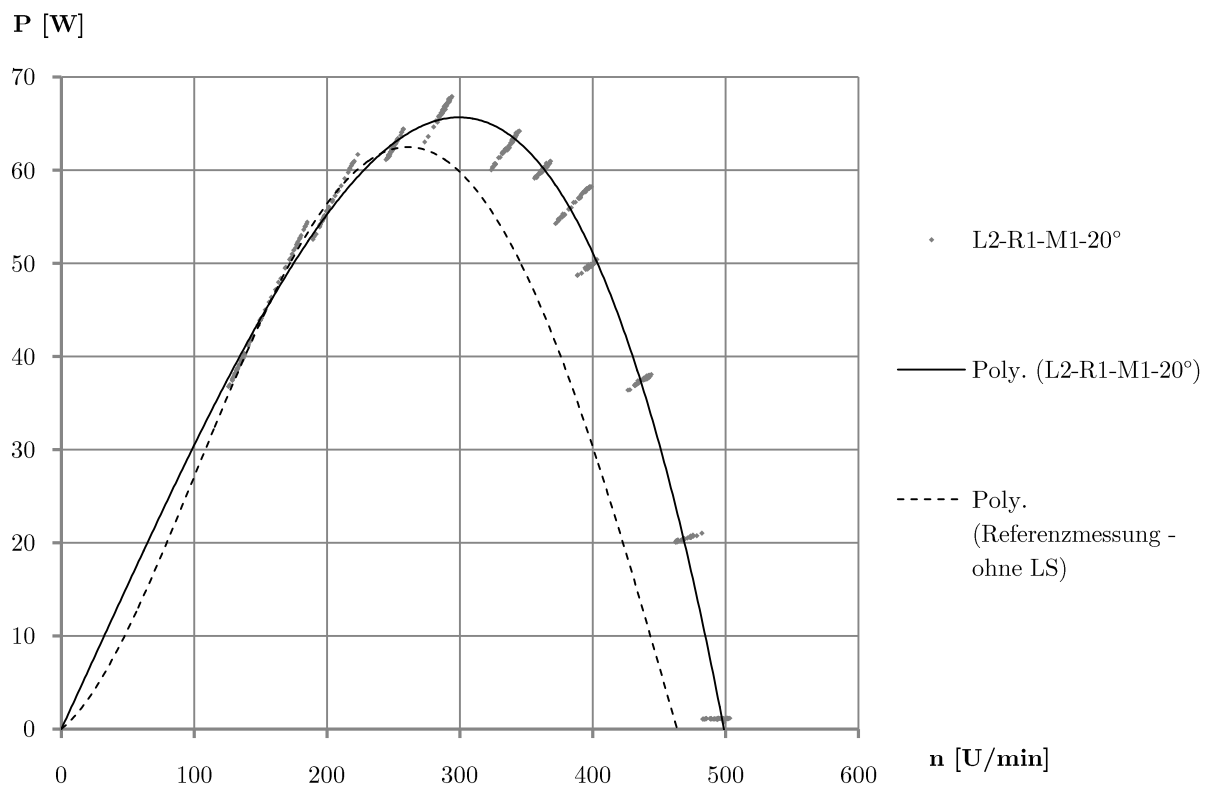


Abbildung 8-14: Leistung P über Drehzahl n der optimalen Konfiguration L2-R1-M1 mit Referenzmessung; $\gamma = 20^\circ$; Trendlinie: Polynom 4. Ordnung

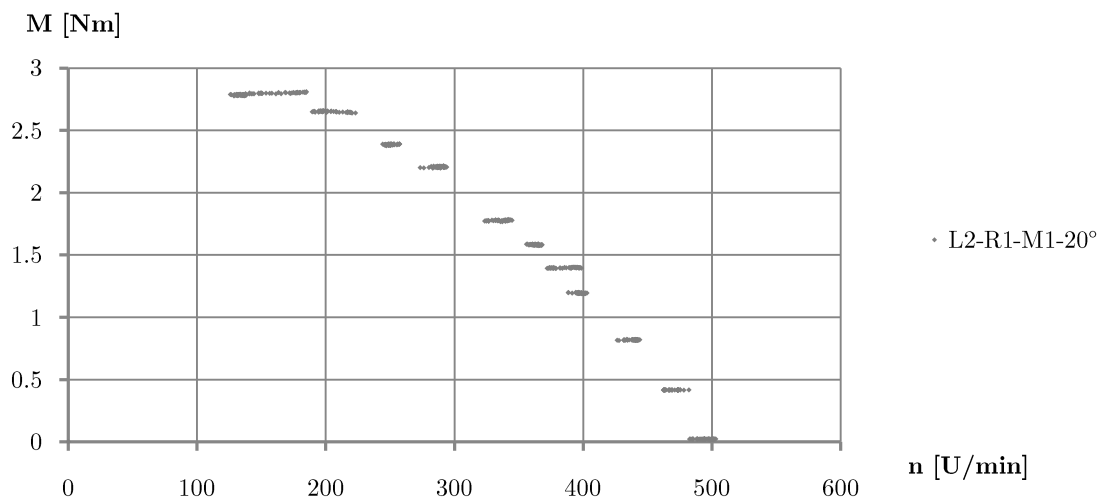


Abbildung 8-15: Drehmoment M über Drehzahl n mit der Konfiguration L2-R1-M1 $\gamma = 20^\circ$;
 $c = 15.53 \text{ m/s}$

8.5.2 Diskussion

Insgesamt wurden an sieben verschiedenen Leitschaufelstellungen die Leistungskurven mit dem jeweils optimalen Phasenwinkel γ gemessen. Die Konfiguration L2-R1-M1 mit einem Phasenwinkel $\gamma = 20^\circ$ erbrachte die maximale Leistung von knapp 66 W bei einer Drehzahl von 300 U/min (Abbildung 8-14). Dies stellt eine Leistungssteigerung von 6% gegenüber dem VAWT-Modell ohne Leitschaufeln dar. Das Maximum der Leistung verschiebt sich gegenüber der Referenzmessung ohne Leitschaufeln zu einer höheren Drehzahl nach rechts. Auffällig ist die Anhäufung der Messpunkte bei einer Drehzahl von 400 U/min, die sich unterhalb der Trendlinie befindet. Betrachtet man Abbildung 8-15, in der das Drehmoment M über der Drehzahl n aufgetragen ist, kann am selben Betriebspunkt ein Moment von 1.2 Nm abgelesen werden. Der nächste Betriebspunkt weist ein Moment von 1.4 Nm auf, die mittlere Drehzahl ist jedoch annähernd gleich wie beim vorherigen Betriebspunkt. Dies bedeutet, dass das gemessene Drehmoment von 1.2 Nm kleiner als das tatsächlich anliegende Moment ist. Dies ist auf ein zu schnelles anfahren des Betriebspunktes durch zu schnelles steigern der Magnetisierungsspannung an der Hysteresebremse zurückzuführen. Es ist deshalb äußerst wichtig, die Spannung an der Bremse langsam zu steigern.

Bei Betrachtung der Abbildung 8-3, in der das Drehmoment M über der Drehzahl n des VAWT-Modells ohne Leitschaufeln aufgetragen ist, wird ersichtlich, dass im Punkt der maximalen Leistung bei einer Drehzahl von 270 U/min ein Drehmoment von 2.2 Nm wirkt. Im Vergleich dazu ist in Abbildung 8-15 das Drehmoment M über der Drehzahl n der optimalen Konfiguration L2-R1-M1-20° dargestellt. Am Punkt der maximalen Leistung bei einer Drehzahl von 300 U/min, beträgt das Moment ebenfalls 2.2 Nm. Die höhere Leistungsausbeute bei der Ausführung mit Leitschaufeln ist also nur auf die dabei höhere Drehzahl zurückzuführen.

Des Weiteren ist zu bemerken, dass bei einigen der anderen Konfigurationen ähnlich hohe Leistungen gemessen wurden und somit eine eindeutige Bestimmung der optimalen

Konfiguration nur bedingt möglich ist. Die ergänzenden Messergebnisse, die an verschiedenen Konfigurationen gemessen wurden sind im Anhang angeführt.

9 Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick

Im theoretischen Teil der vorliegenden Arbeit ist gezeigt worden, warum ein Windenergiekonverter nur maximal 59% der im Wind enthaltenen Energie in mechanische Energie umwandeln kann. Des Weiteren wurde der maximale Wirkungsgrad von Widerstandsläufern begründet, der sich auf 33% beläuft. Abschließend wurden die zwei an Windenergiekonvertern wirkenden Prinzipien, das effektive Auftriebsprinzip und das Widerstandsprinzip gegenübergestellt.

