



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Lutz Rohlfing

CFD-Modellierung der Rotor-Rotor-Interaktion von Multirotorwindenergieanlagen

Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und
Produktion

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

Masterarbeit

CFD-Modellierung der Rotor-Rotor-Interaktion von Multirotorwindenergieanlagen

im Studiengang **Master Berechnung und Simulation im Maschinenbau**
am Department **Maschinenbau und Produktion**
der Fakultät **Technik und Informatik**
der **Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg**

Erstprüfer: **Prof. Peter Dalhoff**

Zweitprüfer: **Prof. Dr. Jan Piatek**

Abstrakt

Deutsch

In dieser Arbeit wird eine CFD-Simulation zur Bestimmung der Rotor-Rotor-Interaktion an Multi-rotor-Windenergieanlagen aufgebaut. Dafür wird zuerst eine Literaturrecherche durchgeführt, um daraus Informationen für dieses Modell zu gewinnen. Auf der Basis dieser Recherche wird das Modell aufgebaut. Dabei wird das Modell auf zwei Rotorblätter, die miteinander interagieren vereinfacht. Als Geometrie wird dafür der Rotor der DTU 10MW genutzt. Als Programm wird ANSYS Fluent verwendet. Das SST – $k - \omega$ – Turbulenzmodell wird genutzt. Aus der Simulation werden die Lasten am Rotorblatt ausgewertet. Das Schwenkmoment des Rotorblatts steigt bei einer Windgeschwindigkeit von 12 m/s und einem Abstand von $0,005 \cdot R$ um ungefähr 1,5%. Die Schubkraft steigt um 0,8%. In einer anschließenden Parameterstudie wird der Einfluss des Abstands und der Windgeschwindigkeit untersucht.

English

In this work, a CFD simulation is conducted to determine the rotor-rotor interaction in multi-rotor wind turbines. First, a literature review is performed to gather information for this model. Based on this research, the model is developed. The model is simplified to two interacting rotor blades. The rotor of the DTU 10MW turbine is used as the geometry. ANSYS Fluent is utilized as the simulation software. The turbulence model used is the SST – $k - \omega$ – model. The loads on the rotor blades are evaluated from the simulation. The blade's edgewise moment increases by approximately 1.5% at a wind speed of 12 m/s and a distance of $0.005 \cdot R$. The thrust force increases by 0.8%. A subsequent parameter study examines the influence of the distance and wind speed.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	I
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
2 Einführung in Windenergieanlagen	3
2.1 Grundlegende Größen	3
2.2 Begriffsdefinition	4
2.3 Blatt-Element-Methode	6
2.4 Einführung in Multirotor-Windenergieanlagen	8
3 Einführung in Computational Fluid Dynamics	10
3.1 Grundlegendes Lösungsverfahren	10
3.2 Turbulenzmodelle	12
3.3 Grundlagen der Vernetzung	14
3.4 Lastberechnung in ANSYS Fluent	16
3.5 Ansätze zur Bewegungssimulation	17
4 Literaturrecherche	20
4.1 Bisherige Modellierung	20
4.2 Modellwahl	23
5 Modellaufbau	26
5.1 Rotorblatt	26
5.2 Modelle	30
5.3 Parameter	33
5.4 Vernetzung	35
5.5 Simulation	37
5.5.1 Randbedingungen	37
5.5.2 Dynamische Berechnungselemente	38
5.5.3 Zeitschrittweite	39

5.5.4	Solvereinstellungen	40
5.5.5	Abstürze	41
6	Plausibilisierung	43
6.1	Netzqualität	43
6.2	Konvergenz	46
6.3	Validierungsmodell	48
7	Ergebnisdarstellung	52
7.1	Strömungsdarstellung	52
7.2	Lasten am Rotorblatt	54
7.2.1	Schwenkmoment	54
7.2.2	Schubkraft	60
7.2.3	Radialkraft	65
8	Parameterstudie	70
8.1	Variation des Abstands	70
8.2	Variation der Windgeschwindigkeit	75
9	Schluss	77
9.1	Zusammenfassung	77
9.2	Häufigkeit der Interaktionen	79
9.3	Fehlerhafte Ansätze	80
9.4	Ausblick	80
	Literaturverzeichnis	82

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
c_t	-	Schubkraftbeiwert
c_p	-	Leistungsbeiwert
a	-	axialer Induktionsfaktor
a'	-	tangentialer Induktionsfaktor
I_t	-	Turbulenzintensität
I_{ref}	-	Referenzturbulenzintensität
∇	-	Nabla-Operator
y^+	-	dimensionsloser Wandabstand
\vec{n}	-	Normalenvektor
λ	-	Schnelllaufzahl
f	-	Skalierungsfaktor
R_b	-	Rotationsmatrix des Blattkoordinatensystems
i	-	Anzahl der Interaktionen
i_{max}	-	maximale Anzahl der Interaktionen
u	-	Faktor
ω	$\frac{1}{s}$	spezifische Dissipationsrate von k
ϕ	°	Anströmwinkel
α	°	Anstellwinkel
θ	°	Profilverwindung
β	°	Positionswinkel des Rotorblatts
β_{start}	°	Startwinkel der Simulation
β_{end}	°	Endwinkel der Simulation
φ	°	Pitchwinkel
k	$\frac{J}{kg}$	turbulente kinetische Energie
η	$\frac{kg}{m \cdot s}$	dynamische Viskosität
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte
s	m	kürzester Abstand der Blattspitzen
r	m	radiale Position
R	m	Rotorradius
\vec{r}_{AB}	m	Ortsvektor zwischen A und B
\vec{v}_b	m	Ortsvektor des Blattkoordinatensystems
R_s	m	Simulationsradius

d_v	m	Tiefe der Domain stromaufwärts
d_h	m	Tiefe der Domain stromabwärts
h_r	m	Rauigkeitshöhe der Blattoberfläche
Δx	m	Zellgröße
d_{grenz}	m	minimaler Abstand für eine Rotor-Rotor-Interaktion
v	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit der Blattspitze
v_{red}	$\frac{m}{s}$	reduzierte Geschwindigkeit
v_{rel}	$\frac{m}{s}$	relative Geschwindigkeit
v_σ	$\frac{m}{s}$	Standardabweichung der Windgeschwindigkeit
\bar{v}	$\frac{m}{s}$	Mittelwert der Windgeschwindigkeit
v_{hub}	$\frac{m}{s}$	Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe
b	$\frac{m}{s}$	Faktor
\vec{v}	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeitsvektorfeld
v'	$\frac{m}{s}$	variable Geschwindigkeitskomponente
u_t	$\frac{m}{s}$	Wandschubspannungsgeschwindigkeit
v_{max}	$\frac{m}{s}$	maximale Strömungsgeschwindigkeit
g	$\frac{m}{s^2}$	Gravitationskonstante
A	m^2	Fläche
ν	$\frac{m^2}{s}$	kinematische Viskosität
ϵ	$\frac{m^2}{s^3}$	Dissipationsrate von k
V	m^3	Volumen
V_{opt}	m^3	optimales Zellvolumen
V_{cell}	m^3	Zellvolumen
F_s	N	Schubkraft
\vec{F}_p	N	Kraftvektor einer Oberfläche
M	Nm	Moment
$M_{Schwenk}$	Nm	Schwenkmoment
\vec{M}_A	Nm	Momentenvektor um Punkt A
p	Pa	Druck
τ_w	Pa	viskoser Spannungsanteil
p_0	Pa	Umgebungsdruck
Ω_0	$\frac{rad}{s}$	Endwinkelgeschwindigkeit
Ω	$\frac{rad}{s}$	Winkelgeschwindigkeit
n	RPM	Drehzahl
t	sec	Zeit
t_{sim}	sec	Simulationszeit

