

Entwicklung einer Berechnungs-Methode für die Auslegung von Pitch-Regelungen bei vertikal betriebenen Windkraftanlagen nach Open Source Kriterien

Timm Wille

Matrikel-Nr. 778143

Bachelorarbeit - 20. April 2015

Studiengang

MASCHINENBAU - ERNEUERBARE ENERGIEN

Beuth Hochschule für Technik Berlin

Betreuerin und Gutachterin:

PROF. DR.-ING. SILKE KÖHLER

Gutachter:

PROF. DR.-ING. PETER BARTSCH

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

.....
Datum, Unterschrift



Diese Arbeit steht unter einer Creative Commons
Attribution-ShareAlike 4.0 International Lizenz.

Kurzbeschreibung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es aufzuzeigen, wie sich vertikale Windkraftanlagen (VAWT) trotz komplexer Strömungsverhalten über das Double Multiple Stream Tube Modell (DMST) berechnen lassen. Das zweidimensionale Berechnungsverfahren, dass auf der Blattelement-Impuls-Theorie (BEM) aufbaut, stellt die Grundlage für die hier entwickelte Berechnungsmethode für die optimale Blattwinkeleinstellung (Pitch) der Rotorblätter. Am Beispiel eines H-Darrieus-Rotors mit einem symmetrischen NACA 0018 Profil wird gezeigt, wie sich mit dem Verfahren der Wirkungsgrad durch den Pitch verbessern lässt. Die Arbeit bietet einen Ausgangspunkt, mit dem eine offene Weiterentwicklung des Verfahrens ermöglicht wird.

Abstract

The objective of the present paper is to show how to calculate vertical axis wind turbines (VAWT) despite the complex flow behavior by using the Double Multiple Stream Tube Model (DMST). The two-dimensional mathematical method which is based on the blade element-momentum theory (BEM), provides the basis for the calculation method that is developed here for getting the optimum blade angle adjustment (pitch) of the rotor blades. On example at a H-Darrieus rotor with a symmetrical NACA 0018 profile it is shown how the efficiency can be improved by the pitch using this method. The work provides a starting point, where the open development of the process is possible.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	v
Symbolverzeichnis	vi
1. Einleitung	1
1.1. Motivation und Open Source Kriterien	1
1.2. Aufgabenstellung und Gliederung	4
2. Stand der Technik	6
2.1. Vertikalachsige Windturbinen	6
2.2. H-Darrieus Rotoren und Pitchregelungen	8
2.3. Berechnungsverfahren und das Double Multiple Stream- tube Modell	9
3. Methodisches Vorgehen	11
3.1. Konstruktive und operative Prozessgrößen	11
3.1.1. Anfangsbedingungen und Konventionen	11
3.1.2. Geometrische Dimensionierung	14
3.1.3. Schnelllaufzahl und Beschleunigungskräfte	16
3.2. Auswahl der freien Variablen	18
3.3. Vorgehen nach dem DMST Modell	19
3.4. Vergleichsrechnung ohne und mit Pitchregelung	29
4. Ergebnisse und Schlussfolgerungen	30
4.1. Anfangsbedingungen und Kriterien	30

4.2. Pitch in Abhängigkeit von Azimutwinkel und Windgeschwindigkeit	32
4.3. Vergleich der Leistungsfähigkeit ohne und mit Pitchoptimierung	35
5. Zusammenfassung und Ausblick	38
Literatur	41
A. Wertetabellen für $V_\infty = 5m/s$ und $9m/s$	45
B. Ergebnisse $V_\infty = 5m/s$	55

Abbildungsverzeichnis

1.	Windenergie Weltweit, WWEA-Report 2013	1
2.	Verschiedene VAWT Typen. Aus [24, S. 12]	7
3.	Verhaltensprinzip einer Windkraftanlage in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit nach [16] a) Leistung b) Häufigkeit der Windgeschwindigkeiten c) gewonnene Jahres- Arbeit	12
4.	Vektorielle Geschwindigkeits- und Winkelbetrachtung am Flügelprofil	13
5.	Windturbinen mit unterschiedlichen Seitenverhältnissen. Aus [4]	15
6.	Zusammenhang zwischen Blattflächenüberdeckung des Ro- tors und der optimalen Schnelllaufzahl bei VAWTs. Aus [29]	17
7.	Doppelte Strömungsröhre mit resultierender Leistungs- abnahme, je für die an- und die abströmende Seite der VAWT.	19
8.	Prinzip des Multiple Stream Tube Modells mit 6 Strö- mungsröhren mit einheitlicher $\Delta\Theta$ Verteilung. Aus [1] .	21
9.	DMST mit Windenergiewandler-Scheiben und mit verzö- gerten An- und Abströmungsgeschwindigkeiten für eine Strömungsröhre. Aus [1]	22
10.	Winkelprojektion der Anströmfläche für kleine Winkel $\Delta\Theta$ als Strecke	23
11.	Anströmverhältnisse und Luftkräfte am Profilquerschnitt eines Blattelements. Nach [10]. Wobei $\theta = \alpha_P$ und $\alpha = \alpha_A$!	24

12.	Darstellung der Kräfte und des Pitchverlaufs über den Rotationsverlauf	31
13.	Geschwindigkeitsabnahme ohne Pitch bei $V_\infty = 9m/s$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$	33
14.	Winkelbetrachtung und Tangentialbeiwert ohne Pitch bei $V_\infty = 9m/s$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$	33
15.	Geschwindigkeitsabnahme mit Pitch bei $V_\infty = 9m/s$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$	34
16.	Winkelbetrachtung und Tangentialbeiwert mit Pitch bei $V_\infty = 9m/s$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$	35
17.	Momenten- und Leistungsbetrachtung ohne Pitch bei $V_\infty = 9m/s$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$	36
18.	Momenten- und Leistungsbetrachtung mit Pitch bei $V_\infty = 9m/s$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$	36
19.	Geschwindigkeitsabnahme ohne Pitch bei $V_\infty = 5m/s$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$	55
20.	Winkelbetrachtung ohne Pitch bei $V_\infty = 5m/s$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$	56
21.	Momenten- und Leistungsbetrachtung ohne Pitch bei $V_\infty = 5m/s$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$	56
22.	Geschwindigkeitsabnahme mit Pitch bei $V_\infty = 5m/s$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$	57
23.	Winkelbetrachtung mit Pitch bei $V_\infty = 5m/s$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$	57
24.	Momenten- und Leistungsbetrachtung mit Pitch bei $V_\infty = 5m/s$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$	58

Tabellenverzeichnis

1.	Anfangsbedingungen für exemplarischen Auslegungsfall .	32
2.	Vergleich ohne und mit Pitch bei $\lambda = 2.0$ $V_\infty = 9m/s$ und $Re = 110e3$	37

Symbolverzeichnis

ν	kinetische Viskosität der Luft [m^2/s]
α	Anströmwinkel abhängig von den Geschwindigkeiten
α_A	Anstellwinkel von der Profilsehne S aus gesehen
α_P	Pitchwinkel von Profilsehne S nach Umfangsrichtung
$\Delta\Theta$	Abschnitt bzw. Teilkreisbogen des Rotationswinkels [deg, rad]
λ	Schnelllaufzahl [-]
ρ	Dichte der Luft [kg/m^3]
σ	Blattflächenüberdeckung [-]
Θ	Rotationswinkel (Azimutwinkel) [deg, rad]
a	Abnahmefaktor des Windes [-]
a_z	Zentripetalbeschleunigung [$1/s^2$]
c	Sehnenlänge des Profils [mm]
c_p	Leistungsbeiwert [-]
D	Durchmesser [m]
F_S	Schubkraft in Windrichtung (Impulstheorie) [N]
f_W	Funktion des Relativwindes

F_y	Reaktionskraft entgegen der Schubkraft [Blattelementtheorie [N]
G_g	Beschleunigungsverhältnis zur Erdbeschleunigung $g = 9,81m/s^2$
H	Höhe [m]
n	Drehzahl in [1/s]
N_B	Anzahl der Rotorblätter
P_T	Turbinen-Leistung [W]
P_W	Wind-Leistung [W]
R	VAWT Radius [m]
Re	Reynoldszahl
U	Umfangsgeschwindigkeit [m/s]
V	variable Windgeschwindigkeit [m/s]
V_∞	freie Windgeschwindigkeit/Ausgangswindgeschwindigkeit
W	relative Anströmgeschwindigkeit

Indexverzeichnis:

u,d An- und Abströmung (Up-, Downstream)

∞ Ausgangswert

l,d Auftrieb, Widerstand (Lift, Drag)

N,T Normal, Tangential

Q Momentenbezug

P Leistungsbezug

1. Einleitung

1.1. Motivation und Open Source Kriterien

Die Anforderungen an dezentrale Energieversorgungskonzepte erlangen im Rahmen der globalen Energiewende zunehmend an Bedeutung. Die erneuerbaren Energien sind in Anbetracht der Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit die langfristige Lösung. In den letzten Jahren ist Windenergie zu einem der Hauptenergieträger geworden. Der Windanteil der erneuerbaren Energien in Deutschland liegt bereits heute bei einem Drittel ¹ und weltweit sind es 2012 mehr als 280 GW installierte Leistung gewesen, Tendenz stark steigend (Abbildung 1).

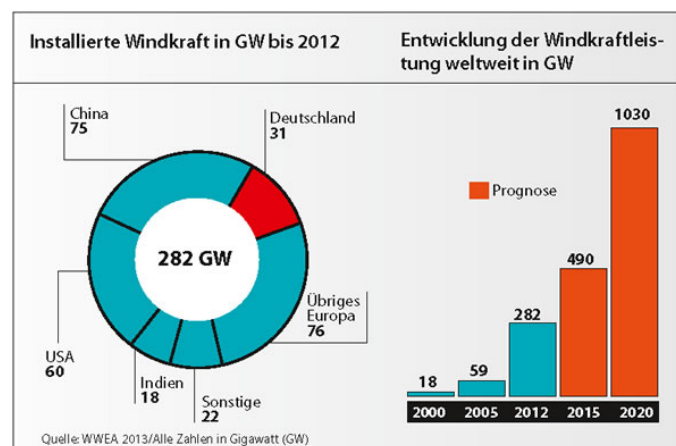


Abbildung 1: Windenergie Weltweit, WWEA-Report 2013

Vertikalachsige Windturbinen (VAWT) sind in dem Windenergieanteil bislang nicht stark vertreten, da sie zum einen für ihren schlechteren Wirkungsgrad bekannt sind und zum anderen ist ihr aerodynamisches

¹vgl. <http://de.statista.com/themen/609/windenergie/> Zugriff am 15.04.2015

Verhalten komplexer und weniger grundlegend erforscht als das von horizontal betriebenen Windkraftanlagen (HAWT). Die Verbesserung des Wirkungsgrades ist für den Betrieb vertikalachsiger Windturbinen mit einfacher Bauweise und zugleich unempfindlichen Standortbedingungen entscheidend, um als Pendant zu HAWTs eine sinnvolle Ergänzung bilden zu können.

Ein wesentlicher Nachteil von VAWTs ist die nicht optimale Anströmung der Flügelprofile in Abhängigkeit der sich ändernden Winkelbedingungen durch die Rotation. Die damit verbundenen Schwierigkeiten beim Anlaufen gehen einher mit schlechteren Leistungswerten als sie derzeit von HAWTs erreicht werden. Dabei zeigt eine theoretische Betrachtung der Strömungsverhältnisse, dass die doppelte Windenergieumwandlung der VAWTs einen idealen Leistungsbeiwert von $C_{P_{max}} = 0,64$ als Grenzwert hat [17]. Eine optimale Anstellung über den gesamten Rotationsverlauf mithilfe gezielter Blattwinkeleinstellung (Pitch) in Windrichtung zeigt neue Chancen auf.

Die vorliegende Arbeit soll einen Einstieg in die Berechnung aufzeigen und zugleich eine nach Open Source Kriterien transparente Weiterentwicklungsgrundlage für Pitchregelungen bei VAWTs liefern.

Der Begriff Open Source kommt ursprünglich aus dem Software Bereich und bedeutet, den Quellcode offen und zur Weiterentwicklung frei zu geben. Sinngemäß lässt sich das Offenlegen von Erkenntnissen auch auf den Hardware Bereich ausweiten². Es werden Erkenntnisse und Anleitungen öffentlich gemacht und eine Open Source Lizenz (vgl. [6] und [30]) regelt die Freigabe und Weitergabebedingungen. Der Vertrieb der

²<http://www.oshwa.org/definition/german/> Zugriff am 15.04.2015

Produkte und angebotene Dienstleistungen bleiben im regulären Wirtschaftsgeschehen etabliert.

Ideell gesehen lässt sich über eine transparente Entwicklung Zugang zu den notwendigen Methoden und Anleitungen weltweit etablieren, wodurch im Rahmen der Globalisierung dezentrale Wirtschaftsprozesse angestoßen werden. Gerade für Entwicklungsländer zeichnet sich hier ein besonderer Vorteil ab.

Wirtschaftlich gesehen können durch zusätzliche Kompetenzressourcen Kosten für die Entwicklung eingespart werden. Open Source Lizenzen sind zudem kostenfrei und die Weiterentwicklungen von außerhalb können von Wirtschaftsunternehmen für die Produktion genutzt werden, solange die Lizenz dies vorsieht.

Organisationen wie die Open Source Ecology ³ oder die Open It Agency aus Berlin ⁴ widmen sich der Unterstützung und Umsetzung von Open Source Methoden, Projekten und Unternehmen.

Um eine Entwicklung im Sinne der Anforderungen an die Offenlegung von Erkenntnissen weltweit etablieren und professionalisieren zu können, ist es erforderlich, dass insbesondere in der Wissenschaft nach diesen Anforderungen geforscht wird, soweit es die Rahmenbedingungen zulassen. Eine Verwendung von Open Source Werkzeugen ist eine wesentliche Voraussetzung, um die Methodik und Ergebnisse nachvollziehen und eine vollständige Reproduzierbarkeit gewährleisten zu können.

Diese Arbeit soll im Bereich der Berechnung und Verbesserung von vertikalachsigen Windkraftanlagen einen Beitrag dazu leisten.

³<http://opensourceecology.de/> Zugriff am 14.04.2015

⁴<http://openitagency.eu/> Zugriff am 14.04.2015

1.2. Aufgabenstellung und Gliederung

Die folgenden Kapitel geben einen Überblick über den Stand der Technik von VAWTs und zeigen aktuelle Ansätze zur Berechnung auf. Ausrichtung und Umfang dieser Arbeit konzentrieren sich auf eine zweidimensionale Herangehensweise, die ohne aufwendige Rechenkapazitäten oder numerische Lösungsverfahren auskommt.

Die Methoden aus der fortgeschrittenen Betrachtung von horizontalachsigen Windturbinen (HAWT), wie der Impulstheorie-Betrachtung nach Betz [10] und der Blattelementtheorie [10] in Kombination mit dem Multiple Streamtube Modell für vertikalachsige Windturbinen (VAWT) nach Strickland [28] werden zusammengeführt. Dabei stellt das optimierte Double Multiple Stream Tube Modell (DMST, DMS) nach Parachivoiu 1981 [21] den Ansatz einer zweidimensionalen Berechnungsmethode dar. Auf dieser Grundlage kann der Pitchwinkel in Abhängigkeit vom optimalen Anstellwinkel für eine mögliche Regelung bestimmt werden.

Auf Basis der Verbesserungen nach [20] und der CFD (Computergestützte Strömungssimulation) Untersuchung nach [1] soll diese Arbeit die Erkenntnisse zusammenfassen und aufzeigen, in wie weit sich durch dieses Verfahren eine Wirkungsgradverbesserung erzielen lässt.