Um die wirkenden Prinzipien während der Leistungsentnahme an der neuartigen VAWT darstellen zu können, wurde eine vereinfachte analytische Berechnung ohne Einbindung der Leitschaufeln durchgeführt. Dabei wurden die Luftkräfte durch Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte errechnet. Diese Beiwerte ermittelten X. Ortiz et al. [18] im Zuge von Windkanalmessungen. Aus den analytischen Berechnungen ging hervor, dass die Leistung an der neuartigen VAWT der Luft sowohl durch das Widerstandsprinzip als auch durch das Auftriebsprinzip entzogen wird. Dabei ist der durch aerodynamischen Auftrieb entzogene Leistungsanteil bedeutend größer gegenüber dem durch Widerstand entzogenen. Es wurde gezeigt, dass das VAWT-Prinzip ein gutes Anfahrverhalten aufweist. Außerdem ist erörtert worden, warum die optimale Schnellläufigkeit der VAWT bei $\lambda_{opt} = 0.5$ liegt. Sie wird zum einen durch das Widerstandsprinzip begrenzt, da mit steigender Schnellläufigkeit die entstehenden Luftwiderstandskräfte abnehmen. Zum anderen nehmen an der VAWT die Luftauftriebskräfte mit steigender Schnellläufigkeit aufgrund des dabei kleiner werdenden Anstellwinkels ebenfalls ab. Es folgten Betrachtungen von Geschwindigkeitsdreiecken in der dynamischen Geometrie-Software *GeoGebra*. Erste Untersuchungen wurden wieder ohne Leitschaufeln durchgeführt, dabei wurde das symmetrische Verhalten zwischen $\varphi = 0^\circ$ bis 180° und $\varphi = 180^\circ$ bis 360° widerlegt, was auch mit den Ergebnissen der CFD-Simulation aus dem Paper [6] übereinstimmt. Nun wurden die Leitschaufeln in die Betrachtungen miteinbezogen. Dabei war die Grundidee, jene Schaufelanströmung über weite Teile des Umfangs auszudehnen, die das maximale Drehmoment in der Betrachtung ohne Leitschaufeln hervorgebracht hatte. Mit der somit gefundenen Ausgangskonfiguration der Leitschaufeln wurde eine Basis für die nachkommenden Messungen am Prüfstand der VAWT geschaffen.

Ziel des experimentellen Teils der Arbeit war es, einen Prüfstand mit einem geeigneten Messsystem aufzubauen, um eine optimale Leitschaufelkonfiguration an der Modell-VAWT zu ermitteln. Geprüft werden sollte in der Auffahrtsrampe des TTM-Instituts, wobei der Luftstrom durch ein 30 kW-axial-Gebläse in Bewegung versetzt wurde. Die Herausforderung bestand zum einen darin, eine homogene Verteilung der Windgeschwindigkeit in der Auffahrtsrampe zu schaffen. Dies gelang durch die Verwendung eines Gleichrichters. Zum anderen musste ein mobiler Prüfstand entworfen werden, der eine einfache Verstellung der Leitschaufeln ermöglicht und ein geeignetes Messsystem aufweist. Als Basis des Prüfstands diente ein Item-Profilgerüst.

Darauf wurden zwei Holzplatten befestigt, zwischen denen die Windturbine angebracht war. Für die einfache Verstellung der Leitschaufeln wurden spezielle Leitschaufelspanner konstruiert und gefertigt. Um das Messsystem auslegen zu können, musste der Leistungsbereich der VAWT unter den vorherrschenden Windbedingungen des Gebläses abgeschätzt werden. Als Messsystem fand das einfache Messprinzip nach De Prony Verwendung, mit dem bereits im 19. Jahrhundert die Leistung von Dampfmaschinen gemessen wurde. Mit derselben Messmethode wurde auch der Vergleich zwischen einer Ausführung mit vier Schaufeln und einer Ausführung mit drei Schaufeln angestellt. Dabei fiel das Leistungsoutput der Ausführung mit vier Schaufeln um sieben Prozent höher aus als jenes der Ausführung mit drei Schaufeln. Die Miteinbeziehung des größeren technischen Aufwandes bei einer vierschaufeligen Turbine, und einer vermuteten größeren Versperrung mit Leitschaufeln legte es dennoch nahe, die dreischaufelige Variante für die nachkommenden Versuche zu verwenden. Nachdem bei den Messungen ein maximales Moment von rund 3 Nm und eine maximale Drehzahl von knapp 500 U/min bei einer Windgeschwindigkeit von 15.53 m/s ermittelt worden waren, konnte die eigentliche Dimensionierung des Messsystems mit Datenerfassungseinheit erfolgen. Durch die guten Beziehungen des TTM-Institutes zu verschiedenen Außenstellen, wie dem Kompetenzzentrum *Virtuelles Fahrzeug* und dem Unternehmen *bionic surfaces technologies GmbH*, wurden verschiedene Messinstrumente wie Hysteresebremse und Messkarte zur Verfügung gestellt. Da mit der Messkarte *USB-6009* von *National Instruments* nur Spannungen gemessen werden können, musste an der Hysterese ein Shunt-Widerstand verbaut werden. In *LabView* wurde ein Messprogramm entworfen, das die Rohsignale der Hysteresebremse, des optoelektrischen Sensors und des Potentiometers in Messwerte umrechnet und aus diesen Werten die Leistung bestimmt sowie ausgibt und aufzeichnet.

Bei den Messungen wurde jeweils eine Leistungs-Drehzahl-Kurve gemessen, um Vergleiche zwischen verschiedenen Versuchskonfigurationen anstellen zu können. Eine Referenzmessung ohne Leitschaufeln, die zu Beginn durchgeführt wurde, diente den folgenden Versuchen als Bezug. Anschließend wurden verschiedene Konfigurationen der Leitschaufeln geprüft, wobei eine optimale Konfiguration ermittelt wurde, die eine Leistungssteigerung von 6% gegenüber der VAWT ohne Leitschaufeln bewirkte. Diese moderate Leistungssteigerung legt nahe, die Einbindung von Leitschaufeln als eine untergeordnete Maßnahme zur Effizienzsteigerung zu betrachten. Überdies geht dadurch die Eigenschaft der Windturbine verloren, sich einfach und schnell zum Wind auszurichten.

Es ist des Weiteren gezeigt worden, dass das Auftriebsprinzip an dem VAWT-Modell mit Leitschaufeln nicht verstärkt umgesetzt werden konnte. Dies könnte unter Umständen an den schlechten aerodynamischen Eigenschaften der ebenen Platten liegen, die als Rotorschaukeln verwendet wurden. Bereits bei geringen Anstellwinkeln kann der hohe Druckanstieg bei der Umströmung der scharfen Vorderkante zur Ablösung der Strömung führen. An dem alternativen Konzept der VAWT wechseln sich Anström- und Abströmkannte aufgrund der Rotorkinematik bei jeder Umdrehung ab. Somit muss das Rotorschaukelprofil zum einen zweizählig drehsymmetrisch sein und sollte keine scharfe Kante aufweisen. Eine Linsenform erfüllt diese Kriterien und wurde auch bei der CFD-Simulation verwendet. Zum anderen sollte das Profil eine geringe Dicke aufweisen um den Luftwiderstand bei kleinen Anstellwinkeln ebenso wie den Nachlauf in

Grenzen zu halten. Mit einem solchen Profil könnten höhere Drehmomente in Folge des aerodynamischen Auftriebs generiert werden. Ein NACA-0009-Profil käme dem am nächsten. In Abbildung 9-1 und Abbildung 9-2 sind die Auftriebsbeiwerte c_L und Widerstandsbeiwerte c_D über den Anstellwinkel α eines solchen NACA-0009-Profils für drei verschiedene Reynoldszahlen dargestellt, die R. Sheldahl und P. Klimas bei ihren Windkanalmessungen ermittelten [22]. Die Zahl 0009 bedeutet, dass das Profil symmetrisch ist und eine Dicke von 9% bezogen auf die Profiltiefe aufweist. Verglichen mit den Messergebnissen von X. Ortiz et al. [18] an ebenen Platten (Abbildung 4-8), weist das NACA-0009 bei Anstellwinkeln bis $\alpha = 10^\circ$ einen geringeren Widerstandsbeiwert und eine schneller steigende Kurve des Auftriebsbeiwerts auf. Des Weiteren beträgt der maximale Widerstandsbeiwert $c_{D,max} = 1.8$, wohingegen er bei den Messungen an der ebenen Platte von X. Ortiz nur etwa $c_{D,max} = 1.1$ beträgt. Außerdem beträgt der maximale Auftriebsbeiwert am NACA-0009-Profil $c_{L,max} = 1.1$, wohingegen an der ebenen Platte (AR=1.6) nur ein $c_{L,max} = 0.9$ ermittelt wurde. In weiterführenden Messungen könnte also untersucht werden, wie sich verschiedene aerodynamische Schaufelprofile auf das Leistungoutput auswirken.