INHALTSVERZEICHNIS

Δt	<i>sec</i>	Zeitschrittweite
P	W	Leistung

Abbildungsverzeichnis

1.1	Situationsdarstellung	2
2.1	Winkeldefinition [5](S. 23 f.)	4
2.2	Kräfte und Momente an einem Rotorblatt	5
2.3	Anströmverhältnisse bei 10 und 25 m/s	6
2.4	Kräfte am Rotorblattprofil, angelehnt an [5](S. 48)	7
2.5	MR-WEA Konzepte [HAW intern]	8
3.1	Vergleich der Turbulenzmodelle [2](S.84)	14
3.2	Vernetzung ohne Schichtverfeinerung	15
3.3	Vernetzung mit Schichtverfeinerung	15
3.4	Bewegliches Netz	17
3.5	Dynamisches Netz	18
4.1	Vergleich zwischen beweglichem und dynamischen Netz	24
5.1	Modell des Rotorblatts	26
5.2	c_p und c_t Kurve des DTU 10MW Rotorblatts.	29
5.3	Pitchwinkel am DTU 10MW Rotorblatt	29
5.4	Modellaufbau Validierungsmodell	30
5.5	Modellaufbau Basismodell	31
5.6	Blattelemente	32
5.7	Pitchwinkel	34
5.8	Nahbereich	35
5.9	Netz Schnittbilder	36
5.10	Randbedingungen Validierungsmodell	37
5.11	Beispiel für ein negatives Zellvolumen	39
6.1	Basismodell Netzqualität	43
6.2	Durchschnittlicher Wert von y^+ in den Blattelementen des linken Rotorblattes	44
6.3	Maximaler Wert von y^+ in den Blattelementen des linken Rotorblattes	45
6.4	Residuen des Basismodell im Zeitschritt 500	46
6.5	Endresiduen des Basismodells in den Zeitschritten	47
6.6	Schubkraft aus dem Validierungsmodell bei 10 m/s	48
6.7	Schwenkmoment aus dem Validierungsmodell bei 10 m/s	49

6.8	Geschwindigkeit in y-Richtung bis zur Blattvorderkante	50
6.9	Druckfeld bei $r/R = 0,9$ und 10 m/s	50
6.10	Kräfte am Profil bei $r/R = 0,9$ und 10 m/s	50
7.1	Geschwindigkeitsfeld bei $3, 0$ und -3 Grad	52
7.2	Geschwindigkeitsvektorfeld bei $3, 0$ und -3 Grad	53
7.3	Schwenkmoment aus dem Basismodell	54
7.4	Schwenkmoment-Verteilung im Validierungs- und Basismodell bei 3 Grad	55
7.5	korrigierte Schwenkmoment-Verteilung im Validierungs- und Basismodell bei 3 Grad	56
7.6	Schwenkmomente der einzelnen Blattelemente	57
7.7	prozentuale Abweichung des Schwenkmoments	58
7.8	prozentuale Abweichung des gesamten Schwenkmoments	59
7.9	Schubkraft aus dem Basismodell	60
7.10	Schubkraft-Verteilung im Validierungs- und Basismodell bei 3 Grad	60
7.11	korrigierte Schubkraft-Verteilung im Validierungs- und Basismodell bei 3 Grad	61
7.12	Schubkräfte der einzelnen Blattelemente	62
7.13	prozentuale Abweichung der Schubkraft	63
7.14	prozentuale Abweichung der gesamten Schubkraft	64
7.15	Radialkraft aus dem Basismodell	65
7.16	Radialkraft-Verteilung im Validierungs- und Basismodell bei 3 Grad	66
7.17	korrigierte Radialkraft-Verteilung im Validierungs- und Basismodell bei 3 Grad	66
7.18	Radialkräfte der einzelnen Blattelemente	67
7.19	prozentuale Abweichung der Radialkraft	68
7.20	prozentuale Abweichung der gesamten Radialkraft	69
8.1	prozentuale Abweichung des Schwenkmoments bei verschiedenen Abständen	71
8.2	prozentuale Abweichung des gesamten Schwenkmoments bei höherem Abstand	71
8.3	prozentuale Abweichung der Schubkraft bei verschiedenen Abständen	72
8.4	prozentuale Abweichung der gesamten Schubkraft bei höherem Abstand	73
8.5	prozentuale Abweichung der Radialkraft bei verschiedenen Abständen	73
8.6	prozentuale Abweichung der gesamten Radialkraft bei höherem Abstand	74
8.7	Schwenkmoment aus dem Validierungsmodell bei 25 m/s	75
8.8	Schubkraft aus dem Validierungsmodell bei 25 m/s	75
8.9	Druckfeld bei $r/R = 0,9$ und 25 m/s	76
8.10	Kräfte am Profil bei $r/R = 0,9$ und 25 m/s	76
9.1	Startpositionen MR	79

9.2	Schwenkmomente der einzelnen Blattelemente bei höherem Abstand	84
9.3	Schubkräfte der einzelnen Blattelemente bei höherem Abstand	85
9.4	Radialkräfte der einzelnen Blattelemente bei höherem Abstand	86

Tabellenverzeichnis

5.1	Skalierte Kennwerte der DTU 10 MW	28
5.2	Modellparameter	33

Abkürzungen

Wortlaut	Abkürzung
Actuator Line Method	ALM
Computational Fluid Dynamics	CFD
Courant Zahl	CFL
Prozessor	CPU
Detached Eddy Simulation	DES
Differentialgleichung	DGL
Direct Numerical Simulation	DNS
Danish Technical University	DTU
Einzelrotor	ER
Finite Volumen Methode	FVM
Horizontal Wind Axis Turbine	HAWT
Large Eddy Simulation	LES
Multirotor	MR
National Renewable Energy Laboratory	NREL
Reynolds Averaged Navier Stokes	RANS
Vertical Axis Wind Turbine	VAWT
Windenergieanlage	WEA

Kapitel 1

Einleitung

In dieser Masterarbeit soll die Rotor-Rotor-Interaktion an Multirotor (MR)-Windenergieanlagen (WEA) untersucht werden. MR-WEA besitzen im Gegensatz zu konventionellen WEA mehrere Rotoren an einer Anlage. Dabei sind die einzelnen Rotoren kleiner als bei einer leistungsäquivalenten Einzelrotor (ER)-WEA. In den vergangenen Jahren ist es bei WEA zu einem Anlagenwachstum gekommen. Dies ermöglicht pro Anlage eine größere Nennleistung und steigert damit die Gesamtleistung eines Windparks. Dies führt im Gegenzug zu häufigen Neuentwicklungen von WEA Modellen. Dadurch können die Skalierungseffekte in der Produktion nicht ausgenutzt werden. MR-WEA können eine Möglichkeit sein, dieses Problem zu lösen und damit die Stromgestehungskosten der Windenergie weiter zu senken.