Die Arbeit ist unterteilt in drei Hauptteile. Im Abschnitt 2 geht es um den Stand der aktuellen Technik und die bestehenden Berechnungsmethoden mit dem Schwerpunkt auf der zweidimensionalen Vorgehensweise nach dem DMST Modell. Abschnitt 3 gibt einen Überblick über die Methodik und die komplexen geometrischen Zusammenhänge. Im An-

schluss werden in Abschnitt 4 die Ergebnisse für einen exemplarischen Fall dargelegt und ausgewertet.

Zusätzlich werden am Ende in Abschnitt 5 die Erkenntnisse zusammengefasst und ein Ausblick formuliert, der aufzeigt, welche Potentiale und Ansatzpunkte sich für die Zukunft daraus entwickeln.

2. Stand der Technik

2.1. Vertikalachsige Windturbinen

Vertikale Windkraftanlagen wurden im Vergleich zu HAWTs erst sehr spät entwickelt, die modernen Modelle sind Anfang des 20. Jahrhunderts entstanden wobei es im wesentlichen zwei Arten gibt: Den Savonius-Rotor nach dem Widerstandsprinzip und den Darrieus-Rotor als Auftriebsläufer (Abbildung 2), die in den 1930er Jahren patentiert wurden [2], [16].

Der einfachen Bauweise steht ein komplexes Strömungsverhalten gegenüber, welches die eigentliche Auslegung und Berechnung erschwert. Für die Berechnungen wurden verschiedene Modelle und Methoden entwickelt, welche in Unterabschnitt 2.3 aufgeführt sind.

Einen wesentlichen Vorteil von VAWTs stellt die Unabhängigkeit von der Windrichtung dar. Eine aufwendige Nachführung entfällt, sodass sie sich dadurch besonders für urbanes Gelände, bzw. für Gegenden, in denen der Wind häufig seine Richtung ändert, eignen.

Es gibt viele experimentelle Variationen von VAWTs ⁵ und einige ambitionierte Projekte im Megawattbereich (vgl. [23] und [7]). Insbesondere in Kanada wird die Entwicklung vorangetrieben, dort befindet sich die weltweit höchste Anlage (110 Meter) „Eole C“(4.2 MW) [23].

⁵Einen umfassenden Überblick findet man unter http://www.buch-der-synergie.de/c_neu_html/c_08_08_windenergie_senkrechtachser.htm Zugriff am 30.03.2015

Eine abgewandelte Form des Darrieus-Rotors ist der H-Darrieus-Rotor (kurz H-Rotor), bei welchem die Flügelblätter über die gesamte Höhe den gleichen Abstand zur Rotationsachse haben und somit theoretisch höhere Wirkungsgrade erreichen kann [10]. Der einfachen Bauweise und weiteren Vorteilen von VAWTs steht eine ungünstige Auswirkung der Befestigungen und Verstrebungen auf die Aerodynamik gegenüber [10].

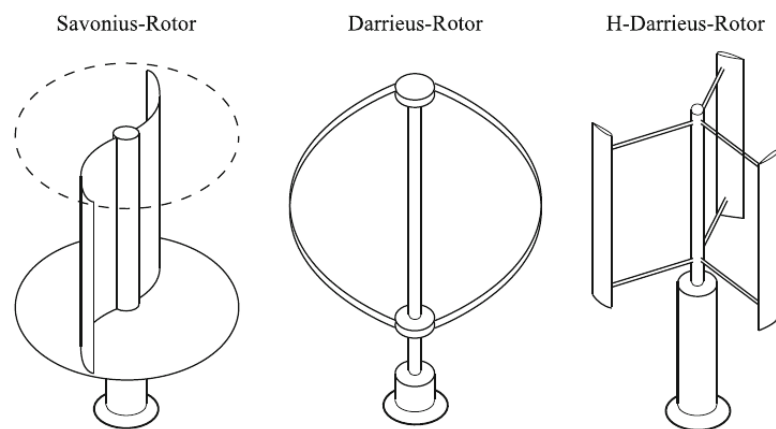


Abbildung 2: Verschiedene VAWT Typen. Aus [24, S. 12]

Generell gibt es VAWT Ausführungen mit unterschiedlicher Flügelblattzahl. Für einen beruhigten, schwingungsarmen Lauf empfiehlt sich eine Variante mit ungerader Blattzahl, üblicherweise $N_B = 3$.

Eine Besonderheit bei der Aerodynamik von VAWTs ist die doppelte Durchströmung.

Durch die Berücksichtigung der An- und Abströmung kann der Wirkungsgrad im idealen Fall auf $16/25$ gesteigert werden, im Vergleich zu den $16/27$ bei einer Scheibe nach Newman [17]. Allerdings konnte ein vergleichbarer Wert bisher nicht experimentell nachgewiesen werden.

2.2. H-Darrieus Rotoren und Pitchregelungen

Der H-Rotor hat für die Berechnung weniger komplexe Strömungsverhältnisse, da hier eine Variation der Normalkraftausrichtung in z-Richtung (Höhenrichtung) entfällt. Dadurch eignet sich das Modell besonders für eine zweidimensionale Berechnung und ist für die Pitchregelung am besten geeignet. Der über die Höhe konstante Radius reduziert den Rechenaufwand erheblich. Dennoch bleiben sehr viele Faktoren neben dem Rotationswinkel zu beachten.

Ein sehr großer Nachteil von VAWT Auftriebsläufern ist die schlechte Eignung für das selbst Anlaufen, so dass zunächst der Generator im Motorbetrieb die nötige Drehzahl einleitet. Eine Pitchregelung könnte hier neue Wege aufzeigen und ein selbständiges Anlaufen ermöglichen.

Als Ergänzung zu HAWTs kommen Vertikalachser bereits heute zum Einsatz. Kommerzielle Lösungen sind auch im Bereich der Pitch-geregelten Anlagen in Serie. Die Ansätze sind jedoch nicht Open Source zugänglich und zielen primär auf die rotatorischen Effekte ab [8].

Es gibt für den variablen Pitch bereits vielversprechende Ansätze, wie Paraschivoiu 2009 zeigt [22], bzw. bereits 1995 entwickelt [3]. Jedoch sind die verwendeten Berechnungscodes nicht öffentlich verfügbar [13]. Im Sinne der eingangs erwähnten Open Source Kriterien bedarf es einer eigens dafür vorgesehenen Version.

Für eine Berücksichtigung der sich ändernden Windgeschwindigkeit bedarf es der Auswertung multipler Iterationsverfahren, die ein numeri-

sches Verfahren erfordern, welches nicht Teil des vorliegenden Textes ist.

Im Gegensatz zu HAWTs reicht es nicht, das optimale Verhältnis von Auftrieb und Widerstand anzustreben. Durch die Rotation um die vertikale Achse kommt es zusätzlich zu einer Verdrehung der Resultierenden Kräfte, wodurch es trotz optimalem Anstellwinkel zu negativen Tangentialkräften kommen kann. Diese gilt es durch den Pitch zu umgehen. Weitere Ausführungen dazu im Abschnitt 4.

2.3. Berechnungsverfahren und das Double Multiple Streamtube Modell

Neben analytischen Verfahren und den Methoden der Wirbelbetrachtung (Vortex-Model) gehört der Streamtube Ansatz zu den methodisch effizientesten Vorgehensweisen. Hier wird die VAWT zweidimensional betrachtet und zugleich ist ein wesentlich geringerer Aufwand an Rechenkapazität notwendig als bei CFD Methoden. (vgl. [18])

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt bei der Betrachtung von H-Darrieus Rotoren und ihrem Potential in Richtung der Pitchregelung. Die entwickelte Berechnungsmethode für den Pitch bezieht sich ausschließlich auf diesen Anlagentyp, lässt sich jedoch ggf. an zusätzliche Winkelbedingungen anpassen, welches nicht Teil dieser Ausarbeitung ist.

Das Double Multiple Stream Tube Modell [21] ist eine Weiterentwicklung der elementaren Impulstheorie nach Betz [10, S. 80 ff.], der Blattelementtheorie [10, S. 92 ff.], sowie der Verbesserung des MST von [28].

Das Modell stellt den Zusammenhang zwischen den wirkenden Kräften in Windrichtung und ihrer Verteilung über den Rotationskörper dar. Die Betrachtung erfolgt zweidimensional und ist ohne hohe Berechnungsressourcen durchführbar.

Die Annahme eines Windenergiewandlers als Scheibe lässt sich nicht identisch mit dem Vorgehen bei HAWTs anwenden, da es sich bei VAWTs um einen Rotationskörper in Form eines Zylinders handelt.

Hier kommt der Ansatz nach dem Ingenieur Paraschivoiu aus dem Jahr 1981 zum Tragen. Dieser betrachtet die Durchströmung der VAWT in zwei Schritten. Im ersten Schritt berücksichtigt die Methode die beiden (Double) Bereiche in denen die Windturbine Leistung abgreifen kann. Im zweiten Schritt wird das Verhalten des Windes aus der Draufsicht und die Verteilung über den Umfang berücksichtigt. Hierzu wird der Rotationsbereich als Funktion des Rotationswinkels in mehrere (Multiple) Strömungsröhren unterteilt.

Genaue Erläuterungen dazu befinden sich unter Abschnitt 3.

3. Methodisches Vorgehen

3.1. Konstruktive und operative Prozessgrößen

3.1.1. Anfangsbedingungen und Konventionen

Der Umfang der hier betrachteten Berechnungsmethode erfordert vereinfachende Annahmen. Nach der bereits erwähnten DMST Methode werden Anfangsbedingungen getroffen.

Annahmen für die Energiewandler-Scheiben Betrachtung:

- Es herrscht Umgebungsdruck zu Beginn und Ende jeder Strömungsröhre.
- Die Energiewandler-Scheiben werden als stillstehend betrachtet.
- Keine Wirbelbildung im Nachlauf wird berücksichtigt.
- Die Luft wird als inkompressibel angenommen,
- und es liegt eine stationäre und reibungsfreie Strömung vor.
- Die Geschwindigkeit direkt an der Scheibe ist damit konstant.
- Eine infinite Anzahl Flügelblätter wird angenommen (Komplettüberdeckung).
- Es herrscht ein gleichmäßig über die Scheibe verteilter Druck, bzw. Schub.

Annahmen für die Blattelementtheorie:

- Die H-Rotorblätter werden als ideal gerade über die gesamte Höhe angenommen.

- Jedes Flügelblatt bildet dadurch ein Blattelement und muss nicht differenziell betrachtet werden.
- Die Reynoldszahl ist konstant (in Abhängigkeit von der Anfangswindgeschwindigkeit).
- Die Anzahl der Rotorblätter ist zu berücksichtigen, die Betrachtung erfolgt je Rotorblatt.
- Die Anstellung erfolgt im Sinusverlauf abwechselnd in positive und negative Winkelrichtung (entsprechend ergeben sich die geometrischen Herleitungen der verwendeten Formeln).

Die Auswahl der Auslegungswindgeschwindigkeit sollte sich nach der Durchschnittswindgeschwindigkeit richten, jedoch auch die in Abbildung 3 dargestellte Verteilung und die Auswirkung auf die Leistung berücksichtigen.

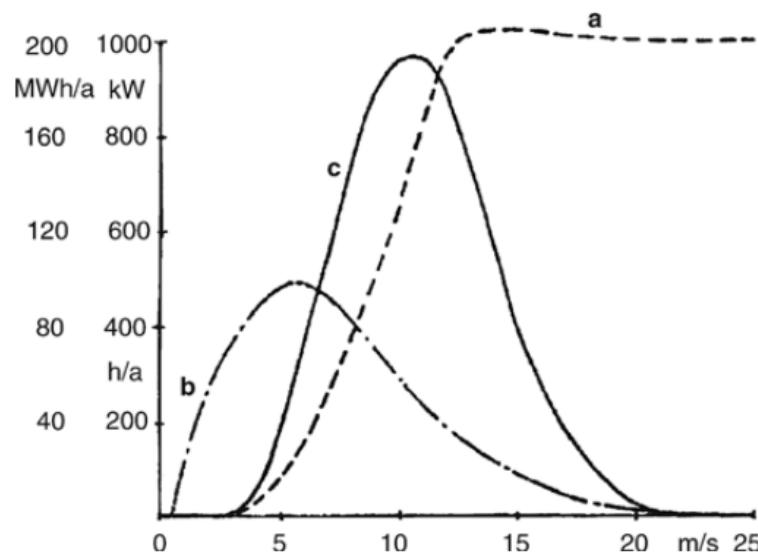


Abbildung 3: Verhaltensprinzip einer Windkraftanlage in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit nach [16] a) Leistung b) Häufigkeit der Windgeschwindigkeiten c) gewonnene Jahres-Arbeit

Aus der geometrischen Herleitung der Winkelzusammenhänge, dargestellt in ??, ergibt sich für den Pitchwinkel die Hauptgleichung (1) unter der Annahme, dass $U = \lambda \cdot V_\infty = \text{const}$, sowie der optimalen Anstellung $\alpha_A = \alpha_{A_{opt}} = \text{const}$ als Ziel und der Abhängigkeit $W = f_W(a_{u,d}, \Theta)$. Dabei ist f_W die Funktion des Windes über den gesamten Rotationsverlauf eines Flügelprofils. Ausführungen dazu sind in den Abschnitten 3.2 und 3.3 zu finden.

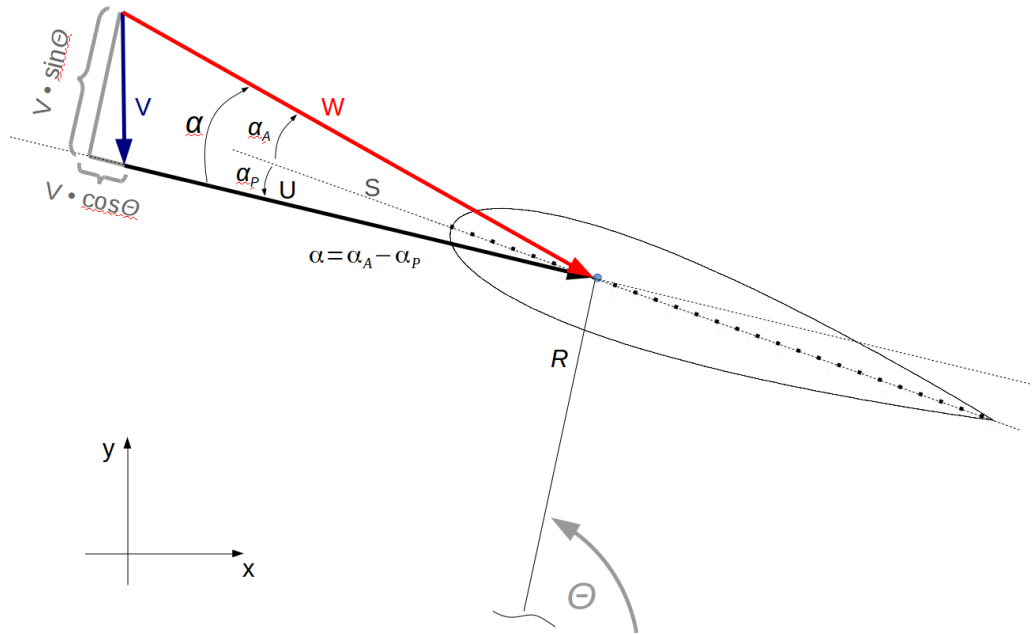


Abbildung 4: Vektorielle Geschwindigkeits- und Winkelbetrachtung am Flügelprofil

$$\alpha_P = \alpha_{A_{opt}} - \alpha(f_W) \quad (1)$$

Neben den bestimmenden Inputvariablen und den geometrischen Größen der Anlage gibt es Prozessgrößen, die sich in konstruktive und operative Variablen unterteilen lassen und teilweise Zwischenergebnisse für den resultierenden Pitchwinkel liefern.

3.1.2. Geometrische Dimensionierung

Bei der Auslegung von VAWTs wird zunächst überschlägig die Dimensionierung anhand der erwünschten Leistung, bzw. bei Maximalleistung anhand des zur Verfügung stehenden Standortes bestimmt. Hierzu wird ein Leistungsbeiwert angenommen, der bei VAWTs ohne Pitch, respektive Darrieus Rotoren zwischen $c_p = 0,3 - 0,4$ liegt [10].