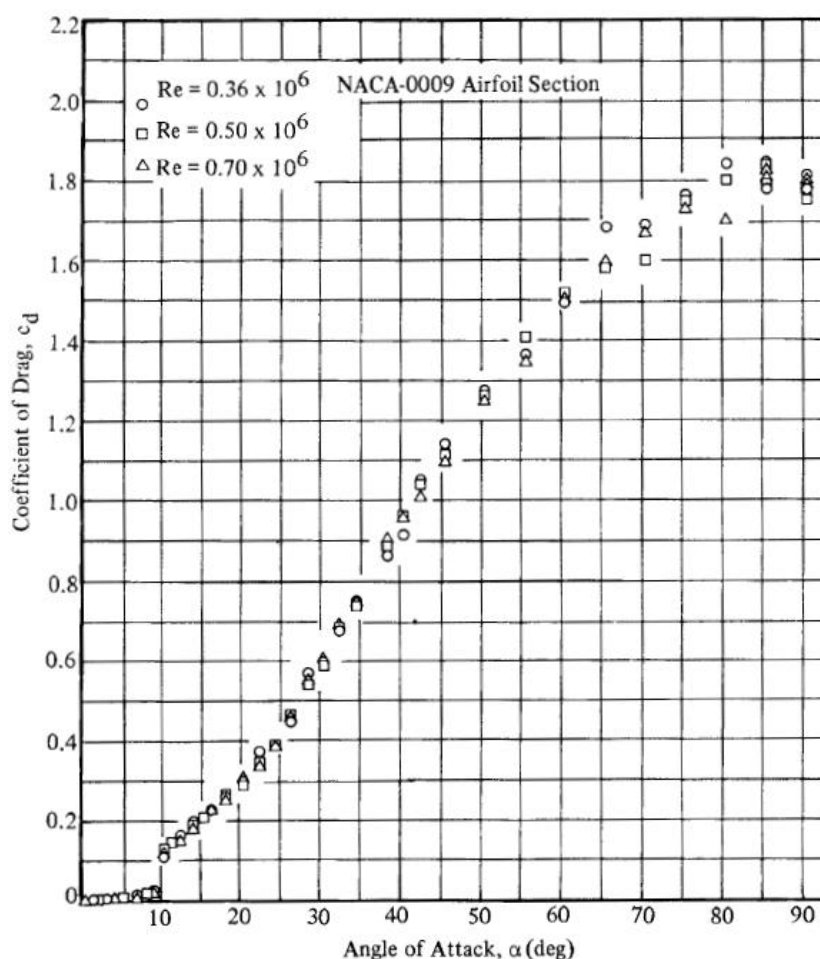


Abbildung 9-1: Windkanalmessungen von c_D (Coefficient of Drag) abhängig vom Anstellwinkel α (Angle of Attack) am NACA-0009-Profil nach [22]

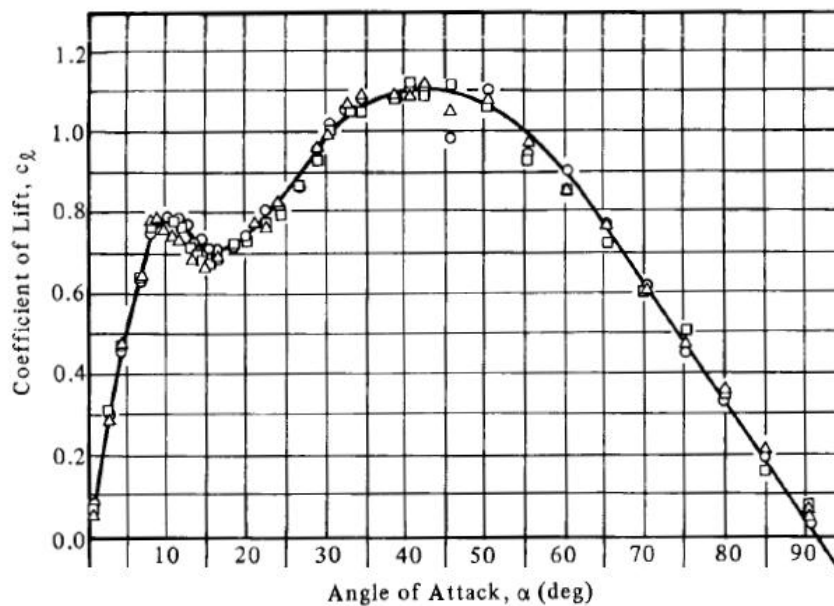


Abbildung 9-2: Windkanalmessungen von c_L (Coefficient of Lift) abhängig vom Anstellwinkel α (Angle of Attack) am NACA-0009-Profil nach [22]

In den Versuchen wurde eine 2D-Strömungssituation untersucht, die durch Begrenzung des Strömungsraumes nach oben und unten zustande kam. Dabei gestaltete sich die Windabfuhr unter Einbindung der Leitschaufeln problematisch. Es ist anzunehmen, dass eine ungehinderte vortexförmige Abströmung der Luft nach oben die Luftabfuhr erleichtern und somit zu einer Wirkungsgradsteigerung beitragen könnte. In weiterführenden Versuchen am VAWT-Prüfstand könnte dazu oberhalb oder unterhalb der Turbine eine Öffnung realisiert werden, die das Abströmen der Luft erleichtert. Dabei würde eine 3D-Strömungssituation entstehen.

Bei den Messungen mittels Hysteresebremse erwies sich eine langsame Steigerung des Erregerstroms als unerlässlich, da aus zu schneller Erregung fehlerhafte Messungen resultieren. Eine programmierte Messzyklussteuerung wäre hierbei hilfreich, die die einzelnen Betriebspunkte optimal anfährt und nach Erreichen eines stationären Zustands die Messwertaufnahme über einen bestimmten Zeitraum ausführt. Eine mögliche Alternative zur Hysteresebremse stellt ein gelagerter Generator dar, der das Drehmoment über einen definierten Hebel an eine Kraftmesszelle abgibt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der Generator ein geringes Leerlaufmoment aufweisen sollte.

Literaturverzeichnis

- [1] K. R. Haapala and P. Prempreeda, "Comparative life cycle assesement of 2.0 MW wind turbines," *Int. J.Sustainable Manufacturing* , vol. 3, no. 2, pp. 170-185, 2014.
- [2] Österreich Bundeskanzleramt. (2014, Sep.) [Online]. <https://www.bka.gv.at/site/4890/default.aspx>
- [3] Umwelt Bundesamt. (2014, Sep.) [Online]. <http://www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/energie/erneuerbare/>
- [4] World Wind Energy Association. (2015, Jan.) [Online]. <http://www.wwindea.org/wwec2014-key-statistics-of-world-wind-energy-report-published/>
- [5] A. P. Schaffarczyk, *Introduction to Windturbine Aerodynamics*, Springer, Ed. Kiel, 2014.
- [6] H. Jericha, E. Göttlich, T. Selic, and W. Sanz, "NOVEL VERTICAL-AXIS WIND TURBINE WITH ARTICULATED BLADING," *Proceedings of ASME Turbo Expo 2012: Power for Land, Sea and Air* , no. GT2012, Jun. 2012.
- [7] H. Jericha, E. Göttlich, and W. Sanz, "Windturbine," Österreich Patent AT 511 955 B1 2013-04-15, Sep. 05, 2011.
- [8] M. Hansen, *Aerodynamics of Wind Turbines*, 2nd ed. Earthscan, 2008.
- [9] H. Erich, *Windkraftanlagen - Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit*, 5th ed. Springer Vieweg, 2014.
- [10] R. Gasch and J. Twele, *Windkraftanlagen - Grundlagen, entwurf, Planung und Betrieb*, 8th ed., T. U. Berlin, Ed. Deutschland: Springer Vieweg, 2013.
- [11] A. Gebert. (2011, Apr.) Konstruktion eines Demonstrationsmodells einer Windkraftanlage mit vertikaler Achse. Bachelorarbeit.
- [12] P. Dieudonné. (2014, Sep.) EolProcess. [Online]. <http://www.eolprocess.com/index.php>
- [13] T. Bresson. (2014, Nov.) AeroSeeD. [Online]. <http://www.aeroseed.com/innovation/eolienne.php>
- [14] M. Brandecker. (2011) Variantenkonstruktion der Blattverstellung einer Windkraftanlage mit vertikaler Achse. Bachelorarbeit.