Das aerodynamische Verhalten an MR-WEA ist Stand der Forschung. So wird zum Beispiel in den Artikeln [15], [4] und [8] die Strömung stromabwärts der MR-WEA untersucht. Dabei wird festgestellt, dass es zu einer Leistungssteigerung der Anlage bis zu 2% bis 5% kommen kann. Außerdem wird ermittelt, dass es bei MR-WEA zu einer schnelleren Erholung des Geschwindigkeitsdefizits kommen kann. In dem Artikel [16] wird bereits eine Simulation der Rotor-Rotor-Interaktion durchgeführt, um die Lastveränderung an den Rotorblättern zu bestimmen. Dafür wird die „Actuator Line Method“ (ALM) genutzt. Diese vereinfacht die Rotorblätter zu Linien, die mit Kräften auf das Fluid wirken. Um eine genauere Berechnung der Lasten bei einer Rotor-Rotor-Interaktion zu erreichen, ist es notwendig, die Rotorblätter mit ihrer wahren Geometrie zu modellieren. Das erfolgt in dieser Arbeit. Dabei werden die Laständerungen bei einer Rotor-Rotor-Interaktion bestimmt. In der nachfolgenden Abbildung wird die grundlegende Situation dargestellt.

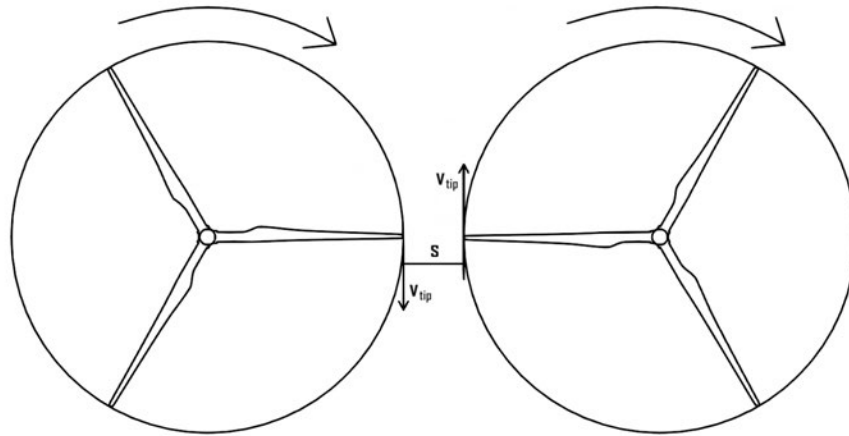


Abbildung 1.1: *Situationsdarstellung*

Beide Rotorblätter können im Betrieb an der Stelle des kürzesten Abstands s zusammentreffen. Dabei bewegen sich die Blattspitzen mit einer relativen Geschwindigkeit von $2 \cdot v_{tip}$ aneinander vorbei. Hierbei kann es zu einer Interaktion der Strömung, die vom Blatt erzeugt wird, kommen. Dies verändert die Lasten an den Rotorblättern. Bei Rotoren mit gleicher Drehzahl und der gleichen Anfangsposition wie in Abbildung 1.1 treten diese Lasten bei jeder Umdrehung auf. Bei Rotoren mit ungleicher Drehzahl oder Anfangsposition tritt die Last nicht bei jeder Umdrehung auf, sie wird zufälliger auftreten. Regelmäßig auftretende Lasten können die Lebensdauer der Rotorblätter verkürzen.

Die Interaktion der Rotorblätter wird hier mit der Methode der Computational Fluid Dynamics (CFD) berechnet. In einem CFD-Löser wird der zu berechnende Bereich mit Hilfe kleiner, finiter Volumen diskretisiert. Dieser Bereich wird im Weiteren als Domain bezeichnet. In der Domain können die verschiedenen Feldgrößen der Strömung, wie zum Beispiel Geschwindigkeit und Druck, berechnet werden. Die zugrunde liegenden Gleichungen sind dabei die Navier-Stokes-Gleichungen. In dieser Arbeit wird das kommerzielle Programm ANSYS Fluent genutzt.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, das Verständnis für das Verhalten der Strömung bei einer Rotor-Rotor-Interaktion zu vertiefen. Dabei wird ein generelles Verständnis für die Unterschiede zur Strömung an einer ER-WEA entwickelt. Des Weiteren wird untersucht, ob sich die Lasten an den Rotorblättern verändern. Auch wird der Einfluss verschiedener Parameter wie Windgeschwindigkeit und der Abstand der Blattspitzen untersucht.

Kapitel 2

Einführung in Windenergieanlagen

Zuerst wird eine Einführung in WEA und MR-WEA gegeben.

2.1 Grundlegende Größen

Um den Aufbau des Modells besser zu verstehen, wird eine Einführung in die grundlegende Aerodynamik einer WEA gegeben. Zwei zentrale Größen sind die Schubkraft und die Leistung. Die Formel für die Schubkraft eines Rotors lautet [5](S. 31):

$$F_s = \frac{1}{2} \cdot c_t \cdot A \cdot \rho \cdot v_{wind}^2 \quad (2.1)$$

Dabei ist v_{wind} die Windgeschwindigkeit weit von der Anlage entfernt. ρ ist die Luftdichte, A ist die Kreisfläche, die der Rotor abdeckt und c_t der Schubbeiwert. Dieser ist ein anlagenspezifischer Wert. Die Formel für die Leistung lautet [5](S. 32):

$$P = \frac{1}{2} \cdot c_p \cdot A \cdot \rho \cdot v_{wind}^3 \quad (2.2)$$

Hier ist c_p der Leistungsbeiwert, der wie c_t von der Anlage abhängig ist.