Bei vorgegebener zu erreichender Turbinen-Leistung ergibt sich aus der maximalen Wind-Leistung (2) und Gleichung (3) die Turbinen-Projektionsfläche, die Angriffsfläche des Windes. Bei vorgegebener Fläche ergibt sich die dem Wind zu entnehmende Leistung. Der Durchmesser D und die Höhe H sind dementsprechend wählbar, unter Berücksichtigung des in Abbildung 5 dargestellten Effektes des Seitenverhältnisses auf die Effizienz. Zugleich sollte aufgrund konstruktiver und schwingungstechnischer Aspekte ein zu flaches Seitenverhältnis vermieden werden. Die Optimierung hierzu ist nicht Teil dieser Arbeit.

$$P_W = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_\infty^3 \quad (2)$$

$$P_T = c_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_\infty^3 \quad (3)$$

Eine geeignete Wahl des Blattprofils erfolgt ebenfalls an dieser Stelle und kann ggf. auf Grundlage der Schnelllaufzahl λ und der abhängig vom variablen Wind V und Profilsehnenlänge c nach (4) zu berechnenden Reynoldszahl Re angepasst werden.

Wobei für die relative Anströmgeschwindigkeit W , abhängig von Wind

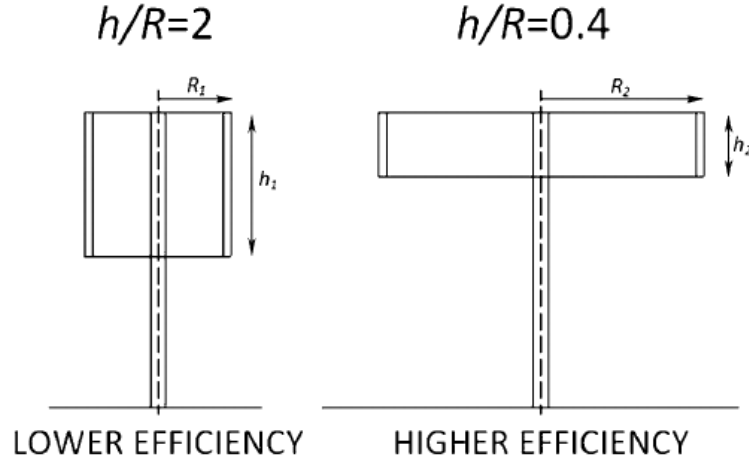


Abbildung 5: Windturbinen mit unterschiedlichen Seitenverhältnissen. Aus [4]

und Umdrehung, Gleichung (5) gilt, dargestellt in Abbildung 4.
 $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} [m^2/s]$ als kinetische Viskosität der Luft bei $20^\circ C$.

$$Re = \frac{c \cdot W}{\nu} \quad (4)$$

$$W = \sqrt{(V \cdot \sin(\Theta))^2 + (V \cdot \cos(\Theta) + U)^2} \quad (5)$$

Die Entscheidung für ein Flügelblatt-Profil ist damit abhängig von den Anforderungen an die Anströmung. Die Sehnenlänge ist ausschlaggebend für die Reynolds-Zahl und das Auftreten von Stalleffekten (Strömungsabriss) bei sehr kleinen Schnelllaufzahlen. Um eine gute Vergleichbarkeit mit der vorhandenen Literatur zu schaffen, wurde in dieser Arbeit ein NACA0018 verwendet. Es ist symmetrisch und bereits in verschiedenen Anwendungen getestet und empfohlen worden [20], [4], [14].

Eine gute Übersicht über die Eigenschaften des Profiltyps gibt für kleine Reynolds-Zahlen [27] und für hohe Reynolds-Zahlen [9]. Für die Berechnung wurden die Werte aus [11] übernommen ⁶.

3.1.3. Schnelllaufzahl und Beschleunigungskräfte

In Abbildung 4 ist die Zusammensetzung der relativen Anströmgeschwindigkeit dargestellt, wobei die Umfangsgeschwindigkeit U sich aus der Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\pi \cdot n$ und dem Radius $R = D/2$ der Windturbine zusammensetzt und somit (6) für die Schnelllaufzahl gilt.

$$\lambda = \frac{U}{V} = \frac{\omega \cdot R}{V} \quad (6)$$

Ist für die Schnelllaufzahl in der Literatur kein optimaler Wert zu finden, so lässt sich diese über die Annahme einer kritischen Drehzahl ermitteln [15]. Diese verursacht Beschleunigungskräfte von vielfacher Gewichtskraft des Flügels und ist entscheidend für die Belastung auf die Flügelblattbefestigung. Wie Abbildung 6 zeigt, ist die Schnelllaufzahl abhängig von der Blattflächenüberdeckung σ . Diese ist unterschiedlich definiert, da hier die von den Flügelblättern überstrichene Fläche entweder mit der Mantelfläche, der Projektionsfläche oder der halben Projektionsfläche (zweifaches überdecken pro Umdrehung) ins Verhältnis gesetzt wird. $\sigma = \frac{N_B \cdot c}{2\pi R}$, $\sigma = \frac{N_B \cdot c}{2R}$ oder $\sigma = \frac{N_B \cdot c}{R}$. Ein zweifaches durchschreiten der Mantelfläche wäre ebenfalls denkbar und ergibt $\sigma = \frac{N_B \cdot c}{\pi R}$.

⁶Für eigene Vergleichsrechnungen ist diese Quelle empfehlenswert, für genauere Daten insbesondere bei kleinen Reynoldszahlen ist an dieser Stelle auf das komplexere Programm XFOIL zu verweisen, in Kombination mit der grafischen Oberfläche xfr5.

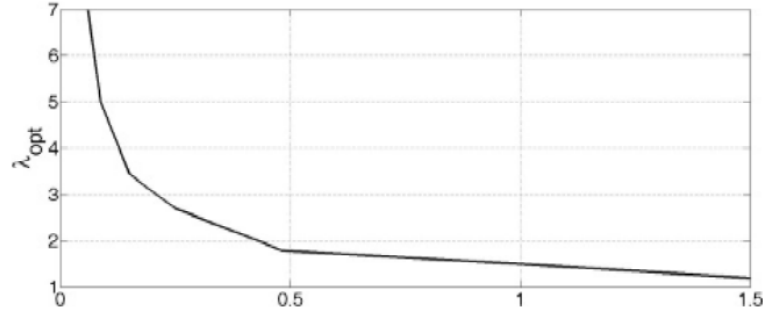


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen Blattflächenüberdeckung des Rotors und der optimalen Schnelllaufzahl bei VAWTs. Aus [29]

Daraus lässt sich in der Abbildung 6 ein Bereich für Validierungszwecke definieren.

Das Ermitteln der Schnelllaufzahl hängt ab von der maximalen Drehzahl, die die Windkraftanlage verträgt. Hierzu sollte eine Drehzahl angenommen werden und es wird die resultierende Zentripetalbeschleunigung a_z entlang dem Radius in Richtung der vertikalen Drehachse mit der Erdbeschleunigung g verglichen. Je nach Größe der Windkraftanlage und dementsprechendem Gewicht der Bauteile können die resultierenden Kräfte die Lebensdauer der Anlage verringern oder zur Zerstörung führen. Dabei ist für die Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\pi \cdot n$ eine Drehzahl von $n = \frac{n_{min}}{60s/min}$ zu berücksichtigen.

$$a_z = \omega^2 \cdot R = (2\pi n)^2 \cdot R \quad (7)$$

Zum Abschätzen der wirkenden Kräfte kann dieses Beschleunigungsverhältnis mit dem Gewicht des Flügelprofils verglichen werden. Aluminiumprofile des in dieser Arbeit verwendeten Typs NACA0018 haben ein

Gewicht von 3kg pro Meter Länge⁷.

$$G_g = \frac{a_z}{g} = \frac{a_z}{9,81m/s^2} \quad (8)$$

Bei verfügbaren Daten sollte jedoch als Auslegungsschnelllaufzahl immer nach dem maximalen Leistungsbeiwert gegangen werden, um die besten Ergebnisse zu erzielen. Typische Schnelllaufzahlen liegen bei VAWTs, je nach Flügelblattzahl und Blattflächenüberdeckung, zwischen $\lambda = 2 - 6$ (vgl. [2], [4] und [20]).

3.2. Auswahl der freien Variablen

Sowohl die Umfangsgeschwindigkeit als auch die geometrischen Größen und Dimensionen der VAWT und auch die Windgeschwindigkeit für den jeweiligen Iterationsprozess werden festgelegt, einhergehend mit einer konstanten Auslegungsschnelllaufzahl. Als freie Variablen bleiben die variable Windgeschwindigkeit V während der Durchströmung und der sich periodisch wiederholende Rotationswinkel Θ .

Da es sich bei dem DMST um ein iteratives Berechnungsverfahren handelt, kann je Berechnungszyklus nur eine freie Windgeschwindigkeit V_∞ betrachtet werden. Das erhöht den Rechenaufwand, da die Anfangswindgeschwindigkeit bezogen auf die Windrichtung sowohl axial als auch über den Durchmesser variiert. In Abschnitt 4 soll ein exemplarischer Fall betrachtet werden.

⁷vgl. z.B. <http://www.vertikal-windkraft-anlagen.de/produkte/h-rotor-rotorprofil-airfoilblade-symmetrisch-naca0018/> Zugriff am 14.04.2015

3.3. Vorgehen nach dem DMST Modell

Die iterative Vorgehensweise nach der Blattelement-Impuls-Theorie mit dem DMST erfolgt in den Betrachtungsschritten: Strömungsröhre nach Betz (Kontinuitätsgleichung), Doppelte Strömungsröhre nach Paraschivoiu (zwei Energiewandler-Scheiben, siehe 7), Multiple Streamtube Modell nach [28] (siehe 8).

Darüber erhält man eine Schubkraft in Abhängigkeit der Abnahmefaktoren für Anströmung (upstream) der vorderen Zylinderhälfte und Abströmung (downstream) in der hinteren Zylinderhälfte zweidimensional betrachtet, wie in Abbildung 9 zu sehen. Für jede Strömungsröhre erfolgen je zwei Iterationen.

Dann folgt die Blattelementtheorie, welche die Kräfte an einem Flügelprofil betrachtet (Abbildung 11).

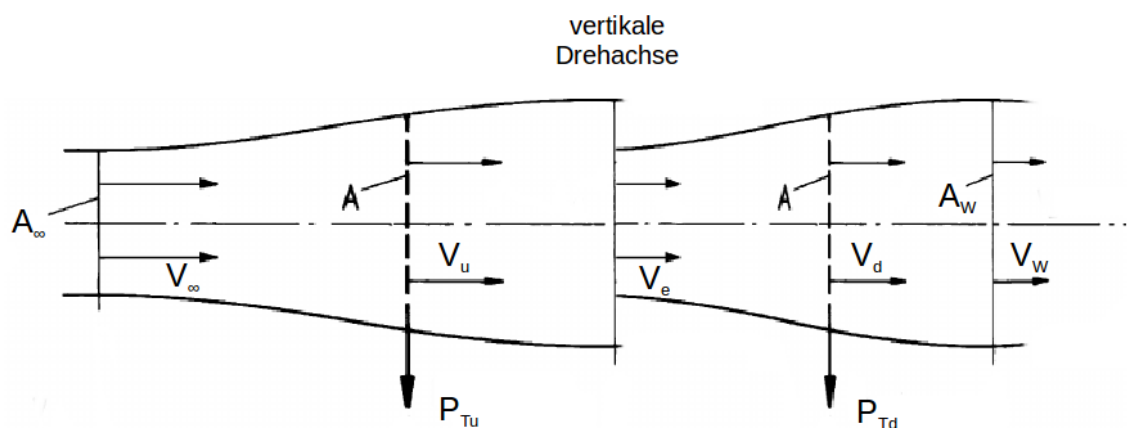


Abbildung 7: Doppelte Strömungsröhre mit resultierender Leistungsabnahme, je für die an- und die abströmende Seite der VAWT.

Aus Sicht der Strömungsröhre wirken durch die Leistungsentnahme an jeder Windenergiewandler-Scheibe zwei Kräfte, die sich nach dem Newton'schen Gesetz ausgleichen (*actio gleich reactio*). Dem Schub F_S aus der Impulstheorie wirkt eine Kraft F_y entgegen, die anteilig aus den Tangential- und Normalkräften über die Blattelementtheorie ermittelt wird [12], unter Berücksichtigung der Flügelblattzahl. Letzteres ist zu beachten, da jeder Flügel innerhalb einer Umdrehung die Strömungsröhre passiert. Beide Kräfte sind von dem geschwindigkeitsmindernden Abnahmefaktor $a_{u,d}$ abhängig und bilden somit die Grundlage für den iterativen Prozess (9).

$$F_S(a_{u,d}) = -F_y(a_{u,d}) \quad (9)$$

Impulstheorie:

Der Massenstrom der Luft $\dot{m} = \rho \cdot A \cdot V$ ist aufgrund des Kontinuitätsgesetzes konstant und mit der sich durch die Leistungsentnahme verlangsamenden Geschwindigkeit weitet sich die Durchtrittsfläche, wie in Abbildung 7 zu erkennen ist. Die erzeugte Kraft lässt sich über die Druckdifferenz im Bezug auf die Durchtrittsfläche bestimmen. Nach der Bernoullischen Druckgleichung unter den zu Beginn getroffenen Annahmen lässt sich der Zusammenhang nach den Gleichungen (13), (14) und (10) herleiten.

$$F_S = (p^+ - p^-) \cdot A = \dot{m} \cdot (\Delta V) \quad (10)$$

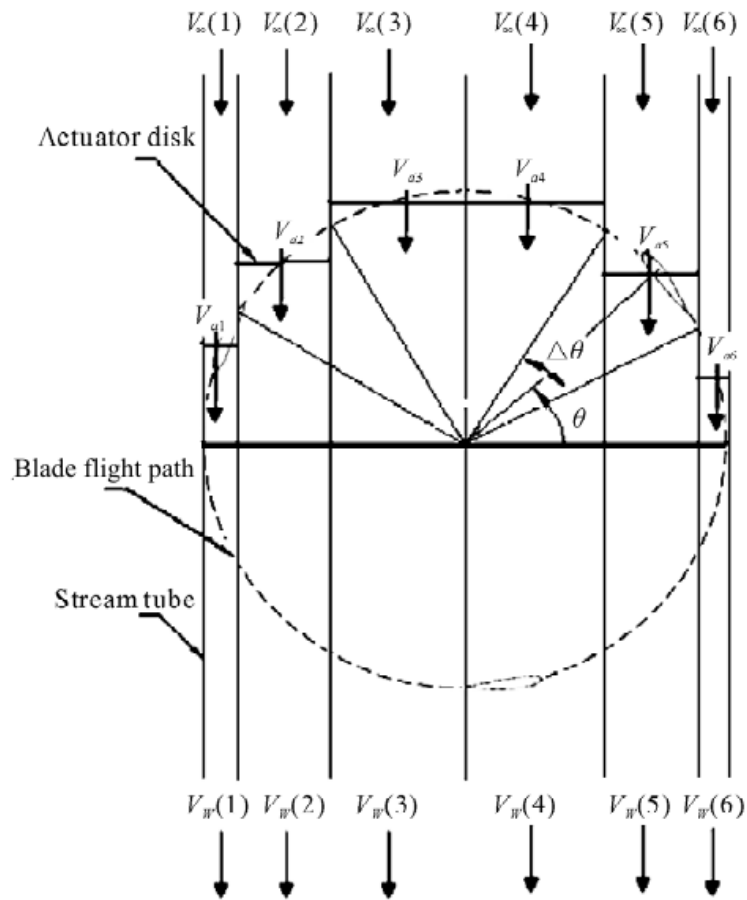


Abbildung 8: Prinzip des Multiple Stream Tube Modells mit 6 Strömungsröhren mit einheitlicher $\Delta\theta$ Verteilung. Aus [1]