-
- [15] B. Egger. (2014, Oct.) Optimierung eines Windturbinenmodells mit vertikaler Achse. Bachelorarbeit.
- [16] H. Sigloch, *Technische Fluidmechanik*, 6th ed. Springer, 2008.
- [17] L. Böswirth and S. Bschorer, *Technische Strömungslehre*, 9th ed. Vieweg+ Teubner, 2012.
- [18] X. Ortiz, A. Hemmatti, D. Rival, and D. Wood, "Instantaneous forces and moments on inclined flat plates," Dept Mechanical and Manufacturing Engineering,, University of Calgary, Canada The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7), 2012.
- [19] Wikipedia. (2014, Nov.) [Online]. <http://de.wikipedia.org/wiki/Bremse>
- [20] Wikipedia. (2014, Nov.) [Online]. http://de.wikipedia.org/wiki/Pronyscher_Zaum
- [21] mobac GmbH. (2015, Jan.) [Online]. http://www.mobac.de/deutsch/h_folder/index_p.php?content=strom-stand-es
- [22] R. Sheldahl and P. Klimas, *Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attac for use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines* . Albuquerque: Sandia National Laboratories - Energy Report, 1981.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schematische Draufsicht auf die Windturbine der Patentschrift [7].....	4
Abbildung 2-2: Schematische Seitenansicht der Windturbine der Patentschrift [7]	5
Abbildung 2-3: Isometrische Ansicht des Demonstrationsmodells der VAWT mit vier Schaufeln [11].....	6
Abbildung 2-4: Konzept des Windrades mit drehenden Segeln [12].....	7
Abbildung 2-5: Konzept der VAWT des Unternehmens <i>AeroSeeD</i> [13].....	8
Abbildung 2-6: Rechengitter für die 2D-Simulation ohne Leitschaufeln [6].....	9
Abbildung 2-7: Drehmomentverlauf einer Schaufel und resultierender Verlauf dreier Schaufeln entlang der Umdrehung; Windgeschwindigkeit $c = 35$ m/s; Schnellaufzahl $\lambda = 0.5$ [6].....	10
Abbildung 2-8: Resultierende Drehmomentverläufe dreier Schaufeln entlang einer Umdrehung für verschiedene Schnellaufzahlen λ (speed ratio) [6].....	11
Abbildung 2-9: Geschwindigkeitsverteilung an verschiedenen Rotorpositionen; $c = 35$ m/s, $\lambda = 0.5$ [6]	12
Abbildung 2-10: Druckverteilung an verschiedenen Rotorpositionen; $c = 35$ m/s, $\lambda = 0.5$ [6]	12
Abbildung 4-1: Stromlinienverlauf, Axialer Geschwindigkeitsverlauf und Druckverlauf entlang der Durchströmung eines Rotors; nach M. Hansen [8].....	14
Abbildung 4-2: Kontrollvolumen (CV) um ein Windrad nach M. Hansen [8].....	15
Abbildung 4-3: Alternatives Kontrollvolumen um eine Windturbine nach M. Hansen [8].....	16
Abbildung 4-4: Einteilung der Windturbinen.....	19
Abbildung 4-5: Leistungsfaktor c_p über der Schnellaufzahl λ verschiedener Bauformen [5]	19
Abbildung 4-6: Vereinfachte persische Windmühle mit vertikaler Achse (links), mit dazugehöriger Funktion $c_p(\lambda)$ (rechts) nach [10].	22
Abbildung 4-7: Kräfte am Flügel nach [17].....	22
Abbildung 4-8: Windkanalmessungen von c_D (Drag Coefficient) und c_L (Lift Coefficient) abhängig vom Anstellwinkel α (Angle of Attack) ebener Platten mit unterschiedlichen Seitenverhältnissen (Aspectratios AR) [18]	23
Abbildung 4-9: Widerstandsbeiwerte (c_A anstelle von c_L) und Auftriebsbeiwerte (c_W anstelle von c_D) der Profile NACA 4412 bis 4424 in Abhängigkeit des Anstellwinkels (α_a anstelle von α) aus Windkanalmessungen [10].....	24
Abbildung 4-10: Prinzipskizze des Darrieus-Rotors (links) und dessen Antriebsprinzip (rechts) [10].....	24
Abbildung 5-1: Näherungsfunktionen $c_L(\alpha)$ und $c_D(\alpha)$	27
Abbildung 5-2: Rotorschaukel in allgemeiner Lage; $\lambda = 0.5$	27
Abbildung 5-3: Verlauf der Umfangskraft F_{Dn} einer umlaufenden Schaufel für verschiedene Schnellaufzahlen λ ; $c = 36$ m/s.....	29
Abbildung 5-4: Verlauf der Umfangskraft F_{Ln} einer umlaufenden Schaufel für verschiedene Schnellaufzahlen λ ; $c = 36$ m/s.....	30
Abbildung 5-5: Verlauf des Anstellwinkels α einer umlaufenden Schaufel für verschiedene Schnellaufzahlen λ ; $c = 36$ m/s.....	31
Abbildung 5-6: Verlauf der Relativgeschwindigkeiten w einer umlaufenden Schaufel für verschiedene Schnellaufzahlen λ ; $c = 36$ m/s.....	31

Abbildung 5-7: Verlauf des Drehmoments einer umlaufenden Schaufel für verschiedene Schnelllaufzahlen λ ; $c = 36$ m/s.....	32
Abbildung 5-8: Gemittelte Leistung dreier Schaufeln abhängig von der Schnelllaufzahl; $c = 36$ m/s	32
Abbildung 5-9: Schaufel mit Geschwindigkeitsdreiecken an den Positionen Schaufelachse, Anström- und Abström- kante bei einem Winkel $\varphi = 315^\circ$; $\lambda = 0.5$	34
Abbildung 5-10: Relativgeschwindigkeit w_r entlang des Umfangs; $\lambda = 0.5$	34
Abbildung 5-11: Relativgeschwindigkeitsverteilung entlang der Schaufel s an den Positionen $\varphi_1 = 70^\circ$ und $\varphi_1 = 290^\circ$; $\lambda = 0.5$	35
Abbildung 5-12: Größe und Richtung der Relativgeschwindigkeiten um die Schaufel an der Position $\varphi = 70^\circ$; $\lambda = 0.5$; $c = 36$ m/s.....	36
Abbildung 5-13: Größe und Richtung der Relativgeschwindigkeiten um die Schaufel an der Position $\varphi = 290^\circ$; $\lambda = 0.5$; $c = 36$ m/s.....	36
Abbildung 5-14: Position des maximalen Drehmoments laut CFD-Simulation bei $\varphi = 290^\circ$; Geschwindigkeitsdreiecke an Anström- und Abström- kante; $\lambda = 0.5$	37
Abbildung 5-15: Ausgangskonfiguration der Leitschaufeln; $\lambda = 0.5$	38
Abbildung 6-1: Über 60 s Gemittelte Windgeschwindigkeiten entlang der Kanallbreite in einer Höhe von 1.2 m, gemessen an drei Abständen vom Gleichrichter.....	41
Abbildung 6-2: Gebläse mit Gleichrichter und Prüfstand positioniert in der Auffahrtsrampe des TTM-Instituts.....	41
Abbildung 6-3: Schematische isometrische Ansichten des Prüfstandes von oben.....	42
Abbildung 6-4: Schematische isometrische Ansichten des Prüfstandes von unten	43
Abbildung 6-5: Detailschnitt durch einen Leitschaufelspanner (6).....	44
Abbildung 6-6: Prony'scher Zaun [20].....	45
Abbildung 6-7: Prinzip der Drehmomentmessung mittels Bremsriemen.....	45
Abbildung 6-8: Gewindespindel und Hangwaagen (links), Lederriemen um Riemenscheibe (rechts).....	46
Abbildung 6-9: Schaltung des Messaufbaus	48
Abbildung 6-10: Definition des Phasenwinkels γ	49
Abbildung 6-11: Prüfstandsaufbau – Leistungsmessung mittels Hysteresebremse, optoelektrischen Sensors und Datenlogsystem.....	49
Abbildung 6-12: Detail der Phasenwinkelerfassung (13).....	50
Abbildung 6-13: Detail der Leistungsmesseinheit (14).....	50
Abbildung 6-14: Detail der Stromversorgung und Datenerfassungseinheit (15)	50
Abbildung 6-15: Drehmoment-Spannungskurve für steigende Stromstärke mit der Polynomfunktion y 6. Grades.....	52
Abbildung 6-16: Benutzeroberfläche des Messprogramms in LabView.....	52
Abbildung 6-17: Blockdiagramm des Messprogramms.....	53
Abbildung 7-1: Leistung P über Drehzahl n ; Vier Rotorschaufeln vs. drei Rotorschaufeln an der Modell-VAWT; $c = 15.53$ m/s; Polynome 4. Ordnung.....	54
Abbildung 8-1: Kurzzeichen der Leitschaufelkonfigurationen.....	57

