



**INSTITUT FÜR  
ENERGIETECHNIK  
UND THERMODYNAMIK**  
Institute of Energy Systems and Thermodynamics

Diplomarbeit

# **Einfluss der Rotorblattwinkelstellung auf den Ertrag von Windkraftanlagen**

unter der Leitung von

**Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Reinhard Willinger**  
(E302 - Institut für Energietechnik und Thermodynamik)

und

**Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Burchhart**  
(Verbund AG)

Eingereicht an der Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften  
der Technischen Universität Wien  
zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

von

**Alexander Wimmer, BSc**  
Matr.Nr. 01328958

Wien, am 24. Juli 2020

# Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur genannt habe. Weiters erkläre ich, dass ich diese Diplomarbeit bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin / einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, Juli 2020

.....  
(Alexander Wimmer, BSc)

# Danksagung

Als erstes möchte ich mich bei Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Reinhard Willinger für die Ermöglichung und die hervorragende Betreuung bedanken. Eine großartige Zusammenarbeit, bei der ich mich gut aufgehoben fühlte, wurde von Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Burchhart und Simon Kloiber, MSc von Verbund AG ermöglicht. Die Flexibilität und schnelle Verfügbarkeit meiner Betreuer weiß ich sehr zu schätzen. Aus den Meetings ging ich immer mit einem guten Gefühl heraus und ich freute mich auch sehr über Einladungen privater Natur.

Außerdem bedanke ich mich bei der Firma Riegl für die Einführung in die Software und die rasche Behandlung von Fragen/Problemen.

Zum Schluss möchte ich mich noch bei meinen Eltern, meinen Geschwistern und meiner Freundin Lisa bedanken, die mich im Laufe des Studiums stets ermutigt und unterstützt haben. Bei ihnen konnte ich immer Zuspruch und Motivation finden, aber auch den Alltagsstress vergessen.

# Kurzfassung

Zweck dieser Arbeit ist die Untersuchung von zwei Windkraftanlagentypen, welche aus Geheimhaltungsgründen als „Anlage A“ und „Anlage B“ bezeichnet werden. Von Interesse ist der erzielbare Ertrag bei unterschiedlichen Pitchwinkeln. Um die Form der Rotorblätter zu erhalten, wurden die Windkraftanlagen mit 3D-Laserscannern eingescannt. Die erhaltenen Punktwolken konnten mit einem Python Script weiterverarbeitet und Profilschnitte extrahiert werden. Mit der freien Software QBlade wurde die Profilmströmung der Profile an unterschiedlichen radialen Positionen berechnet, um die entstehenden Kräfte in Form von dimensionslosen Beiwerten zu erhalten. Profilpolaren stellen diese Beiwerte in Abhängigkeit der Anströmrichtung dar. Die Profilschnitte wurden dann weiter mit ihren Abmessungen und ihrer Lage im Raum zu einem Rotorblattmodell zusammengefügt. Gemeinsam mit dem Windfeld konnte nun eine Simulation, welche nach der „Lifting-Line-Methode“ arbeitet, durchgeführt werden. Der Ertrag wurde nun mit der erhaltenen Leistung und den ortsbezogenen Windmessungen berechnet. Aus der Simulation erhält man nicht nur Aufschluss über die Leistung, sondern auch über viele andere Parameter, wie die Reynoldszahl, die relative Anströmgeschwindigkeit und den aerodynamischen Anstellwinkel. Diese Parameter wurden anschließend mit den Werten zur Auslegung der Simulation verglichen und ihr Einfluss überprüft, um so die erhaltenen Ergebnisse interpretieren zu können. Die Pitchwinkel wurden nicht nur bei allen drei Rotorblättern gemeinsam verändert, sondern es wurde auch der Einfluss der Winkelabweichung einzelner Rotorblätter untersucht.

# Abstract

The purpose of this work is the investigation of two types of wind turbines, which for reasons of confidentiality are referred to as „System A“ and „System B“. The yield that can be achieved at different pitch angles is of interest. In order to get the shape of the rotor blades, the wind turbines were scanned with 3D laser scanners. The point clouds obtained could be further processed with a Python script and profile sections could be extracted. With the free software QBlade, the profile flow around the profiles at different radial positions was calculated in order to obtain the resulting forces in the form of dimensionless coefficients. Polar diagrams represent these coefficients depending on the inflow direction. The profile sections were then further combined with their dimensions and their position in space to form a rotor blade model. Together with the wind field, a simulation could now be carried out, which works according to the „lifting line method“. The yield was now calculated using the power received and the location-related wind measurements. The simulation not only provides information about the performance, but also about many other parameters such as the Reynolds number, the relative windspeed and the aerodynamic angle of attack. These parameters were then compared with the values for the design of the simulation and their influence was checked, so that the results obtained could be interpreted. The pitch angles were not only changed together for all three rotor blades, but the influence of the angular deviation of individual rotor blades was also examined.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Aufgabenstellung/Motivation . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Theorie Windkraftanlage</b>	<b>2</b>
2.1	Aufbau Windkraftanlage . . . . .	2
2.2	Rotor . . . . .	3
2.2.1	Geometrische Parameter . . . . .	3
2.2.2	Kräfte, Geschwindigkeiten und Beiwerte am Profil . . . . .	5
2.2.3	Reynoldszahl . . . . .	7
2.2.4	Laminarprofil - Transition . . . . .	7
2.2.5	Polaren . . . . .	10
2.2.6	Verwindung . . . . .	11
2.3	Betz'sches Gesetz . . . . .	12
2.4	Berechnungsverfahren . . . . .	15
2.4.1	Blattelementmethode . . . . .	16
2.4.2	Wirbelmethode . . . . .	17
2.5	Betrieb . . . . .	22
2.5.1	Leistungskennlinie . . . . .	22
2.5.2	Leistungsregelung . . . . .	22
2.6	Wind . . . . .	24
2.6.1	Windscherung . . . . .	24

2.6.2	Windgeschwindigkeitsverteilung . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Software und Methode</b>	<b>28</b>
3.1	Verwendete Software . . . . .	28
3.1.1	RiSCAN PRO . . . . .	28
3.1.2	Python und Salome Meca . . . . .	31
3.1.3	QBlade . . . . .	31
3.2	Modellierung der Rotorblattgeometrie . . . . .	31
3.2.1	Datenexport aus RiSCAN PRO . . . . .	31
3.2.2	Erzeugen der Profil-Punktlisten . . . . .	33
3.2.3	Rotorblattdesign in QBlade . . . . .	35
3.3	Simulation in QBlade . . . . .	39
3.3.1	Polaren . . . . .	39
3.3.2	360° Polar-Extrapolation . . . . .	44
3.3.3	Windprofil . . . . .	46
3.3.4	QLLT Simulation . . . . .	47
3.4	Datenauswertung . . . . .	50
3.4.1	Produktionsdaten . . . . .	50
3.4.2	Häufigkeitsverteilung des Windes . . . . .	51
3.4.3	Simulationsdaten . . . . .	52
3.4.4	Ertragsberechnung . . . . .	53
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>55</b>
4.1	Einfluss der Reynoldszahl . . . . .	55
4.1.1	Vergleich der simulierten mit den berechneten Reynoldszahlen	55
4.1.2	Reynoldszahlenschwankung . . . . .	57
4.1.3	Einfluss der Reynoldszahl auf die Polaren . . . . .	61
4.2	Ertrag bei unterschiedlicher Pitchwinkelstellung . . . . .	64
4.3	Abweichungen des Pitchwinkels einzelner Rotorblätter . . . . .	69

<b>5</b>	<b>Erkenntnisse</b>	<b>76</b>
	<b>Literatur</b>	<b>77</b>



# Nomenklatur

## Abkürzungen

BEM	Blattelementmethode
CAE	Computer-aided engineering
HAWT	Horizontalachsig Windkraftanlage
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
VAWT	Vertikalachsig Windkraftanlage

## Lateinische Symbole

$\dot{m}$	Massenstrom	$kg/s$
$A$	Querschnittsfläche	$m^2$
$b$	Breite eines Rotorblattausschnittes	$m$
$c$	Profiltiefe	$m$
$c_a$	Auftriebsbeiwert	
$c_P$	Leistungsbeiwert	
$c_w$	Widerstandsbeiwert	
$E$	Kinetische Energie	$J$
$F$	resultierende Kraft	$N$
$F_A$	Auftriebskraft	$N$
$F_S$	Schubkraft	$N$
$F_T$	Tangentialkraft	$N$
$F_W$	Widerstandskraft	$N$
$h_w$	Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Windgeschwindigkeit	
$m$	Masse	$kg$
$n$	Drehzahl	$1/s$
$N_{crit}$	Verstärkungsfaktor ( $e^N$ Methode)	
$P$	Leistung	$W$
$P_0$	Gesamte im Wind enthaltene Leistung	$W$

$R$	Radius bis zur Rotorblattspitze	$m$
$r_P$	Radius des Profilschnittes	$m$
$t$	Zeit	$s$
$u$	Umfangsgeschwindigkeit	$m/s$
$v_{aus}$	Ausschaltwindgeschwindigkeit	$m/s$
$v_a$	Axiale Anströmgeschwindigkeit	$m/s$
$v_{ein}$	Einschaltwindgeschwindigkeit	$m/s$
$v_N$	Nennwindgeschwindigkeit	$m/s$
$v_r$	Relative Windgeschwindigkeit	$m/s$
$v_w$	Windgeschwindigkeit	$m/s$
$z_0$	Rauhigkeitslänge	$m$
$Re$	Reynoldszahl	

## Griechische Symbole

$\alpha$	Aerodynamischer Anstellwinkel	°
$\beta$	Verwindungswinkel	°
$\epsilon$	Gleitzahl	
$\eta$	Wirkungsgrad	
$\Gamma$	Zirkulation	$m^2/s$
$\lambda$	Schnelllaufzahl	
$\mu$	dynamische Viskosität	$Pa \cdot s$
$\nu$	kinematische Viskosität	$m^2/s$
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit	$rad/s$
$\rho$	Dichte	$kg/m^3$
$\sigma_0$	Turbulenzintensität	
$\sigma_v$	Standardabweichung	
$\vartheta$	Blatteinstellwinkel	°
$\vartheta_P$	Pitchwinkel	°

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Aufgabenstellung/Motivation

Die optimalen Einstellungen einer Windkraftanlage sind von dessen Standort und den dort vorherrschenden Windverhältnissen abhängig. Stellt man einen Zusammenhang zwischen dem Ertrag und der mechanischen Belastung der Windkraftanlagen her, kann man somit den Betrieb optimal auf die Bedürfnisse des Benutzers einstellen. Es kann somit ein Kompromiss zwischen Ertrag und Lebenszeit gefunden werden, um den größtmöglichen Nutzen zu erzielen.

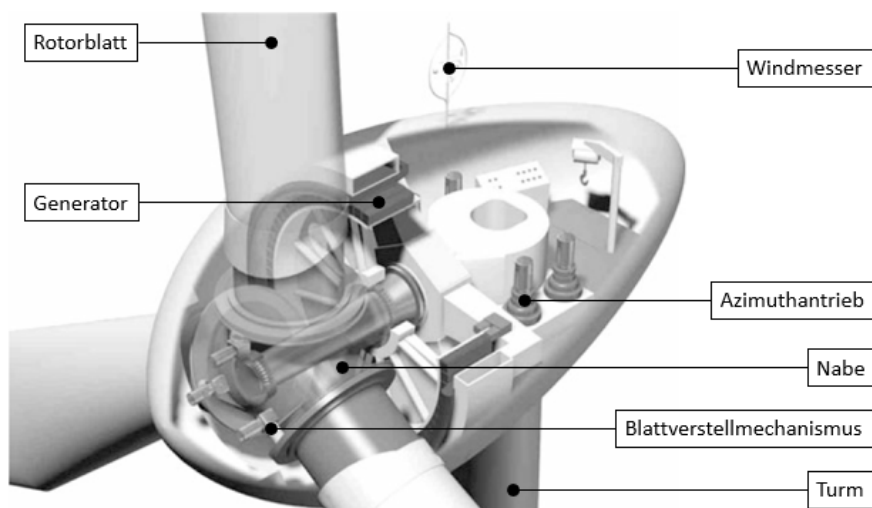
In dieser Arbeit ist der erzielbare Ertrag bei unterschiedlichen Rotorblattwinkstellungen von Interesse. Mithilfe von fluiddynamischer Modellierung soll dafür die Umströmung, sowie die Veränderungen der Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte der Rotorblattprofile untersucht werden. Der Einfluss der Windscherung soll zudem im Windfeld berücksichtigt werden.

# Kapitel 2

## Theorie Windkraftanlage

### 2.1 Aufbau Windkraftanlage

Bei den behandelten Windkraftanlagen handelt es sich um horizontalachsige Anlagen die drehzahlvariabel betrieben werden. Sie besitzen drei Rotorblätter, die mittels eines Blattverstellmechanismus in ihrer Längsachse gedreht werden können (Pitchwinkelregelung siehe Abschnitt 2.5.2). Der grundlegende Aufbau ist in Abbildung 2.1 zu sehen. Der Azimuthantrieb stellt sicher, dass die Anlage von vorne angeströmt wird (Luvläufer).

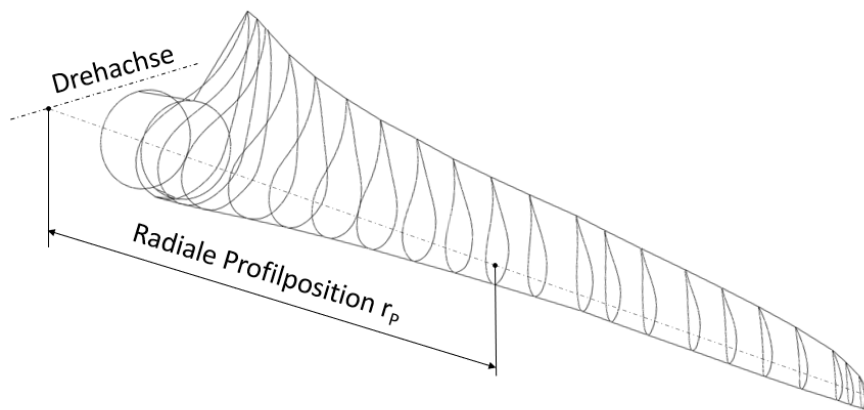


**Abbildung 2.1:** Aufbau einer getriebelosen Windkraftanlage; modifiziert aus [12]

## 2.2 Rotor

### 2.2.1 Geometrische Parameter

Das Rotorblatt ist aus Profilen aufgebaut, welche in weiterer Folge auch als Profilschnitte bezeichnet werden. In Abbildung 2.2 ist die radiale Profilposition  $r_P$  eingezeichnet, wobei diese dem Abstand eines Profils zur Drehachse entspricht. In Diagrammen wird dieser Radius im Verhältnis zum maximalen Radius (Profilspitze) angegeben.



**Abbildung 2.2:** Radiale Profilposition

In Abbildung 2.3 sind die geometrischen Parameter eines Profils dargestellt. Die Verbindungslinie zwischen Profilnase (2) und Profilhinterkante (7) wird als Profilsehne bezeichnet. Die Länge der Sehne ist die Profiltiefe  $c$ . Die Skelettlinie verbindet die Mittelpunkte der dem Profil eingeschriebenen Kreise. Ein symmetrisches Profil besitzt eine gerade Skelettlinie, ansonsten ist es unsymmetrisch bzw. gewölbt. Der größte Kreisdurchmesser ist die Profildicke (4) und die größte Abweichung der Sehne zur Skelettlinie die Profilwölbung (5). Weiters sind noch die Profiloberseite (6) und Profilunterseite (9) in der Abbildung dargestellt. [2]

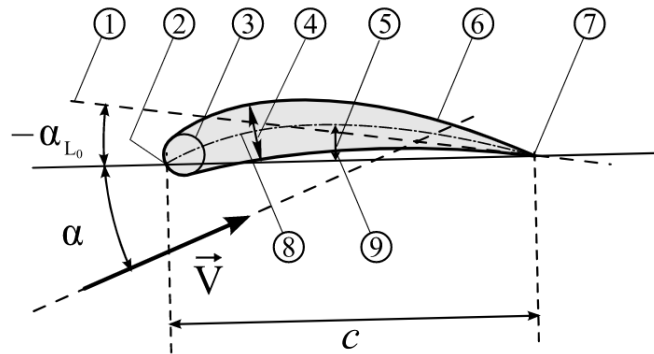


Abbildung 2.3: Profilgeometrie [27]

Das x-y-Koordinatensystem ist so festgelegt, dass die Profilhase im Koordinatenursprung und die Profilschneidegerade auf der x-Achse liegt.

Der Winkel zwischen der Drehebene und der Profilschneidegeraden wird als Blatteinstellwinkel  $\vartheta$  bezeichnet (siehe Abbildung 2.4). Der aerodynamische Anstellwinkel  $\alpha$  wird aus der Profilschneidegeraden und der resultierenden Anströmgeschwindigkeit  $v_r$  gebildet. [11]

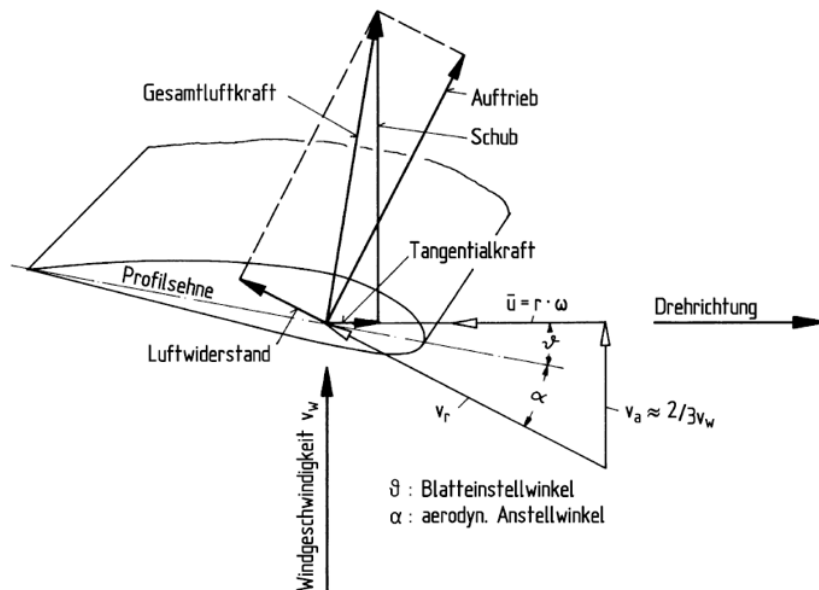
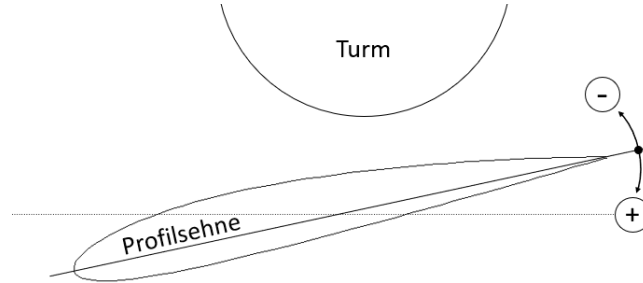


Abbildung 2.4: Winkeldefinition am Profilquerschnitt [11]

In Abbildung 2.5 ist eine Variation der Winkellage des gesamten Rotorblattes, am Beispiel einer Profilschneidegeraden, dargestellt. Die Darstellung zeigt die Draufsicht auf die Windkraftanlage, wobei auch der Turm angedeutet ist. Diese Winkeländerung um die Längsachse, wird als Pitchverstellung mit dem Pitchwinkel  $\vartheta_P$  bezeichnet. Bei keiner Pitchverstellung ( $\vartheta_P = 0^\circ$ ) entspricht der Blatteinstellwinkel dem Verwin-

zungswinkel  $\beta$ . Dieser ist eine konstruktiv festgelegte Größe und variiert über die Blattlänge (Verwindung des Rotorblattes, siehe Abschnitt 2.2.6).



**Abbildung 2.5:** Vorzeichenkonvention des Pitchwinkels  $\vartheta_P$

### 2.2.2 Kräfte, Geschwindigkeiten und Beiwerte am Profil

Wird das Profil angeströmt, resultiert eine Kraft  $F$ . Diese setzt sich aus der Auftriebskraft  $F_A$  und einer Widerstandskraft  $F_W$  zusammen.

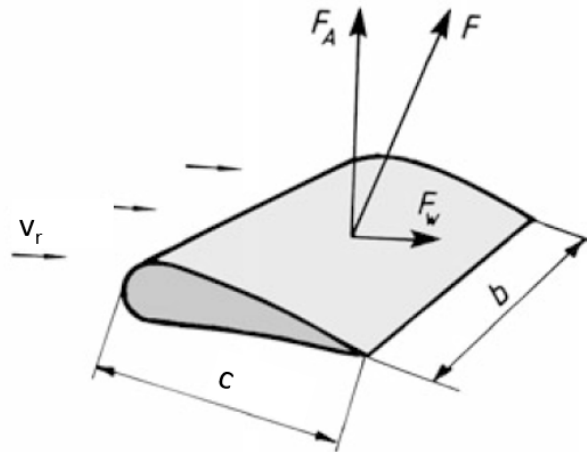
Die Entstehung der Auftriebskraft kann man sich mithilfe des Impulssatzes erklären. Der nach unten umgelenkte Fluidmassenstrom in der Profilumgebung lässt demnach eine Kraft in entgegengesetzte Richtung entstehen. Die Auftriebskraft zeigt nach oben, also normal zur Strömungsrichtung (siehe Abbildung 2.6) . [2]

Mithilfe der Auftriebskraft und der Widerstandskraft, erhält man den dimensionslosen Auftriebsbeiwert  $c_a$  und den Widerstandsbeiwert  $c_w$ :

$$F_A = c_a \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2 \rightarrow c_a = \frac{F_A}{A \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2} \quad (2.1)$$

$$F_W = c_w \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2 \rightarrow c_w = \frac{F_W}{A \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2} \quad (2.2)$$

Diese beziehen sich auf den Staudruck  $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2$  und die Querschnittsfläche  $A = b \cdot c$ . Die Profiltiefe  $c$  und die Breite des Rotorblattausschnitts  $b$ , sind in Abbildung 2.6 abgebildet.



**Abbildung 2.6:** Auftriebs- und Widerstandskraft am Rotorblattelement; modifiziert aus [2]

Die dimensionslosen Beiwerte sind abhängig vom Anstellwinkel, wobei ein positiver Wert von  $c_a$  einen Auftrieb entspricht, ansonsten herrscht Abtrieb.  $c_w$  ändert sich nur gering und ist stets positiv im Anstellwinkelbereich des normalen Betriebs. Die Ermittlung erfolgt normalerweise experimentell im Windkanal. [11, 23]

Die resultierende Kraft  $F$  kann zerlegt werden in eine Tangentialkomponente  $F_T$  in der Rotordrehebene und eine weitere Kraft  $F_S$  senkrecht darauf. Die Tangentialkomponente erzeugt das Antriebsmoment und  $F_S$  den Rotorschub. Da der Rotor eine Drehbewegung vollzieht, setzt sich die Anströmgeschwindigkeit  $v_r$  zusammen aus der axialen Anströmgeschwindigkeit  $v_a$  und der Umfangsgeschwindigkeit  $u$ . Alle genannten Größen sind in Abbildung 2.4 dargestellt. Die Umfangsgeschwindigkeit eines gewählten Profils, ist von dessen radialen Abstand zur Rotationsachse abhängig und lässt sich wie folgt berechnen:

$$u = \omega \cdot r_P = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot r_P \quad (2.3)$$

Solange die Windgeschwindigkeit und die Drehzahl konstant bleiben, ändert sich der Winkel zwischen der Drehebene und  $v_r$  nicht ( $\vartheta + \alpha = \text{konst.}$ ), er ist also unabhängig von der Lage der Profilsehne. [2, 11]



### 2.2.3 Reynoldszahl

Eine wichtige dimensionslose Kennzahl für Profilmströmung ist die Reynoldszahl. Sie ist maßgebend für den Einfluss der Reibung des umströmten Körpers. Die Berechnung erfolgt mithilfe der Anströmgeschwindigkeit  $v_r$ , der charakteristischen Länge (Profiltiefe  $c$ ) und der kinematischen Zähigkeit  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ :

$$Re_c = \frac{v_r \cdot c}{\nu} \quad (2.4)$$

mit Luft bei Normalnull:  $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$

[11, 18]

Die Reynoldszahlen von Windrotoren liegen an der Blattspitze im Bereich von 1 bis  $8 \cdot 10^6$ , je nach Größe der Rotoren und entsprechen damit den Werten, die auch für die Tragflügel von langsamer fliegenden Flugzeugen gültig sind. Deshalb werden bis heute die aerodynamischen Profile für die Rotorblätter von Windkraftanlagen aus der Luftfahrt „entliehen“. [11]

### 2.2.4 Laminarprofil - Transition

#### Grenzschicht

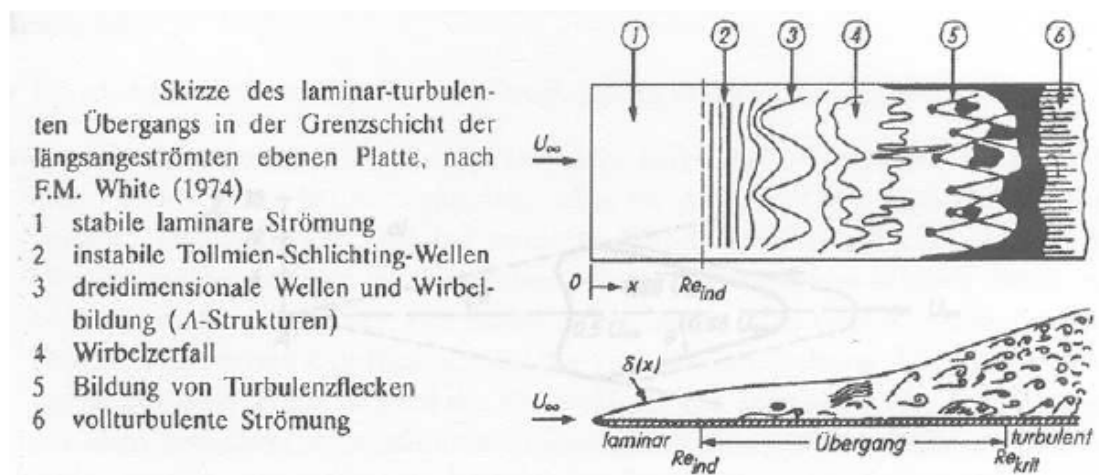
An der Außenfläche des Profils fällt in einer sehr dünnen Schicht, die Geschwindigkeit des Fluids auf null ab. Diese Schicht wird als Grenzschicht bezeichnet und in ihr liegt ein großer Geschwindigkeitsgradient und deshalb auch eine große Schubspannung vor. Der Einfluss der Viskosität hat hier also anders wie in der freien Strömung, bei der nur kleine Geschwindigkeitsgradienten vorkommen, große Bedeutung. [2]

Der gesamte Widerstand des umströmten Profils wird einerseits durch den Reibungswiderstand an der Grenzschicht und andererseits durch den Druckwiderstand erzeugt. Letzterer entsteht durch die Druckkräfte aus der Außenströmung. Der Geschwindigkeits- und Druckverlauf der Strömung um den Körper ist abhängig von dessen Form. Die Grenzschichtströmung ist laminar und schlägt ab einem gewissen „Umschlagspunkt“, in eine turbulente Strömung um. Das bedeutet, dass

sich die vorerst parallelen Schichten nun, durch Querbewegungen und Wirbel in der Strömung, miteinander vermischen. [11] Ob laminare oder turbulente Strömung vorliegt, ist abhängig von der Reynoldszahl. Bei einer längs angeströmten ebenen Platte wird diese wie folgt berechnet:

$$Re_x = \frac{v_r \cdot x}{\nu} \quad (2.5)$$

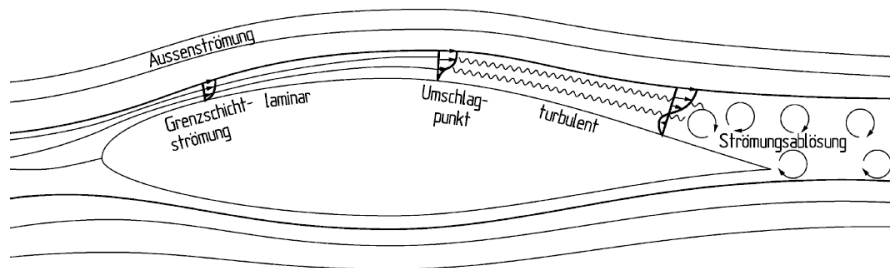
Hier entspricht  $x$  der Lauflänge, wodurch die Reynoldszahl kontinuierlich ansteigt. Der erwähnte Umschlag wird als Transition bezeichnet, welche auf verschiedene Arten geschehen kann. Bei einer Außenströmung geringer Turbulenz handelt es sich um die „Natürliche Transition“, welche in Abbildung 2.7 dargestellt ist. Man sieht, dass die Strömung mehrere Stadien durchläuft, bevor sie ab einer kritischen Reynoldszahl zu einer vollturbulenten Strömung wird. [28]



**Abbildung 2.7:** Natürliche Transition der Grenzschicht einer längs angeströmten Platte [28]

In Abbildung 2.8 ist ein Profilschnitt und die umliegende Außenströmung zu sehen. Die Grenzschichtdicke ist hier stark vergrößert dargestellt und nimmt über die Lauflänge der Profilloberfläche zu. Der Druck in der Grenzschicht entspricht näherungsweise dem Druck der Außenströmung. Die Strömung wird am Profil vorerst bis zur größten Profildicke beschleunigt, wodurch der Druck abfällt. Die Beschleunigung wirkt der Verlangsamung in der Grenzschicht, durch die viskose Reibung, entgegen. Danach kommt es zu einer Verzögerung der Strömung verbunden mit einem Druckanstieg, welche sich hier mit der viskosen Verzögerung summiert. In unmittelbarer Wandnähe kann es dann bis zu einer gegenläufigen Strömung

kommen, wie in Abbildung 2.8 zu sehen ist. Es entsteht ein Stau, welcher die Außenströmung von der Profiloberfläche wegdrängt, was als Strömungsablösung bezeichnet wird. [15]



**Abbildung 2.8:** Grenzschicht um einen Profilschnitt [11]

Die Strömungsablösung erzeugt einen Druckwiderstand welcher wie schon erwähnt, Teil des gesamten Widerstandes ist. Eine turbulente Grenzschicht hat die Eigenschaft, dass sie länger am Körper haftet und somit die Strömungsablösung erst bei größerer Lauflänge geschieht. Dies verringert zwar bei stumpfen Körpern den Druckwiderstand, da aber bei den vorliegenden schlanken Profilformen der Druckwiderstand nur einen sehr kleinen Teil des gesamten Widerstands ausmacht, im Gegensatz zum Reibungswiderstand in der Grenzschicht, steigt der Widerstand mit der Turbulenz. Eine Grenzschicht die lange laminar bleibt ist deshalb vorteilhaft. [11]

## $e^N$ Methode

Um den Ort der Transition zu bestimmen wird in QBlade die sogenannte „ $e^N$  Methode“ verwendet. Dieses Verfahren ist auf Grenzschichten mit einem Druckgradienten und zweidimensionaler, inkompressibler Strömung anwendbar. Es basiert auf der linearen Stabilitätstheorie, welche das Wachsen einer wellenförmigen Störung in der Strömung beschreibt. In QBlade muss ein Wert  $N_{crit}$  gewählt werden, wobei dieser dem Verstärkungsfaktor entspricht. Erreicht nun die verstärkte Frequenz den Wert  $e^{N_{crit}}$ , ist die Transition abgeschlossen. Auf die Festlegung des Wertes für  $N_{crit}$  wird in Abschnitt 3.3.1 eingegangen.[25]

### 2.2.5 Polaren

Trägt man die dimensionslosen Beiwerte für Auftrieb  $c_a$  oder Widerstand  $c_w$  über den aerodynamischen Anstellwinkel  $\alpha$  auf, erhält man ein Polardiagramm.