Da die Berechnung insgesamt aus zwei iterativen Prozessen besteht, gibt es für An- und Abströmung je einen Formelsatz.

$$F_{S_u} = (\rho A V_u) \cdot (V_\infty - V_e) \quad (11)$$

$$F_{S_d} = (\rho A V_d) \cdot (V_e - V_w) \quad (12)$$

Im Folgenden wird die Herleitung exemplarisch für die Anströmseite ausgeführt und kann analog auf die Abströmungsseite übertragen werden

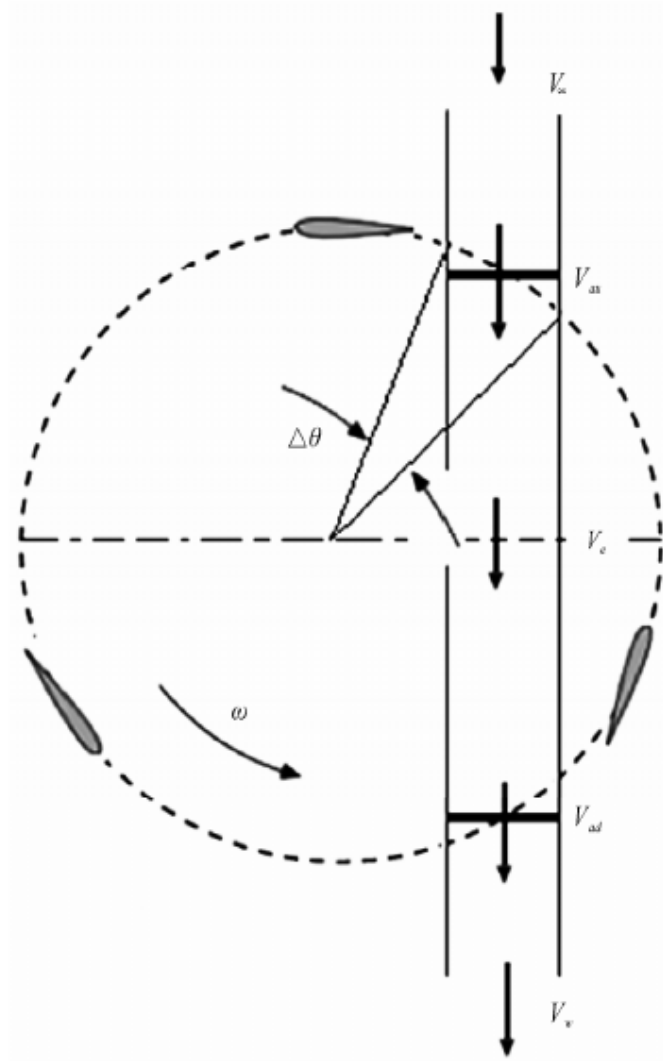


Abbildung 9: DMST mit Windenergiewandler-Scheiben und mit verzögerten An- und Abströmungsgeschwindigkeiten für eine Strömungsröhre. Aus [1]

(zweite Strömungsröhre, siehe Abbildung 7).

Bernoulli

$$\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 + p_\infty = \frac{1}{2}\rho V_u^2 + p_u^+ \quad (13)$$

$$\frac{1}{2}\rho V_u^2 + p_u^- = \frac{1}{2}\rho V_e^2 + p_\infty \quad (14)$$

Daraus folgt für F_S

$$F_{S_u} = \frac{1}{2} \rho A \cdot (V_\infty^2 - V_e^2) \quad (15)$$

Es folgt für die Geschwindigkeit im Ausgleichsbereich V_e der Rotorachse (engl. equilibrium):

$$V_u = \frac{1}{2}(V_\infty + V_e) \rightarrow V_e = 2V_u - V_\infty \quad (16)$$

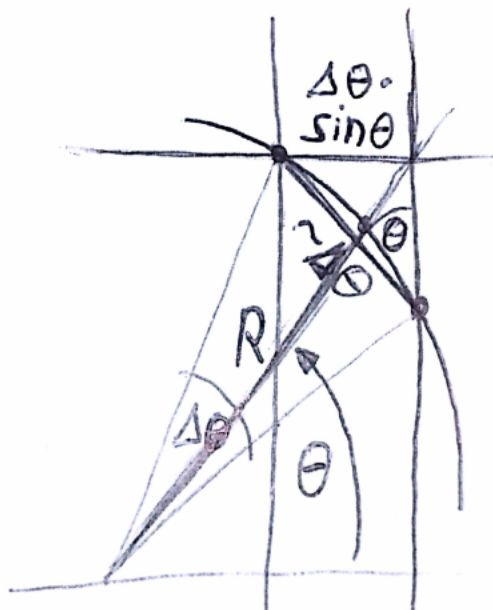


Abbildung 10: Winkelprojektion der Anströmfläche für kleine Winkel $\Delta\Theta$ als Strecke

$$A = HR\Delta\Theta \sin \Theta \quad (17)$$

Die Definition der Fläche ergibt sich aus der geometrischen Betrachtung in Abbildung 10.

$$F_{S_u} = \rho \cdot H \cdot R \cdot \Delta\Theta \sin \Theta \cdot 2V_u(V_\infty - V_u) \quad (18)$$

Blattelementtheorie:

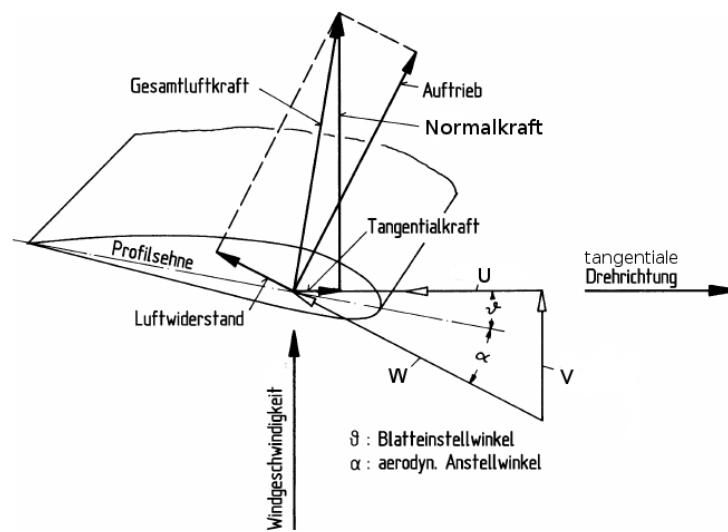


Abbildung 11: Anströmverhältnisse und Luftkräfte am Profilquerschnitt eines Blattelements. Nach [10]. Wobei $\theta = \alpha_P$ und $\alpha = \alpha_A$!

Die Kräfte am Blattelement ergeben sich aus den Auftriebs- (Lift) und Widerstands- (Drag) Beiwerten. Die resultierenden Normal- und Tangentialkräfte ergeben je eine Komponente in y-Richtung.

$$-F_{y_{Blatt}} = F_N \sin \Theta - F_T \cos \Theta \quad (19)$$

Die Normal- und Tangentialbeiwerte können wie in (20) und (21) beschrieben bestimmt werden.

$$C_N = C_l \cdot \cos \alpha + C_d \cdot \sin \alpha = \frac{F_N}{(1/2)\rho W^2 A} \quad (20)$$

$$C_T = C_l \cdot \sin \alpha - C_d \cdot \cos \alpha = \frac{F_T}{(1/2)\rho W^2 A} \quad (21)$$

Unter der Annahme, dass die Kraftverteilung gleichmäßig über die gesamte Höhe des geraden Rotorblattes erfolgt, kann das gesamte Flügelblatt als Blattelement betrachtet werden, wodurch $A = c \cdot H$ ist. Daraus folgt mit (20) und (21) für die dem Schub entgegen gerichtete Kraft:

$$-F_{y_{Blatt}} = \frac{1}{2}\rho W^2 c H \cdot [C_N \sin \Theta - C_T \cos \Theta] \quad (22)$$

Betrachtet man nun die Gesamtkraft aus der Blattelementtheorie für eine Strömungsröhre, so ergibt sich mit der Anzahl der Flügelblätter und dem Bogenmaßabschnitt der Strömungsröhre $\Delta\Theta/2\pi$ die (23). Eine Herleitung hierzu findet sich in der Literatur unter [12] in Kombination mit [1].

$$-F_y = \frac{1}{2}\rho W^2 c H \cdot \frac{N_B \Delta\Theta}{2\pi} [C_N \sin \Theta - C_T \cos \Theta] \quad (23)$$

Unter Einführung des Abnahmefaktors $a_{u,d}$ für die An- und Abströmung ergibt sich jeweils folgende Beziehung:

$$a_u = \frac{V_u}{V_\infty} \quad (24)$$

$$a_d = \frac{V_d}{V_e} \quad (25)$$

Daraus folgt aus Gleichung (5) die vereinfachte Form, sowie für den Anströmwinkel der Zusammenhang in Gleichung (28).

$$W_u = V_\infty \cdot \sqrt{(a_u \cdot \sin(\Theta))^2 + (a_u \cdot \cos(\Theta) + \lambda)^2} \quad (26)$$

$$W_d = V_e \cdot \sqrt{(a_d \cdot \sin(\Theta))^2 + (a_d \cdot \cos(\Theta) + \lambda)^2} \quad (27)$$

Wie in Abbildung 4 zu erkennen, lässt sich auf diese Weise auch der Anströmwinkel über den arctan berechnen.

$$\alpha = \arctan \left(\frac{a_{u,d} \cdot \sin \Theta}{a_{u,d} \cdot \cos \Theta + \lambda} \right) \quad (28)$$

Für den Iterationsverlauf ergeben sich nach (9) für jede Strömungsröhre etwa 20 Iterationsschritte (mindestens 10 sind erforderlich), je einmal für die An- und einmal für die Abströmungsseite der Windturbine. Exemplarisch folgt aus (18) und (23) die Herleitung der Iterationsgleichung für den Upstream und kann analog auf den Downstream übertragen werden. Schub und negative Blattelementkräfte in y-Richtung werden gleichgesetzt und zusammengefasst.

$$R|\sin \Theta|2V_u(V_\infty - V_u) = W_u^2 \cdot c \cdot \frac{N_B}{4\pi} \cdot [C_N \sin \Theta - C_T \cos \Theta] \quad (29)$$

$$a_u(1 - a_u) = a_u^2 \cdot \left(\frac{W_u}{V_u}\right)^2 \cdot \frac{N_B \cdot c}{8\pi R|\sin \Theta|} \cdot [C_N \sin \Theta - C_T \cos \Theta] \quad (30)$$

Erweitert man beide Seiten um $1/V_\infty^2$ und den rechten Teil von (29) mit a_u^2 aus (24), erhält man zusammengefasst Formel (30). Durch Einführen der G-Funktion (vgl. [12]) lässt sich daraus die Iterationsgleichung umformen. Hierbei ist zu beachten, dass der Anströmwinkel (im Fall ohne Pitch gleich dem Anstellwinkel) im Sinusverlauf sein Vorzeichen ändert und die Kräfte sich umkehren, so dass mit $|\sin \Theta|$ gerechnet werden muss. Da auch beim Pitch bewusst das Vorzeichen des optimalen Anstellwinkels im Sinusverlauf geändert wird (näheres dazu in Unterabschnitt 3.4), gilt diese Konvention für beide Fälle. Im Anschluss erfolgt das Substituieren der Anfangsgeschwindigkeit durch den entsprechenden Abnahmefaktor $a_u = V_u/V_\infty$ wie in [12], [1] und [28] ebenfalls hergeleitet wurde. Es ergibt sich Gleichung (32).

$$G_{f_u}(a_u) = \left(\frac{W_u}{V_u}\right)^2 \cdot \frac{N_B \cdot c}{8\pi R|\sin \Theta|} \cdot [C_N \sin \Theta - C_T \cos \Theta] \quad (31)$$

Iterationsgleichung

$$\frac{(1 - a_u)}{a_u} = G_{f_u}(a_u) \rightarrow \mathbf{a_u} = \frac{1}{\mathbf{G_{f_u}}(\mathbf{a_u}) + 1} \quad (32)$$

Winkelberechnung:

Der optimale Anstellwinkel hängt von empirischen Daten je Flügelprofil ab. Er ergibt sich aus den Auftriebs- und Widerstandsbeiwerten für das entsprechende Profil bei einer ausgewählten Reynoldszahl.

Um die Reynoldszahl überschlägig zu bestimmen und für den Berechnungsprozess festzulegen, kann mit dem Tool von Caleb Engineering [5] vorgegangen werden. Für die ausgewählte Schnelllaufzahl und eine Anlaufwindgeschwindigkeit V_{min} über den ungepitchten Verlauf der Winkel, bzw. der Relativgeschwindigkeiten kann mithilfe Gleichung (4) die mittlere Reynoldszahl bestimmt werden.

Anschließend kann mit JavaFoil [11] online auf Profil-Daten zugegriffen werden, bzw. lassen sich diese auch über die Software XFOIL bestimmen. Zu überschlägigen Vergleichsrechnungen wird erstere Quelle empfohlen. Sie wurde für diese Arbeit verwendet.

Die Werte werden in 2° Abständen in die dafür vorgesehene Tabelle eingefügt und eine Polynomfunktion 3ten Grades wird aus den Werten generiert, um im DMST Verfahren beliebige Auftriebs- und Widerstandswerte berechnen zu können[15].

Nachdem alle festen Werte ausgewählt wurden (der optimale Anstellwinkel wird zuletzt über die maximale Gleitzahl bestimmt), beginnt der doppelte Iterationsprozess für eine definierte Anzahl Strömungsröhren m . Daraus folgt die doppelte Anzahl Winkelsegmente $2m$.

3.4. Vergleichsrechnung ohne und mit Pitchregelung

Der Vergleich der Unterschiede ohne und mit Pitch erfolgt über die Momenten- und Leistungskennlinie einen Flügels über den Rotationswinkel. Des Weiteren lässt sich der Verlauf des Tangentialbeiwertes bestimmen, der in Abhängigkeit vom Anströmwinkel Aufschluss über die Leistungsfähigkeit der Windturbine gibt.

Ein Gesamt-Momenten- und Leistungskennwert der Anlage können ermittelt werden. Beide Werte hängen unmittelbar zusammen und im Folgenden sind die Gleichungen aufgeführt. Nachvollziehbar aus [1].

$$Q = N_B \cdot \sum_{i=1}^{2m} \left(\frac{(1/2)\rho W^2 H c C_T \cdot R}{2m} \right) \quad (33)$$

$$C_{Q_{ges}} = \frac{Q}{(1/2)\rho V^2 D H \cdot R} \quad (34)$$

Die Einzelwerte je Winkelposition und Flügelblatt (für den Kurvenverlauf) ergeben sich entsprechend ohne Summenbildung und Blattzahl. Für den Gesamt-Leistungswert gilt:

$$C_{P_{ges}} = \lambda \cdot C_{Q_{ges}} \quad (35)$$

4. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Alle Berechnungen erfolgen auf der Grundlage von den nach [15] erstellten Kalkulations-Tabellen. Das DMST Modell wurde um die in Unterabschnitt 3.3 beschriebene Vorgehensweise ausgebaut und vollständig neu aufgesetzt. Die Vorgehensweise wurde um den wechselnden Pitchwinkel ergänzt.

4.1. Anfangsbedingungen und Kriterien

Zunächst ist eine Anfangsbetrachtung hilfreich um zu verstehen, warum der optimale Anstellwinkel wechseln muss.