Wie bereits erwähnt, ist v_{wind} die Windgeschwindigkeit weit von der Anlage entfernt. Direkt vor der Anlage stellt sich eine reduzierte Strömungsgeschwindigkeit v_{red} ein. Sie beträgt dort:

$$v_{red} = v_{wind} \cdot (1 - a) \quad (2.3)$$

Dabei ist a der axiale Induktionsfaktor. Beträgt dieser $\frac{1}{3}$, existiert nach dem Betzschen Gesetz der höchste Wert von c_p [5](S. 32). Die Geschwindigkeit direkt vor der Anlage ist somit kleiner als die generelle Windgeschwindigkeit. Das Profil wird durch seine Drehung zusätzlich mit der Geschwindigkeit $\Omega \cdot r$ angeströmt. Dabei ist r die radiale Position auf dem Blatt. Für die Blattspitze ist zum Beispiel $r = R$. Die Anströmung durch die Blattrotation ist um einen tangentialen Induktionsfaktor mit der Bezeichnung a' erhöht. Da $a' \ll a$ ist, wird in dieser Arbeit a' mit Null angenommen.

Es ist davon auszugehen, dass der anströmende Wind turbulent ist. Laminare Strömung ist nicht zu erwarten. In einer turbulenten Strömung existieren Wirbel, die zu einer Fluktuation der Ge-

schwindigkeit führen. Um diese Turbulenz zu charakterisieren, existiert die Turbulenzintensität. Diese wird mit der folgenden Formel definiert:

$$I_t = \frac{v_\sigma}{\bar{v}} \quad (2.4)$$

Dabei ist \bar{v} die mittlere Windgeschwindigkeit und v_σ die Standardabweichung der Geschwindigkeit. Um eine Turbulenzintensität für eine Windgeschwindigkeit zu erhalten, kann das Normalturbulenzmodell der IEC genutzt werden [1] (S. 31).

$$v_\sigma = I_{ref} \cdot (0,75 \cdot v_{hub} + b); b = 5,6 \text{ m/s} \quad (2.5)$$

Dabei ist I_{ref} ein Referenzwert, der abhängig von der Windturbinenklasse nach IEC ist. v_{hub} ist die Windgeschwindigkeit auf Höhe der Rotornabe.

2.2 Begriffsdefinition

In diesem Abschnitt werden verschiedene Winkel, Kräfte und Momente definiert, die im Weiteren Verlauf dieser Arbeit relevant sind. Zuerst werden verschiedene Winkel, die für die Anströmung relevant sind, dargestellt. Dieses Profil wird durch einen Schnitt durch das Rotorblatt erzeugt.

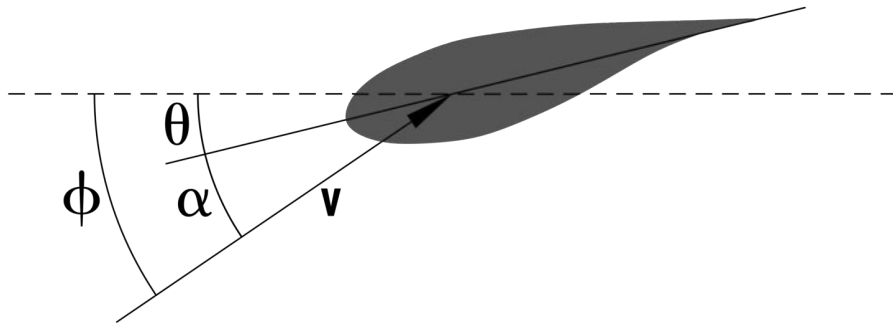


Abbildung 2.1: Winkeldefinition [5](S. 23 f.)

Die durchgezogene Linie durch das Profil ist die Profilhene. Die gestrichelte Linie markiert die Rotorebene. ϕ ist der Anströmwinkel. Aus diesem strömt die Geschwindigkeit v an das Profil. Der Winkel α wird als Anstellwinkel bezeichnet. Der verbleibende Winkel θ ist die Profilverwindung. Mit der folgenden Gleichung kann der Anströmwinkel berechnet werden.

$$\phi = \arctan\left(\frac{v_{wind} \cdot (1 - a)}{\Omega \cdot r \cdot (1 + a')}\right) \quad (2.6)$$

r ist die radiale Position auf dem Blatt. Umso weiter außen die Position auf dem Rotorblatt ist, desto schneller wird das Blatt durch seine eigene Drehung angeströmt. Der Anströmwinkel ist abhängig von der Windgeschwindigkeit. Um das WEA-Rotorblatt in der gewünschten Anströmposition zu halten, wird es bei Veränderung der Windgeschwindigkeit gedreht. Dies wird Pitch genannt.

In den folgenden Abbildungen sind die Kräfte und Momente am Rotorblatt mit ihren Bezeichnungen dargestellt.

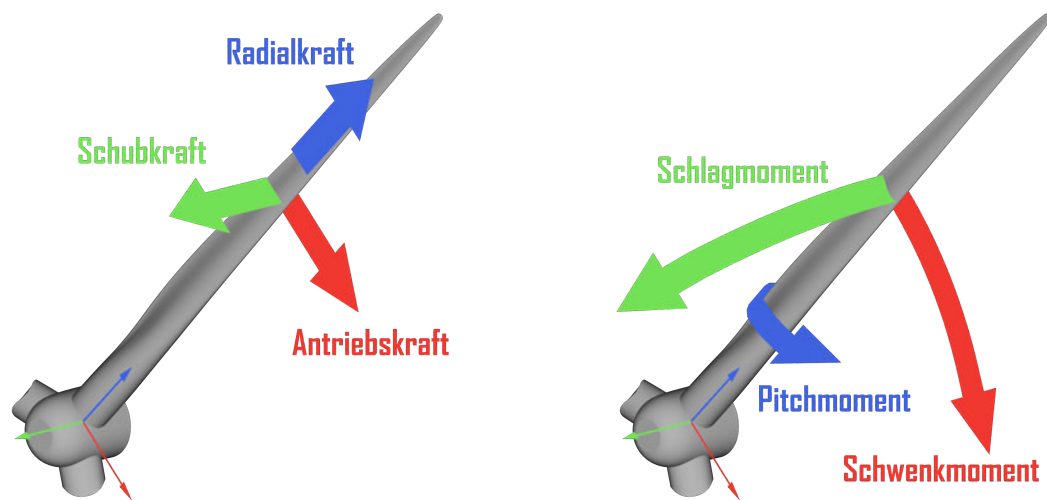


Abbildung 2.2: Kräfte und Momente an einem Rotorblatt

Links sind die Kräfte dargestellt. Die Schubkraft zeigt dem Wind entgegen. Die hier dargestellte Schubkraft ist die eines Blattes. Die gesamte Schubkraft des Rotors aus Gleichung 2.1 setzt sich durch Summieren der einzelnen Schubkräfte der Blätter zusammen. Die Radialkraft zeigt entlang der Blattachse. In Rot ist die Antriebskraft dargestellt. Multipliziert man die Antriebskraft mit ihrem Hebelarm zur Rotorachse, entsteht das Schwenkmoment. Dieses ist in der rechten Abbildung zu sehen. Multipliziert man das Schwenkmoment mit der Anzahl der Rotorblätter erhält man das Antriebsmoment. Multipliziert man das Antriebsmoment mit der Drehgeschwindigkeit Ω ergibt sich die Leistung P . In Grün ist das Schlagmoment eingezeichnet. Dieses wird von der Lagerung des Rotors aufgenommen. Das Pitchmoment in Blau muss aufgebracht werden, wenn das Rotorblatt gedreht werden soll. Damit sind die grundlegenden Begriffe für diese Arbeit definiert. Die Auswertung in dieser Arbeit wird sich vor allem auf Schubkraft, Schwenkmoment und Radialkraft konzentrieren.