Abbildung 8-2: Leistung P über Drehzahl n der Modell-VAWT ohne Leitschaufeln; c = 15.53 m/s; Referenzkurve für folgende Versuche; Trendlinie: Polynom 4. Grades.....	58
Abbildung 8-3: Drehmoment M über Drehzahl n der Modell-VAWT ohne Leitschaufeln; c = 15.53 m/s	58
Abbildung 8-4: Leistungsbeiwert c_p über Schnellläufigkeit λ der Modell-VAWT ohne Leitschaufeln; c = 15.53 m/s; Trendlinie: Polynom 4. Grades.....	59
Abbildung 8-5: Standardabweichungen der Drehzahl n und der Leistung P; Referenzmessung ohne Leitschaufeln (LS)	61
Abbildung 8-6: Detail der Standardabweichungen der Drehzahl n und der Leistung P; Referenzmessung ohne Leitschaufeln (LS)	61
Abbildung 8-7: Zufällige Messfehler im jeweiligen Betriebspunkt mit gemittelter oberer und unterer Messunsicherheitsgrenze; Referenzmessung ohne Leitschaufeln (LS).....	63
Abbildung 8-8: Detail der zufälligen Messfehler im jeweiligen Betriebspunkt mit gemittelter oberer und unterer Messunsicherheitsgrenze; Referenzmessung ohne Leitschaufeln (LS).....	63
Abbildung 8-9: Ausgangskonfiguration der Leitschaufeln; $\lambda = 0.35$; $\gamma = -20$	64
Abbildung 8-10: Ausgangskonfiguration L1-R1-M1; $\gamma = 20^\circ$ (durchgezogene Linie)	65
Abbildung 8-11: Leistung P über Drehzahl n der Ausgangskonfiguration L1-R1-M1 mit Referenzmessung; $\gamma = 20^\circ$; Trendlinien: Polynom 4. Ordnung.....	65
Abbildung 8-12: Strömungssituation abgeleitet von den Messergebnissen an der Konfiguration L1-R1-M1- 20° ; Relativgeschwindigkeiten entlang des Umfangs; $\lambda = 0.35$	66
Abbildung 8-13: Optimale Konfiguration L2-R1-M1- 20°	67
Abbildung 8-14: Leistung P über Drehzahl n der optimalen Konfiguration L2-R1-M1 mit Referenzmessung; $\gamma = 20^\circ$; Trendlinie: Polynom 4. Ordnung.....	67
Abbildung 8-15: Drehmoment M über Drehzahl n mit der Konfiguration L2-R1-M1 $\gamma = 20^\circ$; c = 15.53 m/s.....	68
Abbildung 9-1: Windkanalmessungen von c_D (Coefficient of Drag) abhängig vom Anstellwinkel α (Angle of Attack) am NACA-0009-Profil nach [22]	71
Abbildung 9-2: Windkanalmessungen von c_L (Coefficient of Lift) abhängig vom Anstellwinkel α (Angle of Attack) am NACA-0009-Profil nach [22]	72
Abbildung 0-1: Leistung P über Drehzahl n der der Konfiguration L1-R1-M1- 0° ; c = 15.53 m/s; Trendlinie: Polynom 4. Grades.....	82
Abbildung 0-2: Leistung P über Drehzahl n der der Konfiguration L1-R1-M1- 40° ; c = 15.53 m/s; Trendlinie: Polynom 4. Grades.....	82
Abbildung 0-3: Leistung P über Drehzahl n der der Konfiguration R1-L3-M1- 40° ; c = 15.53 m/s; Trendlinie: Polynom 4. Grades.....	83
Abbildung 0-4: Leistung P über Drehzahl n der der Konfiguration R2-L1-M1- 20° ; c = 15.53 m/s; Trendlinie: Polynom 4. Grade.....	83
Abbildung 0-5: Leistung P über Drehzahl n der der Konfiguration R2-L1-M2- 20° ; c = 15.53 m/s; Trendlinie: Polynom 4. Grades.....	84
Abbildung 0-6: Leistung P über Drehzahl n der der Konfiguration R2-L2-M1- 20° ; c = 15.53 m/s; Trendlinie: Polynom 4. Grades.....	84

Abbildung 0-7: Leistung P über Drehzahl n der der Konfiguration R2-L3-M1-20°; c = 15.53 m/s; Trendlinie: Polynom 4. Grades.....	85
Abbildung 0-8: Leistung P über Drehzahl n der der Konfiguration R2-L3-M1-40°; c = 15.53 m/s; Trendlinie: Polynom 4. Grades.....	85

Anhang

Leistungsmessung nach De Prony

Die folgende Tabelle enthält die Messwerte und die daraus berechneten Werte der Leistung der Vergleichsmessung zwischen der VAWT-Modellturbinen mit vier und mit drei Rotorscheufeln.

Vier Rotorscheufeln					Drei Rotorscheufeln				
Gemessene Werte			Berechnete Werte		Gemessene Werte			Berechnete Werte	
n [U/min]	m_1 [kg]	m_2 [kg]	M [Nm]	P [W]	n [U/min]	m_1 [kg]	m_2 [kg]	M [Nm]	P [W]
120	9.10	1.93	2.81	35.36	150	7.10	0.45	2.61	40.99
142	8.90	1.56	2.88	42.83	190	6.83	0.40	2.52	50.20
150	8.70	1.36	2.88	45.24	210	6.40	0.35	2.37	52.21
180	8.18	1.22	2.73	51.48	220	6.38	0.31	2.38	54.87
200	7.88	1.13	2.65	55.47	220	6.50	0.30	2.43	56.05
220	7.58	1.04	2.57	59.12	230	6.70	0.36	2.49	59.92
250	7.39	0.96	2.52	66.06	240	6.25	0.34	2.32	58.28
270	7.03	0.87	2.42	68.34	250	6.27	0.30	2.34	61.33
280	6.70	0.83	2.30	67.54	270	5.97	0.28	2.23	63.14
290	6.16	0.72	2.14	64.89	270	6.10	0.28	2.28	64.57
310	5.80	0.62	2.03	66.05	275	5.70	0.32	2.11	60.85
320	5.80	0.59	2.04	68.51	289	5.64	0.21	2.13	64.51
340	5.06	0.51	1.79	63.57	290	5.57	0.31	2.06	62.68
200	7.90	1.08	2.68	56.05	290	5.72	0.22	2.16	65.55
220	7.66	1.08	2.58	59.48	300	5.50	0.31	2.04	63.98
260	7.00	0.86	2.41	65.60	300	5.50	0.30	2.04	64.17
285	6.60	0.76	2.29	68.39	300	5.50	0.23	2.07	64.97
315	6.12	0.63	2.15	71.06	307	4.55	0.16	1.72	55.28
333	5.50	0.54	1.95	67.87	320	5.30	0.20	2.00	67.06
340	5.05	0.46	1.80	64.13	330	4.27	0.12	1.63	56.21
352	4.55	0.35	1.65	60.75	360	3.62	0.10	1.38	52.15

Repräsentative Polynomfunktion

In der folgenden Tabelle sind die aufgezeichneten Messwerte des Referenzversuchs an dem VAWT-Modell ohne Leitschaufeln des Betriebspunktes bei 270 U/min dargestellt. Aus diesen Werten wurden der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet.

n [U/min]	P [W]		n [U/min]	P [W]
267.858294	61.328235		Mittelwert	269.672643
266.291144	60.974065		Standardabweichung	2.55049168
268.127683	61.28391			0.60356033
267.857932	61.298442			
270.181056	61.705842			
270.415577	61.940462			
271.918371	62.235769			
271.760641	62.087221			
271.126327	61.918456			
273.249996	62.375498			
273.281102	62.556363			
270.291043	61.832455			
271.632948	61.984496			
273.16908	62.378354			
272.292377	62.214557			
275.551581	62.810869			
271.854687	62.084217			
271.264288	61.806617			
269.686271	61.613658			
271.736675	62.105136			
267.857397	61.22193			
267.871871	61.094253			
267.857176	61.008362			
266.380015	60.866865			
263.988912	60.222885			
265.431588	60.595403			
268.180055	61.021228			
268.36098	61.034213			
267.385981	60.881652			
266.01777	60.641524			
266.424409	60.759046			
266.351741	60.674035			
267.26395	60.810523			
270.658801	61.594831			
271.369463	61.918612			
271.778185	61.697822			
270.80698	61.385602			
270.214987	61.450912			
271.291908	61.668053			
271.983266	61.958025			

Messunsicherheit

In der folgenden Tabelle sind die mittlere Drehzahl und die mittlere Leistung des jeweiligen Betriebspunktes der Referenzmessung an dem VAWT-Modell ohne Leitschaufeln als Ausgangspunkt für die Berechnung der Leistungs-Messunsicherheit verwendet worden.