Hierzu wurde die Situation in einer GeoGebra-Animation (Software) getestet und die Winkelverhältnisse geprüft. Dabei ließ sich feststellen, dass der Tangentialanteil der Resultierenden Kraft aus Auftriebs- und Widerstandskraft zeitweise negative Werte annimmt. Die besten Ergebnisse lassen sich erzielen, wenn der Profil-Aufhängepunkt, bzw. der optimale Anstellwinkel mit der sinusabhängigen Vorzeichenkonvention gedreht wird. So werden im hinteren Bereich negative Anstellwinkel und im vorderen positive Anstellwinkel dominieren um einen optimalen Vortrieb zu generieren. Der dadurch entstehende Sprung (siehe Abbildung 12) muss in der Praxis konstruktiv sanfter gelöst werden.

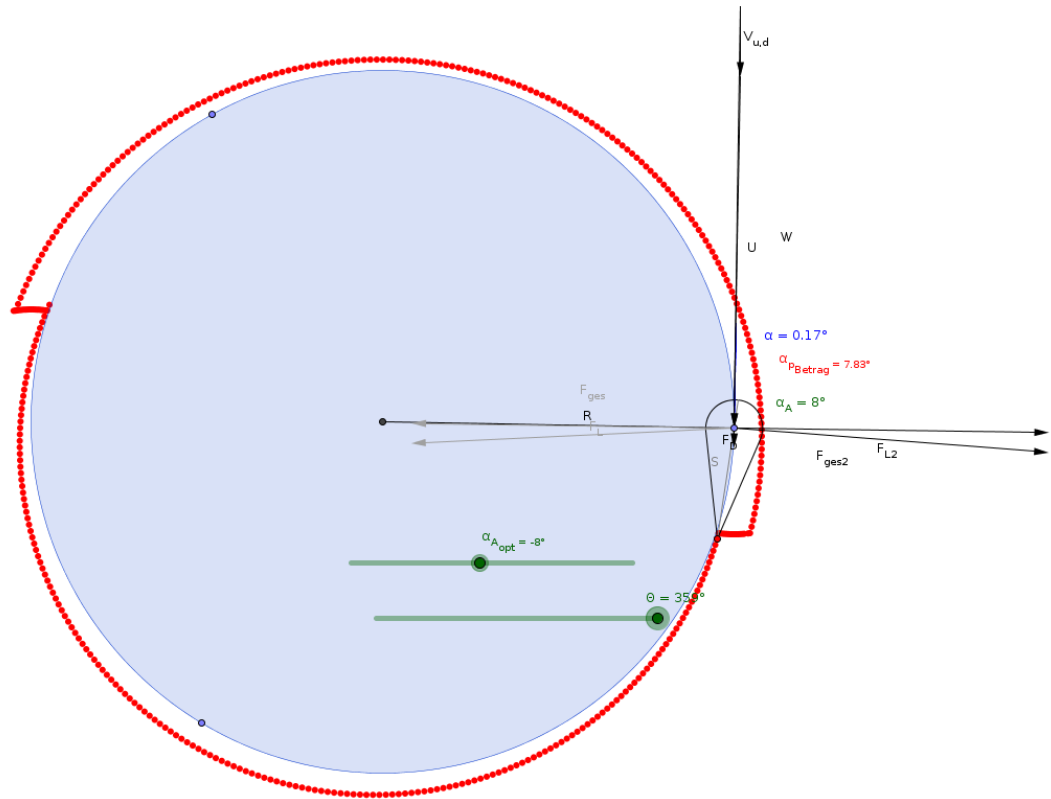


Abbildung 12: Darstellung der Kräfte und des Pitchverlaufs über den Rotationsverlauf

Die Werte in Tabelle 1 stellen die Startbedingungen der Berechnung dar. Dabei ist die Anlaufwindgeschwindigkeit entscheidend für die kleinste anzunehmende Reynoldszahl (ungünstigster Fall), die mittlere Jahreswindgeschwindigkeit als Orientierungswert (für Deutschland ca. 5m/s) und die Nenngeschwindigkeit des Windes ist die eigentliche Auslegungswindgeschwindigkeit. Für die maximale Drehzahl wurde die kritische Vollastgeschwindigkeit angenommen, ab der die Windturbine Leistung abregelt, wenn sie überschritten wird.

Mit diesen Werten wurden nach der DMST Methode und dem ausgebauten Tool von Caleb Engineering [15] die folgenden Diagramme erstellt.

Name	Zeichen	Wert	Einheit	Formel
Durchmesser	D	2	m	
Höhe	H	2	m	
Profil		NACA0018		
Sehnenlänge	c (S)	200	mm	
Blattzahl	N_B	3	-	
Drehzahl	n_{min}	300	RPM	$n = n_{min}/60s$
G-Faktor	G_g	$0.9 \cdot 100$	-	$\frac{a_z}{g = 9,81m/s^2}$
Schnelllaufzahl	λ	2.0	-	$\frac{\omega \cdot R}{V_\infty}$
Reynoldszahl	Re	110000	-	$\frac{Wc}{\nu}$
Anlaufgeschwind.	V_{min}	3-4	m/s	
Jahresgeschwind.	V_{mitt}	5	m/s	
Nennwindgeschwind.	V_{nenn}	9	m/s	
Vollastwindgeschwind.	V_{voll}	15	m/s	
opt. Anstellwinkel	$\alpha_{A_{opt}}$	± 8	°	

Tabelle 1: Anfangsbedingungen für exemplarischen Auslegungsfall

4.2. Pitch in Abhängigkeit von Azimutwinkel und Windgeschwindigkeit

Zunächst die Grafiken ohne Pitch, sie zeigen deutlich, wie der Wind im hinteren Teil der Windturbine ausgebremst wird (Abb 13). Der sich ständig ändernde Anstellwinkel sorgt für einen stark schwankenden Tangentialbeiwert (Abb 14).

Bei der gepitchten Berechnung ist die Abnahme der Geschwindigkeit vor allem auf der Seite zu finden, auf der der Flügel mit dem Wind dreht, der Abnahmefaktor liegt nahe 1.0, so dass kaum Leistung dem Wind entzogen wird, Abbildung 15. In Abbildung 16 erkennt man, dass sich hier der Umschlagspunkt befindet, in dem das Flügelblatt kurzzeitig keinen Auftrieb hat (Anstellwinkel 0). Der Widerstandswert sorgt für

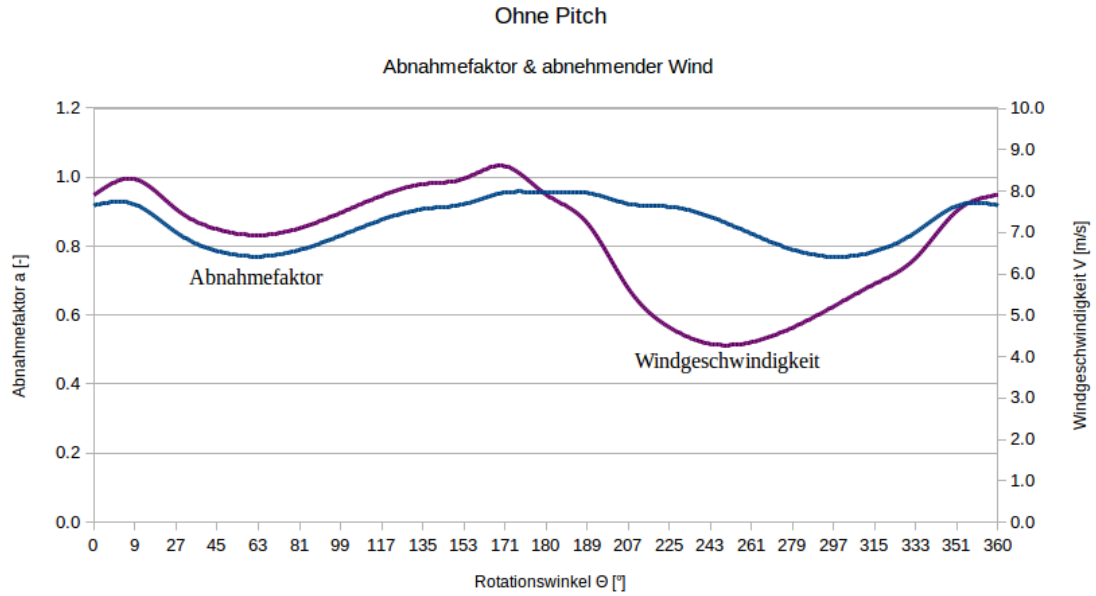


Abbildung 13: Geschwindigkeitsabnahme ohne Pitch bei $V_\infty = 9\text{ m/s}$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$

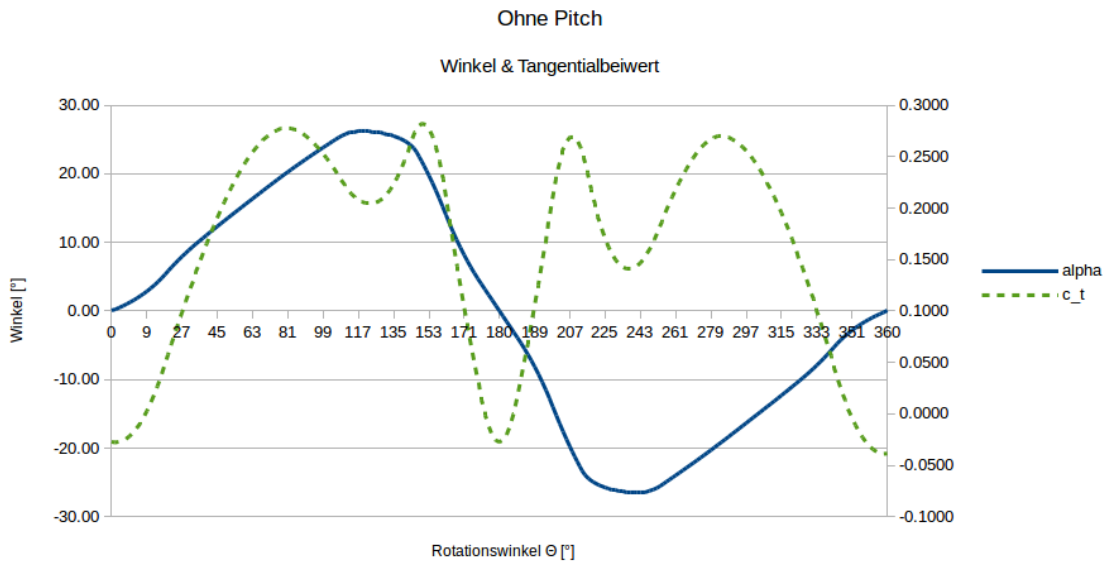


Abbildung 14: Winkelbetrachtung und Tangentialbeiwert ohne Pitch bei $V_\infty = 9\text{ m/s}$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$

einen negativen Tagentialbeiwert. Im anschluss wird wieder der optimale Anstellwinkel eingestellt und.

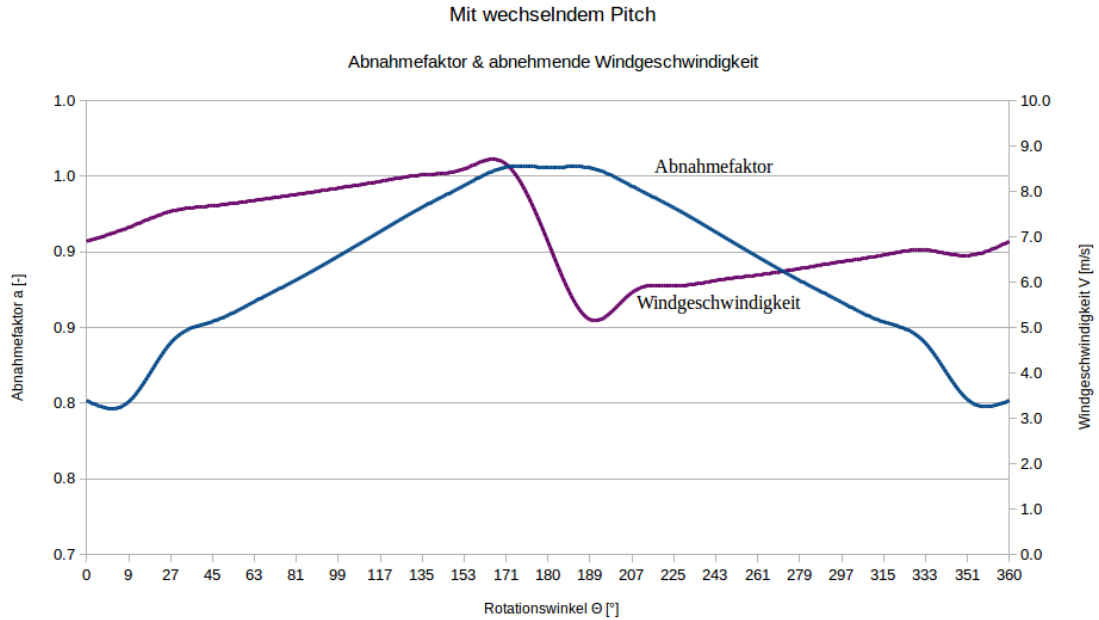


Abbildung 15: Geschwindigkeitsabnahme mit Pitch bei $V_\infty = 9m/s$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$

Ein vergleichbares Ergebnis erhält man mit langsamen Geschwindigkeiten (siehe Anhang A). Hier zeigt sich, dass eine von der variablen Geschwindigkeit unabhängige Schnellaufzahl dominiert, für weitergehende Arbeiten sollte dies ein Ansatz zur Verbesserung der Berechnungsmethode sein.

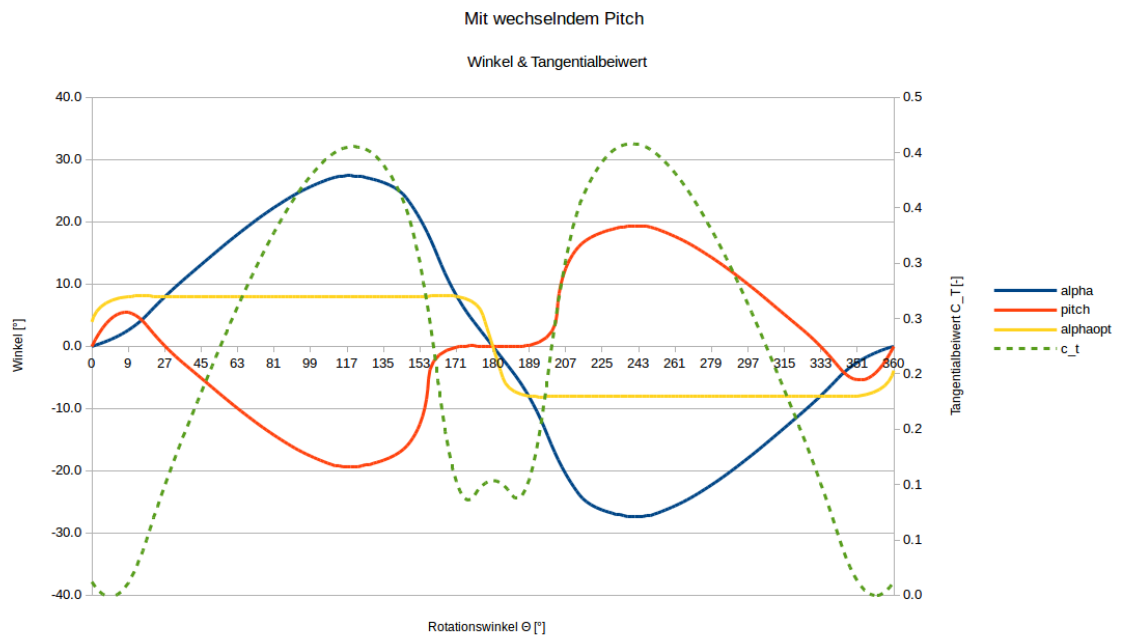


Abbildung 16: Winkelbetrachtung und Tangentialbeiwert mit Pitch bei $V_\infty = 9m/s$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$

4.3. Vergleich der Leistungsfähigkeit ohne und mit Pitchoptimierung

Ein Vergleich der Leistungskurven zeigt deutlich, wie die Wirkungsgradsteigerung zustande kommt. Eine gleichmäßige Leistungsentnahme aus dem Wind führt mit Pitch zu einem ruhigen Momentenverlauf mit höheren Werten, woraus sich eine Bessere Leistungskurve ergibt.