2.3 Blatt-Element-Methode

In diesem Abschnitt wird die Idee der Blatt-Element-Methode (BEM) erläutert. In der BEM wird das Rotorblatt in radiale Schnitte unterteilt [5] (S.45 ff.). Dies sind die sogenannten Blattelemente. Ihre Ausdehnung beträgt dr . An diesen Elementen werden die verschiedenen Kräfte und Momente ermittelt. Damit erhält man eine Verteilung der Kräfte und Momente über die radiale Position des Blattes. Integriert man zum Beispiel über die Schubkräfte der einzelnen Blattelemente und multipliziert mit der Anzahl der Blätter n , erhält man die gesamte Schubkraft des Blattes.

$$F_s = n \cdot \int df_s dr \quad (2.7)$$

Da in dieser Arbeit mit numerischen Methoden gearbeitet wird, sind diskrete und keine kontinuierlichen Werte vorhanden. Dadurch geht das Integral in eine Summe über.

$$F_s \approx n \cdot \sum \Delta f_s \cdot \Delta r \quad (2.8)$$

In Abschnitt 2.2 wird der Anströmwinkel vorgestellt. Dieser definiert die Anströmrichtung, welche in den folgenden Abbildungen beispielhaft für ein Blattelement dargestellt wird.

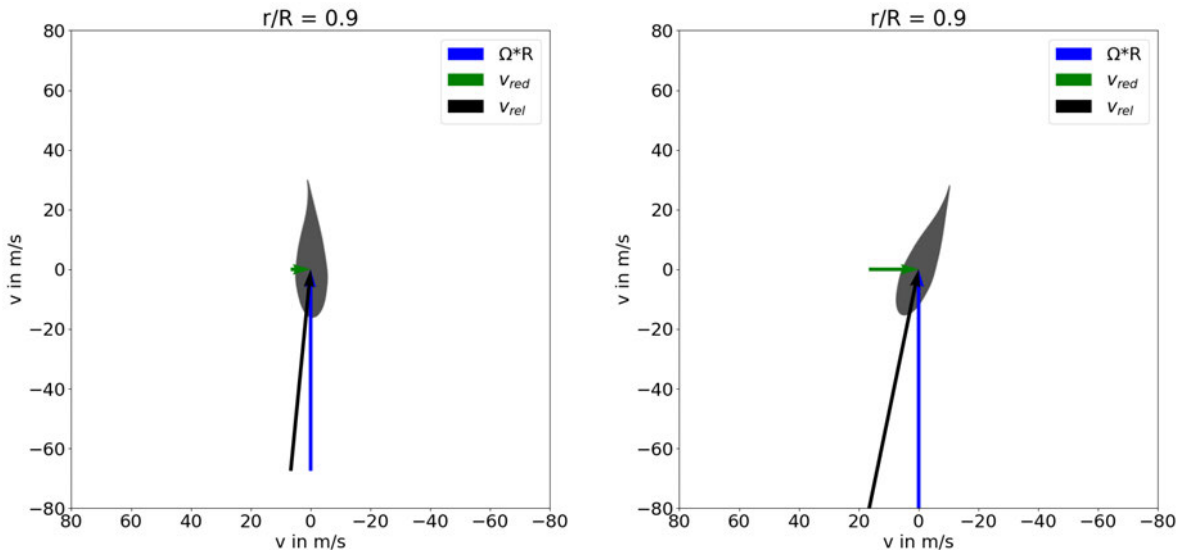


Abbildung 2.3: Anströmverhältnisse bei 10 und 25 m/s

Die Position dieses Blattelements liegt bei $r/R = 0,9$. Links ist die Anströmung bei 10 m/s und rechts bei 25 m/s dargestellt. v_{rel} beschreibt die relative Geschwindigkeit mit der das Blatt angeströmt wird. Die Richtung wird durch den Anströmwinkel aus Gleichung 2.6 definiert. v_{red}

ist die reduzierte Windgeschwindigkeit aus Gleichung 2.3. Da a' mit Null angenommen wird, wird $\Omega \cdot R$ nicht um eine Geschwindigkeit induziert. In der rechten Abbildung ist das Blatt um einen Winkel gepitcht. Der Pitchwinkel φ wird in dieser Arbeit als positiv im Uhrzeigersinn beim Blick von der Blattspitze zur Blattwurzel definiert.

Die Kräfte an einem Blattelement sind in der folgenden Abbildung beispielhaft sichtbar. Der Pitchwinkel ist 0 Grad.

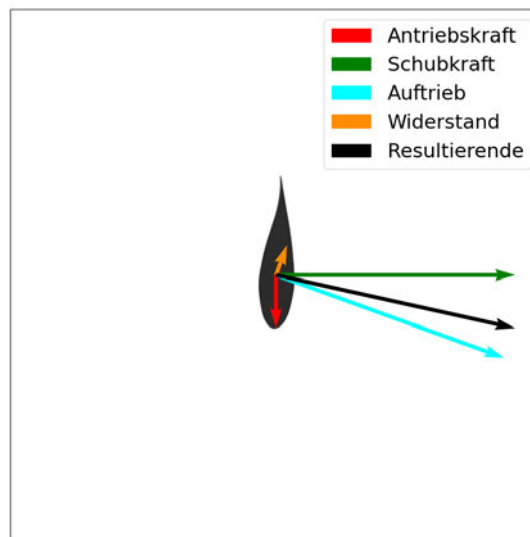


Abbildung 2.4: Kräfte am Rotorblattprofil, angelehnt an [5](S. 48)

Hierbei ist in Rot die Antriebskraft eingezeichnet. In Grün ist die Schubkraft eingezeichnet. Der hier eingezeichnete Vektor beschreibt die Kraft, die vom Fluid auf das Blatt wirkt. Wenn das Blatt nicht beschleunigt wird, müssen alle Kräfte im Gleichgewicht sein. Dann existiert zu dem Schubkraftvektor eine gleich große Gegenkraft vom Profil auf das Fluid. In Türkis ist die Auftriebskraft und in Orange die Widerstandskraft dargestellt. Die Widerstandskraft verläuft parallel zur Anströmrichtung. Die Auftriebskraft steht senkrecht auf dieser. Der schwarze Vektor ist der resultierende Kraftvektor aus den jeweiligen Kräftepaaren. Damit sind die Grundlagen für diese Arbeit gelegt.