Gemessene Werte		Berechnete Werte								
n [U/min]	M [Nm]	$\Delta M_{\text{Messkarte}}$ [Nm]	M_u [Nm]	M_o [Nm]	$M_{u,\text{gesamt}}$ [Nm]	$M_{o,\text{gesamt}}$ [Nm]	$P_{u,\text{gesamt}}$ [W]	P [W]	$P_{o,\text{gesamt}}$ [W]	ΔP [W]
1848.1	0.004	0.002	0.001	0.006	0.001	0.006	0.248	0.697	1.154	0.906
1694.1	0.107	0.003	0.104	0.110	0.103	0.111	18.328	19.000	19.682	1.355
1565.4	0.201	0.004	0.197	0.206	0.195	0.208	31.953	33.012	34.085	2.132
1456.2	0.297	0.005	0.292	0.302	0.289	0.305	44.035	45.292	46.565	2.530
1381.5	0.356	0.006	0.350	0.362	0.346	0.365	50.084	51.472	52.877	2.794
1306.5	0.396	0.006	0.390	0.402	0.386	0.406	52.831	54.199	55.583	2.752
1243.9	0.444	0.007	0.438	0.451	0.433	0.456	56.424	57.877	59.348	2.924
1146.8	0.493	0.007	0.486	0.500	0.481	0.505	57.786	59.184	60.599	2.812
1078.7	0.545	0.007	0.537	0.552	0.532	0.557	60.078	61.517	62.972	2.893
983.9	0.594	0.007	0.587	0.602	0.581	0.608	59.876	61.240	62.618	2.742
909.7	0.653	0.008	0.645	0.661	0.639	0.668	60.869	62.229	63.604	2.735
595.4	0.692	0.008	0.684	0.699	0.677	0.706	42.210	43.124	44.048	1.838
								Messunsicherheitsbereich	ΔP_{mittel} [W]	2.368
								mittlere Messunsicherheit	$\Delta P_{\text{mittel}}/2$ [W]	1.184

Ergänzende Diagramme

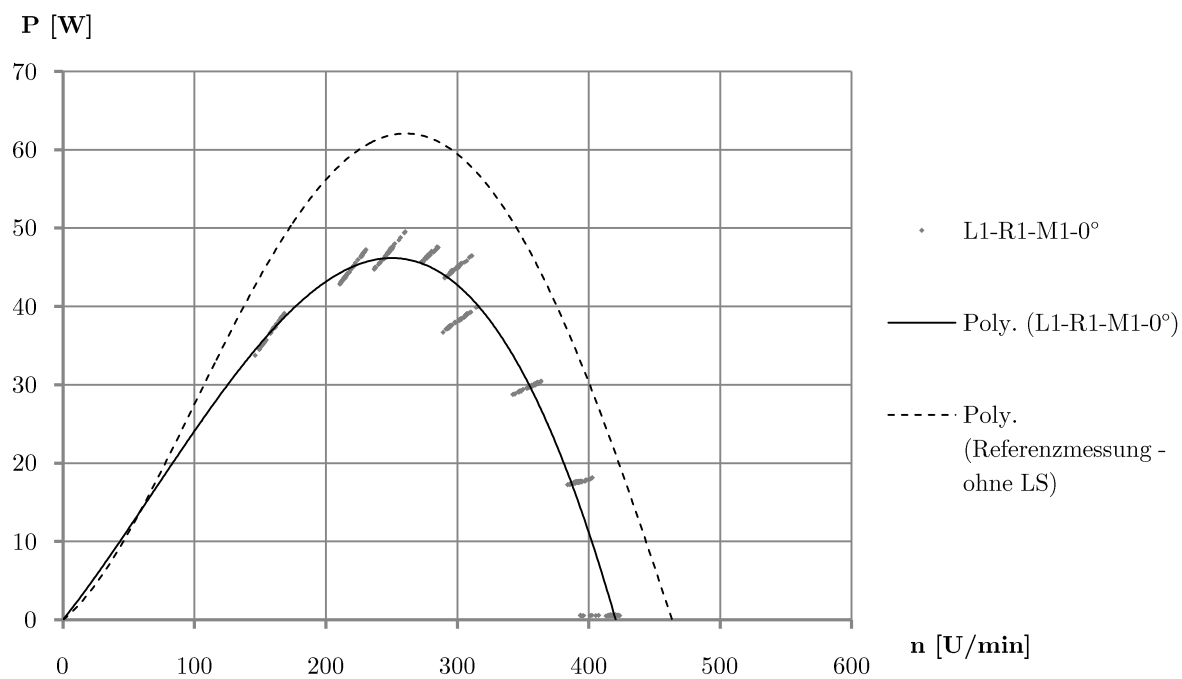


Abbildung 0-1: Leistung P über Drehzahl n der der Konfiguration L1-R1-M1-0°; $c = 15.53$ m/s;
Trendlinie: Polynom 4. Grades

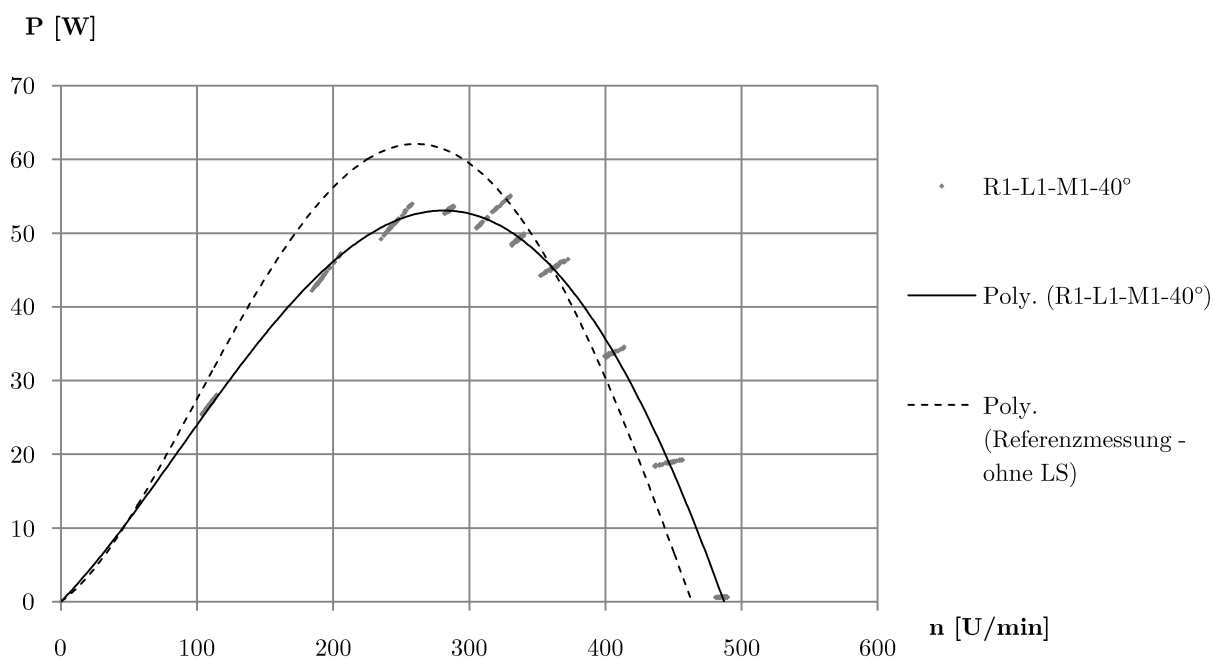


Abbildung 0-2: Leistung P über Drehzahl n der der Konfiguration L1-R1-M1-40°; $c = 15.53$ m/s;
Trendlinie: Polynom 4. Grades