Wichtig ist, dass es sich bei allen Diagrammen um die Abbildung von EINEM Flügelprofils handelt, so dass der Verlauf um 120° (bei 3 Flügelblättern) wiederholt und somit verstärkt wird.

Bei einer Schnellaufzahl von 2.0 ergibt sich eine Wirkungsgradsteigerung um 47%, eine signifikante Verbesserung.

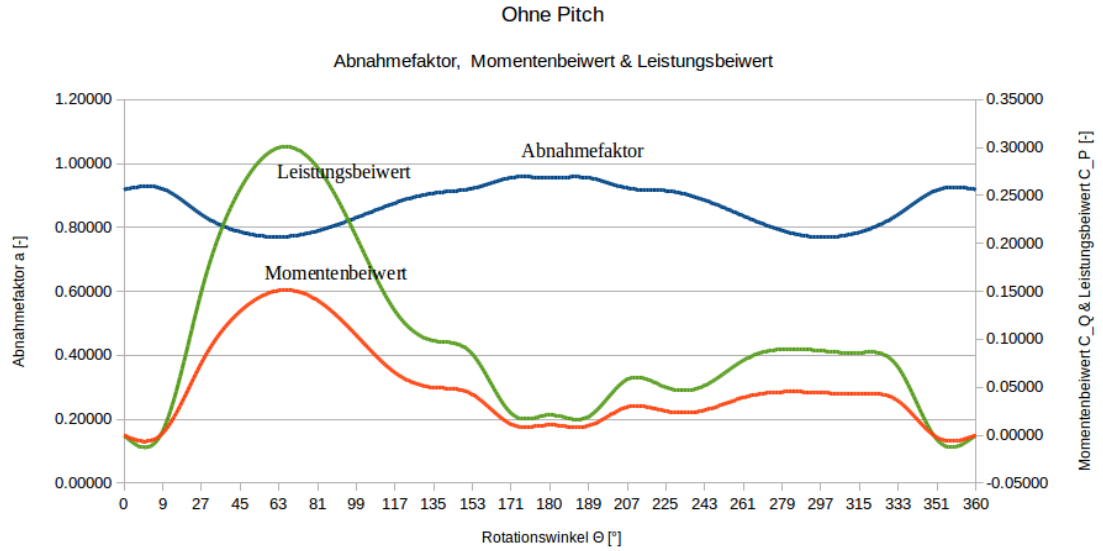


Abbildung 17: Momenten- und Leistungsbetrachtung ohne Pitch bei $V_\infty = 9m/s$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$

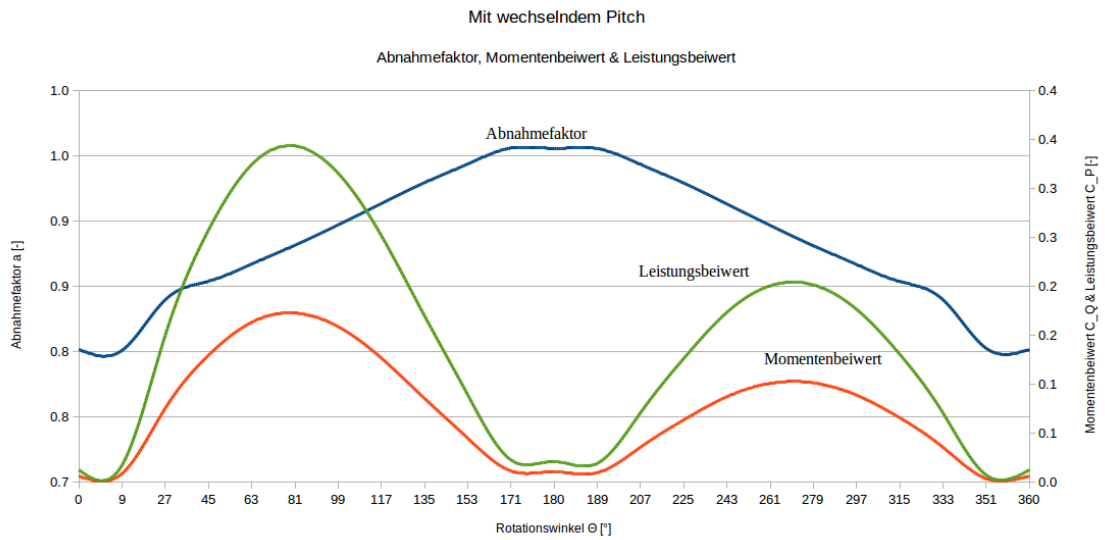


Abbildung 18: Momenten- und Leistungsbetrachtung mit Pitch bei $V_\infty = 9m/s$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$

Zusätzlich muss das Pitchen konstruktiv und variabel gelöst werden, damit sich daraus ein Vorteil für VAWTs abzeichnet.

GESAMT	ohne Pitch	mit Pitch
Momentenbeiwert	0,16	0,24
Leistungsbeiwert	0,32	0,47

Tabelle 2: Vergleich ohne und mit Pitch bei $\lambda = 2.0$ $V_\infty = 9m/s$ und $Re = 110e3$

Eine sehr wichtige Erkenntnis ist, dass durch die Annahme, der Anstellwinkel sei unabhängig von der Reynoldszahl, ein erheblicher Anteil besserer Gleitwerte (Gleitzahl ϵ) bei höheren Windgeschwindigkeiten nicht berücksichtigt wird. Allerdings fließt dieser Umstand auch bei der Berechnung des Einflussfaktors mit ein, so dass hier ebenfalls die durch die abnehmende Geschwindigkeit sich verändernde Reynoldszahl und damit der sich verändernde optimale Anstellwinkel nicht berücksichtigt werden.

Für die Berücksichtigung dieser Bedingung und die Optimierung des Anstellwinkels sind numerische Lösungsverfahren erforderlich um die Menge der Randbedingungen und Daten verarbeiten zu können.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Vertikalachsige Windturbinen weisen eine komplexe Aerodynamik auf. In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, wie mit einer vereinfachten zweidimensionalen Betrachtung die Strömungsverhältnisse am Rotorblatt berechnet werden können. Zugleich konnte nachgewiesen werden, dass sich durch eine Pitchregelung mit wechselndem Anstellwinkel eine signifikante Wirkungsgradsteigerung erreichen lässt. Der Schwerpunkt der Arbeit lag bei der Ermittlung des optimalen Pitchwinkels in Abhängigkeit vom Rotationswinkel und den komplexen geometrischen und aerodynamischen Zusammenhängen.

Dennoch stellt die Ausarbeitung lediglich eine Grundlage für weitere Optimierungs-Methoden dar. Da es sich bei der Detailbetrachtung um aufwändige Iterationsverfahren mit zusätzlichen Variablen handelt, wird eine weiterführende numerische Vorgehensweise empfohlen. Diese sollte insbesondere folgende Punkte berücksichtigen:

- Die sich verändernde Windgeschwindigkeit hat einen Einfluss auf die Reynoldszahl und damit auf den optimalen Anstellwinkel:

$$\alpha_{A_{opt}} = f(Re)$$

- Die sich verändernde Schnelllaufzahl durch die Geschwindigkeitsreduzierung muss in Abhängigkeit vom Abnahmefaktor in die Berechnung aufgenommen werden:

$$\lambda = f(a_{u,d})$$

- Ein numerisches Verfahren zur Verbesserung der Iterationsmethode in Abhängigkeit der sich ändernden freien Windgeschwindigkeit ist

wichtig, um Vergleichsmethoden mit HAWTs zu ermöglichen:

$$a_{u,d} = f(V_\infty, \Theta)$$

- Der Schwerpunkt der Pitch-Optimierung sollte auf den Tangentialkräften, bzw. den Tangentialbeiwert des Rotors gelegt werden.
- Sich bildende Wirbel und andere Störgrößen, wie z.B. Schwingungen durch die wechselnden Normalkräfte, wären ebenfalls zu untersuchen.

Zusammengefasst ergibt sich eine umfangreiche Funktion für den Pitchwinkel nach $\alpha_P = f(\Theta, a_{u,d}, \lambda, Re, V_\infty) \rightarrow C_{T_{max}}$.

Dabei können Ansätze, wie die sich aufweitende Strömungsröhre ([26] und [19]), die Vortex-Methode nach [18] für freie Abströmungen oder bislang nicht rechnerisch erfasste Mechanismen, wie die Selfpitchmethode (von [25] vorgestellt), in die Weiterentwicklung einfließen. Für die detaillierte Wirbelbetrachtung sollte auf CFD-Methoden zurückgegriffen werden.

Mit den heutigen Rechenleistungen, wie sie auch für CFD-Untersuchungen notwendig sind, wäre eine hochauflösende Iterationsmethode nach genetischen Algorithmen denkbar um diesen Prozess zu verbessern und den optimalen Pitchwinkel zu jeder Zeit einstellen zu können.

Ziel der Weiterentwicklung wird es sein, einen Algorithmus zu finden, über den zu jeder Situation (Anströmung, Windturbinendimensionierung, Rotation) ein optimaler Pitchwinkel ausgegeben wird, der für eine Regelung verwendet werden kann.

Insbesondere eine Vergleichsmethode mit CFD Daten, sowie empirischen Messmethoden sollte entwickelt werden, um eine Verifizierung der

Berechnungsmethode dieser Arbeit anhand realer Anlagenwerte sicherzustellen. Diese konnte im zeitlichem Umfang und aufgrund fehlender Messdaten nicht erbracht werden.

Eine deutliche Wirkungsgradverbesserung konnte jedoch nachgewiesen werden, da der Vergleich unter gleichen Annahmen für die Berechnung ohne und mit Pitch erbracht wurde. Die Verbesserung der Genauigkeit für den Vergleich verschiedener VAWT Anlagen, sowie mit HAWT Anlagen wird damit Gegenstand folgender Arbeiten sein.

Die vorliegende Ausarbeitung wird im Sinne der eingangs genannten Open Source Kriterien zur Weiterentwicklung verfügbar gemacht⁸ und bietet eine wichtige Grundlage für die überschlägigen Berechnungen von H-Darrieus-VAWTs mit und ohne Pitch sowie als Ansatz für numerische Verfahren.

⁸Dokumentation zu finden unter: <http://wiki.opensourceecology.de/>

Literatur

- [1] **Habtamu Beri und Yingxue Yao.** “Double Multiple Stream Tube Model and Numerical Analysis of Vertical Axis Wind Turbine”. In: *Energy and Power Engineering* 3 (2011), S. 262–270.
- [2] **Habtamu Beri und Yingxue Yao.** “Numerical Simulation of Unsteady Flow to Show Self-starting of Vertical Axis Wind Turbine Using Fluent”. In: *Journal of Applied Science, China* 11.6 (2011), S. 962–970.
- [3] **M.T. BRAHIMI, A. ALLET und I. PARASCHIVOIU.** “Aerodynamic Analysis Models for Vertical-Axis Wind Turbines”. In: *International Journal of Rotating Machinery* 2.1 (1995), S. 15–21.
- [4] **S. Brusca, R. Lanzafame und M. Messina.** “Design of a vertical-axis wind turbine: how the aspect ratio affects the turbine’s performance”. In: *Int J Energy Environ Eng* 5 (2014), S. 333–340.
- [5] **Engineering Caleb.** *VAWT Design LibreOffice Calc .ods*. Zugriff 30.03.2015. URL: <http://www.calebengineering.com/uploads/3/5/3/2/3532757/vawtdesign.ods>.
- [6] **CERN.** *CERN Open Hardware Licence*. Zugriff am 14.05.2015. URL: <http://www.ohwr.org/projects/cernohl/wiki>.
- [7] **S. Eriksson, J. Kjellin und H. Bernhoff.** “Tip speed ratio control of a 200 kW VAWT with synchronous generator and variable DC voltage”. In: *Energy Science and Engineering* 1.3 (2013), S. 135–143.
- [8] **Envento Windenergie GmbH.** *Vertikale Windkraftanlagen: Technische Details*. Zugriff am 30.03.2015. URL: <http://www.eigenewindenergie.de/index.php/vertikale-windkraftanlagen/technische-details.html>.
- [9] **HARRY J. GOETT und W. KENNETH BULLIVANT.** *TESTS OF N. A. C. A. 0009, 0012, AND 0018 AIRFOILS IN THE FULL-SCALE TUN-*

- NEL. Techn. Ber. 647. NATIONAL ADVISORY COMMITTEE FOR AERONAUTICS, 1939.
- [10] **Erich Hau.** *Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [11] **Martin Hepperle.** *JavaFoil Online Programm.* Zugriff am 08.04.2015. URL: http://www.mh-aerotools.de/airfoils/jf_applet.htm.
- [12] **Gregory F. Homicz.** *Numerical Simulation of VAWT Stochastic Aerodynamic Loads Produced by Atmospheric Turbulence: VAWT-SAL Code.* Unlimited Release. SANDIA REPORT, 1991.
- [13] **IOPARA Inc.** *Double-Multiple Streamtube Model Overview.* Wind Turbines & Aeronautics Consulting. Zugriff am 07.04.2015. URL: <http://www.iopara.ca/resources.shtml>.
- [14] **Franklyn Kanyako und Isam Janajreh.** “Vertical Axis Wind Turbine Performance Prediction, High and Low Fidelity Analysis”. In: *Proceedings of The 2014 IAJC-ISAM International Conference.* 2014.
- [15] **Caleb Engineering LLC.** *Basic VAWT Design.* Zugriff am 02.04.2015. URL: <http://www.calebengineering.com/basic-small-vawt-design.html>.
- [16] **Klaus Menny.** *Strömungsmaschinen, Hydraulische und thermische Kraft- und Arbeitsmaschinen.* 5. Auflage. B.G. Teubner Verlag, 2006.
- [17] **B.G. Newman.** “MULTIPLE ACTUATOR-DISC THEORY FOR WIND TURBINES”. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 24 (1986), S. 215–225.
- [18] **David Österberg.** “Multi-Body Unsteady Aerodynamics in 2D Applied to a Vertical-Axis Wind Turbine Using a Vortex Method”. Magisterarb. Teknisk-naturvetenskaplig fakultet UTH-enheten, 2010.

-
- [19] **Ion Paraschivoiu, Philippe Fraunié und Claude Béguier.** “Streamtube Expansion Effects on the Darrieus Wind Turbine”. In: *J. PROPULSION* 1.2 (1984), S. 150–155.
- [20] **Ion Praraschivoiu.** “Double Multiple Streamtube Model with Recent Improvements”. In: *J. ENERGY* 7.3 (1983), S. 250–255.
- [21] **Ion Praraschivoiu.** “DOUBLE-MULTIPLE STREAMTUBE MODEL FOR DARRIEUS WIND TURBINES”. In: *Wind Turbine Dynamics*. Hrsg. von R. W. Thresher. NASA Conference Publication 2185. National Aeronautics und Space Administration (NASA). Washington, D.C.: Scientific und Technical information Office, 1981, S. 19–25.
- [22] **Ion Praraschivoiu, O. Trifu und F. Saeed.** “H-Darrieus Wind Turbine with Blade Pitch Control”. In: *International Journal of Rotating Machinery* 2009 (2009), S. 1–7.
- [23] **M. Ragheb.** *VERTICAL AXIS WIND TURBINE 2015*. Zugriff am 16.04.2015. URL: <http://www.mragheb.com>.
- [24] **A. P. Schaffarczyk.** *Introduction to Wind Turbine Aerodynamics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.
- [25] **Liu Shuqin.** “Magnetic Suspension and Self-pitch for Vertical-axis Wind Turbines”. In: *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power* 10 (2011), S. 233–248.
- [26] **Conaill E. Soranghan u. a.** *Double Multiple Streamtube Model for Variable Pitch Vertical Axis Wind Turbines*. Techn. Ber. Glasgow, G1 1XW, United Kingdom: Dept. of Electronic und Electrical Engineering, University of Strathclyde, 2013.
- [27] **Emanuela Sorina SOUCA und Cornel CIUPAN.** “AIRFOIL SELECTION FOR AERODYNAMIC PERFORMANCE CRITERION ON SMALL WIND TURBINES”. In: *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS* 57.II (2014), S. 291–300.