2.4 Einführung in Multirotor-Windenergieanlagen

In diesem Abschnitt werden MR-WEA detaillierter beschrieben. In der folgenden Abbildung sind verschiedenen Konzepte zu sehen, wie die Rotoren einer MR-WEA angeordnet sein könnten.

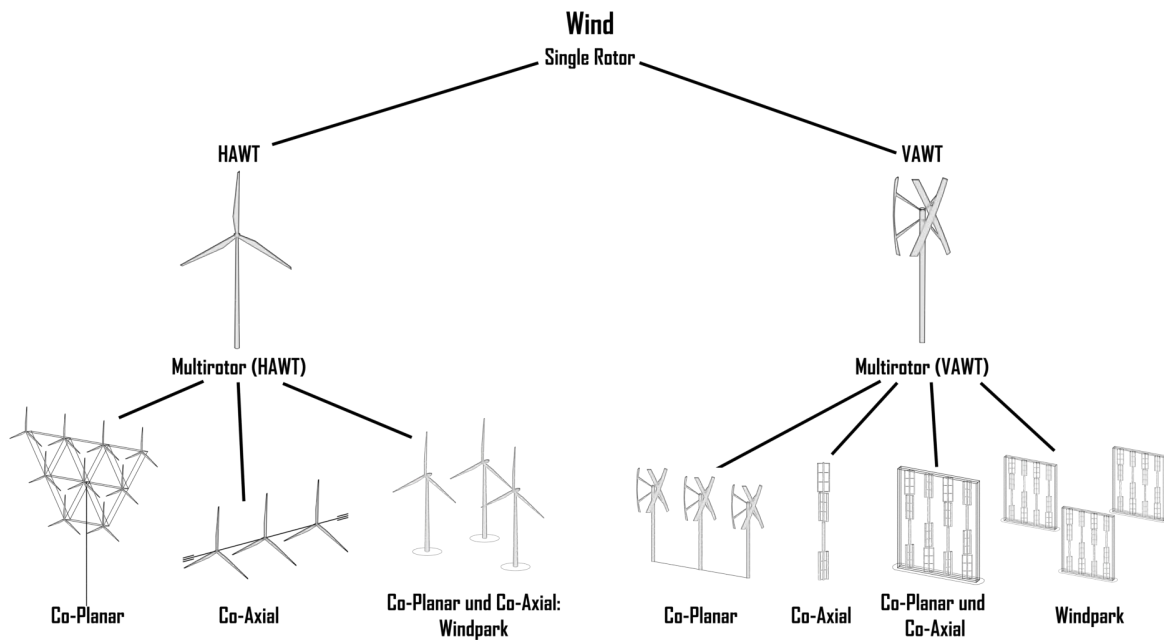


Abbildung 2.5: MR-WEA Konzepte [HAW intern]

WEA können generell in zwei Kategorien eingeteilt werden. Es gibt eine „Horizontal Axis Wind Turbine“ (HAWT) und eine „Vertical Axis Wind Turbine“ (VAWT). Das Unterscheidungsmerkmal ist hier die Orientierung der Rotationsachse. Die klassische WEA, die sich bisher durchgesetzt hat, ist die HAWT-Einzelrotor-Anlage. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, ist es seit dem Beginn der Stromerzeugung aus Windenergieanlagen zu einem Anlagenwachstum gekommen. Dies kann aber zu mehreren Problemen führen. Zum einen müssen von den Anlagenherstellern regelmäßig neue, größere Anlagen entwickelt werden, um den momentanen Marktbedarf zu bedienen. Der Nachteil liegt hier darin, dass nicht über lange Zeiträume die gleichen Komponenten produziert werden können, was die Kosten durch Skalierungseffekte in der Produktion senken würde. Zum anderen werden irgendwann die technisch möglichen Grenzen von großen Anlagen erreicht werden. Hier greift noch ein weiteres Problem. Skaliert man eine WEA hoch, macht sie also größer, steigt die produzierte Leistung mit der Fläche, die von dem Rotor abgedeckt wird. Das bedeutet, die Leistung steigt in zweiter Potenz. Das benötigte Material für die WEA ist aber abhängig vom Volumen,

steigt also in dritter Potenz. Die Kosten für den Bau werden damit schneller steigen als der Ertrag. Dies wird allgemein auch als „Square-Cube-Law“ bezeichnet [14]. Somit wird irgendwann ein Punkt erreicht sein, an dem eine noch leistungsstärkere Anlage nicht mehr wirtschaftlich wäre.

MR-WEA könnten zur Lösung dieser Probleme beitragen. Da die Rotoren und auch andere Komponenten in wesentlich größeren Stückzahlen produziert werden könnten, würde dies die Einzelstückkosten senken. Außerdem würde bei MR-WEA kein simples Skalieren der Anlagen erfolgen. Dies könnte die Effekte des „Square-Cube-Law“ aushebeln. Hierfür ist es vorteilhaft, die Rotoren so eng wie möglich zu platzieren, um das zu verbauende Materialvolumen zu minimieren. Dabei kommen sich die Blattspitzen aber sehr nahe und eine aerodynamische Interaktion kann stattfinden. Mit zunehmender Anzahl der Rotoren steigt auch die Anzahl der Interaktionen. Die in dieser Arbeit zu untersuchenden Effekte treten bei der in Abbildung 2.5 dargestellten koplanaren HAWT-Anlage auf.

Kapitel 3

Einführung in Computational Fluid Dynamics

Nachdem die Aerodynamik an einem WEA-Rotorblatt erläutert ist, werden die Grundlagen der CFD beschrieben. Auch werden in diesem Kapitel Grundlagen des Simulationsprogramms ANSYS Fluent erläutert. CFD-Simulationen können auch mit anderen Programmen durchgeführt werden. Ein Beispiel ist das Open-Source-Programm OpenFoam.