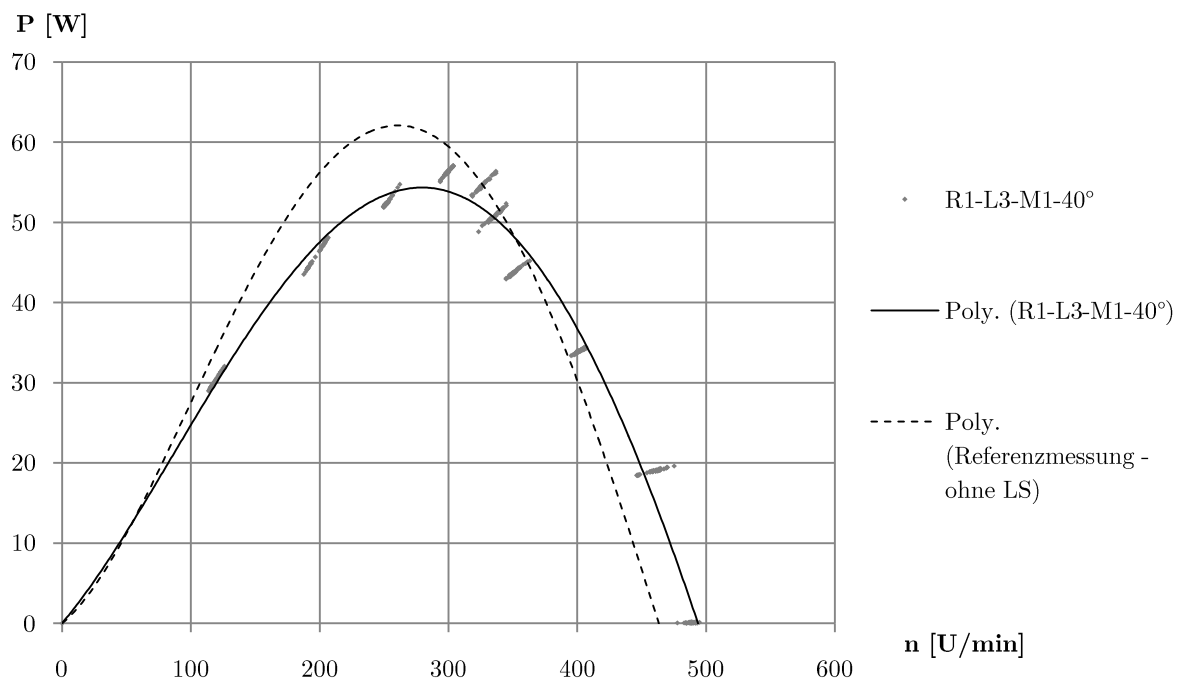


Abbildung 0-3: Leistung P über Drehzahl n der der Konfiguration R1-L3-M1-40°; $c = 15.53$ m/s;
Trendlinie: Polynom 4. Grades

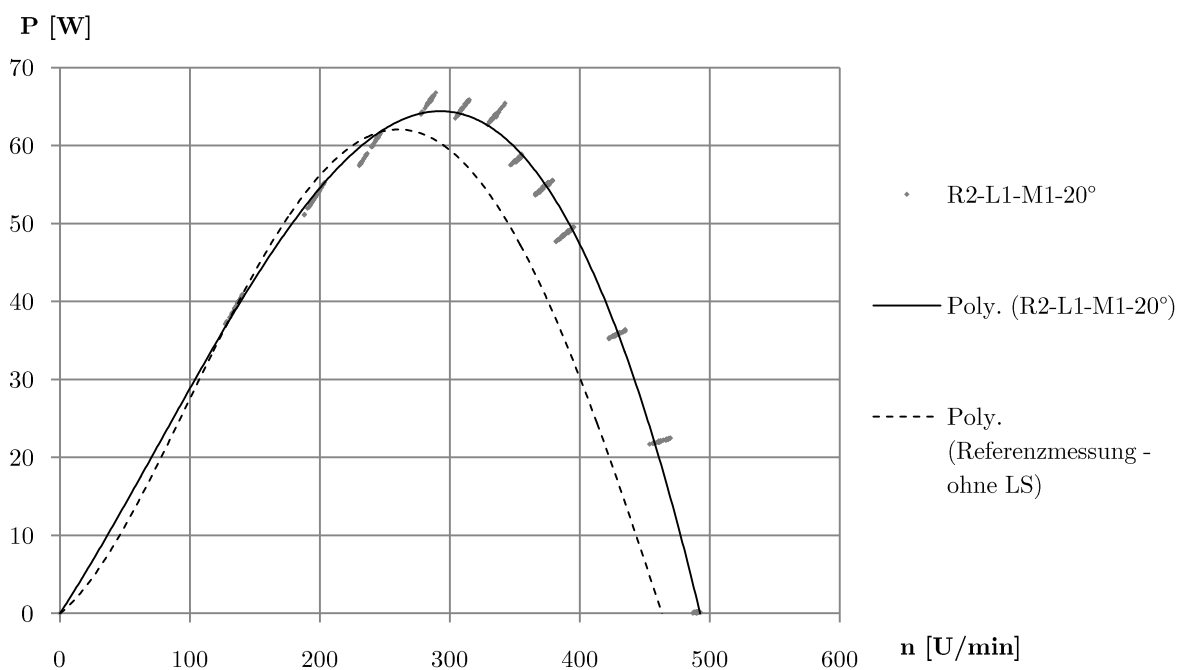


Abbildung 0-4: Leistung P über Drehzahl n der der Konfiguration R2-L1-M1-20°; $c = 15.53$ m/s;
Trendlinie: Polynom 4. Grade

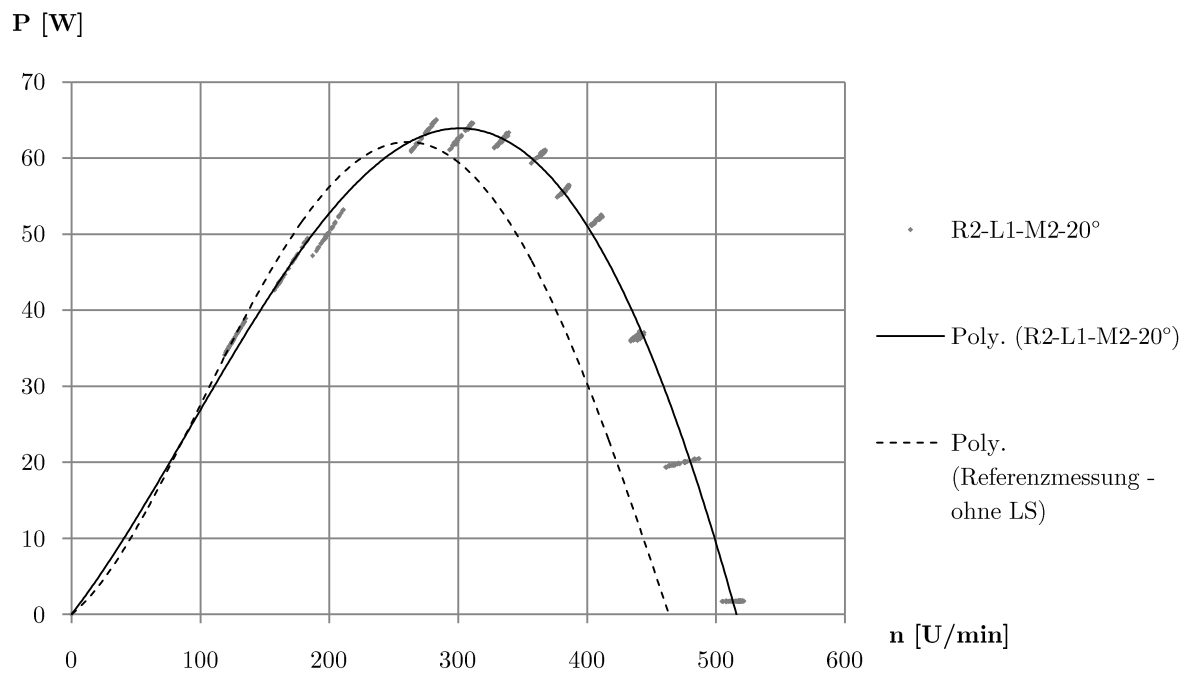


Abbildung 0-5: Leistung P über Drehzahl n der der Konfiguration R2-L1-M2-20°; $c = 15.53$ m/s;
Trendlinie: Polynom 4. Grades