Man erkennt in Abbildung 2.9, dass der Auftrieb bei größer werdendem Anstellwinkel vorerst nahezu linear steigt. Danach flacht die Kurve ab und erreicht den Scheitelpunkt. Erhöht man den Anstellwinkel noch weiter, reißt die Strömung ab und der Auftriebsbeiwert sinkt. Der Widerstand ist bei kleinen Anstellwinkel nur sehr klein und steigt ab einem gewissen Wert stark an. [23] Es ist noch anzumerken, dass man bei unsymmetrischen Profilformen, auch bei einem Anstellwinkel  $\alpha = 0^\circ$  einen positiven Auftriebsbeiwert erhält. [18]

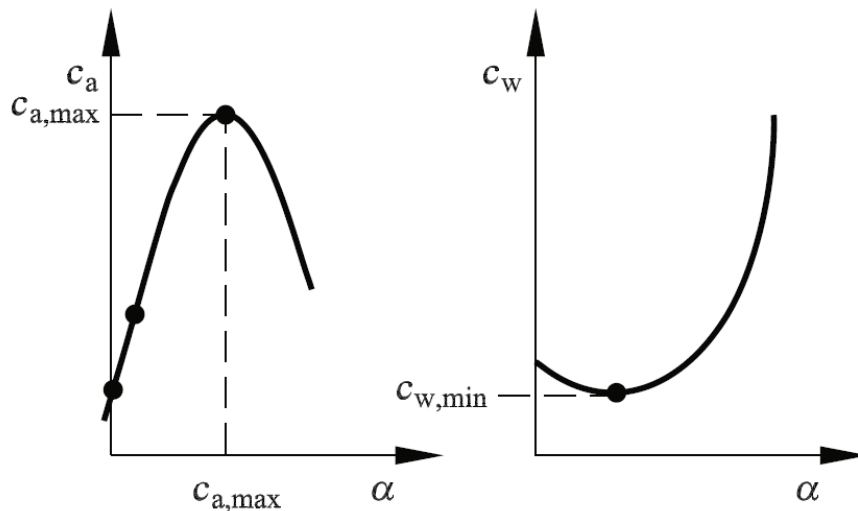


Abbildung 2.9: Polardiagramm [18]

Man kann die Beiwerte auch in ihrer gegenseitigen Abhängigkeit darstellen, welche dann auch als Lilienthalpolare (Abbildung 2.10) bezeichnet wird. [4] Der Anstellwinkel tritt hier als Parameter auf. Der Vorteil dieser Darstellung ist die direkte Auslesbarkeit der maximalen Gleitzahl, als Maß für die Profilhüte, die man durch Anlegen der Tangente erhält. [18] Die Gleitzahl ist dabei als das Verhältnis des Auftriebs- zum Widerstandsbeiwert definiert:

$$\epsilon = \frac{c_a}{c_w} \quad (2.6)$$

Der Verlauf der Polardiagramme ist abhängig von der Profilform und strömungs-

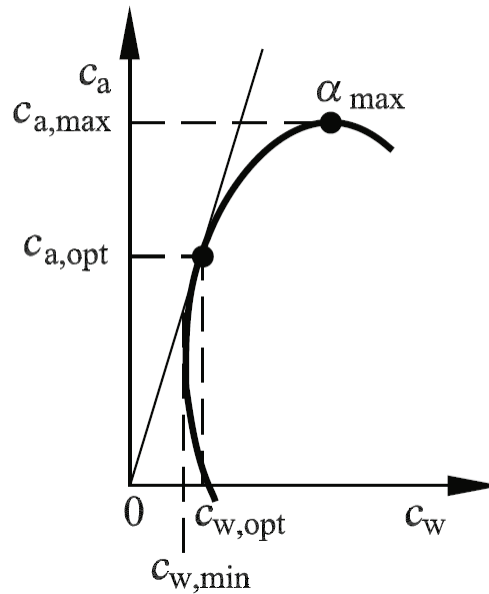
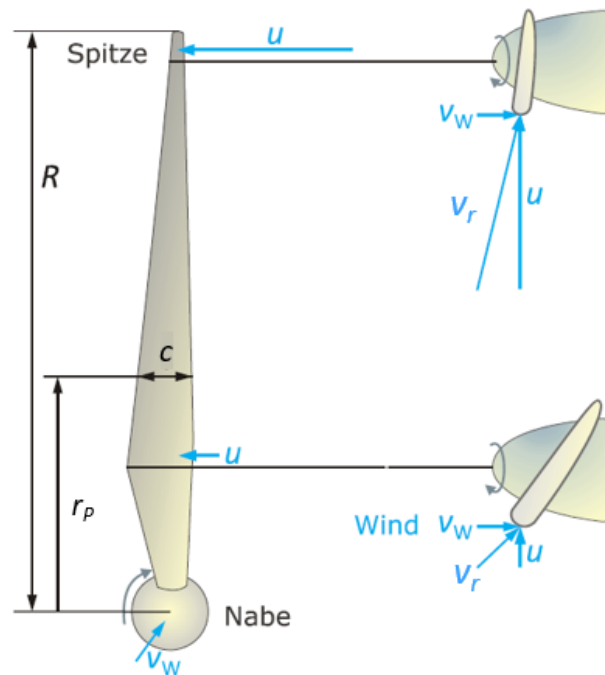


Abbildung 2.10: Polardiagramm nach Lilienthal [18]

mechanischen Eigenschaften. Da die Strömung und somit die Auftriebs- und Widerstandskraft, von der Viskosität des umströmenden Mediums abhängen, werden die Polaren oft für mehrere Reynoldszahlen dargestellt. [11]

### 2.2.6 Verwindung

Mit steigendem Radius am Rotorblatt nimmt auch die Umfangsgeschwindigkeit  $u$  zu. Das zieht eine Veränderung der Anströmgeschwindigkeit  $v_r$  mit sich, welche nun in einem anderen Winkel zur Drehebene steht (siehe Abbildung 2.11). In der Abbildung werden zur Veranschaulichung zwei Profilschnitte dargestellt. Um nun überall über die Rotorblattlänge gute aerodynamische Anstellwinkel zu erreichen, sind die Profile unterschiedlich orientiert. Das Rotorblatt ist somit verwunden. [19, 23] Die optimale Verwindung kann aber nicht für alle Betriebsbereiche gefunden werden, sondern wird für einen Betriebspunkt gewählt. Dies bedingt Verluste und örtliche Strömungsabrisse in anderen Betriebspunkten, besonders in der Nähe der Nabe, da dort das Rotorblatt oft nicht aerodynamisch optimal ausgelegt wird, da auf die Fertigung Rücksicht genommen wird. [11, 12]



**Abbildung 2.11:** Verwindung des Rotorblattes; modifiziert aus [19]

## 2.3 Betz'sches Gesetz

Eine Windkraftanlage entzieht dem Luftstrom kinetische Energie und wandelt diese in mechanische Arbeit um. Es lässt sich jedoch nicht die gesamte Leistung des Windes, der durch eine Querschnittsfläche strömt, entnehmen, da dann der Wind nach dem Rotor keine Geschwindigkeit mehr hätte und ein Luftstau entstehen würde. Es gilt daher ein optimales Verhältnis der Geschwindigkeiten des ein- und ausströmenden Luftstromes zu finden, um den optimalen Leistungsentzug zu gewährleisten. Die Berechnung bezieht sich auf einen Energiewandler der verlustfrei arbeitet und eine reibungsfreie Strömung. [11]

Die mitgeführte kinetische Energie des Windes lautet:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (2.7)$$

Differenziert man nun diese Energie nach der Zeit, erhält man die Leistung des Luftstromes, mit der Geschwindigkeit  $v$  durch die Querschnittsfläche  $A$ :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2 \quad (2.8)$$

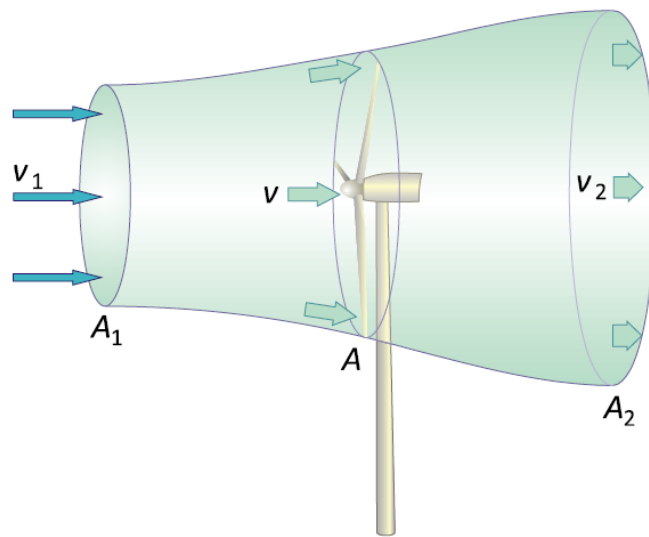
mit dem Luftmassenstrom:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v \quad (2.9)$$

erhält man:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2.10)$$

Der Energiewandler entzieht dem Luftstrom nun kinetische Energie, wobei der Massenstrom  $\dot{m}$  konstant bleibt (Kontinuitätsbeziehung). Dies ist nur durch die Verringerung der Geschwindigkeit möglich, da aber der Massenstrom gleich bleibt wird die Querschnittsfläche größer. In Abbildung 2.12 entspricht der Index „1“ vor und der Index „2“ hinter der Windkraftanlage bzw. dem Wandler. Die Differenz der Leistungen davor und dahinter entspricht der entzogenen Leistung, wobei die Dichte, die abhängig vom Luftdruck und der Temperatur ist, als konstant angenommen wurde:



**Abbildung 2.12:** Strömung durch eine Windkraftanlage (Betz) [2]

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_1 \cdot v_1^3 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_2 \cdot v_2^3 \quad (2.11)$$

Mit der Kontinuitätsbeziehung:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m} \quad (2.12)$$

Wird aus Gleichung (2.11):

$$P = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.13)$$

Diese Leistung soll nun maximal werden und da ein Ergebnis mit  $v_2 = 0$  unphysikalisch wäre, wird ein Verhältnis  $\frac{v_2}{v_1}$  gesucht. Um dieses zu bekommen wird ein zweiter Ansatz für die entzogene Leistung aus dem Luftstrom verwendet. Mit dem Impulssatz bekommt man hierbei die Schubkraft mit der die Luftmenge mit der Geschwindigkeit  $v$ , beim Querschnitt  $A$  verschoben wird:

$$F = \dot{m} \cdot (v_1 - v_2) \quad (2.14)$$

Die benötigte Leistung hierfür ist:

$$P = F \cdot v \quad (2.15)$$

Welche nun mit der Leistung aus Gleichung (2.13) gleichgesetzt werden kann:

$$\frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \dot{m} \cdot (v_1 - v_2) \cdot v \quad (2.16)$$

Daraus erhält man die Geschwindigkeit  $v$  und man erkennt, dass sie dem arithmetischen Mittel aus der Eintritts- und Austrittsgeschwindigkeit entspricht:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (2.17)$$

Die Leistung lässt sich nun mit  $\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1 + v_2)$  wie folgt ausdrücken:

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2) \quad (2.18)$$

Um den Leistungsbeiwert  $c_P$  zu berechnen, benötigen wir noch die gesamte enthal-



tene Leistung des Luftstroms durch die Querschnittsfläche A:

$$P_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \quad (2.19)$$

Und somit erhält man:

$$c_P = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3} \quad (2.20)$$

Der Leistungsbeiwert lässt sich nun durch Umformen als Funktion des Verhältnisses  $\frac{v_1}{v_2}$  anschreiben und ist nur noch von diesem abhängig:

$$c_P = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \quad (2.21)$$

Das ideale Geschwindigkeitsverhältnis kann nun durch Nullsetzen der ersten Ableitung erhalten werden, mit  $\varsigma = \frac{v_2}{v_1}$ :

$$\frac{dc_P}{d\varsigma} = \frac{d\left(\frac{1}{2} \cdot (1 - \varsigma^2) \cdot (1 + \varsigma)\right)}{d\varsigma} = -\frac{3}{2} \cdot \varsigma^2 - \varsigma + \frac{1}{2} = 0 \quad (2.22)$$

Dies ergibt ein optimales Verhältnis von  $\frac{v_1}{v_2} = \frac{1}{3}$ , welches zu einem Leistungsbeiwert von  $c_P = 0,593$  führt. Dies ist die maximale Leistung, die dem Luftstrom durch den Wandler entnommen werden kann und wird als Betz'scher Leistungsbeiwert bezeichnet. [1, 11, 19]

## 2.4 Berechnungsverfahren

Zur aerodynamischen Auslegung der Rotorblätter gibt es verschiedene Modelle, die in diesem Kapitel beschrieben werden. QBlade verwendet sowohl die Blattelementmethode (BEM), als auch die Lifting-Line-Methode aus der Familie der Wirbelmethoden, zur Berechnung aerodynamischer Größen und Kräfte am Rotor. Da numerische Strömungssimulationen (CFD) in dieser Arbeit nicht verwendet werden, wird auf die weitere Beschreibung verzichtet.

Die Blattelementmethode ist hierbei die schnellste Methode und benötigt nur sehr wenig Rechenleistung. Jedoch lassen sich dreidimensionale Strömungseffekte nur unter Zuhilfenahme von semi-empirischen Korrekturen berücksichtigen. Die Wirbelmethode liegt bezogen auf die Rechenleistung zwischen CFD und BEM. Sie benötigt keine Korrekturen, da räumliche Strömungseffekte direkt berechnet werden können. Außerdem ist ein instationärer Strömungszustand und die Pitchverstellung einzelner Rotorblätter realisierbar. [7]

### 2.4.1 Blattelementmethode

Da in der Betz'schen Theorie die Strömung nur zweidimensional betrachtet wurde, muss nun noch der Verlust durch den Drall in der Strömung berücksichtigt werden. Dieser wird durch den Rotor erzeugt und setzt sich in der Nachlaufströmung fort. Der Luftstrom enthält also translatorische und rotatorische Anteile. Setzt man diese ins Verhältnis erhält man die Schnelllaufzahl  $\lambda$ , wobei die Umfangsgeschwindigkeit auf die Rotorblattspitze bezogen wird:

$$\lambda = \frac{u_{\text{Blattspitze}}}{v_w} \quad (2.23)$$

Bis jetzt wurde die Form der Rotorblätter noch nicht miteinbezogen, was sich mit der Blattelementtheorie nun ändert. Das Rotorblatt wird in eine endliche Anzahl von Blattelementen diskretisiert. Diese rotieren mit ihrer radialen Lage um die Drehachse, wobei angenommen wird, dass sich die Luftkräfte in konzentrischen Streifen unbeeinflusst voneinander bewegen. Die Elemente sind über ihre radiale Position, ihre Form, ihre Profiltiefe und den Blatteinstellwinkel definiert. Zunächst wird die relative Windgeschwindigkeit für jedes Element bestimmt. Dabei ergibt sich auch der aerodynamische Anstellwinkel, wodurch man die Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte aus den Polaren entnehmen kann.

Als nächstes werden die Kräfte berechnet, wobei diese in eine tangentiale und eine normale Komponente aufgeteilt werden. Die Einzelbeiträge aller Elemente bilden nun sowohl die gesamte Tangentialkraft, aus welcher man das Antriebsmoment erhält und die gesamte Normalkraft, welche der Schubkraft entspricht.

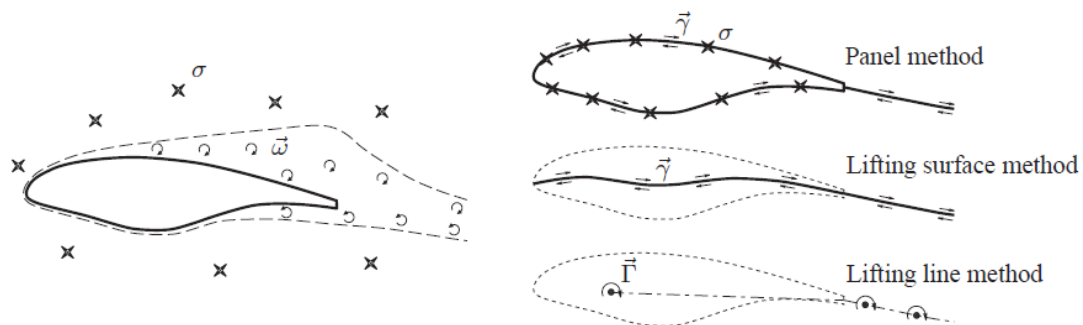
Da neben dem Profilwiderstand auch noch Verluste an der Blattspitze und der Nabe entstehen, müssen diese auch berücksichtigt werden. Dies geschieht wie schon

erwähnt mit halbempirischen Ansätzen. [5, 11]

### 2.4.2 Wirbelmethode

Die räumliche Umströmung eines Rotors lässt sich auf verschiedene Arten beschreiben. Die Prandtl'sche Tragflügeltheorie besagt, dass der Grund für den Auftrieb die Zirkulationsverteilung um den Tragflügel ist. Daraus ergibt sich für eine reibungsfreie Profilmströmung, die sogenannte Singularitätenmethode. Bei dieser wird die Umströmung, eines mit dem aerodynamischen Anstellwinkel  $\alpha$  angeströmten Profils, durch die Anordnung von Wirbeln (Anstellung), Quellen und Senken (Dicke), sowie der Anströmgeschwindigkeit berechnet. [18]

Als Vereinfachungsmaßnahme kann die Dimension der Umströmung reduziert werden, sodass aus dem Volumenintegral der räumlichen Verwirbelung, ein Oberflächenintegral und schlussendlich ein Linienintegral (Wirbellinien) wird. Für die Quellenverteilung im Volumen kann eine ähnliche Vereinfachung durchgeführt werden und sowohl Quellen als auch Wirbel werden aufgrund ihrer Eigenschaft als „Singularitäten“ bezeichnet. Durch die Vereinfachungen lassen sich nun verschiedene Strömungsfeldannäherungen finden, die in Abbildung 2.13 dargestellt sind. Dabei ist links die Modellierung des Strömungsfeldes mittels Wirbel  $\omega$  und Quellen  $\sigma$  zu sehen. Bei der Panel Methode liegen alle Quellen und Wirbelsingularitäten auf der Profiloberfläche und dem Nachlauf. Bei der Lifting Surface Methode entfällt nun die Profildicke, wobei sämtliche Wirbel auf einer Linie liegen. Bei der Lifting Line Methode liegt nun ein Wirbel beim Viertel der Profiltiefe  $\frac{c}{4}$ . [24]

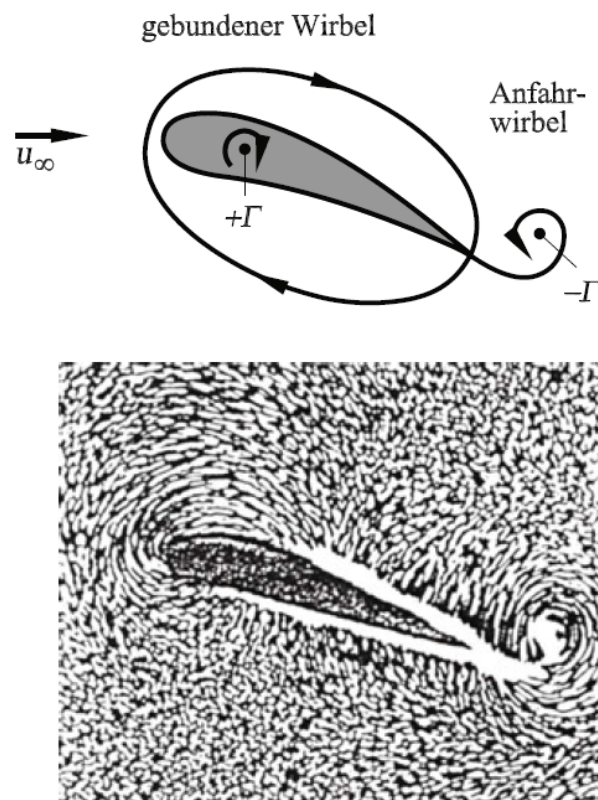


**Abbildung 2.13:** Strömungsfeldannäherung [24]

Bei letzterer Methode kann die Auftriebskraft dabei mit der Zirkulation  $\Gamma$  ermittelt werden, welche die Drehung im Strömungsfeld charakterisiert:

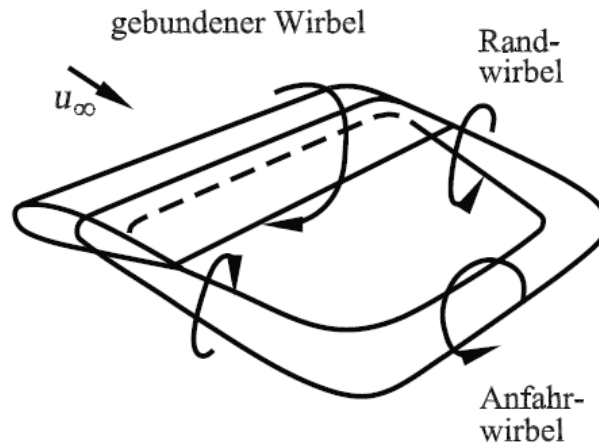
$$F_A = \rho \cdot \Gamma \cdot v_r \quad (2.24)$$

In Abbildung 2.14 sieht man die entstehenden Wirbel eines Profils. Der Anfahrwirbel besitzt dabei eine negative Zirkulation welche durch die gleiche Zirkulation mit entgegengesetztem Vorzeichen um das Profil, ausgeglichen wird (gebundener Wirbel).



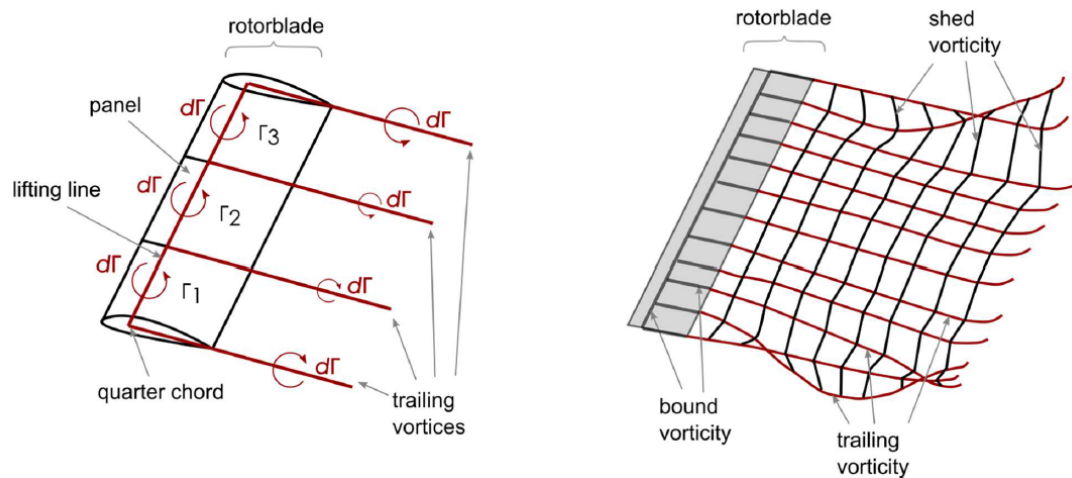
**Abbildung 2.14:** Entstehung der Wirbel eines Profils [18]

Durch die Verbindung der genannten Wirbel mit Randwirbeln entsteht ein geschlossenes Wirbelsystem, welches in Abbildung 2.15 dargestellt ist. Da die Zirkulation entlang einer Wirbellinie konstant ist, kann diese nicht in der Strömung enden, daher muss ein geschlossenes System vorliegen (Helmholtz'scher Wirbelsatz). Die Randwirbel können jedoch unendlich ausgedehnt werden, wobei man dieses Wirbelsystem dann als Hufeisenwirbel bezeichnet. Um nun die Strömung zu berechnen, werden viele solcher Hufeisenwirbel mit unterschiedlicher Wirbelstärke und Länge des gebundenen Wirbels  $\Gamma$ , am Rotorblatt verteilt. Sie werden entlang einer Linie angeordnet, welche als Auftriebslinie bezeichnet wird (engl. Lifting Line). [18]



**Abbildung 2.15:** Geschlossenes Wirbelsystem [18]

In QBlade werden im Modul „QLLT - Nonlinear Lifting Line Simulations“ die vorgestellten Modelle für eine instationäre aerodynamische Simulation verwendet, welche aber an kein Strukturmodell gekoppelt ist, weshalb man von einem starren Rotor ausgehen muss. [17] Die Modellierung des Rotorblattes und der Nachlaufströmung erfolgt mit der Lifting Line Methode, wobei die Auftriebslinie und somit der Angriffspunkt der Auftriebskraft, für jeden Profilschnitt eines Rotorblattes, bei  $\frac{c}{4}$  liegt. Die Kraft wird mit der lokalen Anströmrichtung berechnet, bei der die Annahme gilt, dass sie in der Ebene des Schnittes liegt. Viskositätseffekte werden durch die Einbeziehung der Polaren berücksichtigt, außerdem kann eine inkompressible Strömung angenommen werden (lokale Strömungsgeschwindigkeiten sind viel kleiner als die Schallgeschwindigkeit). [24] Der Begriff „Nonlinear“ im Modulnamen bezieht sich auf die Berechnung der Zirkulation der gebundenen Wirbel an der Auftriebslinie, welche mittels der nichtlinearen Polaren für Auftrieb und Widerstand erfolgt. Auf dem Rotorblatt sind mehrere Hufeisenwirbel nebeneinander angeordnet, mit dem gebundenen Wirbel auf der Auftriebslinie. Es gilt die Zirkulation  $\Gamma$  dieser Wirbelsysteme zu berechnen, wobei zu jedem Zeitschritt die Wirbelringe von der Hinterkante abgeworfen werden, wo sie dann auf die älteren Hufeisenwirbel treffen. Zusammen bilden sie dann ein Gitter, weshalb man hier von der Wirbelgittermethode spricht. In Abbildung 2.16 ist die Modellierung des Rotorblattes und der Nachlaufströmung mit der Wirbelgittermethode dargestellt.