3.1 Grundlegendes Lösungsverfahren

Die Grundidee der Gleichungen, die in der CFD genutzt werden, ist, den Raum in infinitesimal kleine Volumen aufzuteilen [2](S. 12 f.). Diese besitzen die Ausdehnung $dx \cdot dy \cdot dz$. An diesem Volumen können dann verschiedene Bilanzen aufgestellt werden. Aus der Betrachtung der Massenströme an diesem Volumen kann die Kontinuitätsgleichung hergeleitet werden. Diese lautet wie folgt:

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \rho \vec{v} = 0 \quad (3.1)$$

Dabei ist ρ die Dichte des Fluids und \vec{v} das Geschwindigkeitsvektorfeld. ∇ ist der Nabla-Operator, der im Skalarprodukt mit dem Geschwindigkeitsvektor die Divergenz des Vektorfelds ergibt. Nimmt man an, dass ρ konstant ist, das Fluid also inkompressibel ist, vereinfacht sich die Gleichung folgendermaßen:

$$\nabla \vec{v} = 0 \quad (3.2)$$

An diesem infinitesimal kleinen Volumen muss zusätzlich auch die Impulserhaltung gelten. Daraus ergibt sich die folgende Gleichung [2] (S. 15) für den inkompressiblen Fall:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{v} + \vec{g} \quad (3.3)$$

Hier ist ν die kinematische Viskosität. p ist der Druck und \vec{g} die Gravitation. Diese Gleichung ist streng genommen die Navier-Stokes-Gleichung. Im weiteren Sinne wird auch die Kontinuitätsgleichung zu den Navier-Stokes-Gleichungen gezählt.

Bei den Navier-Stokes-Gleichungen handelt es sich um nichtlineare, gekoppelte und partielle Differentialgleichungen (DGL). Für diese ist für die meisten Fälle keine analytische Lösung vorhanden. Sie können daher nur näherungsweise gelöst werden. Dafür hat sich die Finite-Volumen-Methode (FVM) bewährt [2](S.25). Bei dieser Methode wird das Berechnungsgebiet in kleine Zellen diskretisiert. Diese sind zwar immer noch klein im Verhältnis zur gesamten Domain, aber nicht mehr infinitesimal klein. Sie besitzen also reale Abmessungen. Eine wichtige Eigenschaft der FVM ist, dass sie konservativ ist, also lokale Erhaltungsgrößen erhält. Diese Methode ermöglicht es, aus allen Zellen ein Gleichungssystem zu erstellen, das dann gelöst werden kann.

Um ein lösbares Gleichungssystem zu erhalten, müssen an der Domain Randbedingungen definiert werden. Die Randbedingungen teilen sich dabei ein in Einlass, Auslass und Wandrandbedingungen. Übliche Einlassbedingungen sind Geschwindigkeits- oder Druckeinlässe [2](S. 19). Dabei wird an der definierten Oberfläche eine Geschwindigkeit oder ein Druck vorgegeben. Die Geschwindigkeitsrichtung ist dabei üblicherweise normal zu der Flächennormalen. Als Ausfluss kann ein rückwirkungsfreier Ausfluss oder ein Druckausfluss definiert werden. An einer Wandrandbedingung kann eine „no-slip“-Bedingung festgelegt werden. Dies entspricht einer reibungsbehafteten Wand. Wird an der Wand eine „slip“-Bedingung definiert, ist diese Wand glatt und nicht reibungsbehaftet. Das bedeutet, dass keine tangentialen Scherkräfte auf das Fluid wirken. Es handelt sich hierbei aber immer noch um eine Wand, die in Normalenrichtung undurchlässig ist. Alternativ kann eine Wand auch mit einer Symmetriebedingung belegt werden. Dies kann nützlich sein, um die zu berechnende Domain bei symmetrischen Strömungen zu verkleinern.

Mit diesen Randbedingungen kann das bereits erwähnte Gleichungssystem gelöst werden. Dies erfolgt iterativ. Dafür müssen zuerst Startwerte für alle Zellen in der Domain initialisiert werden. Bei einem iterativen Lösungsverfahren ist es notwendig, dass die Lösung konvergiert. Das heißt, dass sich mit zunehmender Anzahl der Iterationen die momentane Lösung an die wahre Lösung des Gleichungssystems annähert. Um dies zu überprüfen, wird das Residuum genutzt. Das Residuum beschreibt, wie sehr die Lösung der momentanen Iteration von der Erfüllung des Gleichungssystems abweicht. Im ersten Iterationsschritt ist das Residuum für gewöhnlich groß, da die initialisierte Lösung im ersten Schritt das Gleichungssystem noch schlecht erfüllt. Mit zunehmender Iteration sollten die Residuen kleiner werden. Ist das Residuum Null ist die exakte Lösung des Gleichungssystems gefunden worden. Dies wird allein aufgrund des Rundungsfehlers nicht auftreten. Daher müssen die Residuen nur eine ausreichende Verkleinerung des Anfangswerts erreichen. In ANSYS Fluent wird zusätzlich eine Skalierung der Residuen durch die Fließrate durchgeführt [13](Abschnitt 26.13.1). Um eine valide Lösung zu erhalten, ist es erforderlich, dass die Residuen ausreichend sinken. Dies soll in Abschnitt 6.2 für das in dieser Arbeit aufgebaute Modell überprüft werden.

Zuletzt soll hier erwähnt werden, dass in ANSYS Fluent verschiedene Diskretisierungsschemata zur Verfügung stehen. Diese geben vor, wie die Variablenwerte von einer zur nächsten Zelle fortgesetzt werden. Die genauen theoretischen Details sind zu umfangreich, um sie in dieser Arbeit zu erklären. Hier sollen die Vor- und Nachteile der verschiedenen Schemata erläutert werden, wie sie in dem Buch „Computational Fluid Dynamics for Engineers“ [2] (S. 47) beschrieben werden. Eine wichtige Eigenschaft dieser Schemata ist, ob sie begrenzt sind oder nicht. Begrenzt bedeutet in diesem Fall, dass die berechnete Variable weder kleiner noch größer ist als die Variablen, die zu ihrer Berechnung genutzt wurden [2] (S. 40). Schemata, die nicht begrenzt sind, können numerisch instabil werden. Das zentrale Differenzen-Schema funktioniert bei diffusionsdominierten Strömungen. Es ist nur unter bestimmten Bedingungen begrenzt. Das Aufwind-Schema erster Ordnung ist begrenzt aber auch von geringer Genauigkeit. Das Aufwind-Schema zweiter Ordnung ist nicht mehr begrenzt aber dafür genauer. Das QUICK-Verfahren besitzt eine bessere Genauigkeit für verwirbelte Strömungen, kann aber nur auf Hexaeder-Netzen genutzt werden. Das MUSCL-Verfahren ist genau und für verwirbelte Strömungen und auf allen Netzen anwendbar. In den „Best-practice-Guidelines“ des Buches [2] (S. 176) wird empfohlen, zuerst mit dem Aufwind-Schema erster Ordnung zu starten und in der finalen Rechnung auf Schemata höherer Ordnung zu wechseln.