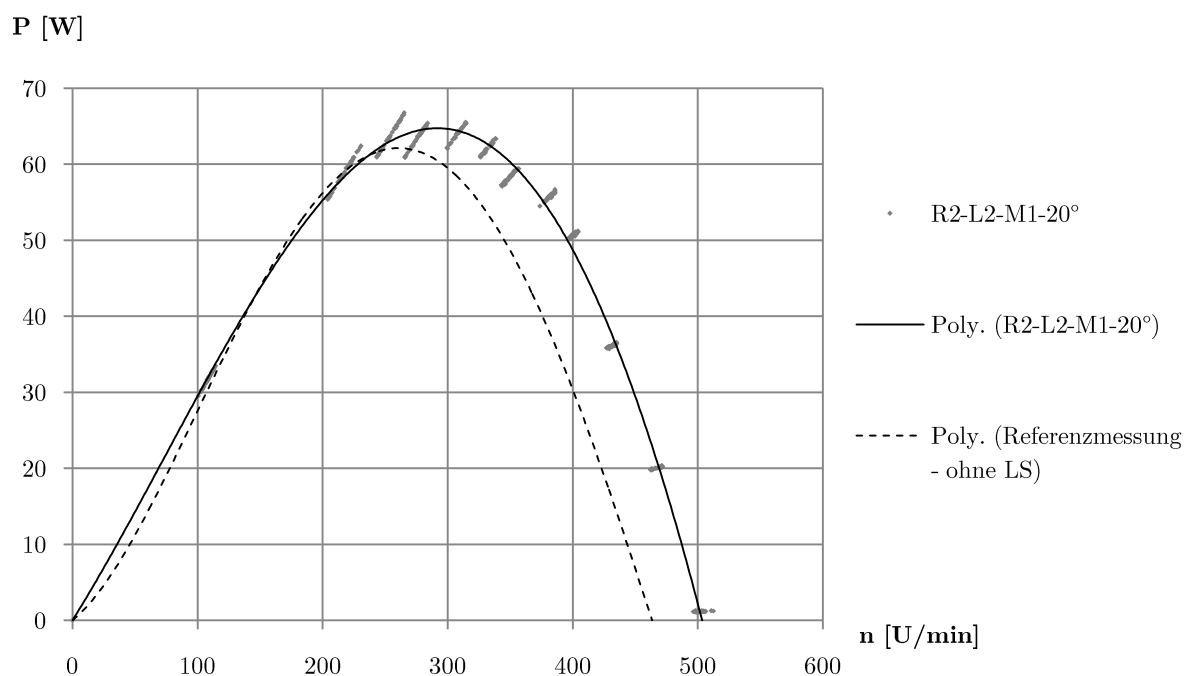


Abbildung 0-6: Leistung P über Drehzahl n der der Konfiguration R2-L2-M1-20°; $c = 15.53$ m/s;
Trendlinie: Polynom 4. Grades

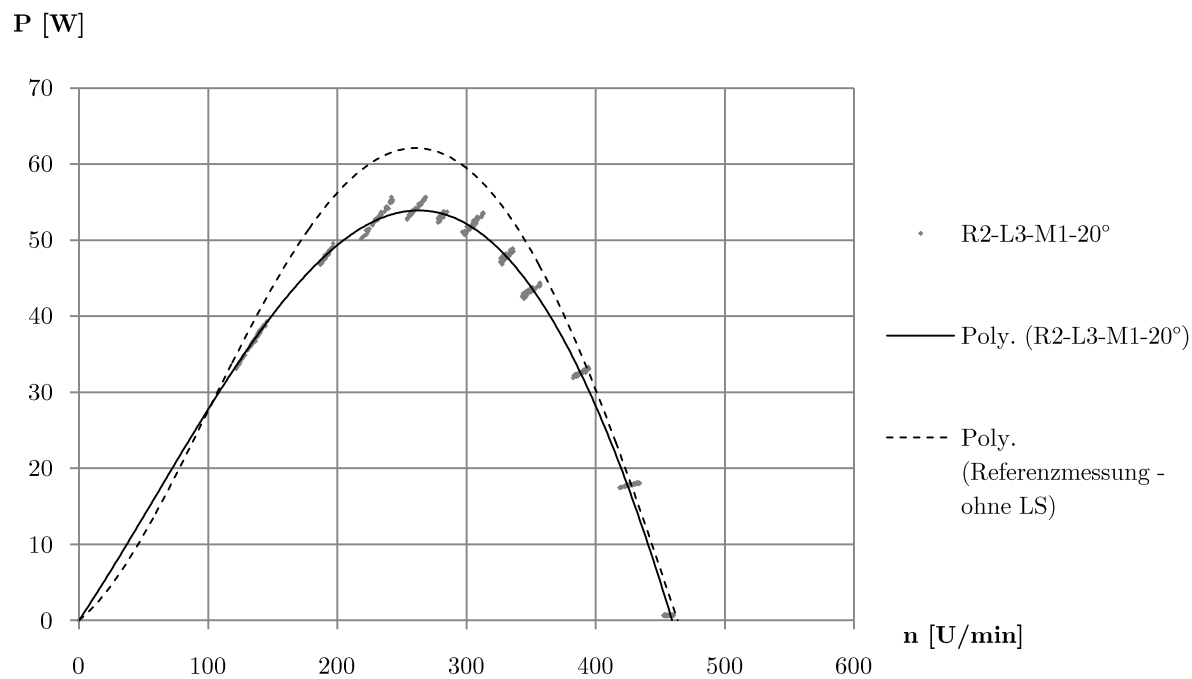


Abbildung 0-7: Leistung P über Drehzahl n der der Konfiguration R2-L3-M1-20°; $c = 15.53$ m/s;
Trendlinie: Polynom 4. Grades

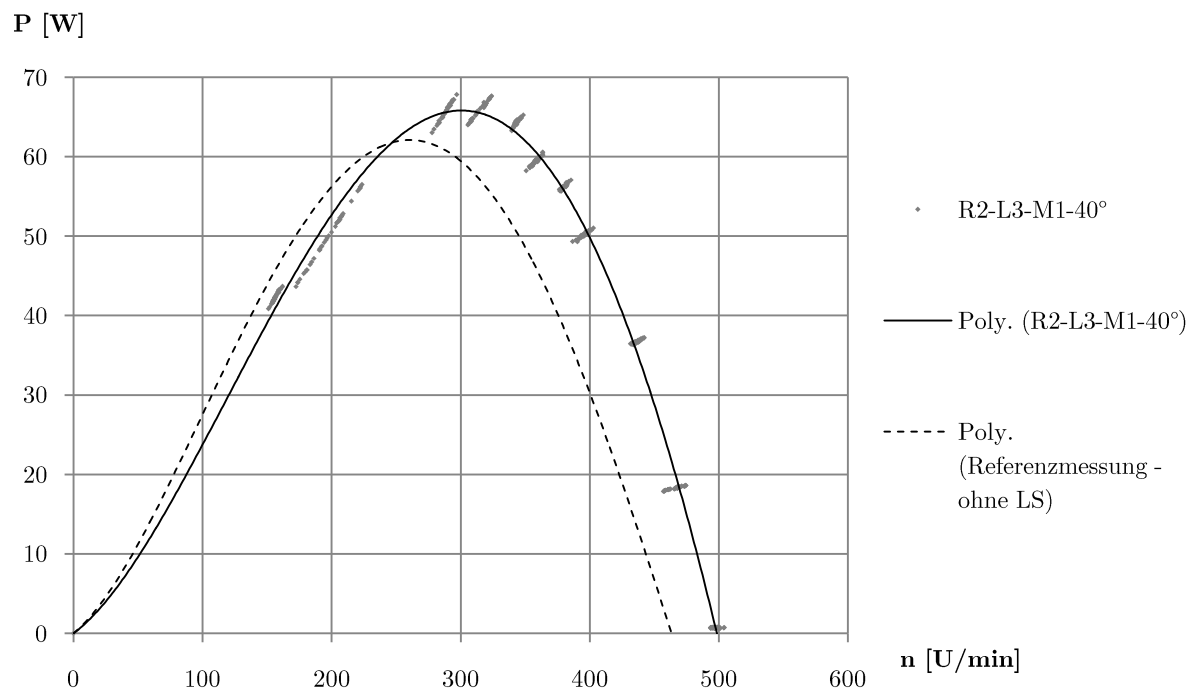


Abbildung 0-8: Leistung P über Drehzahl n der der Konfiguration R2-L3-M1-40°; $c = 15.53$ m/s;
Trendlinie: Polynom 4. Grades