**Abbildung 2.16:** Modellierung des Rotorblattes und der Nachlaufströmung mit der Lifting Line Methode [17]

Die Nachlaufströmung lässt sich auf zwei Arten modellieren, wobei die Wirbelelemente entweder auf einen vorgeschriebenen Pfad übertragen werden, oder die Position der Wellenendpunkte berechnet wird. Zur Berechnung dient die lokale Geschwindigkeit, welche sich aus der Anströmgeschwindigkeit und aller induzierten Geschwindigkeiten der Wirbelelemente zusammensetzt. In QBlade wird die zweite Methode verwendet, da sie die realen physikalischen Gegebenheiten besser abbildet und somit viel genauer ist, jedoch auch deutlich mehr Rechenleistung benötigt. Zusätzlich werden mithilfe der Panelmethode die obere und untere Oberfläche des Rotors mit einem Netz aus Wirbelringen modelliert.

Um einen Einblick in den verwendeten Algorithmus zu bekommen, wird in Abbildung 2.17 noch der Flowchart eines Zeitschritts abgebildet. Dabei wird die Rotorposition (Pitchwinkel und Lage in der Drehebene) angepasst und anschließend die Zirkulation  $\Gamma$  mithilfe einer Iteration berechnet. Weiters erhält man wichtige Größen wie den aerodynamischen Anstellwinkel  $\alpha$  und die relative Anströmgeschwindigkeit  $v_r$ . Wie schon erwähnt werden die entsprechenden Polaren zur Berechnung der Zirkulation und in weiterer Folge der Kräfte verwendet. Ist die Zirkulation konvergiert, werden als nächstes alte Elemente der Nachlaufströmung abgeschnitten, um durch eine begrenzte Anzahl der Wirbelelemente die Rechenleistung zu reduzieren. Nach der Anpassung des vorliegenden Wirbelgitters werden neue Wirbelelemente hinzugefügt und mit einer Zirkulation beaufschlagt.

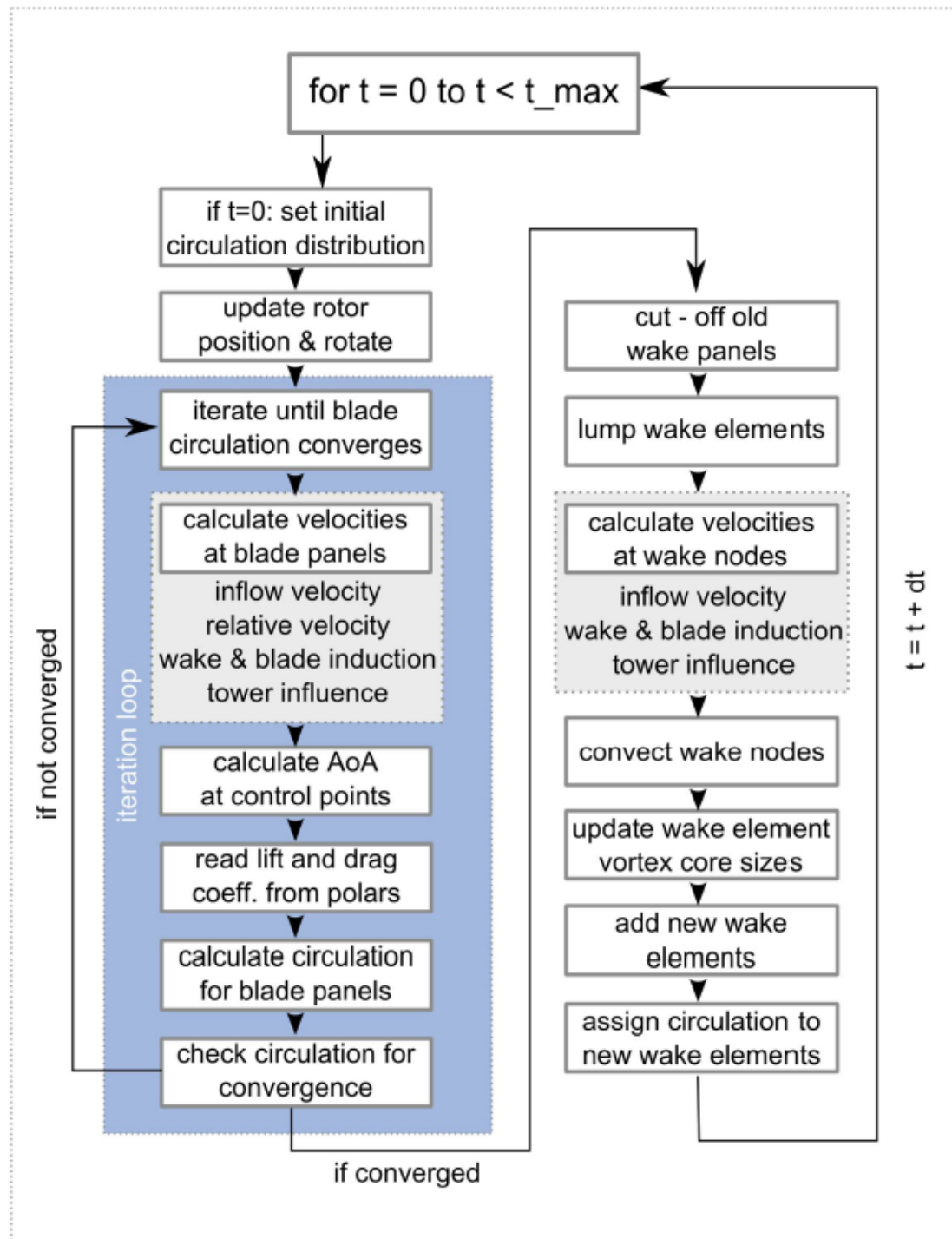


Abbildung 2.17: Flowchart des verwendeten Algorithmus in QBlade [17]

## 2.5 Betrieb

Dieser Abschnitt bezieht sich nur auf Windkraftanlagen mit drehzahlvariabler Betriebsweise.

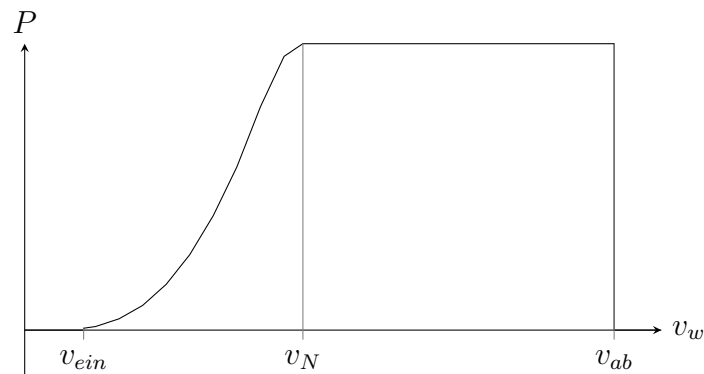
### 2.5.1 Leistungskennlinie

Die Leistungskennlinie die in Abbildung 2.18 zu sehen ist, stellt die erzeugte elektrische Leistung direkt über der Windgeschwindigkeit dar. Eine weitere Möglichkeit ist die Leistung in dimensionsloser Form abzubilden, mit dem Leistungsbeiwert  $c_P$  in Abhängigkeit der Schnelllaufzahl  $\lambda$ , wobei die erste Darstellungsart in dieser Arbeit aufgrund ihrer Benutzerfreundlichkeit bevorzugt wird. In der Abbildung sind auch noch Windgeschwindigkeiten mit besonderer Bedeutung eingezeichnet. Die Geschwindigkeit  $v_{ein}$  ist die Einschaltwindgeschwindigkeit, ab der ein wirtschaftlicher Betrieb der Anlage möglich ist und sie Leistung abgibt. Dies ist auch der Beginn des Teillastgebiets, indem der Pitchwinkel auf einem konstanten Wert gehalten wird. Die Drehzahl wird an die Windgeschwindigkeit angepasst, sodass die Anlage mit der optimalen Schnelllaufzahl  $\lambda$  betrieben wird. Die maximale Generatorleistung wird bei der Nennwindgeschwindigkeit  $v_N$  erreicht, welche auch das Ende des Teillastgebiets markiert. Ab hier wird versucht, die Drehzahl auf einen konstanten Wert zu halten und die Leistung, mithilfe des Pitchwinkels, auf ihren Nennwert zu regeln. Neben der Generatorhöchstleistung, entsteht auch aus mechanischer Sicht eine maximal zulässige Windgeschwindigkeit. Darüber wird die Anlage zu stark belastet und es würde zu Schäden oder gar zur Zerstörung kommen. Die Windgeschwindigkeit, bis zu der die Anlage, aus dem genannten Grund, betrieben wird, nennt man Abschaltwindgeschwindigkeit  $v_{ab}$ . [11, 12]

### 2.5.2 Leistungsregelung

Außer aus den im letzten Abschnitt genannten Gründen, muss die Drehzahl auch aerodynamisch begrenzt werden können, um bei einer Störung, verbunden mit dem Entfallen des Generatormoments, Schäden zu vermeiden. Zur Regelung der Leistung bestehen mehrere Möglichkeiten. Zum einen kann man den Pitchwinkel und somit auch den aerodynamischen Anstellwinkel  $\alpha$  verändern, oder man beeinflusst die Anströmgeschwindigkeit des Profils. Da sich diese aus der Windgeschwindigkeit





**Abbildung 2.18:** Leistungskennlinie

und der Umfangsgeschwindigkeit zusammensetzt, jedoch  $v_w$  nicht beeinflussbar ist, besteht nur die Möglichkeit  $u$  mithilfe der Drehzahl zu verändern. Bei kleinen Anlagen besteht noch als dritte Möglichkeit, die Verringerung der Rotorangriffsfläche, durch Wegdrehen der Rotordrehebene aus dem Wind.

### Pitchwinkelregelung

Durch eine mechanische Verdrehung des Rotorblattes um seine Längsachse, wird der Blatteinstellwinkel und der aerodynamische Anstellwinkel  $\alpha$  verändert. In Abbildung 2.19 ist links ein Profilschnitt des Rotorblattes in seiner optimalen Pitchwinkelstellung dargestellt. Dreht man nun das Rotorblatt in Richtung der eingezeichneten Fahnenstellung (mittlere Darstellung), verringert sich der aerodynamische Anstellwinkel und damit auch die Leistung. Diese Art der Regelung wird bevorzugt bei größeren Windkraftanlagen angewendet, wodurch auch die konstante Leistung zwischen  $v_N$  und  $v_{ab}$  realisiert wird. Eine weitere Möglichkeit, in der Abbildung rechts zu sehen, ist die Verstellung des Anstellwinkels über den kritischen Wert hinaus, wobei die Strömung abreißt. Die sogenannte „Stallregelung“ hat zwar den kürzeren Verstellweg, jedoch ist sie durch den unregelmäßigen Abreißvorgang nicht sehr präzise und belastet die Anlage stärker.

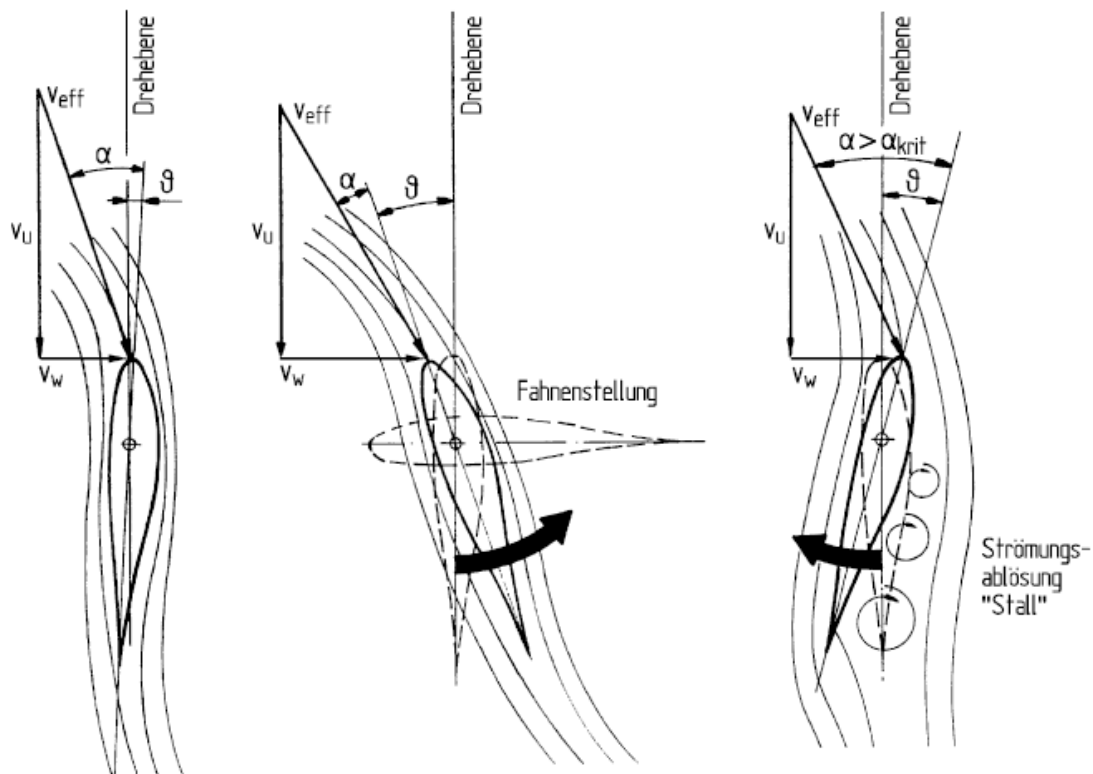


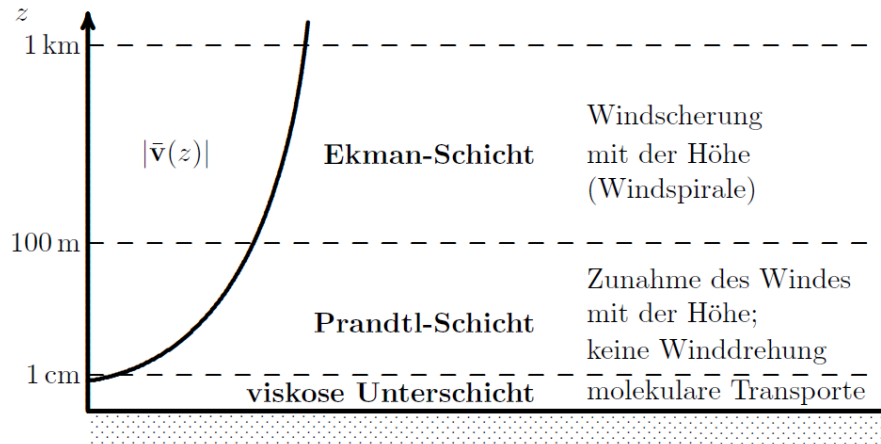
Abbildung 2.19: Pitchwinkelregelung [11]

## 2.6 Wind

### 2.6.1 Windscherung

In Abbildung 2.20 ist die atmosphärische Grenzschicht mit ihren drei Einzelschichten dargestellt. Sie ist die grundsätzlich ständig als turbulent anzusehende Luftschicht, die sich ein bis zwei Kilometer über der Landoberfläche erstreckt. Die unterste Schicht wird als viskose Unterschicht bezeichnet, ist meist nur wenige Millimeter dick und weist keine Turbulenz auf. Sie hat auf die Dynamik der Grenzschicht keinen direkten Einfluss und ist somit in dieser Arbeit nur von untergeordneter Bedeutung. Die bodennahe Grenzschicht oder Prandtl-Schicht erstreckt sich zwischen 20 und 100 Meter und besitzt annähernd höhenkonstante turbulente Strömungen, weshalb eine vereinfachte Berechnung des Windprofils vorgenommen werden kann. Die oberste Schicht wird als Ekman-Schicht bezeichnet, welche sich bis zu zwei Kilometer erstrecken kann. Aufgrund der Abnahme der turbulenten Strömungen mit zunehmender Höhe in dieser Schicht, ist darüber die Strömung der Luft annähernd

laminar. Dazu kommt, dass es durch die Corioliskraft zu einer höhenabhängigen Drehung des Windvektors kommt, wodurch sie auch als Spiralschicht bezeichnet wird.



**Abbildung 2.20:** Einzelschichten der atmosphärischen Grenzschicht [9]

Zur Darstellung des logarithmischen Windprofils in der Prandtl-Schicht wird folgende Gleichung verwendet:

$$v = v_{ref} \cdot \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\frac{z_{ref}}{z_0}} \quad (2.25)$$

wobei  $v$  die Geschwindigkeit der Höhe  $z$  über dem Boden ist und die gemessene Windgeschwindigkeit  $v_{ref} = v_w$ , bei einer Messhöhe von  $z_{ref}$ , als Referenzwerte herangezogen werden. Die Rauigkeitslänge  $z_0$  entspricht der Höhe, bei der  $v = 0$  ist. Aufgrund der unebenen Oberfläche der Erde und Hindernissen wie Bäume, Gebäude, etc. die auch als Rauigkeit bezeichnet wird, verschwindet die Geschwindigkeit am Boden ( $z = 0$ ) nicht. In Tabelle 2.1 sind verschiedene Landschaftsbeschaffenheiten und ihre zugeordnete Rauigkeitslänge eingetragen.

Rauhigkeits- klasse	Rauhigkeitslänge $z_0$ in m	Landschaft
0	0.0002	Wasserflächen
0.5	0.0024	Offenes Gelände, glatte Oberflächen z.B. Landebahnen
1	0.03	Landschaft ohne Zäune u. Hecken, einzelne Häuser
1.5	0.055	Landschaft mit einigen Häusern u. Hecken. Freiflächen min. 1250m.
2	0.1	Landschaft mit einigen Häusern u. Hecken. Freiflächen min. 500m.
2.5	0.2	Landschaft mit einigen Häusern u. Hecken, Büschen und Bäumen. Freiflächen min. 250m.
3	0.4	Dörfer, kleine Städte, Wälder. Unebenes Gelände.
3.5	0.8	Größere Städte, hohe Gebäude
4	1.6	Großstädte mit sehr hohen Gebäuden.

Tabelle 2.1: Rauhigkeitsklassen und Rauhigkeitslängen [3]

## 2.6.2 Windgeschwindigkeitsverteilung

Zur Ermittlung des standortspezifischen Jahresangebotes des Windes, verwendet man oft eine Häufigkeitsverteilung, die mithilfe von statistischen Funktionen wie der Weibullverteilung ausgedrückt wird. Diese gibt an, wie oft eine entsprechende Windgeschwindigkeit auftritt. Um die Häufigkeitsverteilung zu erhalten, wird die Windgeschwindigkeit in Intervallen gemessen. Da innerhalb eines Intervalls häufig der Mittelwert gebildet wird, sollte dieses nicht zu lange sein, da kurz auftretende hohe Windgeschwindigkeiten sonst durch die Mittelwertbildung verschwinden. Dies kann zu Fehlern führen, da wie man in Gleichung (2.10) erkennt, die Leistung des Windes mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit ansteigt. Die mittlere Windgeschwindigkeit wird manchmal für die Klassifizierung des Windangebotes eines Standortes verwendet, jedoch entfällt hier Information, die man mit einer Verteilungsfunktion besser darstellen kann (z.B.: Gleichmäßigkeit des Windes, lange Windflautezeiten). [19]

Die Weibullfunktion ist von zwei Parametern abhängig, dem Formparameter  $k$  und dem Skalierungsfaktor  $A$ . Ersterer legt die Form der Verteilung fest und ist vom Standort abhängig. In Mitteleuropa sind Werte nahe  $k = 2$  üblich, wobei kleine Schwankungen um den Mittelwert ein großes  $k$  erzeugen und umgekehrt. Die folgende Gleichung beschreibt einen näherungsweisen Zusammenhang zwischen den zwei Parametern und der mittleren Windgeschwindigkeit:

$$v_w = A \cdot \left( 0,568 + \frac{0,434}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (2.26)$$

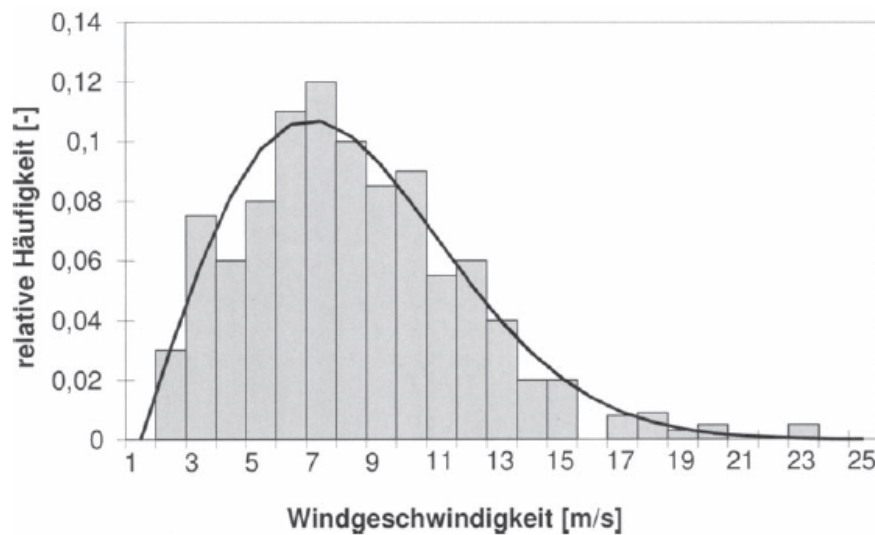
Möchte man die gemessene Häufigkeitsverteilung durch die Weibullverteilung an-

nähern, kann dies durch die Variation der Parameter  $A$  und  $k$  geschehen. Zur Hilfestellung kann auch ein „Weibull-Rechner“ im Internet genutzt werden, der zur Eingabe nur die Häufigkeiten der Windgeschwindigkeiten benötigt und passende Parameter liefert ([10]).

Mithilfe der Parameter kann man nun die Häufigkeitsverteilung ermitteln:

$$h_w(v_w) = \frac{k}{A} \cdot \left(\frac{v_w}{A}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v_w}{A}\right)^k} \quad (2.27)$$

Ein Beispiel für ein Histogramm und der entsprechenden Weibullverteilung ist in Abbildung 2.21 dargestellt.



**Abbildung 2.21:** Weibullverteilung mit Histogramm [23]

# Kapitel 3

## Software und Methode

In Abbildung 3.1 wird der grundsätzliche Ablauf dieser Arbeit in einem Flussdiagramm dargestellt. In diesem Kapitel befindet sich die detaillierte Beschreibung der einzelnen Schritte, beginnend bei der Profilschnitterzeugung, über die Simulation, bis hin zur Datenauswertung.