- [28] **J. H. Strickland.** *The Darrieus Turbine: A Performance Prediction Model Using Multiple Streamtubes*. Techn. Ber. New Mexico: Advanced Energy Projects Department, 1975.
- [29] **Jelena Svorcan u. a.** “Aerodynamic design and analysis of a small-scale vertical axis wind turbine”. In: *Journal of Mechanical Science and Technology* 27.3 (2013), S. 2367–2373.
- [30] **TAPR.** *The TAPR Open Hardware License*. Zugriff am 15.04.2015. URL: <https://www.tapr.org/ohl.html>.

A. Wertetabellen für $V_{\infty} = 5m/s$ und $9m/s$

Tabelle7

Ohne Pitch (nur Werte für Schnellaufzahl = 2, $Re=110e3$, $V=9m/s$)

Actuator Disk angle deg	rad	V m/s	Upwind:				
			Interference Factor	Relative Winc m/s	Angle of Inc. rad	Angle of Inc. deg	
0	0.00	0.00	8.00	0.931	26.26	0.00	0.00
9	0.16	0.16	8.29	0.921	26.10	0.05	2.85
27	0.47	0.47	7.56	0.840	24.86	0.14	7.94
45	0.79	0.79	7.07	0.786	23.42	0.22	12.33
63	1.10	1.10	6.93	0.770	21.92	0.29	16.37
81	1.41	1.41	7.10	0.789	20.25	0.35	20.26
99	1.73	1.73	7.47	0.830	18.27	0.42	23.83
117	2.04	2.04	7.89	0.876	15.93	0.46	26.16
135	2.36	2.36	8.17	0.907	13.41	0.45	25.50
153	2.67	2.67	8.30	0.922	11.15	0.34	19.75
171	2.98	2.98	8.60	0.956	9.48	0.14	8.16
180	3.14	3.14	7.95	0.959	9.25	0.00	0.00
189	3.30	3.30	7.29	0.963	8.58	-0.14	-8.27
207	3.61	3.61	5.81	0.949	9.26	-0.36	-20.67
225	3.93	3.93	4.89	0.950	10.83	-0.47	-27.05
243	4.24	4.24	4.60	0.944	11.99	-0.50	-28.37
261	4.56	4.56	4.88	0.939	12.25	-0.47	-26.75
279	4.87	4.87	5.58	0.939	12.10	-0.41	-23.48
297	5.18	5.18	6.35	0.938	12.43	-0.33	-19.10
315	5.50	5.50	6.84	0.932	14.04	-0.24	-13.99
333	5.81	5.81	7.04	0.927	17.42	-0.15	-8.51
351	6.13	6.13	7.72	0.942	22.11	-0.05	-2.89
360	6.28	6.28	8.00	0.931	26.26	0.00	0.00

Tabelle7

CI	Cd	CN	CT	Iteration:		CQ Torque	CP Power
				G-Function			
-0.03	0.03	-0.03	-0.03	-0.03		0.000	0.000
0.38	0.02	0.38	0.00	0.086		0.002	0.004
0.94	0.03	0.93	0.10	0.190		0.075	0.150
1.24	0.08	1.23	0.19	0.272		0.129	0.257
1.40	0.15	1.38	0.25	0.299		0.151	0.300
1.43	0.23	1.43	0.28	0.268		0.140	0.279
1.38	0.33	1.40	0.25	0.205		0.104	0.207
1.30	0.41	1.35	0.21	0.142		0.065	0.130
1.33	0.39	1.36	0.22	0.102		0.050	0.099
1.44	0.22	1.43	0.28	0.085		0.043	0.085
0.95	0.03	0.95	0.10	0.047		0.011	0.023
-0.03	0.03	-0.03	-0.03	-0.03		0.011	0.021
-0.97	0.03	-0.96	0.11	0.039		0.010	0.020
-1.42	0.25	-1.41	0.26	0.054		0.028	0.056
-1.18	0.46	-1.26	0.12	0.053		0.018	0.036
-1.10	0.52	-1.21	0.07	0.059		0.012	0.024
-1.20	0.45	-1.28	0.14	0.065		0.025	0.050
-1.35	0.34	-1.37	0.23	0.065		0.041	0.082
-1.43	0.21	-1.42	0.27	0.066		0.051	0.102
-1.33	0.10	-1.32	0.22	0.073		0.055	0.109
-0.99	0.03	-0.98	0.11	0.079		0.043	0.085
-0.36	0.02	-0.36	0.00	0.062		-0.002	-0.004
0.07	0.04	0.07	-0.04			0.000	0.000
						0.16	0.32

Tabelle7

Mit wechselndem Pitch (nur Werte für Schnellaufzahl = 2, Re=110e3, V=9m/s)

Actuator Disk angle		V m/s	Upwind:				Angle of Inc. deg
deg	rad		Interference Factor	Relative Winc m/s	Angle of Inc. rad		
0.00		0.00	7.44	0.87	25.69	0.00	0.00
9.00		0.16	7.21	0.80	25.03	0.05	2.58
27.00		0.47	7.56	0.84	24.85	0.14	7.94
45.00		0.79	7.69	0.85	23.94	0.23	13.12
63.00		1.10	7.81	0.87	22.53	0.31	17.98
81.00		1.41	7.93	0.88	20.67	0.39	22.28
99.00		1.73	8.08	0.90	18.43	0.45	25.64
117.00		2.04	8.22	0.91	15.93	0.48	27.37
135.00		2.36	8.37	0.93	13.35	0.46	26.31
153.00		2.67	8.50	0.94	11.01	0.36	20.51
171.00		2.98	8.61	0.96	9.48	0.14	8.16
180.00		3.14	6.91	0.96	9.24	0.00	0.00
189.00		3.30	5.22	0.96	8.59	-0.14	-8.29
207.00		3.61	5.85	0.96	9.71	-0.37	-20.94
225.00		3.93	6.05	0.95	11.42	-0.47	-27.03
243.00		4.24	6.23	0.94	13.18	-0.49	-28.31
261.00		4.56	6.44	0.94	14.73	-0.47	-26.71
279.00		4.87	6.68	0.93	15.96	-0.41	-23.39
297.00		5.18	6.94	0.93	16.85	-0.33	-19.01
315.00		5.50	7.20	0.93	17.37	-0.24	-13.97
333.00		5.81	7.44	0.93	17.42	-0.15	-8.53
351.00		6.13	7.67	0.93	15.79	-0.05	-2.88
360.00		6.28	7.44	0.87	25.69	0.00	0.00

Tabelle7

Pitch deg	Pitch rad	Optimal!		Cl	Cd	CN	CT	
		AOA deg	AOA rad					
		0.14			-0.03	0.03	0.00	0.01
5.42		0.09	8.00	0.14	0.94	0.03	0.94	0.01
0.06		0.00	8.00	0.14	0.94	0.03	0.94	0.10
-5.12		-0.09	8.00	0.14	0.94	0.03	0.92	0.18
-9.98		-0.17	8.00	0.14	0.94	0.03	0.90	0.26
-14.28		-0.25	8.00	0.14	0.94	0.03	0.88	0.33
-17.64		-0.31	8.00	0.14	0.94	0.03	0.86	0.38
-19.37		-0.34	8.00	0.14	0.94	0.03	0.85	0.40
-18.31		-0.32	8.00	0.14	0.94	0.03	0.86	0.39
-12.51		-0.22	8.00	0.14	0.94	0.03	0.89	0.30
-0.16		0.00	8.00	0.14	0.94	0.03	0.94	0.10
		0.00			-0.03	0.03	0.00	0.10
0.29		0.00	-8.00	-0.14	-0.94	0.03	-0.94	0.11
12.94		0.23	-8.00	-0.14	-0.94	0.03	-0.89	0.31
19.03		0.33	-8.00	-0.14	-0.94	0.03	-0.85	0.40
20.31		0.35	-8.00	-0.14	-0.94	0.03	-0.84	0.42
18.71		0.33	-8.00	-0.14	-0.94	0.03	-0.86	0.40
15.39		0.27	-8.00	-0.14	-0.94	0.03	-0.88	0.35
11.01		0.19	-8.00	-0.14	-0.94	0.03	-0.90	0.28
5.97		0.10	-8.00	-0.14	-0.94	0.03	-0.92	0.20
0.53		0.01	-8.00	-0.14	-0.94	0.03	-0.94	0.11
-5.12		-0.09	-8.00	-0.14	-0.94	0.03	-0.94	0.02
		0.00			0.07	0.04	0.00	0.01

Tabelle7

Iteration:				
G-Function	CQ Torque	CP Power	V_e m/s	
		0.01	0.01	
0.25	0.01	0.02	5.42	
0.19	0.08	0.15	6.12	
0.17	0.13	0.26	6.37	
0.15	0.16	0.32	6.61	
0.13	0.17	0.34	6.87	
0.11	0.16	0.32	7.15	
0.09	0.13	0.25	7.44	
0.08	0.09	0.17	7.73	
0.06	0.04	0.09	7.99	
0.05	0.01	0.02	8.21	
		0.01	0.02	
0.04	0.01	0.02		
0.05	0.04	0.07		
0.05	0.06	0.13		
0.06	0.09	0.18		
0.07	0.11	0.21		
0.07	0.11	0.22		
0.07	0.10	0.19		
0.07	0.07	0.15		
0.07	0.04	0.08		
0.07	0.01	0.01		
	0.01	0.01		
	0.24	0.48		

Tabelle8

Ohne Pitch (nur Werte für Schnellaufzahl = 2, Re=110e3, V=5m/s)

Actuator Disk angle		V m/s	Upwind: Interference		Relative Winc m/s	Angle of Inc.		Angle of Inc. CI
deg	rad		Factor			rad	deg	
0.000		0.000	4.390	0.919	14.529	0.000	0.000	-0.029
9.000		0.157	4.603	0.921	14.499	0.050	2.847	0.380
27.000		0.471	4.202	0.840	13.811	0.139	7.939	0.935
45.000		0.785	3.930	0.786	13.014	0.215	12.330	1.244
63.000		1.100	3.852	0.770	12.177	0.286	16.370	1.397
81.000		1.414	3.944	0.789	11.248	0.354	20.265	1.435
99.000		1.728	4.151	0.830	10.150	0.416	23.826	1.380
117.000		2.042	4.381	0.876	8.853	0.457	26.165	1.301
135.000		2.356	4.537	0.907	7.452	0.445	25.500	1.327
153.000		2.670	4.609	0.922	6.192	0.345	19.749	1.436
171.000		2.985	4.778	0.956	5.269	0.142	8.155	0.954
180.000		3.142	4.398	0.955	5.158	0.000	0.000	-0.029
189.000		3.299	4.018	0.955	4.803	-0.142	-8.147	-0.957
207.000		3.613	3.141	0.923	5.220	-0.345	-19.787	-1.426
225.000		3.927	2.616	0.915	6.063	-0.450	-25.758	-1.254
243.000		4.241	2.393	0.885	6.661	-0.462	-26.456	-1.217
261.000		4.555	2.415	0.836	6.710	-0.419	-23.982	-1.332
279.000		4.869	2.610	0.790	6.501	-0.354	-20.297	-1.422
297.000		5.184	2.894	0.769	6.583	-0.285	-16.352	-1.403
315.000		5.498	3.198	0.785	7.441	-0.215	-12.316	-1.254
333.000		5.812	3.545	0.841	9.402	-0.139	-7.941	-0.938
351.000		6.126	4.177	0.917	12.183	-0.050	-2.839	-0.355
360.000		6.283	4.390	0.919	14.529	0.000	0.000	0.074

Tabelle8

Cd	CN	CT	Iteration:		CP Power	V_e m/s
			G-Function	CQ Torque		
0.027	-0.029	-0.027			0.000	0.000
0.016	0.380	0.003	0.086		0.002	4.207
0.031	0.931	0.099	0.190		0.075	3.403
0.077	1.231	0.191	0.272		0.129	2.860
0.145	1.382	0.254	0.299		0.151	2.704
0.234	1.427	0.278	0.268		0.140	2.889
0.333	1.397	0.253	0.205		0.104	3.303
0.408	1.347	0.208	0.142		0.065	3.762
0.386	1.364	0.223	0.102		0.050	4.074
0.221	1.426	0.277	0.085		0.043	4.218
0.032	0.949	0.103	0.047		0.011	4.556
0.027	-0.029	-0.027			0.011	0.021
0.031	-0.952	0.105	0.047		0.010	0.019
0.227	-1.419	0.269	0.084		0.029	0.058
0.416	-1.310	0.170	0.094		0.025	0.050
0.442	-1.286	0.147	0.130		0.026	0.052
0.354	-1.361	0.218	0.197		0.039	0.078
0.241	-1.417	0.267	0.266		0.045	0.090
0.145	-1.387	0.256	0.300		0.044	0.088
0.074	-1.241	0.195	0.274		0.043	0.086
0.029	-0.933	0.101	0.190		0.036	0.071
0.022	-0.356	-0.004	0.091		-0.002	-0.005
0.039	0.074	-0.039			0.000	0.000
Gesamt					0.162	0.321

Tabelle8

Mit wechselndem Pitch (nur Werte für Schnellaufzahl = 2, Re=110e3, V=5m/s)

Actuator Disk angle		V m/s	Upwind: Interference		Relative Winc m/s	Angle of Inc.	
deg	rad		Factor			rad	deg
0.000		0.000	3.833	0.802	13.943	0.000	0.000
9.000		0.157	4.005	0.801	13.904	0.045	2.582
27.000		0.471	4.199	0.840	13.808	0.139	7.935
45.000		0.785	4.270	0.854	13.301	0.229	13.121
63.000		1.100	4.336	0.867	12.515	0.314	17.983
81.000		1.414	4.408	0.882	11.482	0.389	22.284
99.000		1.728	4.486	0.897	10.241	0.447	25.637
117.000		2.042	4.568	0.914	8.852	0.478	27.373
135.000		2.356	4.648	0.930	7.416	0.459	26.308
153.000		2.670	4.720	0.944	6.117	0.358	20.505
171.000		2.985	4.781	0.956	5.266	0.142	8.164
180.000		3.142	3.828	0.956	5.155	0.000	0.000
189.000		3.299	2.876	0.956	4.806	-0.142	-8.157
207.000		3.613	3.207	0.944	5.432	-0.358	-20.495
225.000		3.927	3.290	0.929	6.373	-0.459	-26.297
243.000		4.241	3.354	0.913	7.322	-0.478	-27.362
261.000		4.555	3.423	0.897	8.136	-0.447	-25.627
279.000		4.869	3.501	0.881	8.763	-0.389	-22.276
297.000		5.184	3.585	0.867	9.191	-0.314	-17.977
315.000		5.498	3.668	0.854	9.417	-0.229	-13.118
333.000		5.812	3.728	0.840	9.384	-0.139	-7.936
351.000		6.126	3.661	0.803	8.374	-0.045	-2.586
360.000		6.283	3.833	0.802	13.943	0.000	0.000