### 3.1 Verwendete Software

#### 3.1.1 RiSCAN PRO

Um die Rotorblattgeometrie zu erhalten, wurde die Windkraftanlage von der Firma RIEGL mit 3D-Laserscannern eingescannt. Das zur Verfügung gestellte Softwarepaket RiSCAN PRO Version 2.8 64 bit, dient zur Konfiguration der Sensoren, der Datenvisualisierung, der Datenmanipulation und zu vielen weiteren Aufgaben. Die projektorientierte Struktur erlaubt es, dass alle Scandaten, kalibrierte Fotos usw., in einer Verzeichnisstruktur gespeichert und als Projektdatei mit dem Dateiformat \*.rsp geöffnet werden können. In Abbildung 3.2 ist die Windkraftanlage als Punktwolke in RiSCAN PRO dargestellt. Weiters sind noch die Positionen der Scanner zu erkennen. [20]

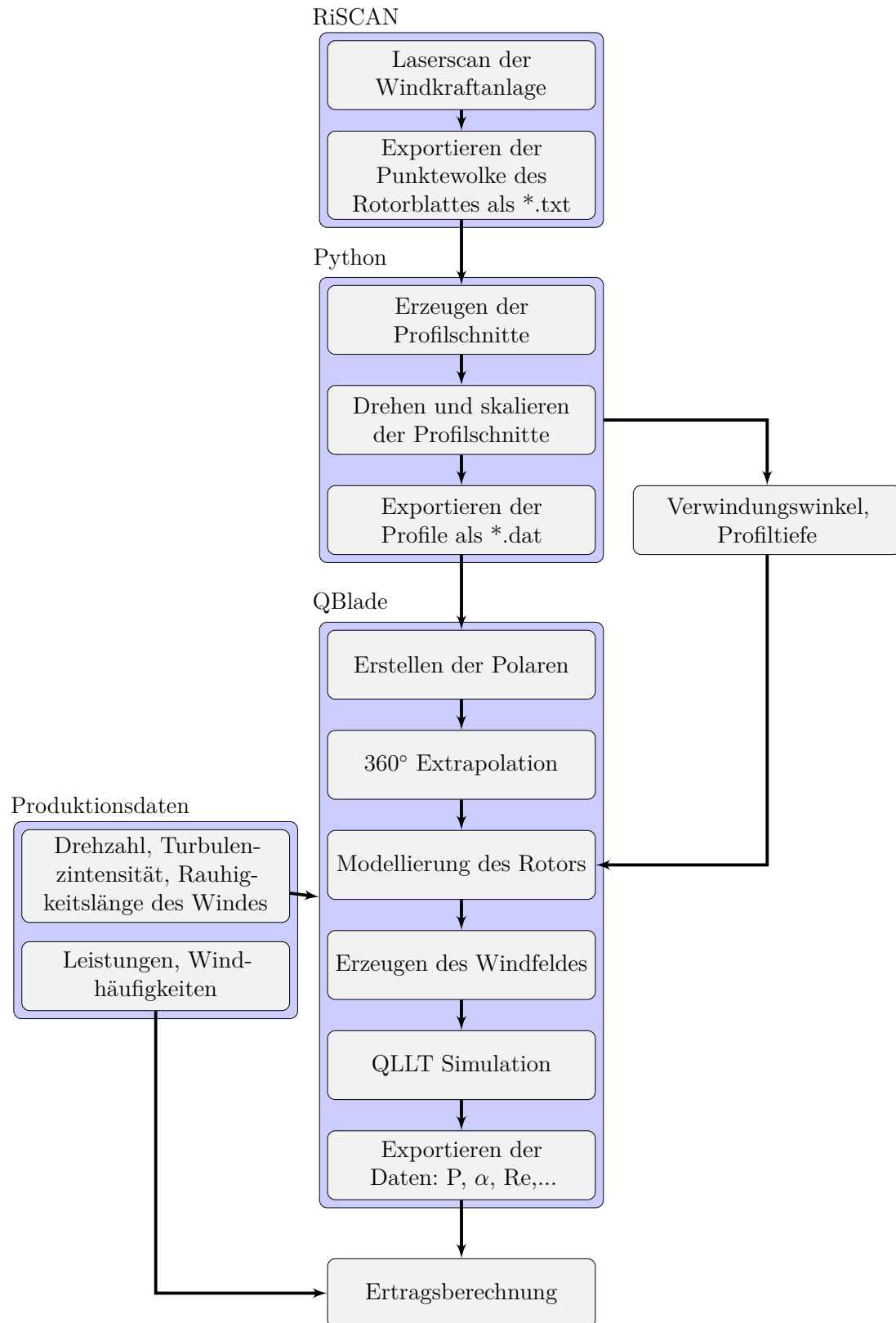


Abbildung 3.1: Flussdiagramm



**Abbildung 3.2:** Darstellung des Laserscans der Windkraftanlage in RiSCAN PRO mit Scannerpositionen



### 3.1.2 Python und Salome Meca

Die Programmiersprache Python Version 3.5.2 wird verwendet, um die Daten der Rotorblattgeometrie weiter zu verarbeiten. Es wird dabei der Rotor, der als Punkteliste vorliegt, eingelesen und kann anschließend weiterverarbeitet werden. Salome Meca Version 8.3.0 ist eine freie Software für Anwendungen im 3D-CAE Bereich. Das Programm besitzt eine Python-Schnittstelle und wurde verwendet, um im enthaltenen Geometrie-Editor, eine optische Kontrolle zu bekommen. Außerdem werden Aufgaben, wie das Ermitteln von Abständen, Winkeln oder das Erzeugen von Splines, durch implementierte Funktionen erleichtert. [21]

### 3.1.3 QBlade

QBlade ist eine freie Software zur Berechnung von Windkraftanlagen. Es ist nicht nur die Simulation von horizontalachsigen (HAWT), sondern auch von vertikalachsigen Anlagen (VAWT) möglich. Durch die Integration von XFOIL, kann der Benutzer eigene Profilschnitte entwerfen oder importieren und deren Polaren berechnen. Anschließend kann der Rotor entworfen und eine Simulation durchgeführt werden. [8]

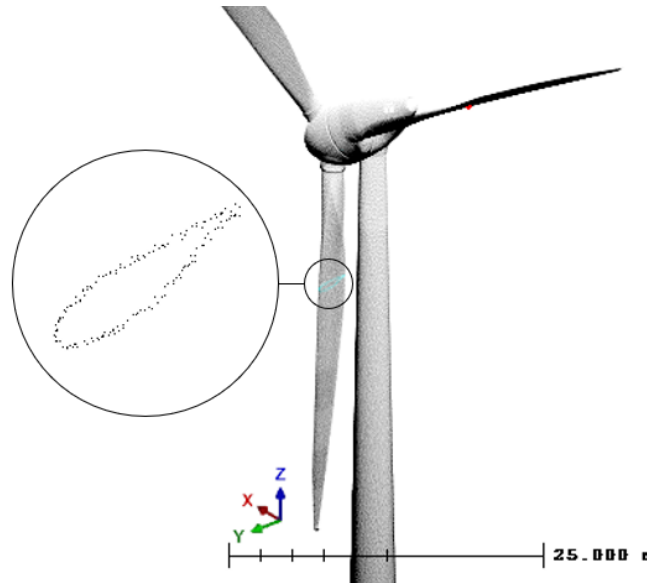
## 3.2 Modellierung der Rotorblattgeometrie

Die Modellierung der Rotorblätter der zwei Windkraftanlagentypen geschieht auf analoge Weise. In diesem Kapitel wird lediglich der Anlagentyp A herangezogen, um die Vorgangsweise zu erläutern. Falls Unterschiede in der Modellierung vorliegen, werden diese explizit erwähnt.

### 3.2.1 Datenexport aus RiSCAN PRO

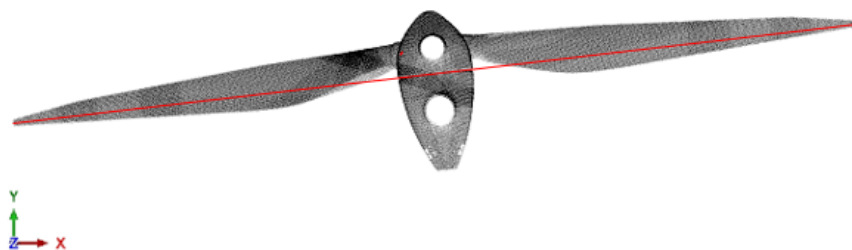
In der Software RiSCAN Pro ist die Windkraftanlage als Punktwolke abgebildet. Um den Rotor freischneiden zu können, ist es zunächst notwendig ins Projektkoordinatensystem zu wechseln. Dieses ist so ausgerichtet, dass die Bodenfläche in der  $x$ - $y$ -Ebene liegt und die Windkraftanlage in die positive  $z$ -Achse zeigt. Das Rotorblatt, das nun von der Nabe aus gesehen, in die negative  $z$ -Richtung zeigt, ist

für die Modellierung zu wählen. Dieses ist außerdem in die Fahnenstellung gedreht, weist also einen Pitchwinkel von  $90^\circ$  auf. In Abbildung 3.3 ist sowohl die Lage des Windkraftwerks zum Koordinatensystem, als auch die Position des Rotors zur Anlage, zur Veranschaulichung dargestellt.



**Abbildung 3.3:** Projektkoordinatensystem des Laserscans mit Detailansicht eines Profilschnittes

Da die Drehebene nicht in der  $x$ - $z$ -Ebene liegt, muss man den Winkel zwischen den Ebenen ermitteln und anschließend berücksichtigen. Dafür wird die gedachte Verbindungslinie der Blattspitzen, die in Abbildung 3.4 als rote Linie dargestellt ist, verwendet.



**Abbildung 3.4:** Winkelabweichung der Drehebene zur  $x$ - $z$ -Ebene

Mit dem, in RiSCAN implementierten, Höhenfilter kann man nun den Bereich in  $z$ -Richtung herausschneiden, in dem sich das Rotorblatt befindet. Als nächstes exportiert man den ausgewählten Bereich in eine neue Punktwolke und kann diese

dann exportieren. Es gibt verschieden Formate zur Auswahl, wobei hier ASCII gewählt wurde und die kartesischen Koordinaten aller Punkte als Liste, in einer \*.txt Datei abgespeichert wurden.

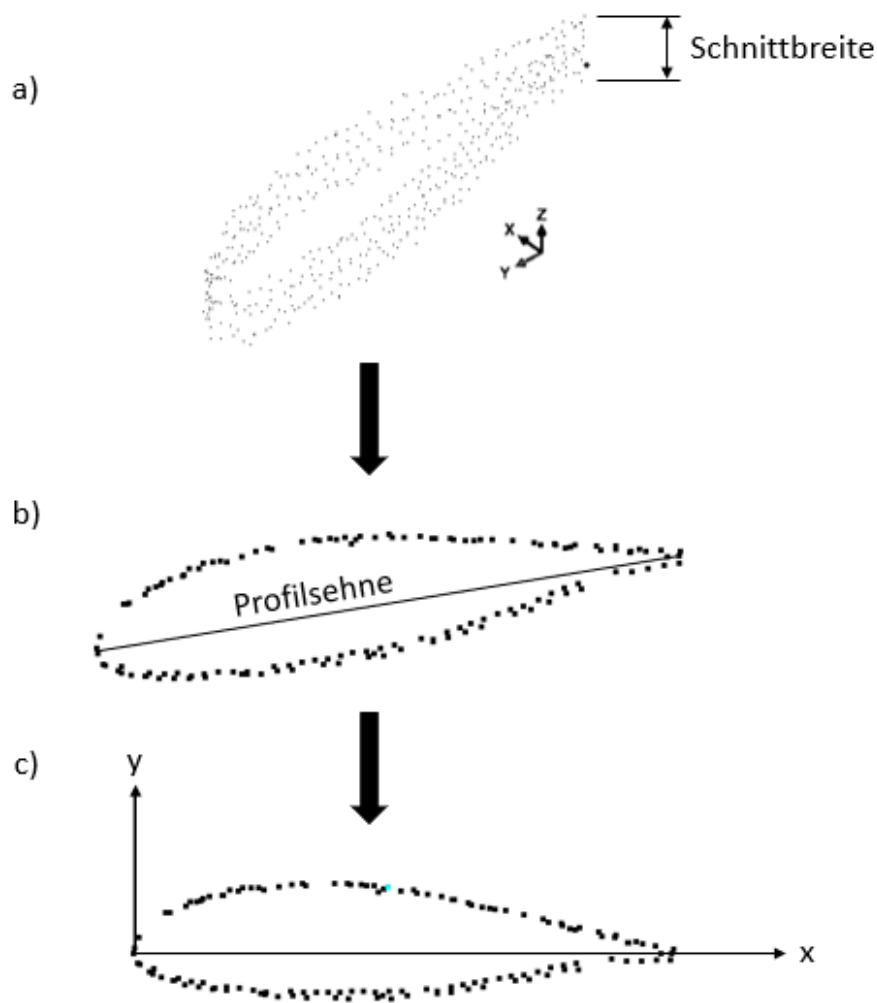
Um die Position der Profilschnitte eindeutig zu bestimmen, wird der radiale Abstand zur Drehachse herangezogen. Die Nabenhöhe kann mithilfe von Punktkoordinaten, direkt in RiSCAN PRO bestimmt werden.

### 3.2.2 Erzeugen der Profil-Punktelisten

Als Nächstes benötigen wir Punktelisten von Profilschnitten an verschiedenen radialen Positionen des Rotors. Aus diesen wird in weiterer Folge das Rotorblatt aufgebaut, siehe Kapitel 3.2.3. QBlade benötigt die Liste der Punkte als \*.dat File, wobei in der ersten Zeile der Profilname angeführt ist und in jeder weiteren, jeweils eine  $x$  und eine  $y$  Koordinate, mit einem Leerzeichen getrennt, eingetragen sind. Jede Zeile definiert also die Lage eines Punktes. Diese Punktelisten müssen die Punkt-Koordinaten in geordneter Reihenfolge beinhalten, sodass der erste Punkt auf der Profilhinterkante liegt, diese über die Profiloberseite (Saugseite) fortlaufen, bis zur Profilnase und anschließend wieder über die Profilunterseite (Druckseite), zur Profilhinterkante zurück. Das Profil muss außerdem auf eine Profiltiefe von  $c = 1m$  normiert sein. Die Profilsehne liegt dabei auf der  $x$ -Achse.

Die Profil-Punktelisten werden mithilfe einer Python-Funktion erstellt. Diese Funktion liest die Punktwolke des Rotorblatts ein und bekommt die radialen Schnittpositionen als ersten Eingabeparameter. Um eine genügend große Anzahl an Punkten pro Profilschnitt zu erhalten, hat der Schnitt eine Breite in  $z$ -Richtung, die anschließend auf  $z=0$  gestaucht wird. In Abbildung 3.5 a) ist der Schnitt mit überzeichneter Schnittbreite zur Veranschaulichung dargestellt. Für eine ausreichende Punkteanzahl wurden 100 Punkte pro Schnitt festgelegt. Die Schnittbreite ist der zweite Eingabeparameter. Als Nächstes wird das Koordinatensystem der Profilpunkte dem geforderten in QBlade angepasst. Danach wird der Punkt an der Profilhinterkante ermittelt und die Punkte, wie oben erwähnt, sortiert. Der Punkt an der Profilnase ist der Punkt mit dem größten Abstand zur Profilhinterkante und die Verbindungslinie bildet die Profilsehne (Abbildung 3.5 b)). Nun kann man den Winkel der Profilsehne zum Koordinatensystem und die Profiltiefe ermitteln. Mithilfe einer Transformationsmatrix wird nun das Profil gedreht, sodass die Profilsehne parallel zur  $x$ -Achse liegt. Anschließend wird mithilfe der ermittelten Profiltiefe, das Profil

skaliert, sodass die Profiltiefe einen Meter beträgt. Das Profil kann nun verschoben werden, sodass die Profilhase im Koordinatenursprung liegt (Abbildung 3.5 c)). Durch fehlende Scanpunkte, beziehungsweise einer zu geringen Punktedichte, im Bereich der Profilhase, mussten die Verwindungswinkel einiger Profile händisch ausgelesen werden. Die so ausgelesenen Werte wurden dem Python Script übergeben, um eine korrekte Orientierung des Profils im Koordinatensystem zu gewährleisten. Zum Schluss kann nun am fertigen Profilschnitt eine optische Kontrolle in Salome erfolgen, ob Profilhase, sowie Hinterkante auf der  $x$ -Achse liegen und das Profil, die Profiltiefe von einem Meter, aufweist.



**Abbildung 3.5:** a) Profilpunkte im ursprünglichen Koordinatensystem; b) Unskalierte und verdrehte Profilpunkte; c) fertiger Profilschnitt

Es wurden Versuche unternommen, das Profil mittels numerischer/mathematischer Verfahren zu glätten und somit eine Ausgleichskurve darüber zu legen. In [28] werden die Anforderungen an die Stetigkeit, abgeleitet aus der Druckverteilung am Profil, aufgezeigt. Zu starke Druckschwankungen können somit zu einer Grenzschichtablösung führen, wobei diese im Zusammenhang mit der Krümmung und ihrer Ableitung steht. Es wird gefordert, dass die Krümmungsableitung stetig ist, was eine Stetigkeit bis zu Ableitungen 3. Grades bedarf und somit die Polynome mindestens 4. Ordnung sein sollten, um die Profilkontur nachzubilden. Bei den hier vorliegenden Profilkonturen, sind durch das Stauchen der Schnittbreite auf ein ebenes Profil und dem Laserscan, Ungleichmäßigkeiten in der Punkteverteilung, über die Profilkontur, entstanden. Möchte man nun die Kontur durch ein Polynom annähern, wird es bei zu geringer Ordnung, zu ungenau nachgebildet und bei Polynomen höherer Ordnung entsteht eine Unstetigkeit in der Krümmung („Welligkeit“). QBlade reagiert sehr empfindlich auf diese Welligkeit und man erhält keine Konvergenz bei der Polarenerstellung. Die Lösung dieses Problems wird im nächsten Kapitel 3.2.3 erläutert.

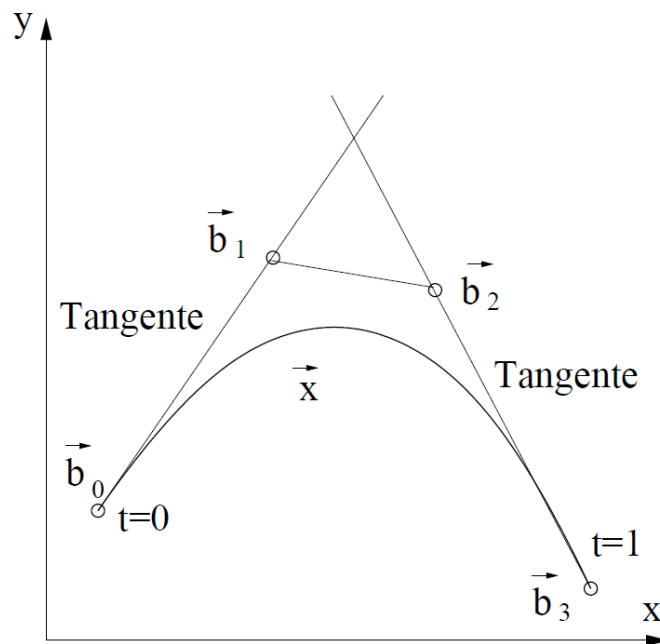
Die Python-Funktion erstellt als letzten Schritt eine \*.dat Datei für jeden Profilschnitt, die nun direkt in QBlade importierbar ist. Alle Profiltiefen, Verwindungswinkel und Punkteanzahlen werden in einer separaten Datei ausgegeben.

### **3.2.3 Rotorblattdesign in QBlade**

Im Modul „Airfoil Design“ kann man die Profilkonturlisten, die im Kapitel 3.2.2 erstellt wurden, einlesen. Weiters ist es möglich NACA Profile direkt zu erstellen, indem man die 4- oder 5-ziffrige Bezeichnung eingibt. Diese Funktion kann sich als nützlich erweisen, um die vorliegenden Profile mit gebräuchlichen NACA Profilen zu vergleichen. Im nabennahen Bereich des Rotorblattes werden aus strukturellen Gründen kreisförmige Profile (zylindrischer Schaft) eingesetzt. Diese können mit einem benutzerdefinierten Widerstandsbeiwert erstellt werden und haben keinen Auftrieb.

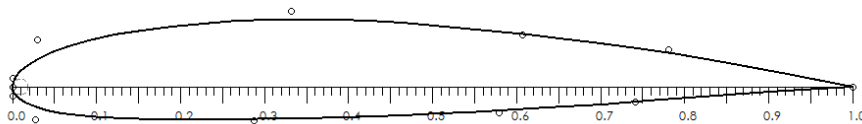
Wie auch schon im Kapitel 3.2.2 erwähnt, sind die importierten Profile noch nicht geglättet. Es hat sich am besten erwiesen, diese mit Splines aus dem „Airfoil Design“ nachzubilden. Verwendet werden hierfür zwei Bezier-Kurven, jeweils eine für die Profiloberseite und -unterseite.

Diese parametrisch modellierten Kurven sind vom Grad  $n=6$ , das bedeutet, dass das sogenannte Kontrollpolygon aus  $n+1=7$  Bezier-Punkten besteht. Ein Beispiel für eine Bezierkurve 3. Grades ist in Abbildung 3.6 zu sehen. Diese Kurve wird durch die vier Punkte ( $\vec{b}_0$ ,  $\vec{b}_1$ ,  $\vec{b}_2$  und  $\vec{b}_3$ ) definiert.  $\vec{b}_1$  bestimmt dabei die Richtung der Kurve in  $\vec{b}_0$ , wobei der Abstand festlegt, wie weit die Kurve in die vorgegebene Richtung weist.  $\vec{b}_1$  liegt deshalb in der Regel nicht auf der Kurve. Analoges gilt für die Punkte  $\vec{b}_2$ , wobei dessen Bezugspunkt  $\vec{b}_3$  ist. [28]



**Abbildung 3.6:** Beispielkurve einer Bezier-Kurve 3.Grades (kubisch) [28]

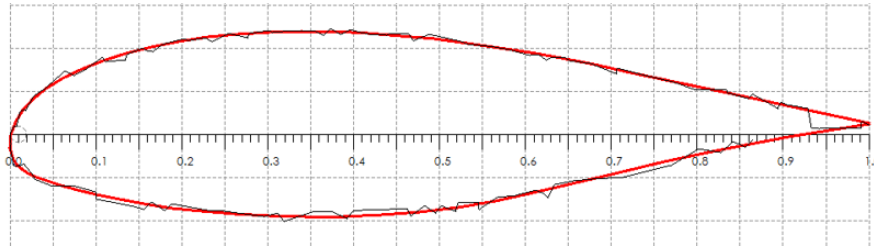
Die verwendeten Splines, mit den Bezier-Punkten als Ringe dargestellt, sind in Abbildung 3.7 zu sehen. Die Punkte an der Profilnase und an der Profilhinterkante fallen jeweils zusammen. Durch Verschieben der Bezier-Punkte, lässt sich nun das vorhandene Profil nachbilden.



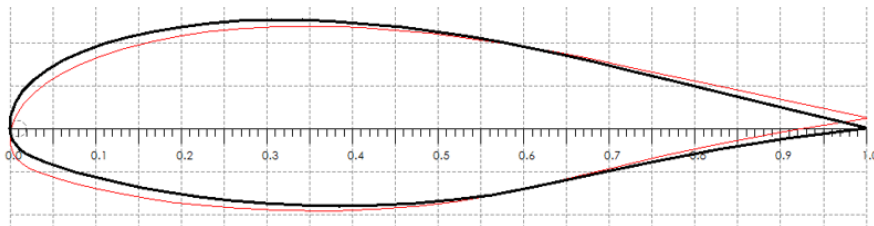
**Abbildung 3.7:** Spline mit Bezier-Punkten aus QBlade

In Abbildung 3.8 ist das ungeglättete Profil (schwarz) und die Nachbildung der Profilkontur (rot) dargestellt. Liegt hier noch ein Winkelfehler vor, kann dieser mit

der Funktion „De-rotate the Foil“ korrigiert werden. Durch Auslesen der Koordinaten, vor und nach der Winkelkorrektur, lässt sich der Winkelfehler ermitteln. Anschließend wird der Verwindungswinkel im Python Skript korrigiert. Das rote Profil in Abbildung 3.9 weist einen Winkelfehler auf, welcher im schwarzen Profil ausgebessert wurde.



**Abbildung 3.8:** Ungeglättetes Profil (schwarz) und Nachbildung der Profilkontur (rot)

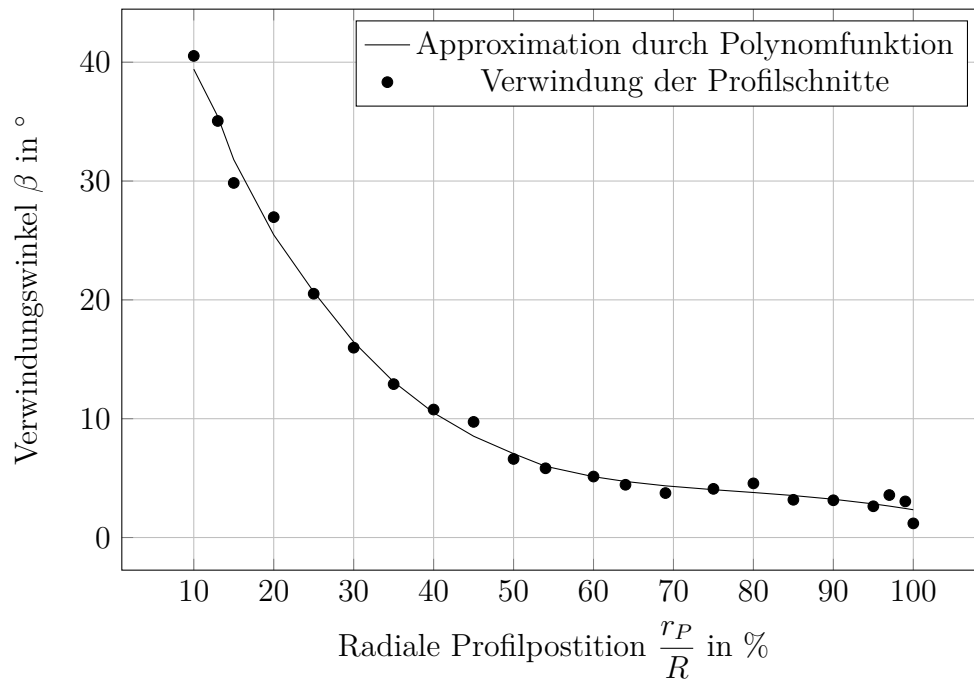


**Abbildung 3.9:** Korrektur des Winkelfehlers: Profil mit Winkelfehler (rot); Korrigiertes Profil (schwarz)

Im Modul „HAWT Rotorblade Design“ lassen sich nun die einzelnen Profilschnitte zu einem Rotorblatt zusammenfügen. Man wählt dazu zuerst die Rotoranzahl mit 3 und den Radius der Anbindung des Rotorblattes zur Nabe. Nun können Abschnitte des Rotors hinzugefügt werden, wobei jeder die radiale Position von der Drehachse (m), die Profiltiefe (m), den Verwindungswinkel ( $^{\circ}$ ) und das Profil, mit den dazugehörigen  $360^{\circ}$ Polaren, enthält. Auf die Erstellung der Polaren wird in den noch folgenden Kapiteln 3.3.1 und 3.3.2 eingegangen. Weiters kann jedes Profil noch mit einem x-Offset und z-Offset verschoben werden, um gekrümmte Rotorkonturen nachbilden zu können, wie im Fall der Anlage B. In Abbildung 3.11 b) ist die gekrümmte Kontur des Rotorblattes, im Bereich der Blattspitze ersichtlich. Es wurden für die Windkraftanlage A, 21 Profilschnitte und für die Anlage B, 22 Schnitte über die Blattlänge verteilt. Als Schnittstellen wurden Profilschnitte gewählt, bei denen die Profiltiefe bekannt war, um diese mit den ermittelten Werten

vergleichen zu können. Für die grafische Darstellung des gesamten Rotorblattes, werden die dazwischenliegenden Bereiche linear interpoliert.

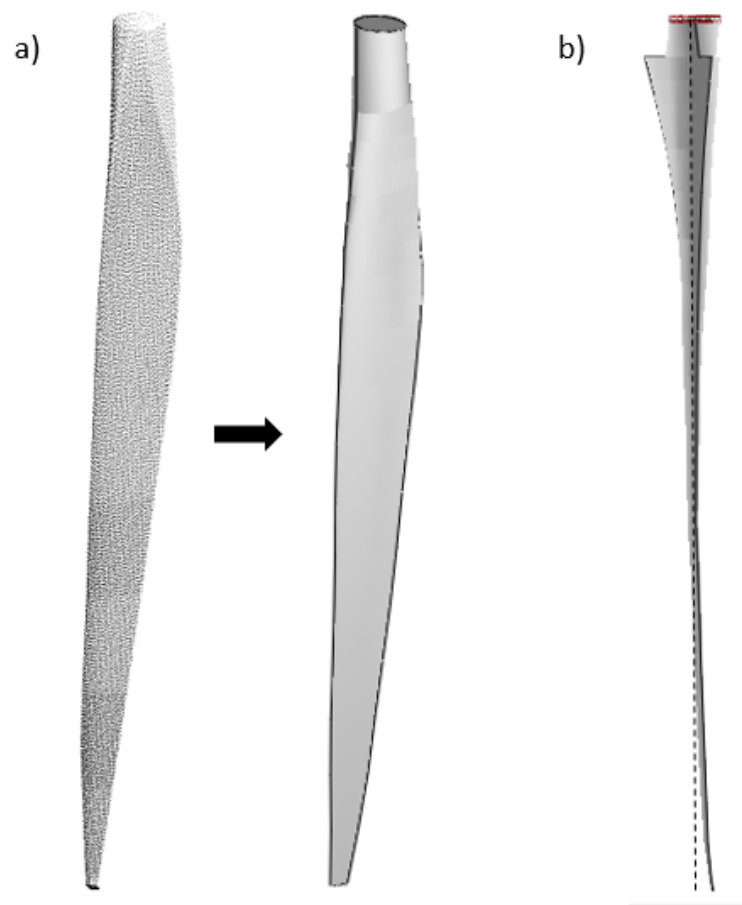
Der Verwindungswinkel der Anlage B, abhängig von der radialen Position, wird in Abbildung 3.10 dargestellt. Die Winkel wurden mit einem Polynom 3. Grades approximiert, um eine gleichmäßigere Verwindung zu erhalten und Fehler auszugleichen.



**Abbildung 3.10:** Verwindung des Rotorblattes

In Abbildung 3.11 a) sieht man links den Laserscan des Rotors und rechts das in QBlade erstellte Modell.





**Abbildung 3.11:** a) Anlage A: Vergleich der echten Rotorgeometrie (links) mit dem Modell aus QBlade (rechts); b) Rotorblatt Anlage B

## 3.3 Simulation in QBlade

### 3.3.1 Polaren

Die Polaren werden in QBlade, im Modul „XFOIL Direct Analysis“ berechnet. Zur Erstellung einer Polare eines Profilschnitts benötigen wir die Reynoldszahl und den Faktor  $N_{Crit}$ , der in der  $e^n$ -Methode zur Bestimmung der Transition verwendet wird.  $N_{Crit}$  ist abhängig von der Turbulenzintensität  $\sigma_0$ , welche zu Charakterisierung der Turbulenz dient. Sie wird wie folgt berechnet:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_v}{v_w} \quad (3.1)$$

$\sigma_v$  ist dabei die Standardabweichung der Windgeschwindigkeit und  $\overline{v_w}$  die mittlere Windgeschwindigkeit in einem Mittelungszeitraum, der in diesem Fall 10 Minuten beträgt. Die erforderlichen Winddaten werden aus den Produktionsdaten entnommen, siehe 3.4.1. Da bei den 10-minütigen Messungen nicht die einzelnen Messpunkte vorhanden sind, sondern nur der Maximalwert  $v_{wmax}$ , der Minimalwert  $v_{wmin}$  und der Mittelwert  $\overline{v_w}$  der Windgeschwindigkeit, wurde die Standardabweichung ermittelt mit:

$$\sigma_v = \frac{v_{wmax} - v_{wmin}}{6} \quad (3.2)$$

Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Messwerte als Normalverteilung vorliegen. Der Maximal- und Minimalwert der Windgeschwindigkeit wird als  $3\sigma_v$  Grenze definiert, wobei die Standardabweichung  $\sigma_v$  die Breite der Normalverteilung beschreibt. 99,73 % aller Messwerte liegen im Intervall  $\pm 3\sigma_v$  der Abweichung vom Erwartungswert. [26]

Um mithilfe der Turbulenzintensität auf den erforderlichen Faktor  $N_{Crit}$  umzurechnen, wird folgende Formel verwendet [25]:

$$N_{Crit} = -8.43 - 2.4 \cdot \ln\left(\frac{\sigma_0}{100}\right) \quad (3.3)$$

Im Programm kann man wählen zwischen „Free-transition (e<sup>n</sup>) Method“ und „Forced-transition“. Bei der ersten Variante ergibt sich der Stömungsumschlag durch die Profilgeometrie und den Anstellwinkel. Liegt kein Umschlag vor, tritt dieser an der Profilhinterkante auf („Forced-Transition“). Man kann die Umschlagsstelle auch beliebig definieren, mit dem Verhältnis  $\frac{x}{c}$ , wobei dieses an der Hinterkante den Wert 1 annimmt. [14]

Die Reynoldszahl ist abhängig von der Windgeschwindigkeit, der Drehzahl und der radialen Position  $r_P$  des betrachteten Profils am Rotorblatt. Die Drehzahl steht im Zusammenhang mit der Windgeschwindigkeit (siehe 2.5.2) und kann aus den Produktionsdaten ermittelt werden. Die Profiltiefe muss hier nicht berücksichtigt werden, da es sich hierbei um eine, auf die Profiltiefe  $c = 1m$  bezogene Reynoldszahl, handelt. Der Auftriebsbeiwert und der Widerstandsbeiwert werden ebenso mit  $c = 1m$  berechnet. [14]

Die normierte Reynoldszahl berechnet sich mit:

$$\frac{Re}{c} = \frac{v_r}{\nu} \quad (3.4)$$

Für die Berechnung der Windgeschwindigkeit in der Blattebene wurde nach der idealisierten Theorie nach Betz (siehe 2.3) eine Windgeschwindigkeit in der Rotationssebene  $v_a$  angenommen, die  $\frac{2}{3}$  der Windgeschwindigkeit  $v_w$  beträgt.

$$v_r = \sqrt{\left(\frac{2}{3} \cdot v_w\right)^2 + u^2} \quad (3.5)$$

mit der Umfangsgeschwindigkeit

$$u = \omega \cdot r_P = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot r_P \quad (3.6)$$

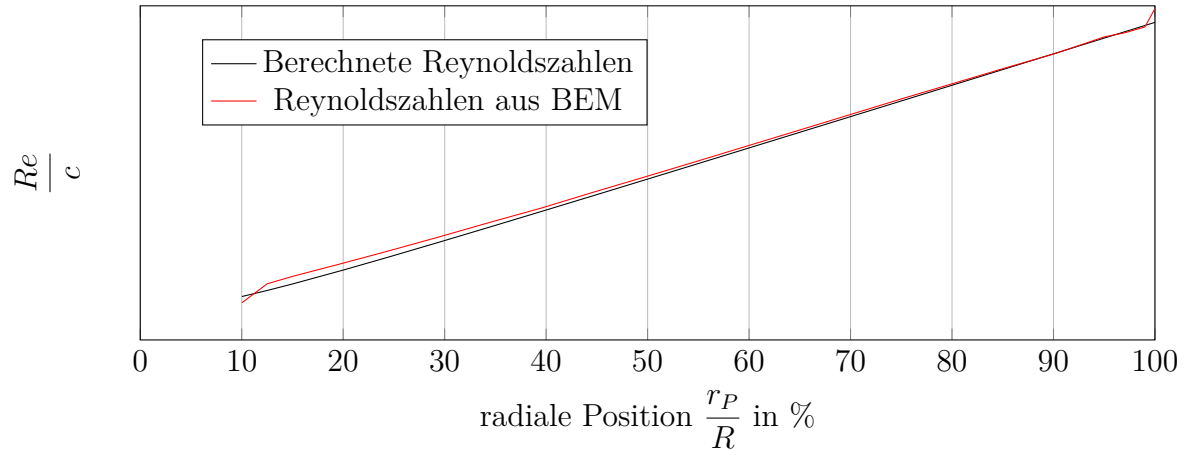
Diese Berechnung der Reynoldszahl gilt nur bei idealisierten Bedingungen und einer drallfreien Strömung. Sie liefert in den mittleren und äußeren Rotorblattbereichen, in denen auch der Großteil der Leistung erzeugt wird, gute Ergebnisse, jedoch wachsen die Abweichungen im nabennahen Rotorblattbereich. Um auch hier gute Ergebnisse zu erzielen, wurden die Reynoldszahlen im Modul „Rotor BEM Simulation“ in QBlade ermittelt. Der Nachteil ist, dass hier bereits der Rotor und die 360°-Polaren vorliegen müssen. Man könnte also entweder vorerst falsche Polaren erzeugen oder die Reynoldszahlen mit einem externen BEM Algorithmus berechnen. Bei der BEM Simulation wird die Schnelllaufzahl benötigt, die sich aus der Windgeschwindigkeit und der Umfangsgeschwindigkeit an der Blattspitze berechnen lässt:

$$\lambda = \frac{u_{Blattspitze}}{v_w} \quad (3.7)$$

Im Modul werden auch semi empirische Korrekturen vorgenommen, die aufgrund der Zweidimensionalität der Blattelementtheorie entstehen. Darunter werden die Energieverluste durch die erzeugten Verwirbelungen an der Blattspitze und der Blattwurzel und der dreidimensionale Stall berücksichtigt. [6]

Die so ermittelten Reynoldszahlen müssen noch durch Division durch die Profiltiefe normiert werden. Ein Vergleich der berechneten und der aus dem „Rotor BEM Simulation“ Modul exportierten Reynoldszahlen befindet sich in Abbildung 3.12.

Man sieht die Reynoldszahlenveränderung durch die Endlichkeit des Rotorblattes und die kleiner werdene Abweichung in Richtung Blattspitze. Die radiale Position  $r_P$  wird dabei in % des Blattspitzenradius angegeben.

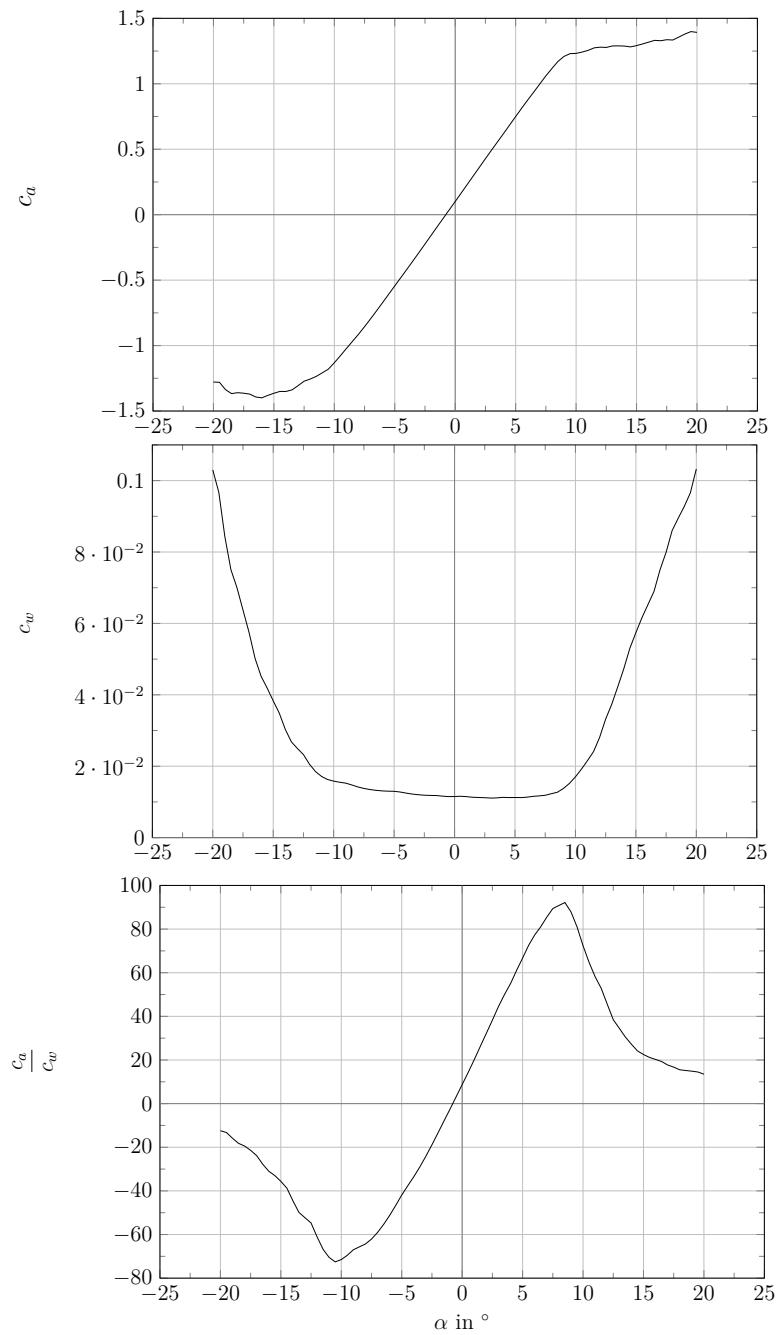


**Abbildung 3.12:** Reynoldszahlen über die Rotorblattlänge

Die Polaren der Profilschnitte werden für jede Windgeschwindigkeit neu berechnet, da diese abhängig von der Reynoldszahl und dem Transitionsverhalten ( $N_{Crit}$ ) sind. Es besteht in QBlade die Möglichkeit, mehrere Polaren für ein Profil zu erstellen, bei verschiedenen Reynoldszahlen und die Polar-Daten in den dazwischenliegenden Bereichen zu interpolieren. Diese Variante funktionierte jedoch nicht und führte zum Absturz des Programms.

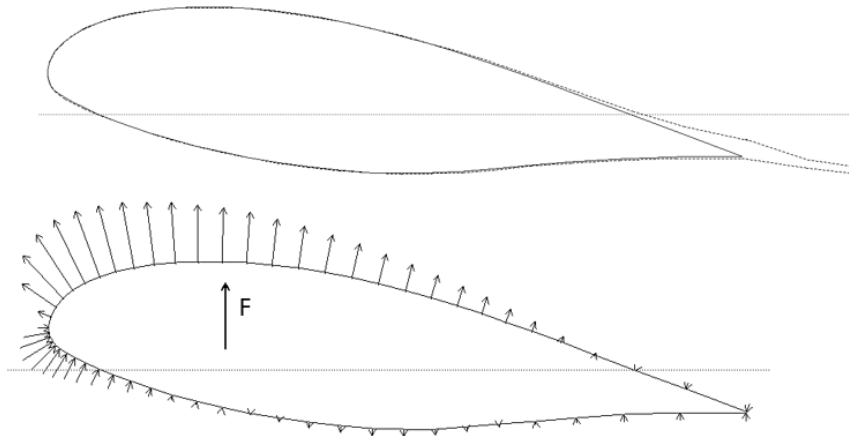
Bevor man die Polare berechnet, muss noch der Bereich des aerodynamischen Anströmwinkels  $\alpha$  festgelegt werden. Hier wurde  $-20^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$  gewählt mit einer Schrittweite von  $\Delta\alpha = 0,5^\circ$ .

In der Abbildung 3.13 sind die ermittelten Kurven dargestellt. Diese wurden bei einer Windgeschwindigkeit von  $v_w = 6 \frac{m}{s}$  und der radialen Blattposition von  $r_P = 16m$  erstellt.



**Abbildung 3.13:** Auftriebsbeiwert  $c_a$ , Widerstandsbeiwert  $c_w$  und Verhältnis  $\frac{c_a}{c_w}$  bei unterschiedlichen aerodynamischen Anstellwinkeln  $\alpha$

Es lässt sich auch noch die Druckverteilung über die Profilkontur, mit der resultierenden Kraft, sowie das Ablöseverhalten der Grenzschicht grafisch darstellen (siehe Abbildung 3.14).



**Abbildung 3.14:** Grafische Darstellung der Grenzschicht (oben) und der Druckverteilung (unten) in QBlade

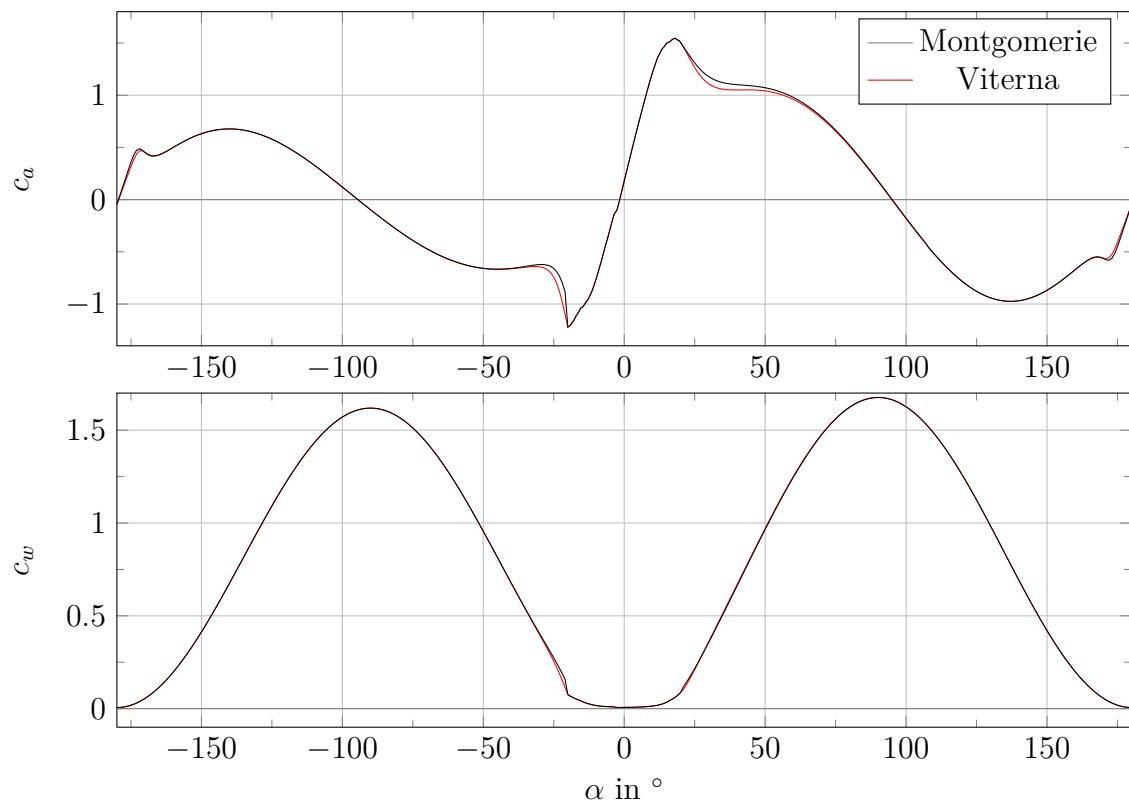
### 3.3.2 360° Polar-Extrapolation

Bei Windkraftanlagen kommt es während einer Umdrehung oft zu höheren aerodynamischen Anstellwinkeln  $\alpha$ , als der analysierte Anstellwinkelbereich im Modul „XFOIL Direct Analysis“. Diese großen Anstellwinkel werden auch für die Leistungslimitierung bei der „Stall-Regelung“ durch Strömungsablösung eingesetzt. Außerdem kommt es während des Simulationsvorganges zu sehr hohen Anstellwinkeln, wenn die Lösung noch nicht konvergiert ist. Aus diesem Grund werden die Polaren auf  $\alpha = \pm 180^\circ$  extrapoliert. Bei größer werdendem Anstellwinkel wird die frontal angeströmte Fläche größer und es tritt Strömungsablösung auf. Dadurch steigt der Widerstandsbeiwert an und der Auftrieb sinkt. Bei  $\alpha = 180^\circ$  zeigt nun die Hinterkante in Strömungsrichtung, weshalb hier der Widerstand wieder kleiner wird und der Auftriebsbeiwert zunimmt. [6]

Es stehen zwei Extrapolationsmethoden zu Auswahl. Zum einen das „Viterna-Corrigan post stall model“ und zum anderen die „Montgomery extrapolation“. Beim Viterna Modell wird die Extrapolation aufgrund von empirischen Gleichungen

durchgeführt und ist als Idealisierung, daher keine Repräsentation der wahren Physik, anzusehen. Die Montgomery Methode geht davon aus, dass bei kleinen Anstellwinkeln um  $0^\circ$  Potentialströmung vorherrscht und sich das Strömungsprofil bei höheren Anstellwinkeln wie eine dünne Platte verhält. Die dazwischenliegenden Bereiche werden mit einer Transformationsfunktion gebildet. [16]

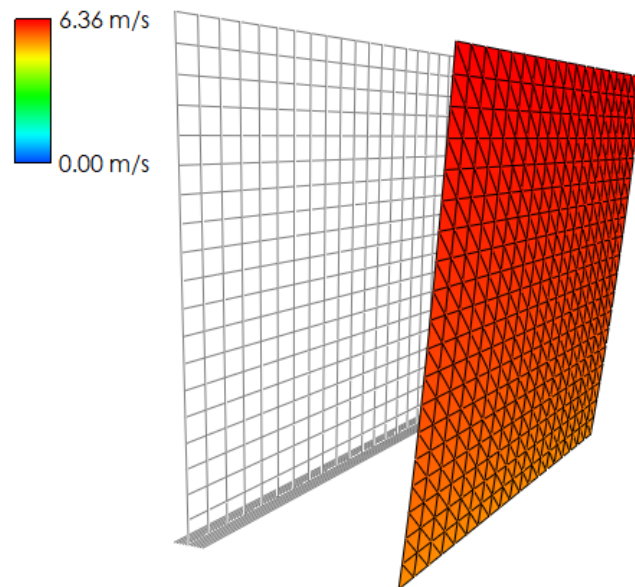
In [16] werden die Methoden miteinander verglichen, wobei beide Methoden gute Ergebnisse liefern und für die Simulation verwendet werden können. In Abbildung 3.15 sind die extrapolierten Polaren des Auftriebsbeiwertes  $c_a$  und des Widerstandsbeiwertes  $c_w$  dargestellt. Diese wurden mit beiden Methoden erstellt, um diese vergleichen zu können. Im vorliegenden Fall unterscheiden sich die Kurven nur minimal. QBlade bietet dem Benutzer noch die Möglichkeit die Kurven zu manipulieren, wobei bei der Montgomery Methode eine feinere Einstellung möglich ist.



**Abbildung 3.15:** Extrapolation der Polaren auf einen aerodynamischen Anstellwinkel  $\alpha = \pm 180^\circ$

### 3.3.3 Windprofil

Im Modul „Turbulent Windfield Generator“ lässt sich ein Windprofil erstellen. Es werden der Rotorradius, die Nabenhöhe, die Windgeschwindigkeit und deren Messhöhe benötigt, welche in diesem Fall zwei Meter über der Nabenhöhe liegt. Es ist möglich ein turbulentes, zeitlich veränderliches Windfeld zu erzeugen. Dieses wird in dieser Simulation jedoch nicht benötigt, weshalb wir für die Turbulenzintensität den Wert  $10^{-6}\%$  wählen (der Wert  $0\%$  ist im Programm nicht zulässig). Für die Windscherung wird die Rauigkeitslänge von  $0,03m$  gewählt. Dies entspricht einem offenen landwirtschaftlichen Gelände ohne Zäune und Hecken, evtl. weitläufig verstreute Gebäude und sehr sanften Hügeln. In Abbildung 3.16 ist das erstellte Windprofil bei  $v_w = 6\frac{m}{s}$  zu sehen.



**Abbildung 3.16:** Windprofil bei  $v_w = 6\frac{m}{s}$  erstellt in QBlade



### 3.3.4 QLLT Simulation

Im Modul „QLLT - Nonlinear Lifting Line Simulations“ kann nun eine Simulation erzeugt werden. Da wie schon erwähnt, die Polaren und die Drehzahl von der Windgeschwindigkeit abhängig sind, müssen mehrere Simulationen pro Windkraftanlage erstellt werden. In dieser Arbeit wird der Einfluss des Pitchwinkels  $\vartheta_P$  auf den Ertrag im Teillastgebiet untersucht. Es wird dabei jeweils der untersuchte Pitchwinkel, unabhängig von der Windgeschwindigkeit, konstant gehalten. Der Bereich ist  $3\frac{m}{s} \leq v_w \leq 10\frac{m}{s}$ , wobei die untere Grenze der Einschaltwindgeschwindigkeit entspricht. Die obere Grenze ist die Windgeschwindigkeit, ab der der Pitchwinkel verändert wird. Es werden Simulationen für jede ganzzahlige Windgeschwindigkeit in diesem Bereich durchgeführt.

Bei der Erstellung der Simulation können eine große Anzahl an Einstellungen getroffen werden. Es wird nun auf die relevantesten Parameter näher eingegangen. Weitere Informationen zu allen Parametern findet man in [17].

Zuerst wählt man den Rotor mit den Polaren, passend zur Windgeschwindigkeit. Man wählt als Typ „UpWind“, da es sich bei den vorliegenden Windkraftanlagen um Luvläufer handelt, was bedeutet, dass der Rotor auf der Wind zugewandten Seite sitzt. Die Nabenhöhe wird nun gewählt und muss mit dem vorliegenden Windfeld zusammenpassen.

#### Rotorblatt Diskretisierung

Als nächstes wählt man die Art der Rotorblattdiskretisierung. Die Diskretisierung ist die Verteilung der Schnittstellen über dem Rotorblatt, siehe Abbildung 3.17. Man kann zwischen einer linearen und einer sinusförmigen unterscheiden, oder man wählt „From Table“. Bei den ersten beiden Auswahlmöglichkeiten muss man noch die Anzahl der Schnittstellen festlegen, die dann entweder gleichmäßig oder sinusförmig über die Rotorblattlänge verteilt werden. Sinusförmig bedeutet, dass im Bereich der Blattspitze und der Blattwurzel, die Schnittstellen dichter beieinander liegen. Bei „From Table“ werden die Schnittstellen direkt aus dem erzeugten Rotor entnommen. Da eine genug große Anzahl an Profilschnitten über dem Rotorblatt verteilt vorliegt, wurde diese Variante gewählt.

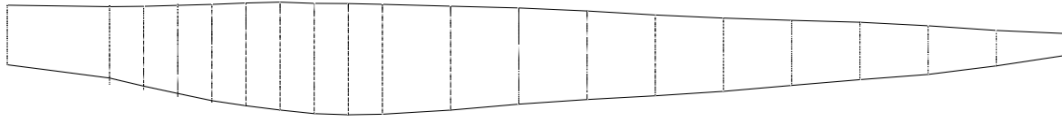


Abbildung 3.17: Diskretisiertes Rotorblatt

### Simulationstyp

Die Simulationen wurde mittels „Simulation Input File“ durchgeführt. Dies hat den Vorteil, dass man während der Simulation verschiedene Parameter ändern kann. Die Eingabe erfolgt dabei über eine Datei \*.sim. Eine Vorlage für diese Datei kann aus [17] entnommen werden, siehe Abbildung 3.18. Dabei steht links die Simulationszeit in Sekunden, gefolgt von der Drehzahl und der Windgeschwindigkeit. Für uns sind noch die rechten drei Parameter wichtig, da hier der Pitchwinkel der drei Rotorblätter, unabhängig voneinander, verändert werden kann.

SIM	ROT	H WND	V WND	WND	YAW	PLAT	PLAT	PLAT	PLAT	PLAT	PLAT	BLA 1	BLA 2	BLA 3
TIME	SPEED	SPEED	SPEED	DIR	ANG	ROLL	PITCH	YAW	T_X	T_Y	T_Z	PITCH	PITCH	PITCH
0.00	1.00	11.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	2.00	11.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	4.00	11.00	0.00	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15.00	7.00	11.00	0.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.00	0.00	0.00
20.00	11.00	11.00	0.00	17.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.00	0.00	0.00
25.00	12.00	11.00	0.00	27.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.00	0.00	0.00

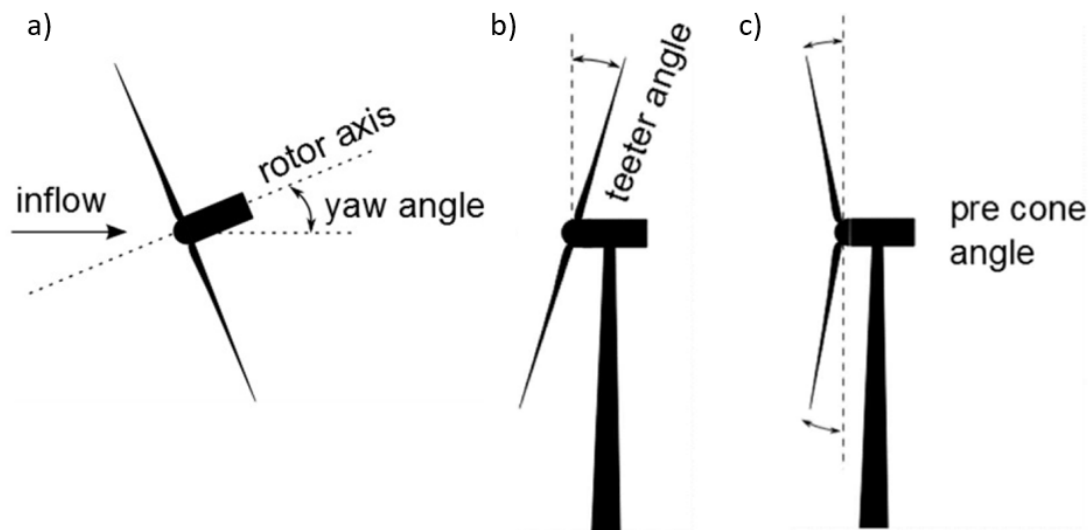
Abbildung 3.18: Vorlage des „Simulation Input File“ aus [17]

### Wind Eingabedaten

Hier kann man das zuvor erstellte Windfeld auswählen, indem man bei „Use Turbulent Windfield“ auf „On“ klickt. Die Windgeschwindigkeit im „Simulation Input File“ wird dabei mit den Daten aus dem Windfeld überschrieben.

### Rotor Winkel

Der erste Winkel ist der Gierwinkel (engl. Yaw Angle). Dieser wird in der Draufsicht auf die Windkraftanlage, in mathematisch positiver Richtung definiert (siehe Abbildung 3.19 a)). Bei den betrachteten Anlagen liegt eine Windnachführung, durch Azimuthantriebe vor. Wir legen den Gierwinkel somit auf einen konstanten Wert von  $0^\circ$  fest. Die programmspezifische Definition des Rotor-Neigungswinkels (engl. Rotorshaft Tilt oder Teeter Angle) und des Rotor-Konuswinkels, wird in Abbildung 3.19 b) bzw. c) gezeigt. Die Neigungswinkel sind  $4^\circ$  bei Anlage A und  $5^\circ$  bei Anlage B, wobei beide Anlagen keinen Konuswinkel besitzen.