Tabelle8

Pitch deg	Pitch rad	Optimal! AOA deg	AOA rad	Cl	Cd	CN	CT	
		0.140			-0.029	0.027	-0.001	0.012
5.418		0.095	8.000	0.140	0.941	0.031	0.941	0.011
0.065		0.001	8.000	0.140	0.941	0.031	0.936	0.099
-5.121		-0.089	8.000	0.140	0.941	0.031	0.923	0.183
-9.983		-0.174	8.000	0.140	0.941	0.031	0.904	0.261
-14.284		-0.249	8.000	0.140	0.941	0.031	0.882	0.328
-17.637		-0.308	8.000	0.140	0.941	0.031	0.862	0.379
-19.373		-0.338	8.000	0.140	0.941	0.031	0.850	0.405
-18.308		-0.320	8.000	0.140	0.941	0.031	0.857	0.389
-12.505		-0.218	8.000	0.140	0.941	0.031	0.892	0.300
-0.164		-0.003	8.000	0.140	0.941	0.031	0.936	0.103
		0.000			-0.029	0.027	-0.001	0.104
0.157		0.003	-8.000	-0.140	-0.944	0.030	-0.938	0.105
12.495		0.218	-8.000	-0.140	-0.944	0.030	-0.894	0.303
18.297		0.319	-8.000	-0.140	-0.944	0.030	-0.859	0.392
19.362		0.338	-8.000	-0.140	-0.944	0.030	-0.852	0.407
17.627		0.308	-8.000	-0.140	-0.944	0.030	-0.864	0.381
14.276		0.249	-8.000	-0.140	-0.944	0.030	-0.884	0.330
9.977		0.174	-8.000	-0.140	-0.944	0.030	-0.907	0.263
5.118		0.089	-8.000	-0.140	-0.944	0.030	-0.926	0.185
-0.064		-0.001	-8.000	-0.140	-0.944	0.030	-0.939	0.101
-5.414		-0.094	-8.000	-0.140	-0.944	0.030	-0.944	0.013
		0.000			0.074	0.039	-0.001	0.012

Tabelle8

Iteration:				
G-Function	CQ Torque	CP Power	V_e m/s	
		0.006	0.012	
0.250	0.009	0.017	3.010	
0.191	0.076	0.150	3.398	
0.171	0.130	0.258	3.540	
0.153	0.163	0.325	3.672	
0.134	0.173	0.344	3.816	
0.115	0.159	0.316	3.972	
0.095	0.127	0.252	4.136	
0.076	0.086	0.170	4.296	
0.059	0.045	0.089	4.439	
0.046	0.011	0.023	4.561	
	0.011	0.021		
0.046	0.010	0.019		
0.060	0.036	0.071		
0.076	0.064	0.126		
0.095	0.087	0.174		
0.115	0.101	0.201		
0.135	0.101	0.202		
0.154	0.089	0.177		
0.172	0.066	0.131		
0.191	0.036	0.071		
0.247	0.004	0.007		
	0.006	0.012		
Gesamt	0.237	0.471		

B. Ergebnisse $V_\infty = 5\text{m/s}$

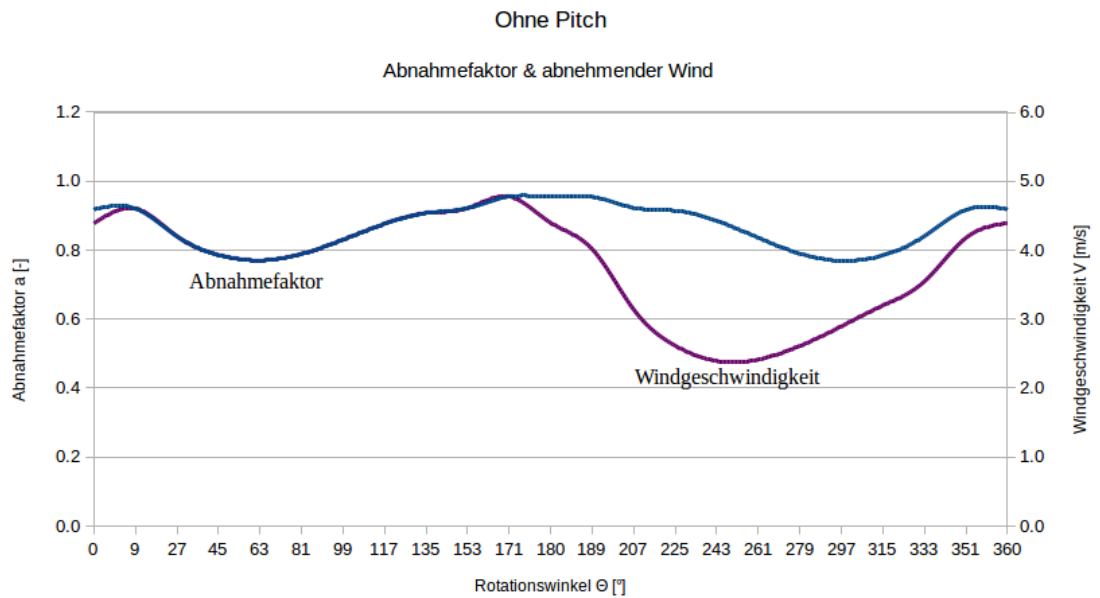


Abbildung 19: Geschwindigkeitsabnahme ohne Pitch bei $V_\infty = 5\text{m/s}$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$

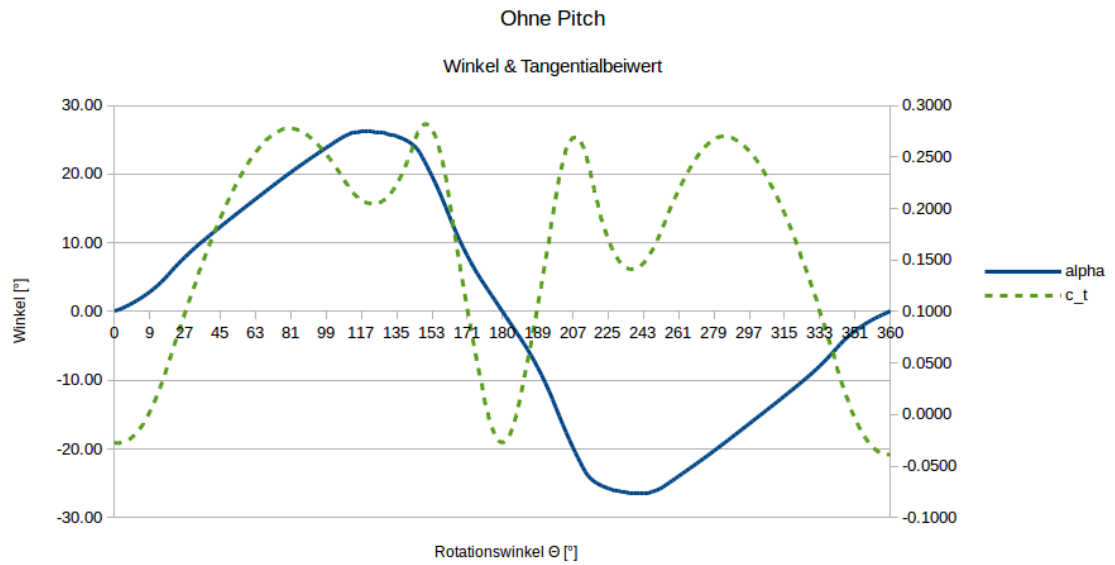


Abbildung 20: Winkelbetrachtung ohne Pitch bei $V_\infty = 5m/s$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$

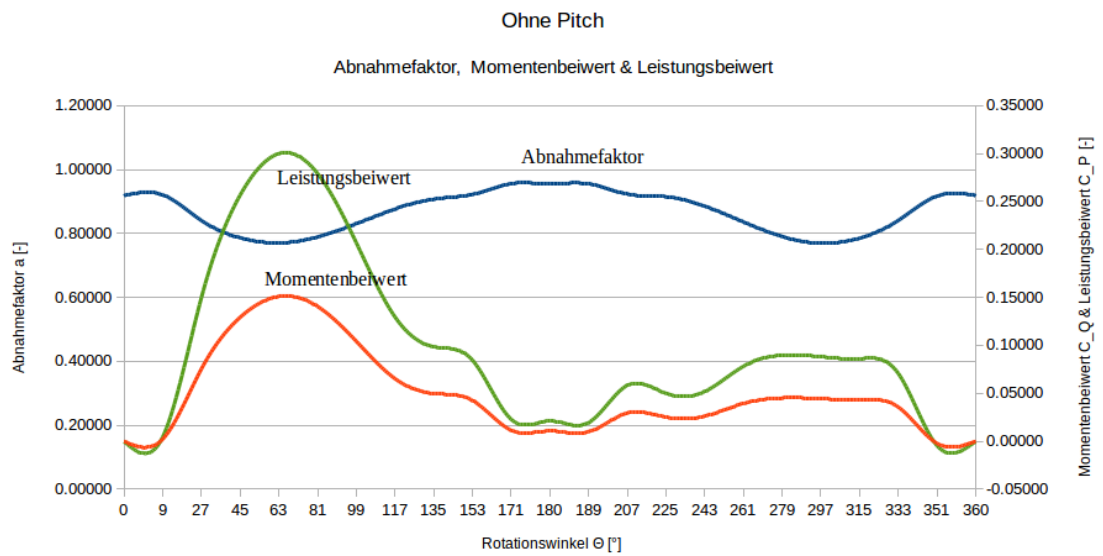


Abbildung 21: Momenten- und Leistungsbetrachtung ohne Pitch bei $V_\infty = 5m/s$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$

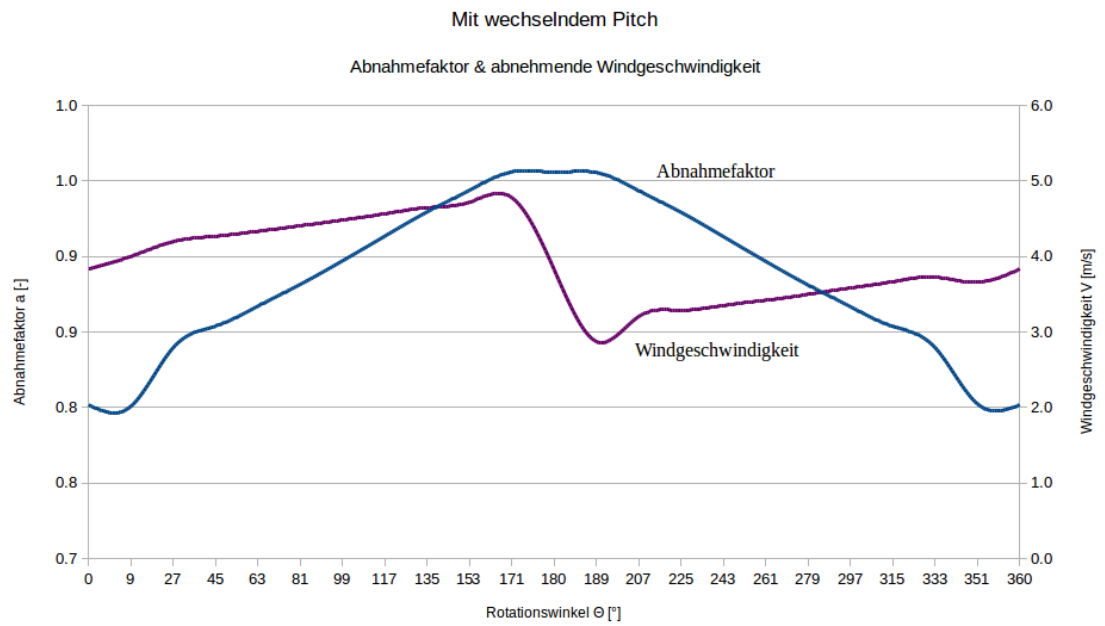


Abbildung 22: Geschwindigkeitsabnahme mit Pitch bei $V_\infty = 5\text{m/s}$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$

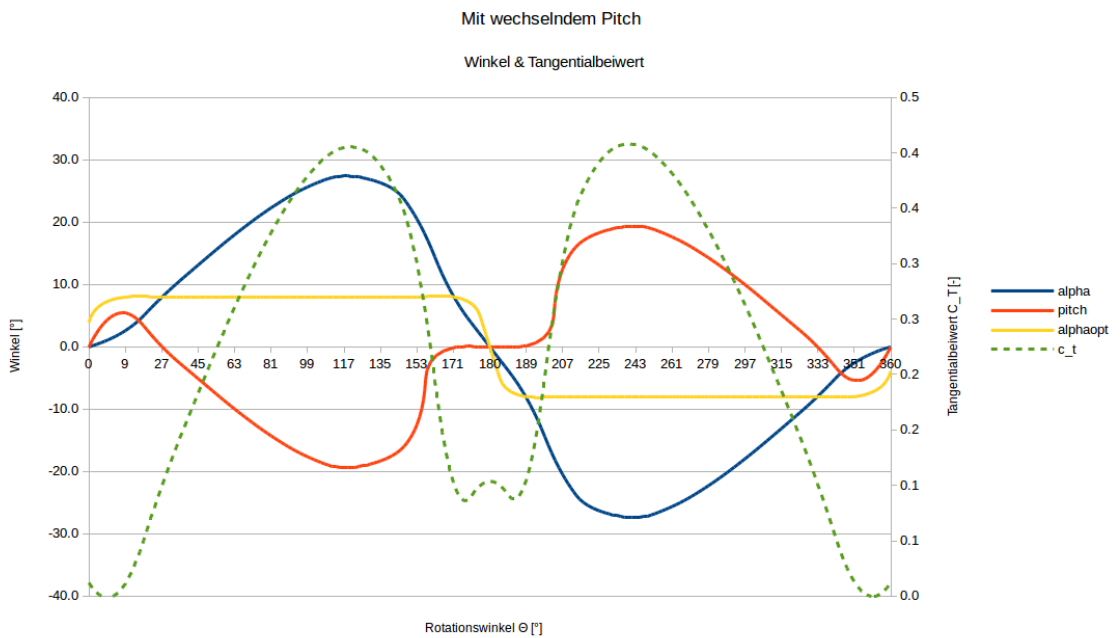


Abbildung 23: Winkelbetrachtung mit Pitch bei $V_\infty = 5\text{m/s}$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$

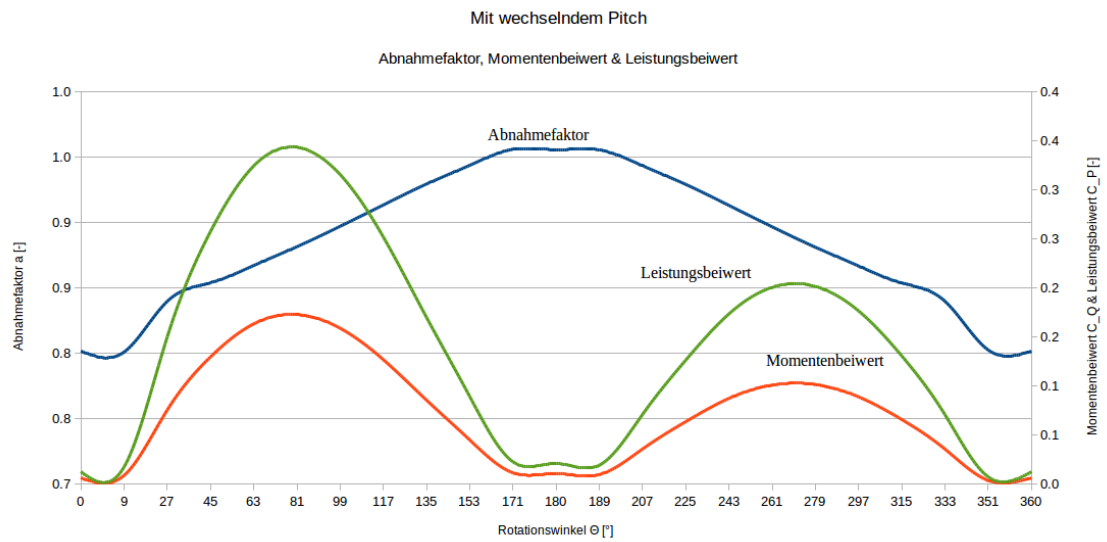


Abbildung 24: Momenten- und Leistungsbetrachtung mit Pitch bei $V_\infty = 5m/s$, $Re = 110e3$ und $\lambda = 2.0$