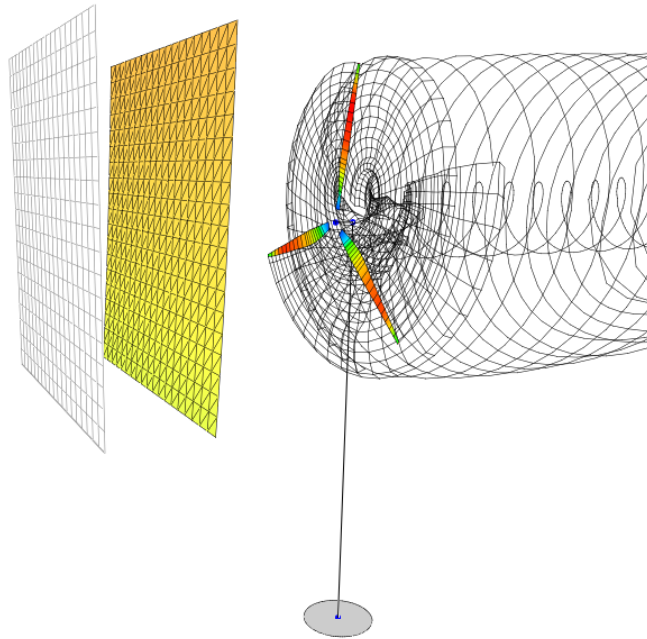
**Abbildung 3.19:** Winkeldefinition des Rotors in QBlade: a) Gierwinkel, b) Rotor-Neigungswinkel, c) Rotor-Konuswinkel [17]

Es ist noch anzumerken, dass meistens in der Literatur der Azimuthwinkel dem Gierwinkel entspricht. In QBlade wird jedoch die Lage des Rotorblattes in der Drehebene darunter verstanden. Verschiedene Effekte, wie der Turmvorstau oder der Himmelscamp Effekt, blieben wie in den Default Einstellungen deaktiviert.

### Wirbel Modellierung

Hier sind zwei Parameter von besonderer Bedeutung, zum einen der „Vortex Time Offset“ und zum anderen die „Turbulent Vortex Viscosity“. Diese Parameter dienen zur Einstellung der anfänglichen Größe des Wirbelkerns und dessen Wachstumsrate. Es liegen noch keine empirischen Daten vor, jedoch wird in [22] empfohlen, für Windkraftanlagen im großen Maßstab eine „Turbulent Vortex Viscosity“ von 100 - 1000 zu wählen. Die beiden Parameter haben großen Einfluss auf die Konvergenz der Simulation, wobei die besten Ergebnisse mit den Werten „Turbulent Vortex Viscosity“=1000 und „Vortex Time Offset“=10 erzielt wurden.

Hat man nun eine Simulation durchgeführt, erhält man eine 3D Ansicht der Windkraftanlage, samt Windfeld und Nachlaufströmung (Abbildung 3.20). Man kann in dieser Ansicht auch Ebenen erstellen, in der die Geschwindigkeitsverteilung ersichtlich wird (Abbildung 3.21).



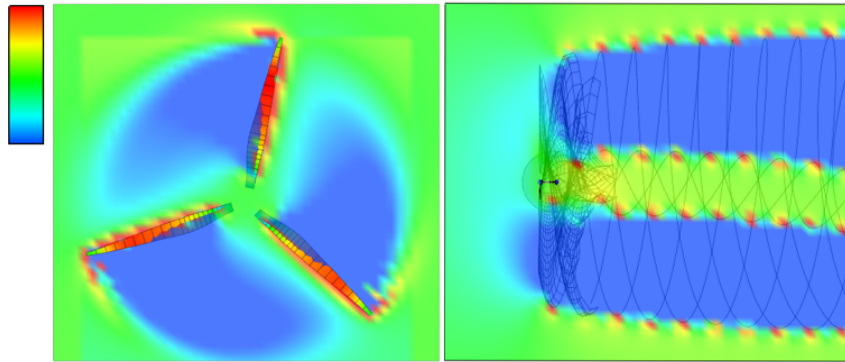
**Abbildung 3.20:** 3D Ansicht der QLLT Simulation in QBlade

Der für diese Arbeit relevanteste Teil ist die Graphen-Ansicht. Hier können eine große Anzahl von Variablen dargestellt und ausgegeben werden. Manche Variablen, wie die Reynoldszahl und der aerodynamische Anstellwinkel, sind nicht nur von der Zeit, sondern auch von der radialen Position am Rotor  $r_P$  abhängig. Daher wird nur die ausgewählte Position angezeigt, die sich in der Graphen-Ansicht verändern lässt.

## 3.4 Datenauswertung

### 3.4.1 Produktionsdaten

In den Produktionsdaten liegen Messungen vom 01.01.2015 00:10 bis zum 01.02.2019 00:00 vor. Jeder Zeitstempel beinhaltet eine zehn minütige Messung, sodass man insgesamt auf 214848 Messungen kommt. Jeder Zeitschritt enthält die gemittelte Windgeschwindigkeit über den Messzeitraum  $\overline{v_w}$ , die Minimalgeschwindigkeit  $v_{wmin}$  und die Maximalgeschwindigkeit  $v_{wmax}$ . Diese wurden bereits in Kapitel 3.3.1 zur Berechnung der Turbulenzintensität genutzt. Außerdem wird jeweils die Leistung und die Drehzahl aufgezeichnet. Da die Leistung immer aus der Differenz der



**Abbildung 3.21:** Geschwindigkeitsverteilungen in ausgewählten Ebenen, links: Vorderansicht, rechts: Draufsicht

gesamten Produktion eines Zeitschrittes zum vorherigen ermittelt wird, zeigt der Wert vor einer Messpause bzw. einem Messausfall eine sehr hohe negative Leistung an. Es liegen jedoch die korrigierten Daten vor, bei denen die Leistung über die Messpause gleichmäßig verteilt wird.

Für die Simulation und Ertragsberechnung ist es erforderlich, dass die gemittelten Werte zu den Windgeschwindigkeiten zugeordnet, vorliegen. Hierfür wurde wiederum ein Python Script erstellt, das vorerst alle Spalten ohne Messungen entfernt. Als nächstes sortiert es die Daten nach der Windgeschwindigkeit, bildet die Mittelwerte und gibt diese in einer Datei aus. Weiters können noch die Betriebsstunden, in einem festgelegten Windgeschwindigkeitsbereich ermittelt werden.

### 3.4.2 Häufigkeitsverteilung des Windes

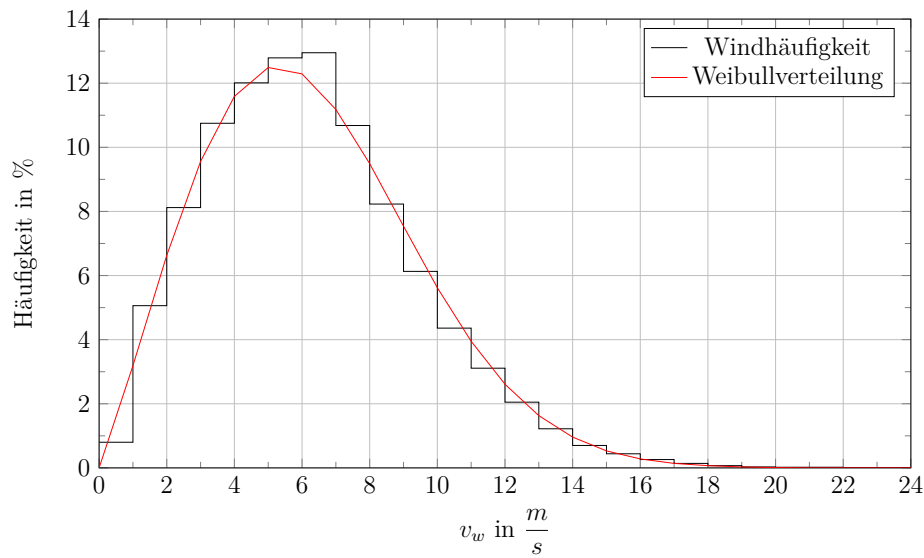
Der Wind wurde in Häufigkeitsklassen von  $1\frac{m}{s}$  eingeteilt (Abbildung 3.22 schwarz), welche mit einer Häufigkeitsverteilung (Weibullverteilung) ausgedrückt wurde (Abbildung 3.22 rot). Diese besitzt einen Skalierungsfaktor  $A$  und einen Formfaktor  $k$ , welche bei Anlage A mit  $A = 7,14\frac{m}{s}$  und  $k = 2,13$  festgelegt wurden und bei Anlage B mit  $A = 7,43\frac{m}{s}$  und  $k = 2,12$ .

Die Wahrscheinlichkeit der Weibullverteilung, dass eine Windgeschwindigkeit auftritt ist [13]:

$$h_w(v_w) = \frac{k}{A} \cdot \left(\frac{v_w}{A}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v_w}{A}\right)^k} \quad (3.8)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass die Windgeschwindigkeit im Bereich  $v_i < v_w < v_{i+1}$  liegt, ist also:

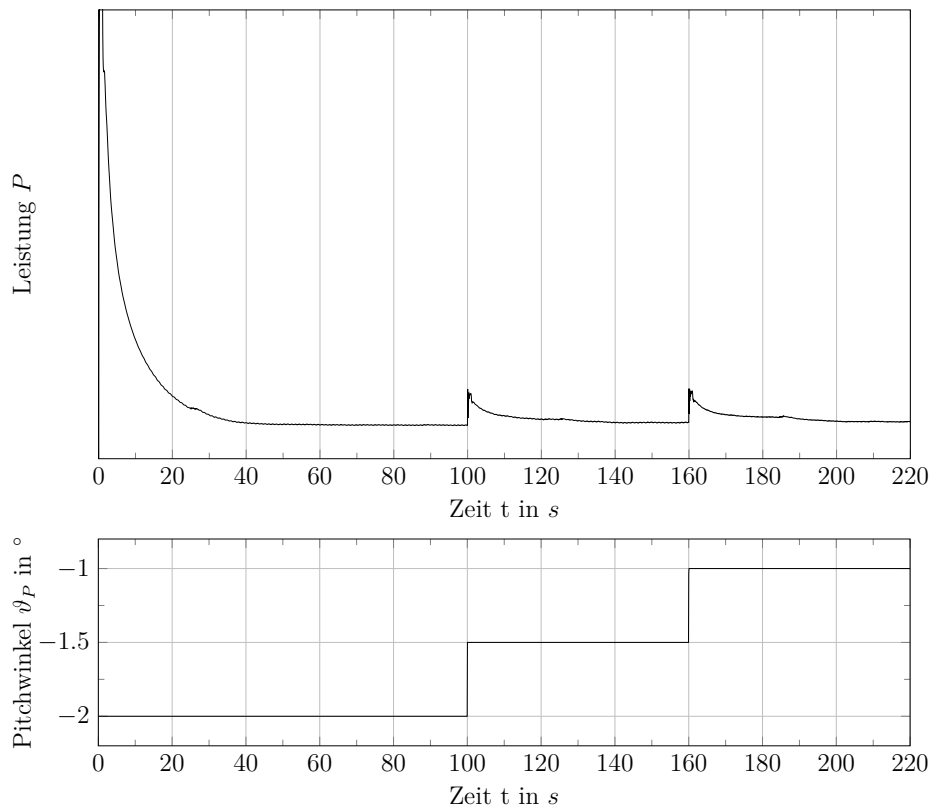
$$f(v_i < v_w < v_{i+1}) = e^{-\left(\frac{v_i}{A}\right)^k} - e^{-\left(\frac{v_{i+1}}{A}\right)^k} \quad (3.9)$$



**Abbildung 3.22:** Häufigkeitsverteilung des Windes mit Weibullverteilung

### 3.4.3 Simulationsdaten

Aus der Graphen-Ansicht von QBlade erhält man den zeitlichen Verlauf der Leistung (Abbildung 3.23). Man sieht, dass die Lösung zu Beginn noch nicht konvergiert ist und Zeit benötigt, um sich einzupendeln. In diesem Fall beginnt man beim Pitchwinkel  $\vartheta_P = -2^\circ$  mit der Simulation und wartet bis der Wert konvergiert ist. Wenn dies der Fall ist, wird  $\vartheta_P$  verstellt, wobei die Lösung wiederum ausschlägt und erneut konvergieren muss. Zu Beginn der Simulation dauert dies jedoch länger, da sich erst die Nachlaufströmung ausbilden muss. Es werden die Leistungsdaten aus den konvergierten Bereichen entnommen und gemittelt, sodass man bei jeder Windgeschwindigkeit, zu jedem Pitchwinkel, einen Leistungswert erhält.



**Abbildung 3.23:** Simulierte Leistung mit Pitchverstellung exportiert aus QBlade, Modul QLLT

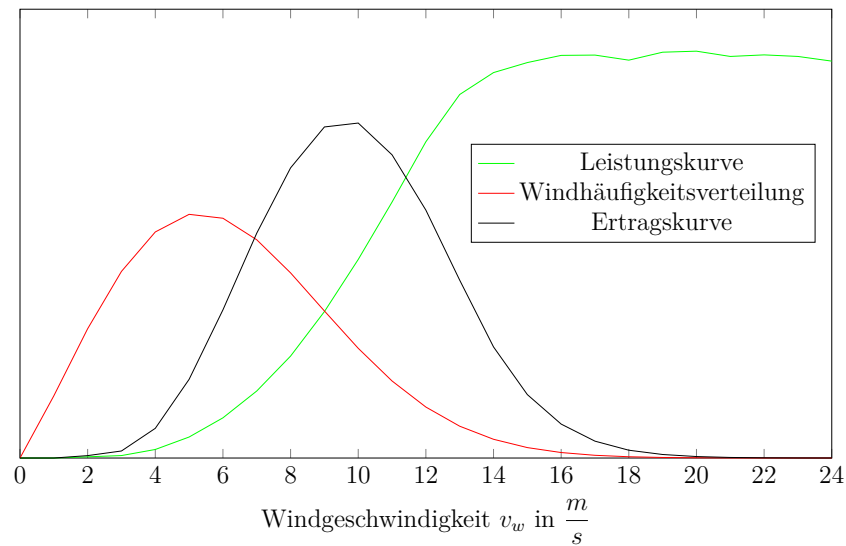
### 3.4.4 Ertragsberechnung

Den Ertrag bei einer Windgeschwindigkeit erhält man durch die Multiplikation der Wahrscheinlichkeit, dass diese Windgeschwindigkeit auftritt, mit der Leistung und der Betriebsstundenanzahl. Der Ertrag wird üblicherweise auf ein Jahr bezogen, sodass hier mit 8760 Betriebsstunden gerechnet wird. Der Jahresertrag kann also durch aufsummieren der Einzelerträge ermittelt werden:

$$\text{Jahresertrag} = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{2} \cdot (P(v_{i+1}) + P(v_i)) \cdot f(v_i < v_w < v_{i+1}) \cdot 8760 \quad (3.10)$$

In Abbildung 3.24, werden noch die Weibullverteilung, die Leistung und der daraus ermittelte Ertrag dargestellt. Die y-Achse wurde dabei nicht beschriftet, da diese Darstellung nur die Relation der Kurven zueinander, in Abhängigkeit der

Windgeschwindigkeit veranschaulichen soll.



**Abbildung 3.24:** Leistung, Windhäufigkeit und Ertrag als Funktion der Windgeschwindigkeit

Es ist noch anzumerken, dass bei Anlage B während des Messzeitraumes eine Umstellung des Pitchwinkels im Teillastgebiet stattgefunden hat. Zur Erstellung der Simulation wurden die Daten bei  $\vartheta_P = 1^\circ$  verwendet. Bei der Ertragsberechnung wurden dann die Windhäufigkeiten des gesamten Messzeitraums herangezogen.



# Kapitel 4

## Ergebnisse und Diskussion

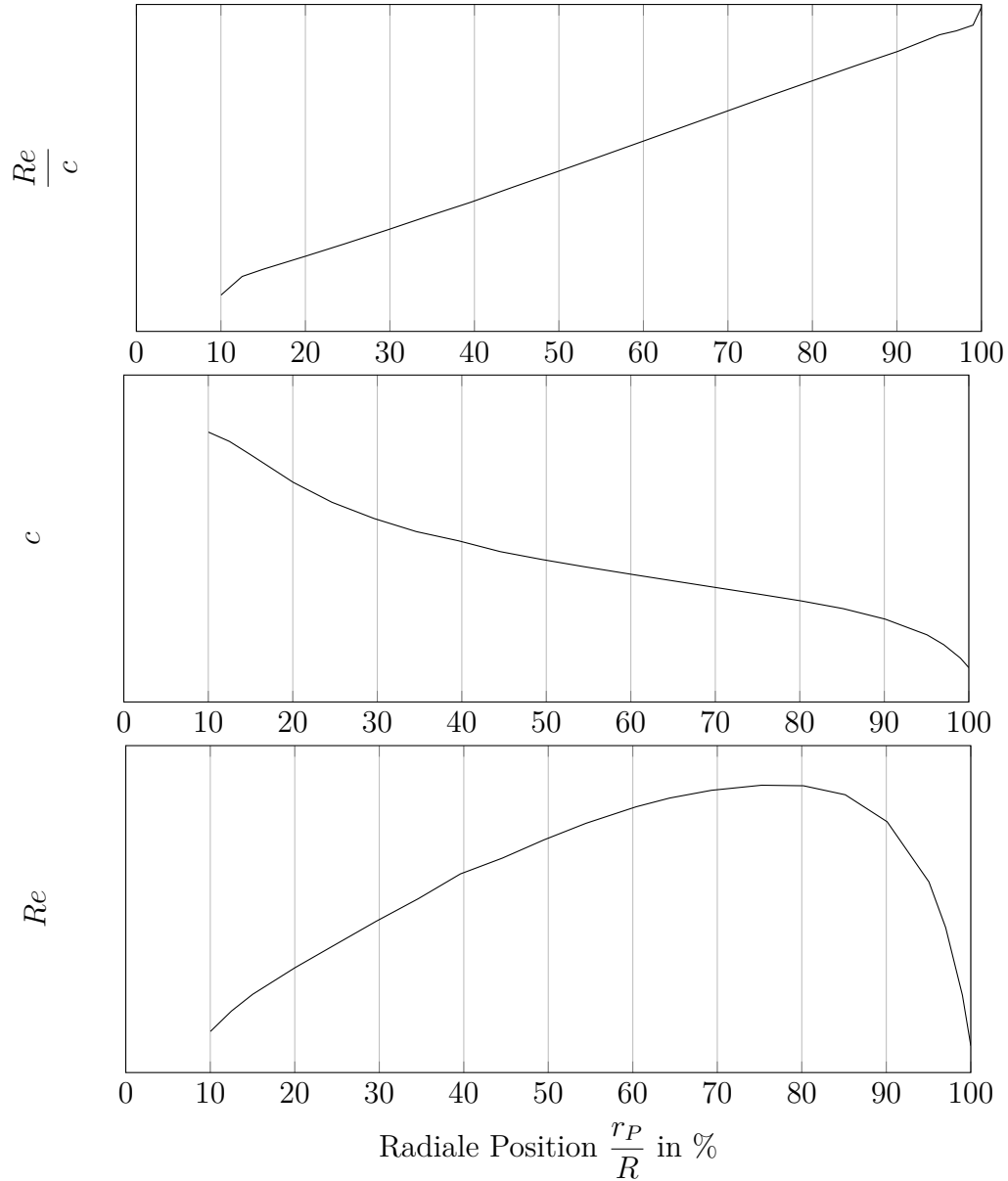
In diesem Kapitel werden Ergebnisse dargestellt, aber auch Sachverhalte erklärt, die sich aus diesen ergeben. Tabellen und Grafiken die dem Verständnis dienen, werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nur aus Daten einer Anlage erstellt. Hierfür wurde die Anlage B gewählt, weil sie die modernere und größere Anlage, mit Profilen größerer Krümmung im Bereich der Blattwurzel, ist. In den Ergebnisdiagrammen werden dann beide Anlagen entsprechend gekennzeichnet.

### 4.1 Einfluss der Reynoldszahl

#### 4.1.1 Vergleich der simulierten mit den berechneten Reynoldszahlen

In Abschnitt 3.3.1 werden die Reynoldszahlen, in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit und der radialen Profilposition  $r_P$  ermittelt. Es werden nun die, für die Polaren-Erzeugung verwendeten Werte, mit den simulierten Reynoldszahlen verglichen. Es ist darauf zu achten, dass es sich bei den berechneten Werten, um auf die Profiltiefe  $c = 1m$  normierte Werte handelt. Diese müssen daher noch mit der Profiltiefe der vorliegenden Profilposition multipliziert werden. In Abbildung 4.1 ist die normierte Reynoldszahl über der Blattlänge, bei konstanter Windgeschwindigkeit und zugehöriger Drehzahl, dargestellt. Die radiale Position  $r_P$  wird dabei in % des Radius, bis zur Blattspitze angegeben. Man sieht, dass die normierte Reynoldszahl aufgrund der größer werdenden Umfangsgeschwindigkeit monoton

ansteigt. Da aber die Profiltiefe mit steigendem Radius sinkt, ergibt sich der Verlauf der unnormierten Reynoldszahlen wie in Abbildung 4.1 dargestellt.



**Abbildung 4.1:** Reynoldszahl und Profiltiefe in Abhängigkeit der radialen Position

Für den Vergleich der berechneten mit den simulierten Werten, wurden die zwei Windgeschwindigkeiten  $v_w = 3 \frac{m}{s}$  und  $v_w = 10 \frac{m}{s}$  herangezogen, da diese als Bereichsgrenzen die Extremfälle darstellen. Um einen Eindruck über die gesamte Rotorblattlänge zu erhalten, wurden sieben radiale Positionen, über die Blattlänge verteilt, gewählt. In Tabelle 4.1 sind die relativen Abweichungen der berechneten

$\frac{r_P}{R}$ in %	10	13	25	50	75	99	100
Relative Abweichung ( $v_w = 3 \frac{m}{s}$ ) in %	18,66	-1,77	-0,52	0,19	-0,08	-1,28	8,26
Relative Abweichung ( $v_w = 10 \frac{m}{s}$ ) in %	21,7	-1,2	0	0	-0,06	-1,61	7,6

**Tabelle 4.1:** Vergleich der berechneten und simulierten Reynoldszahlen

zu den simulierten Werten eingetragen. Man sieht, dass die Abweichungen im Bereich der Blattspitze und des innersten Profils am größten sind, wobei hier die simulierten Werte größer sind. Hier wurde bei der Ermittlung der Reynoldszahlen, zur Berücksichtigung der Verwirbelungen, ein Korrekturfaktor in der BEM Berechnung angewandt (siehe Abschnitt 3.3.1). Sobald man sich jedoch nur minimal ins Blattinnere bewegt, werden die Abweichungen sehr klein. Der Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Reynoldzahlendifferenz ist sehr gering, wie man beim Vergleich der Werte einer radialen Position sehen kann.

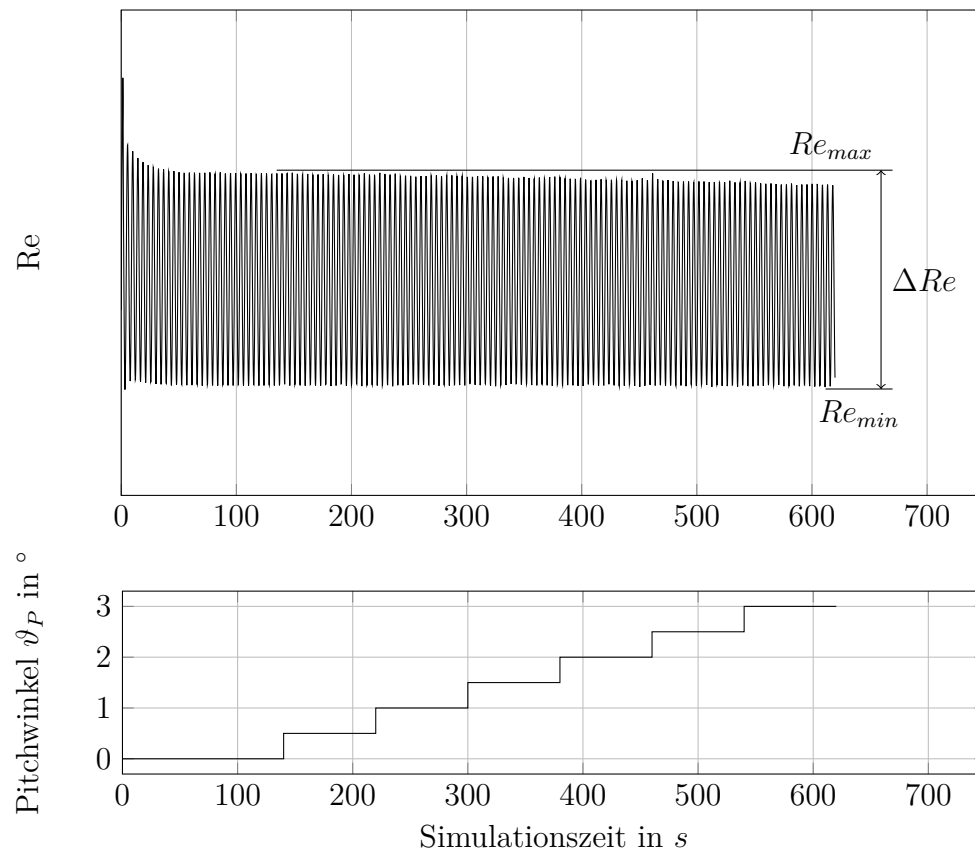
Die Windgeschwindigkeit an der Drehachse ist minimal kleiner, als die gemessene. Der Grund dafür ist, dass die Messhöhe zwei Meter über der Drehachse liegt und ein schräges Windprofil aufgrund der Windscherung vorliegt. Dies erzeugt auch eine Differenz der Reynoldszahl, die jedoch vernachlässigbar klein ist.

### 4.1.2 Reynoldszahlenschwankung

Beim Vergleich der Werte im letzten Abschnitt, wurde immer vom Mittelwert der Reynoldszahl, im eingeschwungenen Zustand ausgegangen. In Abbildung 4.2 ist eine simulierte Reynoldszahl dargestellt. Man erkennt, dass die Werte schwingen. Der Grund hierfür ist die Windscherung, die sich aus folgender Formel ergibt:

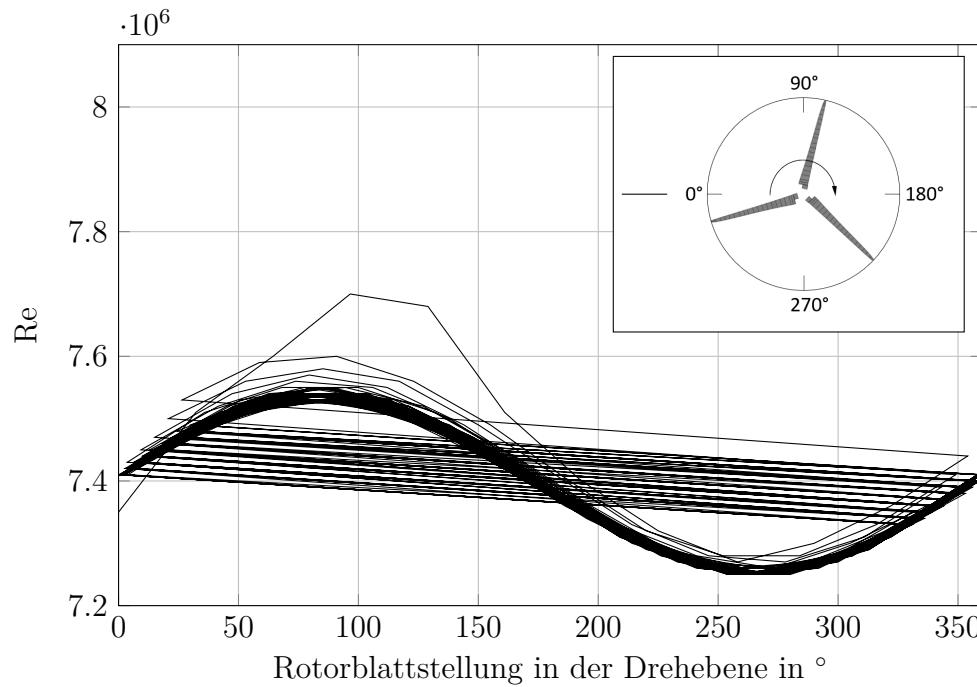
$$v = v_{ref} \cdot \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\frac{z_{ref}}{z_0}} \quad (4.1)$$

wobei  $v$  die Geschwindigkeit der Höhe  $z$  über dem Boden ist und  $z_0$  die Rauigkeitslänge. Als Referenzwerte werden die gemessene Windgeschwindigkeit  $v_{ref} = v_w$  bei einer Messhöhe von  $z_{ref}$  herangezogen. Man erkennt an der Formel, dass bei Veränderung der Windgeschwindigkeit die Steigung der Kurve gleich bleibt, da  $z_0 = konst.$  und  $z_{ref} = konst.$  sind (siehe Abschnitt 2.6.1).



**Abbildung 4.2:** Reynoldszahlen exportiert aus QLLT Simulation

Das Rotorblatt durchläuft nun bei einer Umdrehung Gebiete unterschiedlicher Geschwindigkeit, wodurch auch die Reynoldszahl schwankt. Bei der Darstellung der Reynoldszahl über der Winkellage des Rotorblattes in der Drehebene, kann man diesen Umstand besser erkennen (siehe Abbildung 4.3). Das Rotorblatt zeigt, in Windrichtung betrachtet, nach links, bei einer Stellung von  $0^\circ$  und läuft im mathematisch negativen Drehsinn um. Die maximale Reynoldszahl liegt vor, wenn das Rotorblatt gerade nach oben zeigt ( $90^\circ$ ).



**Abbildung 4.3:** Reynoldszahlen bei Winkellage des Rotorblattes in der Drehebene

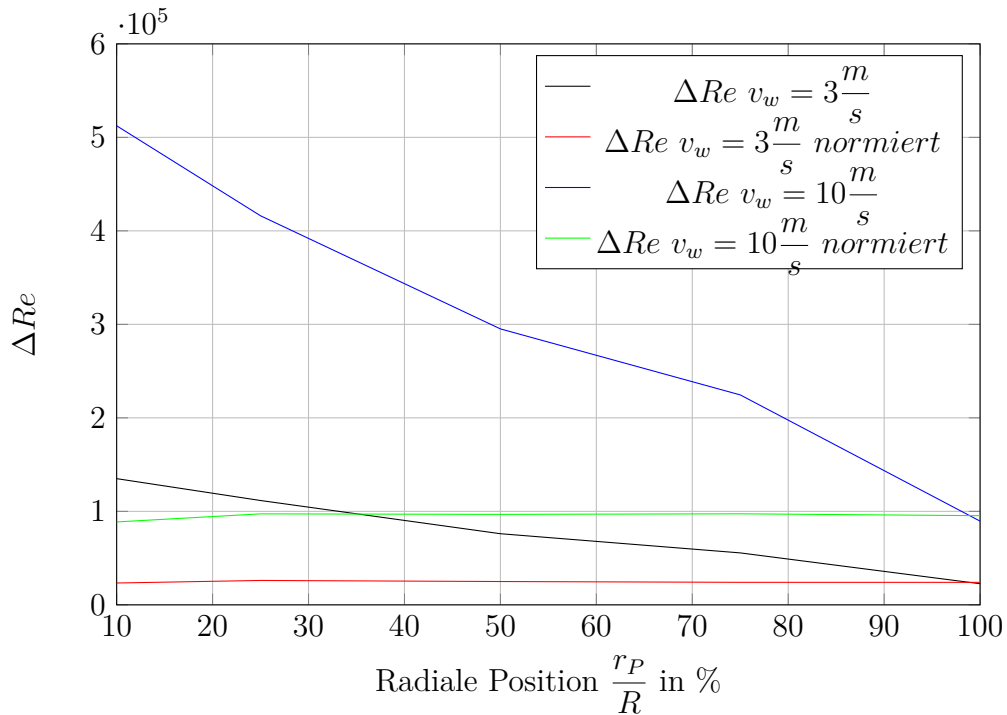
Auch die Verstellung des Pitchwinkels hat einen Einfluss auf die Reynoldszahl, erkennbar durch den zeitlichen Abfall der Kurve in Abbildung 4.2, welcher die Schwingung überlagert. In der Abbildung ist die größte auftretende Reynoldszahl  $Re_{max}$  eingezeichnet, wobei diese ab der Konvergenz der Simulation abgelesen wird. Die kleinste Reynoldszahl  $Re_{min}$  wird ebenso abgebildet und die Differenz wird als  $\Delta Re$  bezeichnet. Diese setzt sich also aus Reynoldszahlenschwingung aufgrund der Windscherung und der Veränderung bei Pitchverstellung zusammen. Sie ist also die maximale Reynoldszahlabweichung einer radialen Position bei konstanter Windgeschwindigkeit.

In Tabelle 4.2 sind die Differenzen  $\Delta Re$  eingetragen, wobei wieder die zwei Windgeschwindigkeiten  $v_w = 3 \frac{m}{s}$  und  $v_w = 10 \frac{m}{s}$ , bei verschiedenen radialen Positionen, herangezogen werden. Außerdem werden die Werte in Abbildung 4.4 zur Veranschaulichung dargestellt. Man erkennt, dass die Schwankungsbreite von der radialen Position  $r_P$  abhängt. Bei größer werdendem Radius steigt die resultierende Anströmgeschwindigkeit  $v_r$ , welche sich aus Umfangsgeschwindigkeit  $u$  und der Windgeschwindigkeit  $v_w$  zusammensetzt. Da bei größer werdendem Blattradius die Umfangsgeschwindigkeit ansteigt,  $v_w$  aber konstant bleibt, hat hier die Windscherung weniger Einfluss auf  $v_r$  und die Reynoldszahl schwankt nicht so stark. Die

$\frac{r_P}{R}$ in %	10	25	50	75	100
$\Delta Re$ bei $v_w = 3 \frac{m}{s}$	134980	111590	76080	55560	22600
$\Delta Re$ bei $v_w = 3 \frac{m}{s}$ normiert	23361	26097	24944	24094	24068
$\Delta Re$ bei $v_w = 10 \frac{m}{s}$	512380	416110	295140	224550	89540
$\Delta Re$ bei $v_w = 10 \frac{m}{s}$ normiert	88678	97313	96767	97376	95357

**Tabelle 4.2:** Reynoldszahldifferenzen bei gleichbleibender Windgeschwindigkeit

normierten Werte hingegen werden leicht größer, haben aber eine relativ kleine Abweichung zueinander. Die Windgeschwindigkeit hat einen großen Einfluss auf  $\Delta Re$ , da die Werte bei  $v_w = 3 \frac{m}{s}$  wesentlich kleiner sind, als bei  $v_w = 10 \frac{m}{s}$ . Im nächsten Abschnitt wird untersucht welchen Einfluss diese Abweichung auf die Profipolaren hat.



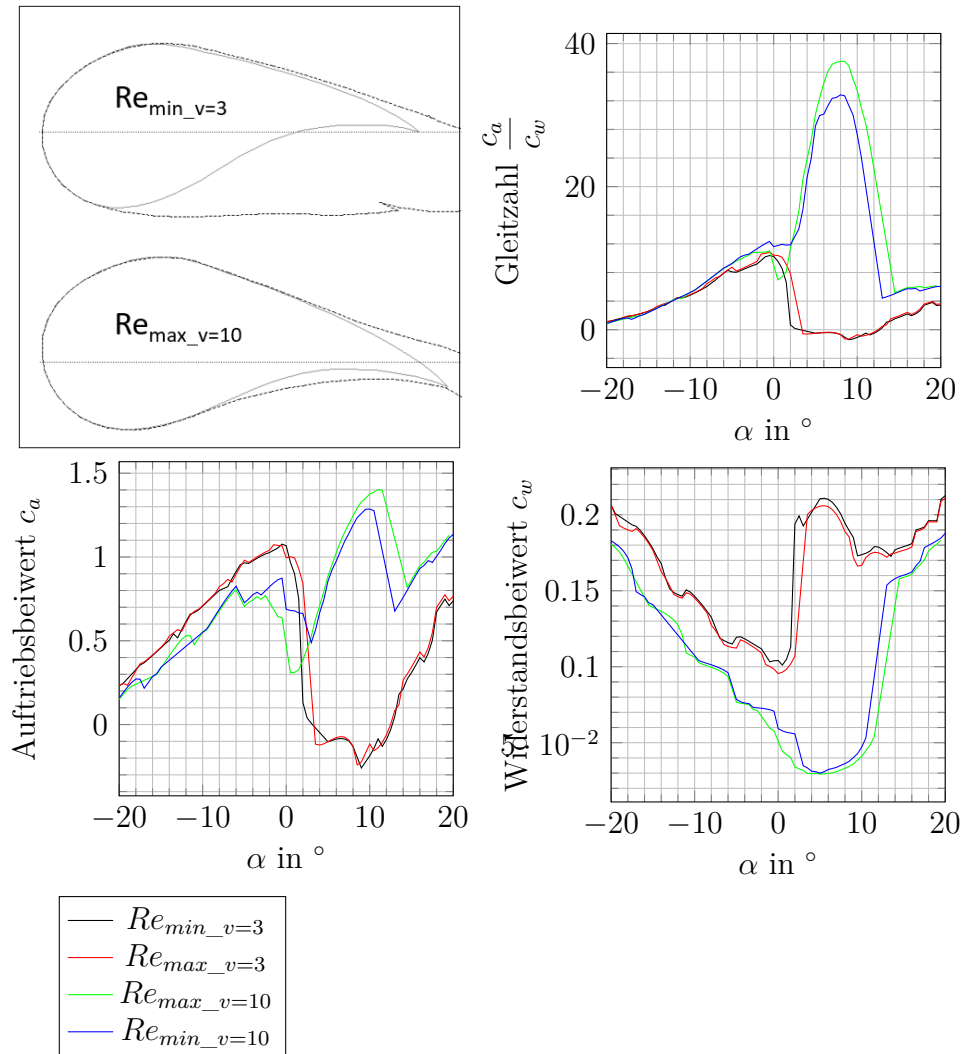
**Abbildung 4.4:** Reynoldszahldifferenzen  $\Delta Re$

### 4.1.3 Einfluss der Reynoldszahl auf die Polaren

In diesem Abschnitt wird untersucht, ob Abweichungen der Reynoldszahl, aufgrund der unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten, als auch durch die Differenz  $\Delta Re$ , einen Einfluss auf die Polaren und somit auf die simulierte Leistung haben. Der Einfluss der Reynoldszahlen auf die Profilpolaren wird wieder für die Bereichsgrenzen unseres Windgeschwindigkeitsbereichs untersucht. Bei  $v_w = 3 \frac{m}{s}$  liegen die kleinsten Reynoldszahlen und die kleinsten Differenzen  $\Delta Re$  vor. Die größten hingegen sind bei  $v_w = 10 \frac{m}{s}$ . In den Abbildungen 4.5 bis 4.7 sind links oben die Profilkonturen mit der strichliert eingezeichneten Grenzschicht zu sehen. Außerdem werden die Polaren  $(c_a, c_w, \frac{c_a}{c_w})$  für jeweils die Reynoldszahlen  $Re_{min\_v=3}$ ,  $Re_{max\_v=3}$ ,  $Re_{min\_v=10}$  und  $Re_{max\_v=10}$  dargestellt. Jede Abbildung ist einer radialen Position zugeordnet, da diese Einfluss auf die Profilform und die Reynoldszahlen hat.

In Abbildung 4.5 sieht man, dass mit größer werdender Reynoldszahl die Stromlinien besser anliegen. Dieser Umstand wirkt sich stark auf den Auftriebsbeiwert und den Widerstandsbeiwert aus, sodass insgesamt die Gleitzahl deutlich höher liegt. Noch hinzu kommt, dass XFOIL für Strömungsablösungen keine aussagekräftigen Ergebnisse liefert. [14]

Der Einfluss der Differenz  $\Delta Re$  wirkt sich hier auch verstärkt aus, ist dennoch relativ gering.

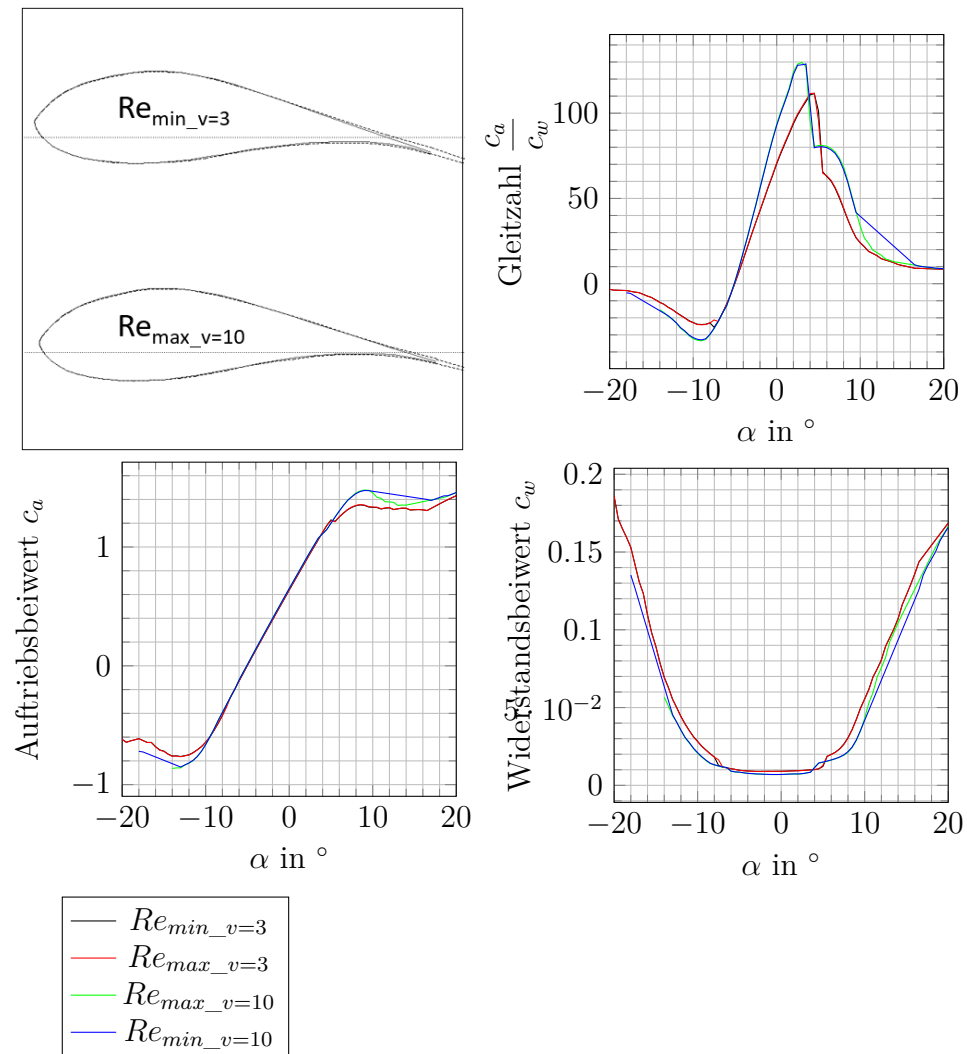


**Abbildung 4.5:** Einfluss der Reynoldszahlen auf Polaren bei  $\frac{r_P}{R} = 10\%$

In den Abbildungen 4.6 und 4.7 liegen aufgrund der größeren radialen Position am Rotorblatt auch höhere Reynoldszahlen vor. Außerdem werden die Profile nach außen hin immer schlanker, sodass die Stromlinien auch bei der kleinsten vorkommenden Reynoldszahl noch anliegen. Der Einfluss von  $Re$ , bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten, ist in den Polaren klar erkennbar. Somit macht es Sinn für jede Windgeschwindigkeit eigene Polaren zu erstellen. Die Differenz  $\Delta Re$  ist dagegen vernachlässigbar klein. Des weiteren verschiebt sich auch der Anstellwinkel  $\alpha$  der maximalen Glitzahl.

Im Blattinnenbereich sind die Reynoldszahleneinflüsse auf die Polaren am größten, jedoch ist dieser für die Leistungserzeugung von untergeordneter Bedeutung.





**Abbildung 4.6:** Einfluss der Reynoldszahlen auf Polaren bei  $\frac{r_P}{R} = 50\%$

Profilformen die hier vorliegen werden aus Gründen der Festigkeit und einfacheren Fertigung nicht aerodynamisch optimal ausgelegt. Vor allem die Profildicke ist davon betroffen, um ausreichende Bauhöhe für die Festigkeit und Steifigkeit, bei dennoch geringem Gewicht, zu erhalten. [11]

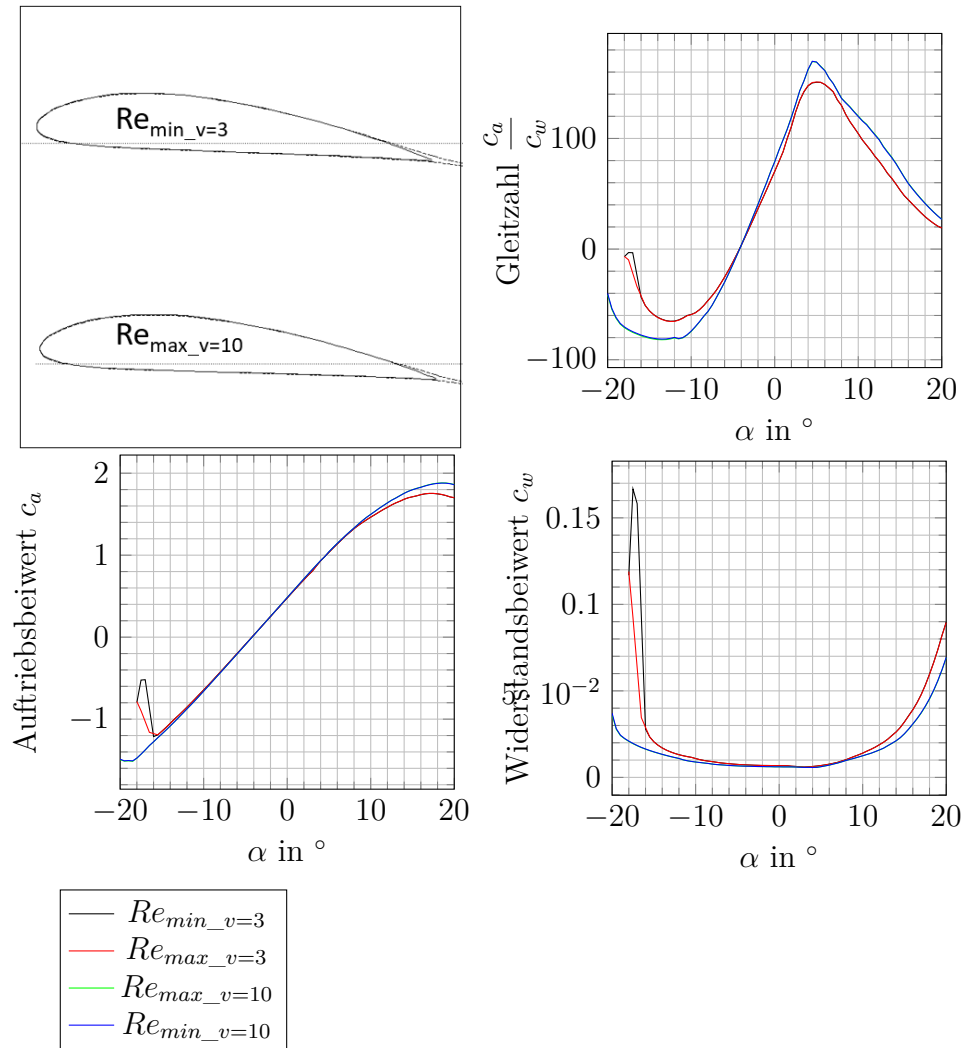


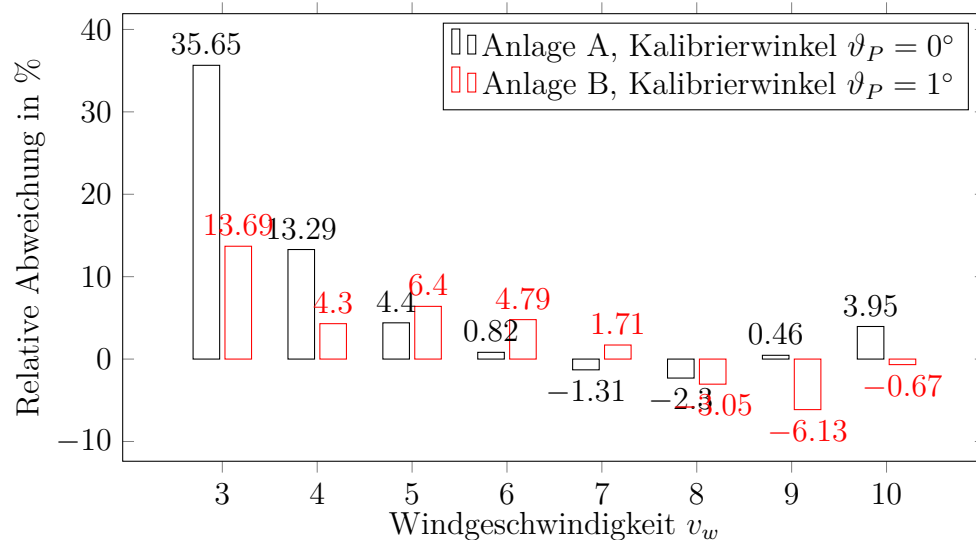
Abbildung 4.7: Einfluss der Reynoldszahlen auf Polaren bei  $\frac{r_P}{R} = 100\%$

## 4.2 Ertrag bei unterschiedlicher Pitchwinkelstellung

Es gilt nun die Erträge bei unterschiedlichen Pitchwinkleinstellungen des Rotorblattes miteinander zu vergleichen. Um eine Referenz zu erhalten, wurden die Erträge der Simulation und der Produktionsdaten, bei gleicher Pitchwinkelstellung  $\vartheta_P$ , miteinander verglichen. Bei Anlage A handelt es sich hier um  $\vartheta_P = 0^\circ$ , wobei der simulierte Wert um 1,01% höher liegt. Wie in Abschnitt 3.4.4 erwähnt, gab es bei Anlage B eine Umstellung des Betriebs auf einen anderen Pitchwinkel. Hier wurde der Pitchwinkel  $\vartheta_P = 1^\circ$ , vor der Umstellung des Betriebs, zur Kalibrierung

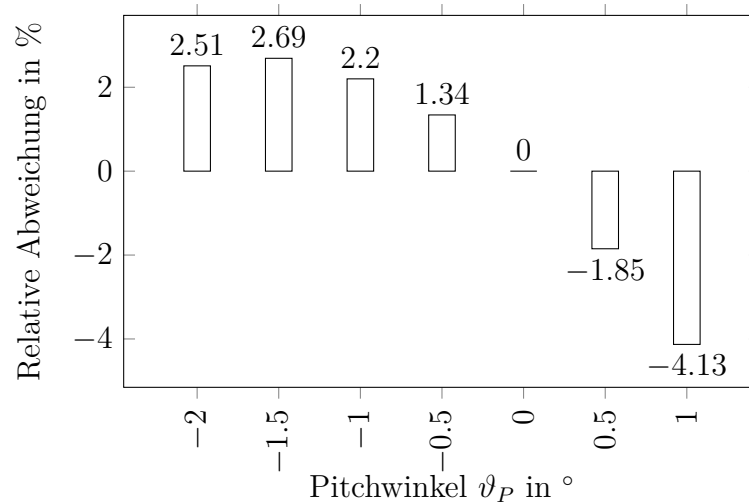
verwendet, da hier höhere Leistungen vorliegen, die besser mit der Leistungskurve des Anlagenherstellers zusammenpassen. Die hier simulierte Leistung ist um 0,33% höher als die gemessene. Die Ertragsberechnung erfolgt dann mit den Winddaten des gesamten Messzeitraumes.

Um zu untersuchen wie groß die Leistungsabweichung, abhängig von der Windgeschwindigkeit ist, wurden diese, relativ zu den Leistungen aus den Produktionsdaten, in Abbildung 4.8, dargestellt. Positive Werte bedeuten, dass die simulierte Leistung höher ist. Dies ist besonders bei kleinen Windgeschwindigkeiten der Fall. Ein Grund dafür ist die niedrige Anströmgeschwindigkeit, wodurch die Reynoldszahl so klein ist, dass sich die Stromlinien ablösen. XFOIL liefert bei Strömungsablösung unrealistische Polaren, die zu einer falschen Leistung führen. Vergleicht man die Produktionsdaten mit den Leistungsdaten des Herstellers, sind auch hier die Abweichungen bei kleinen Windgeschwindigkeiten am größten. Ob dies auch mit Strömungsablösung zu tun hat, oder mit der Leistungsaufzeichnung an sich, ist unklar. Betrachtet man die einzelnen Werte der Produktionsdaten bei  $v_w = 3 \frac{m}{s}$ , kommen fast ausschließlich 3 Leistungen vor, was auf eine geringe Auflösung schließen lässt. Dies hat bei der Betrachtung des gesamten Ertrags kaum Einfluss, wirkt sich jedoch auf die relative Abweichung der kleinen Leistungen aus. Da der Ertrag mit steigender Windgeschwindigkeit zunimmt, ist es besonders wichtig, dass hier geringe relative Abweichungen vorliegen.

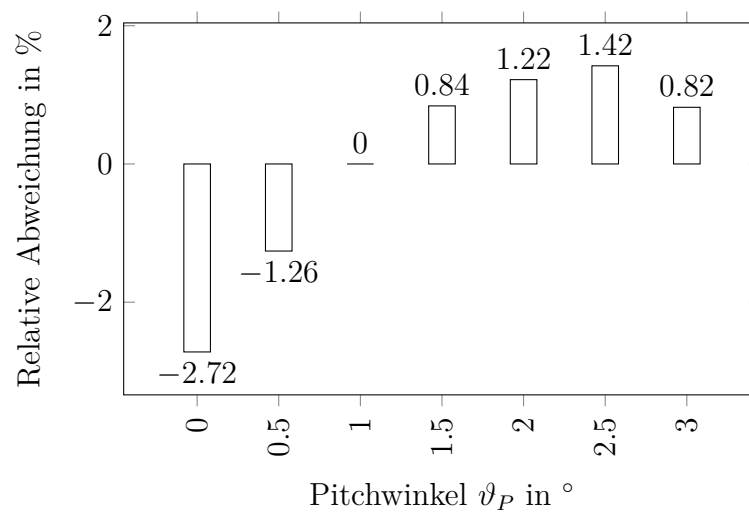


**Abbildung 4.8:** Relative Leistungsabweichung: Leistungen aus den Produktionsdaten zu simulierten

Die Kalibrierwinkel wurden in den Abbildungen 4.9 und 4.10 als Referenz der relativen Ertragsabweichung herangezogen. Bei Abbildung 4.9 steigt der Ertrag bis zu einer negativen Pitchverstellung von  $\vartheta_P = -1,5^\circ$  an und erreicht hier das Maximum, das 2,69% über dem Referenzwert liegt. Bei Anlage B ist das Maximum bei  $\vartheta_P = 2,5^\circ$ , welches 1,42% über dem Referenzwert liegt.



**Abbildung 4.9:** Relative Ertragsabweichung zu  $\vartheta_P = 0^\circ$ , Windkraftanlage A



**Abbildung 4.10:** Relative Ertragsabweichung zu  $\vartheta_P = 1^\circ$ , Windkraftanlage B

Der maximale Pitchwinkel gilt für den Windgeschwindigkeitsbereich  $3\frac{m}{s} \leq v_w \leq 10\frac{m}{s}$ . Er bildet einen Kompromiss für die ideale Rotorblatteinstellung, da für verschiedene Windgeschwindigkeiten unterschiedliche Pitchwinkel die maximale Leistung erzeugen. In den Tabellen 4.3 und 4.4 sind die Stellen der maximalen Leistungen, für jede Windgeschwindigkeit eingetragen. In Abbildung 3.24 erkennt man, wie sich der Ertrag aus Windhäufigkeit und Leistung zusammensetzt. Im betrachteten Windgeschwindigkeitsgebiet steigt der Ertrag mit höherer Windgeschwindigkeit kontinuierlich an. Die höhere Windhäufigkeit wird also von der steigenden Leistung überschattet, darum haben die optimalen Pitchwinkel in diesem Bereich auch den meisten Einfluss.

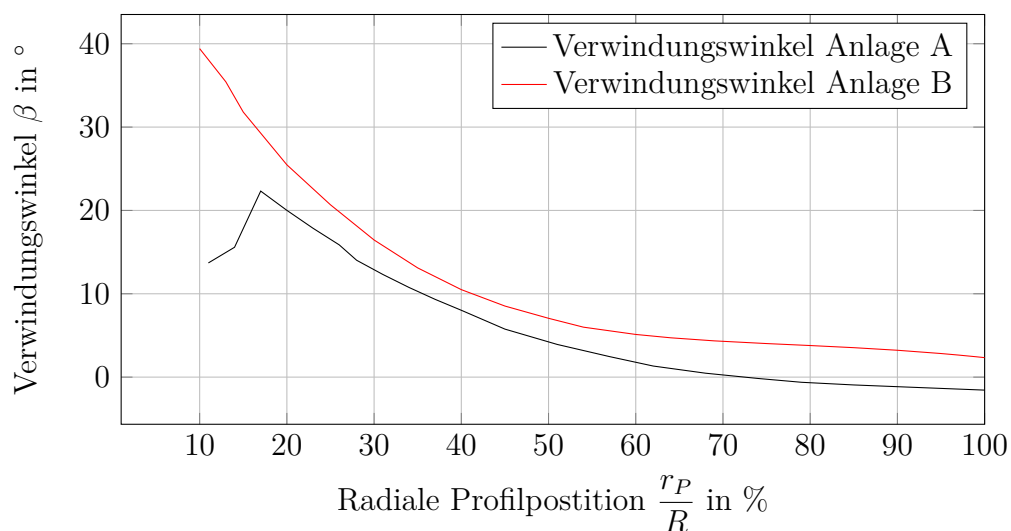
		Pitchwinkel $\vartheta_P$ in °						
		-2	-1.5	-1	-0.5	0	0.5	1
$v_w$ in $\frac{m}{s}$	3	Max						
	4	Max						
	5	Max						
	6	Max						
	7		Max					
	8		Max					
	9		Max					
	10			Max				

**Tabelle 4.3:** Maximale Leistung abhängig vom Pitchwinkel bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten, Windkraftanlage A

		Pitchwinkel $\vartheta_P$ in $^\circ$						
		0	0.5	1	1.5	2	2.5	3
$v_w$ in $\frac{m}{s}$	3	Max						
	4			Max				
	5					Max		
	6					Max		
	7						Max	
	8						Max	
	9						Max	
	10						Max	

**Tabelle 4.4:** Maximale Leistung abhängig vom Pitchwinkel bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten, Windkraftanlage B

Der Grund für die verschiedenen Vorzeichen der maximalen Pitchwinkel bei den beiden Anlagen, lässt sich aus den Kurven der Verwindungswinkel erkennen (siehe Abbildung 4.11). Die Winkel der Anlage A haben einen Nulldurchgang, sodass an der Blattspitze ein negativer Winkel vorliegt. Durch eine negative Pitchverdrehung, ergeben sich hier nun günstigere Anströmwinkel, sodass die Leistung zunimmt. Da bei Anlage B die Verwindungswinkel an allen Stellen größer sind, muss man hier eine positive Pitchverstellung vornehmen, um die idealen Anstellwinkel zu erreichen.



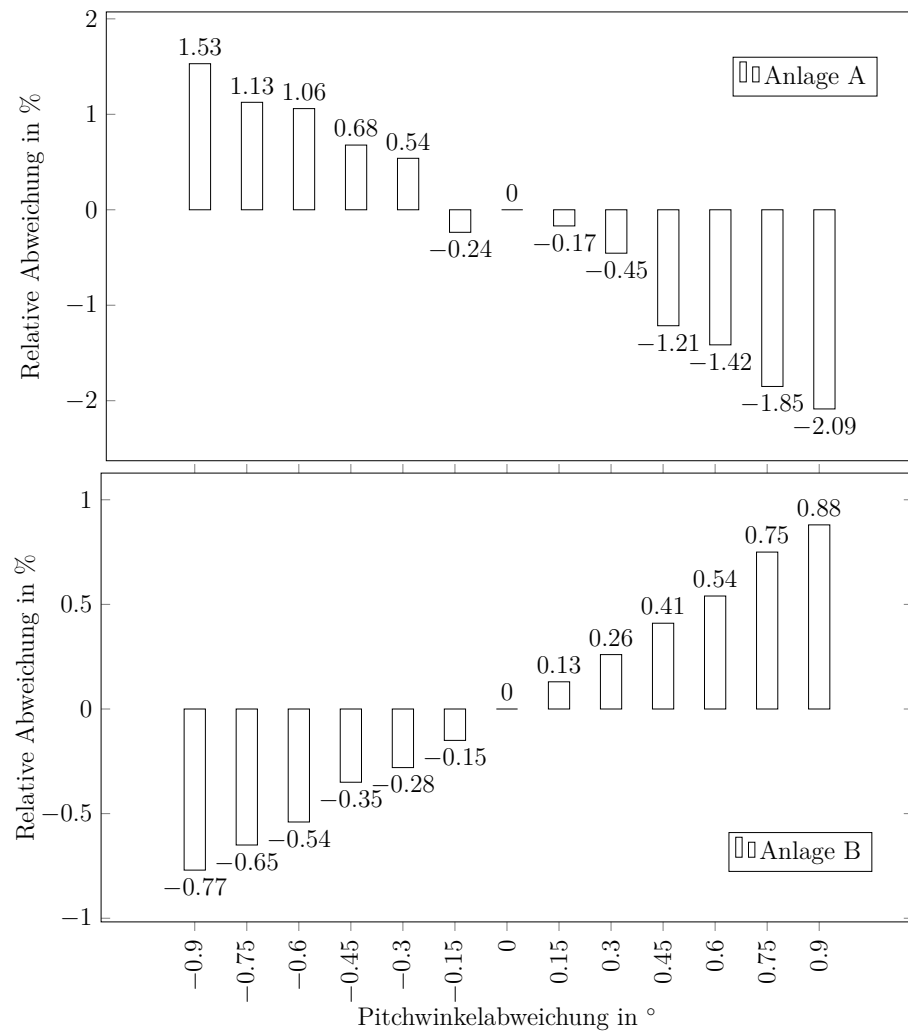
**Abbildung 4.11:** Vergleich der Verwindungswinkel  $\beta$  der Anlagen

### 4.3 Abweichungen des Pitchwinkels einzelner Rotorblätter

In diesem Abschnitt wird die Änderung der Leistung bei der Abweichung der Pitchwinkel einzelner Rotorblätter untersucht. Betrachtet wird die mittlere Windgeschwindigkeit, die bei Anlage A  $v_w = 6,35 \frac{m}{s}$  und bei Anlage B  $v_w = 6,8 \frac{m}{s}$  beträgt.

In Abbildung 4.12 sind die relativen Leistungsunterschiede von den Anlagen A und B dargestellt, wobei ein Rotorblatt eine Pitchwinkelabweichung aufweist. Die Abweichung erfolgt in  $0,15^\circ$  Schritten, ausgehend vom Referenzwinkel, der bei beiden Anlagen mit  $\vartheta_P = 0^\circ$  gewählt wurde. Positive relative Leistungen, entsprechen einer Leistungserhöhung. Die maximale Verstellung beträgt  $0,9^\circ$ , sowohl in positive als auch in negative Pitchrichtung.

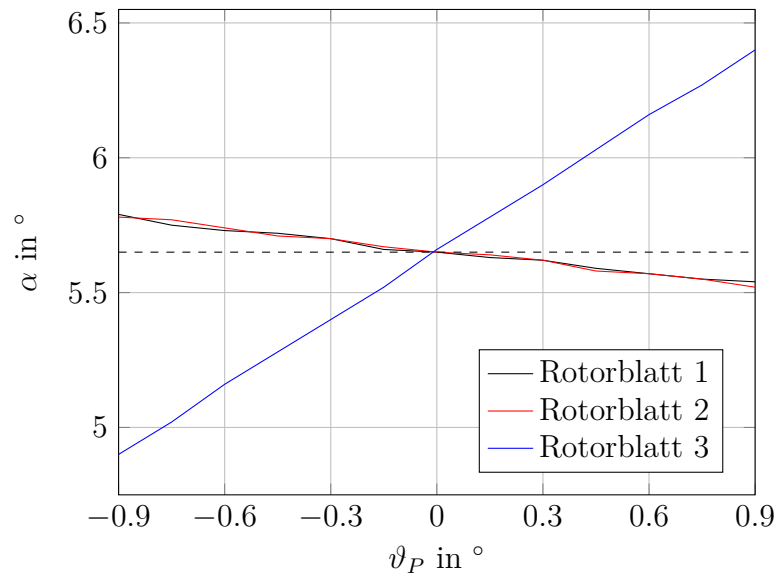
Bei Windkraftanlage A sollte grundsätzlich eine negative Pitchverstellung eine Leistungserhöhung bewirken. Es ist zu berücksichtigen, dass sich nicht nur der Anstellwinkel des verstellten Rotorblattes verändert, sondern durch die Beeinflussung der gesamten Strömung auch der aerodynamische Anstellwinkel  $\alpha$  der anderen beiden. In Abbildung 4.13 ist der aerodynamische Anstellwinkel aller drei Rotorblätter dargestellt. Es wird hierbei lediglich der Pitchwinkel von Blatt 3 verändert. Blatt 1 läuft vor Blatt 3, somit Blatt 2 nach. Die Daten wurden im Bereich der Blattspitze entnommen, wobei es über den gesamten Rotorblattradius  $r_P$  zu den gleichen Effekten kommt. Man sieht beim Rotorblatt 3 die erwartete Erhöhung des Anstellwinkels bei steigendem Pitchwinkel. Der Wert  $\alpha$  der anderen beiden Blätter sinkt hingegen ab, wodurch diese der Leistungsveränderung entgegenwirken.



**Abbildung 4.12:** Relative Leistungsabweichung bei Verstellung des Pitchwinkels eines Rotorblattes

Da die Leistungsabweichungen nur sehr klein sind, werden die Ergebnisse auch von kleinen Schwingungen der Lösung beeinflusst. Durch lange Zeitintervalle für jeden Einschwingvorgang, nach einer Pitchverstellung, wurde versucht, diese Beeinflussung so klein wie möglich zu halten. Außerdem ist es sinnvoll, die Polaren mit einer kleinen Schrittweite  $\Delta\alpha$  zu berechnen, da der Pitchwinkel in kleinen Schritten variiert wird. Dazwischenliegende Polar-Bereiche werden linear interpoliert und können somit zu Abweichungen führen, die in den kleinen Leistungsabweichungen erkennbar sind.

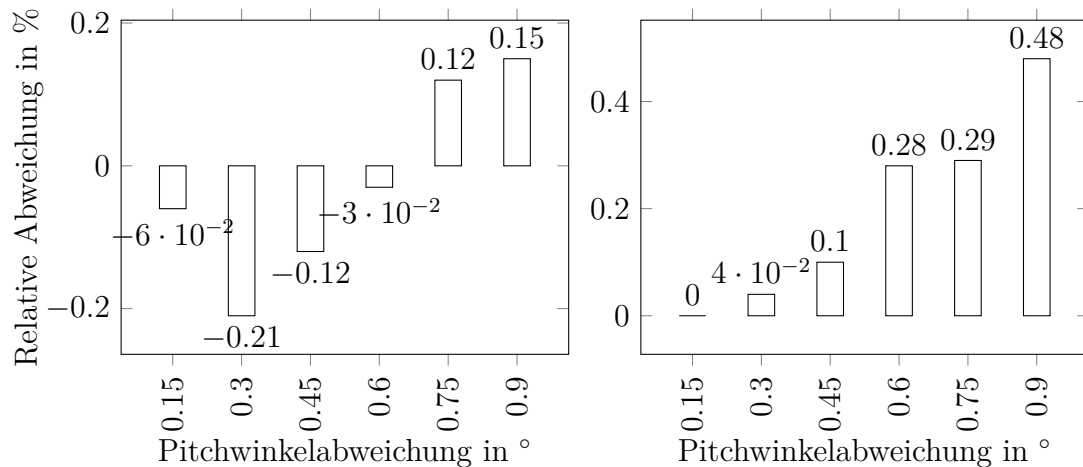




**Abbildung 4.13:** Änderung des aerodynamischen Anstellwinkels bei Veränderung des Pitchwinkels eines Rotorblattes

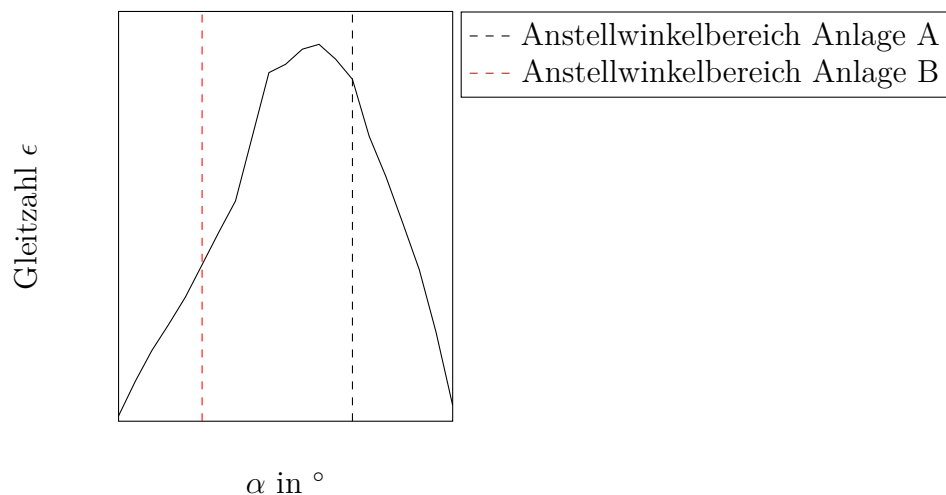
Als Nächstes werden zwei Rotorblätter verstellt. Es wird eines mit einem positiven und ein zweites mit einem negativen Pitchwinkel beaufschlagt, jeweils mit betragsmäßig gleicher Pitchwinkelabweichung (Blatt 2 positiv, Blatt 3 negativ). Das Ergebnis der Leistungsbeeinflussung ist in Abbildung 4.14 dargestellt. Anders als im letzten Fall, bleibt der aerodynamische Anstellwinkel des unverstellten Rotorblattes nun nahezu unbeeinflusst. Bei den beiden anderen Blättern erzeugt eines nun eine höhere Leistung und eines eine geringere.

Betrachtet man bei Anlage A die Polare der Gleitzahl, so befinden sich die Anstellwinkel der Rotorblattspitze rechts vom Maximum. In diesem Bereich liegen oft kleine Unstetigkeiten der Kurve vor, die das Ergebnis beeinflussen und somit schwer nachvollziehbare Ergebnisse liefern. Bei Anlage B befindet man sich nun links vom Maximum, in Bereichen streng monotoner Steigung. Bei einer positiven Pitchverstellung erhöht sich der Anstellwinkel, was zu einer Leistungserhöhung führt. Da dieser Kurvenbereich eine positive Krümmung aufweist, ist die positive Leistung des Blattes 2 betragsmäßig höher, als die negative des Blattes 3. Somit erhält man insgesamt eine positive relative Leistung. Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 4.15 beispielhaft eine Gleitzahl über dem Anstellwinkel, um ihr Maximum. Außerdem wird markiert, wo sich die Anstellwinkel des äußeren Rotorblattbereichs in der Polare befinden.



**Abbildung 4.14:** Relative Leistungsabweichung bei gegenläufiger Verstellung des Pitchwinkels von zwei Rotorblättern; links) Anlage A, rechts) Anlage B

Die erhaltenen Leistungssteigerungen treten nur auf, weil wir die Abweichungen um  $\vartheta_P = 0^\circ$  betrachten. Hat man bei einem Rotorblatt bereits den idealen Winkel eingestellt, bewirkt eine Abänderung, sowohl in die negative, als auch in die positive Pitchrichtung, einen Leistungsverlust. Da man im Teillastgebiet jedoch nur einen Pitchwinkel für den gesamten Windgeschwindigkeitsbereich einstellt, weicht dieser meist vom idealen ab.



**Abbildung 4.15:** Position des Anstellwinkels in der Polare der Gleitzahl  $\epsilon$

### Aerodynamischer Anstellwinkel

Um zu erläutern warum bei gewissen Pitchwinkelstellungen der maximale Ertrag auftritt, muss man die aerodynamischen Anstellwinkel betrachten. Die resultierende Anströmgeschwindigkeit  $v_r$  ändert ihren Winkel bezogen auf die Drehebene ( $\vartheta + \alpha$ ) von der Blattwurzel zur Spitze. Um nun keine zu großen Abweichungen der aerodynamischen Anstellwinkel zu bekommen, werden die Profile verwunden. Hinzukommt, dass jedes Profil bei einem anderen  $\alpha$  die maximale Leistung erbringt. Die optimale Verwindung kann nicht für jede Windgeschwindigkeit vorliegen, sondern nur für eine Schnellaufzahl  $\lambda$ . Bei allen Windgeschwindigkeiten die nicht in diesem Betriebspunkt liegen, geht also Leistung durch suboptimale Anstellwinkel verloren. [11]

Die gesamte Rotorleistung ergibt sich aus den Einzelleistungen der Profile bei unterschiedlicher radialer Position  $r_P$ . Um nun die maximale Leistung zu erhalten, müssen möglichst viele Profile in der Nähe des optimalen Anstellwinkels angeströmt werden, vor allem in äußeren Rotorblattgebieten, da dort der Großteil der Leistung erzeugt wird. Der Pitchwinkel, bei dem dies der Fall ist, ergibt somit den maximalen Ertrag.

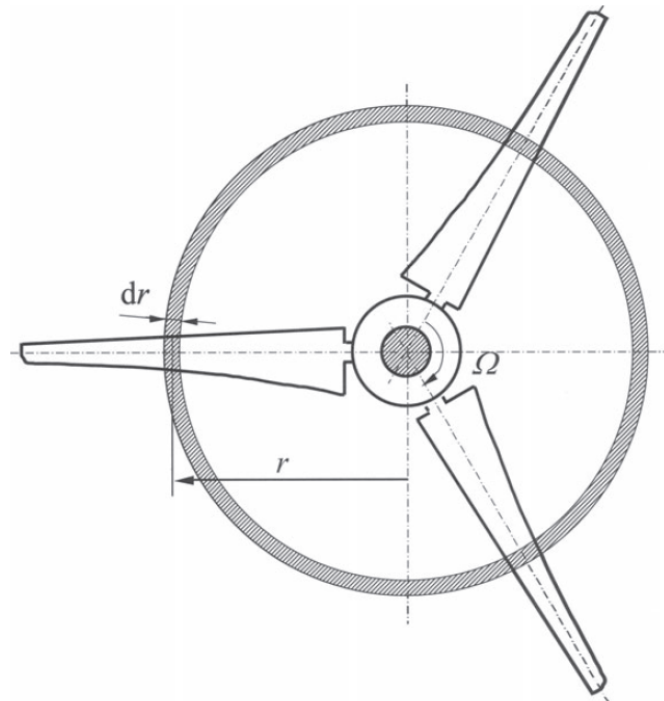


Abbildung 4.16: Ringschnitt des Rotors [23]

Ein Maß für den Wirkungsgrad des Blattes ist die Gleitzahl. Betrachtet man einen Ringschnitt des Rotors wie in Abbildung 4.16, so ist dessen Leistung [23]:

$$dP = z \cdot F_T \cdot u \quad (4.2)$$

mit der Blattanzahl  $z = 3$ . Die tangentielle Kraftkomponente  $F_T$  ist dabei:

$$F_T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot c \cdot dr \cdot (c_a \cdot \sin(\vartheta + \alpha) - c_w \cdot \cos(\vartheta + \alpha)) \quad (4.3)$$

Der Wirkungsgrad wird nun mit der „Ideal-Maschine“ ohne Widerstand, also mit  $c_w = 0$  gebildet:

$$\eta_{\text{Profil}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot c \cdot dr \cdot (c_a \cdot \sin(\vartheta + \alpha) - c_w \cdot \cos(\vartheta + \alpha))}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot c \cdot dr \cdot c_a \cdot \sin(\vartheta + \alpha)} \quad (4.4)$$

$$= 1 - \frac{c_w}{c_a} \cdot \frac{1}{\tan(\vartheta + \alpha)} \quad (4.5)$$

$$= 1 - \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{1}{\tan(\vartheta + \alpha)} \quad (4.6)$$

Der Winkel zwischen der Rotationsebene und der relativen Anströmgeschwindigkeit des Blattes  $v_r$  bleibt konstant ( $\vartheta + \alpha = \text{konst.}$ ). Man kann in Gleichung (4.6) erkennen, dass der Profilverlust bei steigender Gleitzahl  $\epsilon$  zunimmt.

In Tabelle 4.5 sind die Gleitzahlen der Anlage B, bei unterschiedlichen Pitchwinkeleinstellungen und radialen Positionen eingetragen. Die Werte wurden aus der Simulation entnommen und die maximale Gleitzahl  $\epsilon$  jeder radialen Position wurde markiert. Wie die Reynoldszahlen schwanken auch der aerodynamische Anstellwinkel und somit auch die Gleitzahl in Abhängigkeit der Rotorblattlage in der Drehebene. Die Werte der Tabelle entsprechen den Mittelwerten.

Gleitzahlen $\frac{c_a}{c_w}$		$\frac{r_P}{R}$ in %					
		50	60	70	80	90	100
$\vartheta_P$ in °	0	122,8	145,9	142,5	153,7	154,3	151,6
	0,5	112,1	149,9	147,4	161,7	160,1	158,5
	1	104,8	152,7	152,1	168,6	166,2	164,7
	1,5	100,6	153,5	155,8	174,8	172,5	168,5
	2	98,6	147,5	158,1	178,6	180,9	168,6
	2,5	97,6	140,1	154,1	180,0	190,9	167,1
	3	97,4	137,2	146,3	179,7	198,8	164,9

**Tabelle 4.5:** Gleitzahlen bei unterschiedlichen Pitchwinkeln und radialen Positionen, Anlage B

Der ertragsmäßig beste Pitchwinkel wurde mit  $2,5^\circ$  ermittelt (siehe Abbildung 4.10). Man sieht in Tabelle 4.5, dass die maximalen Gleitzahlen, bei großen Radien, im Bereich dieses Winkels liegen. Da bei einer Erhöhung des Pitchwinkels von  $0^\circ$  auf  $1^\circ$ , alle Gleitzahlen steigen, nimmt hier der Ertrag stärker zu, als z.B. bei der Erhöhung von  $2^\circ$  auf  $2,5^\circ$ . Hier steigen nämlich manche Gleitzahlen an, wohingegen andere schon wieder sinken. Dies ist der Grund warum die Ertragsabweichung im Bereich um den optimalen Pitchwinkel kleiner ist.

# Kapitel 5

## Erkenntnisse

Die Software QBlade ermöglicht es Simulationen von Windkraftanlagen durchzuführen und dabei die zeitlichen Verläufe von vielen Parametern zu erhalten. Um gute Ergebnisse zu erzielen sind umfangreiche Kenntnisse über die Anlage, sowie der Betriebsweise erforderlich. Auch die Vielzahl an verstellbaren Simulationsparametern erfordert einen guten Einblick in das Programm, sodass die erstmalige Nutzung eine recht hohe Einarbeitungszeit erfordert. Alles in allem ist das Programm jedoch ein sehr effektives Werkzeug und bildet einen guten Kompromiss zwischen Aufwand und Genauigkeit der Ergebnisse. Aus den gewonnenen Daten konnten außerdem viele Schlüsse gezogen werden und man erhält daraus eine gute Übersicht über das Zusammenspiel von Profilpolaren, Profilform, Anstellwinkel und Leistung.

Natürlich liegen in manchen Bereichen auch gewisse Unsicherheiten vor. Durch fehlende beziehungsweise die endliche Anzahl der Messpunkte bei der Profilmodellierung konnte die Profilkontur nur näherungsweise abgebildet werden. Außerdem war die Ermittlung der exakten Verwindungswinkel dadurch beeinträchtigt. Aus dem Vergleich der simulierten mit der gemessenen Leistung aus den Produktionsdaten, konnte man feststellen, dass die Simulation gute Ergebnisse liefert.

Als Optimierung könnte man noch die Turm-Rotorblattinteraktion, sowie die Rotorblattverformung unter Belastung miteinbeziehen.

# Literatur

- [1] Betz, A. (1926). Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen. Göttingen : Vandenhoeck & Ruprecht 7, 243–244.
- [2] Bschorer, S., *Technische Strömungslehre*; Springer Fachmedien Wiesbaden: 2018.
- [3] Concepts, R. E. <http://www.renewable-energy-concepts.com/german/windenergie/wind-basiswissen/rauhigkeitsklassen.html>, zuletzt besucht am 17.03.2020.
- [4] Cord-Christian Rossow, P. H., Klaus Wolf, *Handbuch der Luftfahrzeugtechnik*; Hanser Fachbuchverlag: 2014.
- [5] David Marten, J. W. QBlade Guidelines v0.6, 2013.
- [6] David Marten, J. W. QBlade Guidelines v0.6, 2013.
- [7] De Nolasco Santos F. Upstream Tower Effect on Wind Turbine Blade Flow, Magisterarb., Universität Aveiro, 2019.
- [8] Design, Q. W. T. und Simulation "<http://www.q-blade.org/welcome>, zuletzt besucht am 13.02.20.
- [9] Etling, D., *Theoretische Meteorologie*; Springer Berlin Heidelberg: 2008.
- [10] für Windenergie-Daten der Schweiz, D. W. <https://wind-data.ch/tools/weibull.php>, zuletzt besucht am 18.03.20.
- [11] Hau E., *Windkraftanlagen, Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit*; Springer Berlin Heidelberg: 2016.
- [12] Heier, S., *Windkraftanlagen Systemauslegung, Netzintegration und Regelung*; Vieweg+Teubner Verlag: 2018.
- [13] Jarass, L., Obermair, G. und Voigt, W., *Windenergie*; Springer-Verlag GmbH: 2009.

- [14] Köhler, M. (2011). Software zur Untersuchung ebener Flügelprofile.
- [15] Kuhlmann, H., *Strömungsmechanik*; Pearson Deutschland GmbH: 2014; 304 S.
- [16] Mahmuddin, F., Klara, S., Sitepu, H. und Hariyanto, S. (2017). Airfoil Lift and Drag Extrapolation with Viterna and Montgomerie Methods. *Energy Procedia*, DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.394.
- [17] Marten, D. QBlade v0.95 Guidelines for Lifting Line Free Vortex Wake Simulations; TU Berlin, 2016.
- [18] Oertel, H., Böhle, M. und Reviol, T., *Strömungsmechanik*; Springer Fachmedien Wiesbaden: 2015.
- [19] Quaschnig, V., *Regenerative Energiesysteme*; Hanser Fachbuchverlag: 2019; 468 S.
- [20] RIEGL Laser Measurement Systems, W. "<http://www.riegl.co.at/company/wir-stellen-uns-kurz-vor/> , zuletzt besucht am 12.02.20.
- [21] Salome, T. O. S. I. P. f. N. S. <https://www.salome-platform.org/> , zuletzt besucht am 12.02.20.
- [22] Sant, T. Improving BEM-based Aerodynamic Models in Wind Turbine Design Codes, Diss., 2007.
- [23] und Twele J., G. R., *Windkraftanlagen, Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb*; Vieweg Teubner Verlag: 2005.
- [24] van Garrel, A. Development of a Wind Turbine Aerodynamics Simulation Module, 2003.
- [25] van Ingen, J., *The  $e^N$  Method for Transition Prediction, 38th Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Historical Review of Work at TU Delft*, 2008.
- [26] Wikipedia: Normalverteilung, W. "<https://de.wikipedia.org/wiki/Normalverteilung>", zuletzt besucht am 12.02.20.
- [27] Wikipedia: Profil (Strömungslehre), W. "[https://de.wikipedia.org/wiki/Profil\\_\(Strömungslehre\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Profil_(Strömungslehre))", zuletzt besucht am 19.02.20.
- [28] Willinger, R., *Numerische Strömungsberechnung von thermischen Turbomaschinen*; Technische Universität Wien: 2017.