3.2 Turbulenzmodelle

Hier sollen verschiedene Turbulenzmodelle vorgestellt werden, die in Bezug auf diese Arbeit relevant sein könnten. Für die meisten Berechnungen sind nicht ausreichend Berechnungsressourcen vorhanden, um die im Abschnitt 3.1 beschriebenen Gleichungen direkt ausreichend genau zu lösen. In den Fällen, in denen dies möglich ist, spricht man von „direct numerical simulation“ (DNS). Die zu untersuchende Rotor-Rotor-Interaktion ist zu komplex, um sie mit einer DNS-Berechnung durchzuführen. Um trotz fehlender Ressourcen eine Näherungslösung des Problems zu erhalten, stehen in CFD-Simulationsprogrammen wie ANSYS Fluent Turbulenzmodelle zur Verfügung.

Hier sollen zwei Modelle aus der Kategorie der „reynolds average navier stokes“ (RANS) Modelle vorgestellt werden. Zusätzlich wird hier das „large eddy simulation“ (LES) Modell und die Kombination dieser Modelle in Form der „detached eddy simulation“ (DES) vorgestellt. Die Grundidee der RANS-Turbulenzmodelle ist die Reynolds-Zerlegung [2] (S.81f.). Das bedeutet, die Variablen in eine mittlere und eine variable Komponente zu zerlegen. Als Beispiel für die Geschwindigkeit in x-Richtung würde das bedeuten:

$$v = \bar{v} + v' \quad (3.4)$$

Diese Grundidee liegt verschiedenen RANS-Modellen zugrunde.

$k - \epsilon - \text{Modell}$

Zuerst soll hier auf das $k - \epsilon - \text{Modell}$ [2](S.88 ff.) eingegangen werden. Dieses gehört zu den Modellen aus zwei Gleichungen. Hierbei werden als zusätzliche Größen die turbulente kinetische Energie k und die Dissipationsrate der turbulenten kinetischen Energie ϵ eingeführt. Die Vorteile des Modells sind die Robustheit und einfache Interpretierbarkeit. Ein Nachteil liegt in der geringen Genauigkeit des Modells. Stromlinienkrümmung und Wirbel in Strömungen sind Schwachstellen des Modells.

$k - \omega - \text{Modell}$

Auch das $k - \omega - \text{Modell}$ gehört zu den Modellen mit zwei Modellierungsgleichungen [2] (S.95 f.). Im Gegensatz zum $k - \epsilon - \text{Modell}$ wird hier durch ω die spezifische Dissipationsrate modelliert. Die Definition lautet:

$$\omega \propto \frac{\epsilon}{k} \quad (3.5)$$

Das $k - \omega - \text{Modell}$ erzeugt bessere Ergebnisse als das $k - \epsilon - \text{Modell}$ bei geringer Turbulenz und in Wandnähe.

LES

Die Grundidee der LES ist es, aus der verwirbelten Strömung kleine Wirbel herauszufiltern [2] (S.79 f.). In einer turbulenten Strömung zerfallen große Wirbel in immer kleinere Wirbel, bis diese bei den kleinsten Längenskalen Bewegungsenergie in Wärme umwandeln. Diesen Prozess vollständig zu simulieren, würde die bereits erwähnte DNS-Methode erfordern. Durch besagte Filterung der Gleichungen verbleiben nur die großen Wirbel der Strömung, während die Effekte der kleineren Wirbel mit Ersatzmodellen beschrieben werden müssen. Der Vorteil der LES-Methode gegenüber den bisher beschriebenen RANS-Modellen liegt in der höheren Genauigkeit, die aber auch mit einem höheren Berechnungsaufwand einhergeht.

DES

Bei einer Strömungsmodellierung mit der DES-Methode werden die Ansätze des LES Modells mit denen der RANS-Modelle vereint [11] (Abschnitt 4.10). Die RANS-Modelle werden in der turbulenten Grenzschicht genutzt, also in Wandnähe. Nachdem sich die Strömung von der Wand abgelöst hat, wird das LES-Modell angewendet. Das Modell ist für den Einsatz bei hohen Reynoldszahlen mit Ablösungen an Wänden entwickelt worden. Es ist aber ähnlich wie das LES-Modell rechenintensiver als die einfacheren RANS-Modelle.

In der folgenden Darstellung sollen die Grundideen der DNS-, RANS- und LES-Modelle verdeutlicht werden.

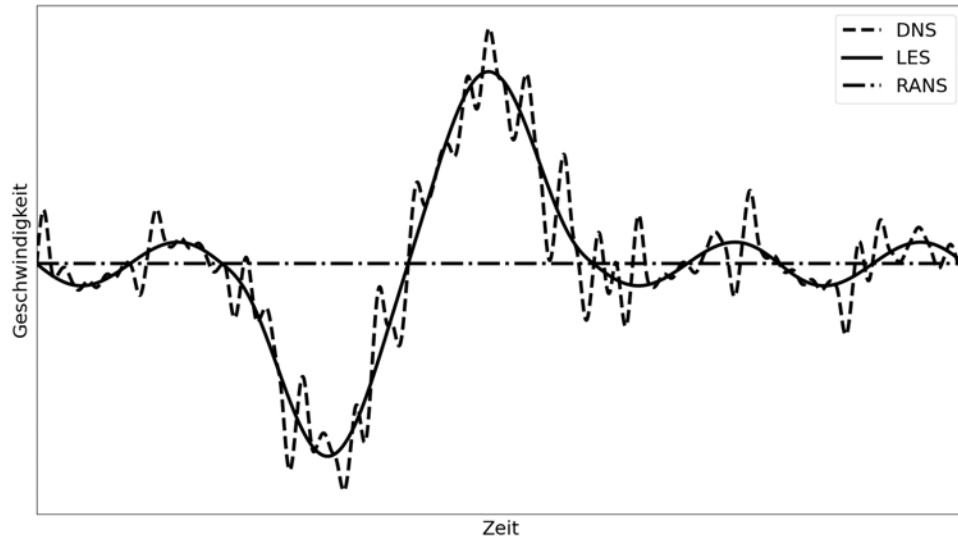


Abbildung 3.1: Vergleich der Turbulenzmodelle [2](S.84)

Hier ist beispielsweise die Größe „Geschwindigkeit“ über der Zeit aufgetragen. Die DNS bildet jede Schwankung genau ab. Die LES bildet nur die großen Schwankungen der Geschwindigkeit ab, während das RANS-Modell nur noch das zeitliche Mittel der Wirbel in diesem Bereich abbilden kann.

3.3 Grundlagen der Vernetzung

In Abschnitt 3.1 wird erklärt, dass die Navier-Stokes-Gleichungen mit der FVM diskretisiert werden. Dafür wird das Berechnungsgebiet in Finite Volumen unterteilt, was Vernetzung genannt wird. Als Basiselemente dienen dabei Drei- und Vierecke im zweidimensionalen Raum und Hexa- und Tetraeder im dreidimensionalen Raum. Dabei unterscheidet man zwischen strukturierten und unstrukturierten Netzen [2](S.58 ff.). Dreiecke und Tetraeder zählen zu den unstrukturierten und Vierecke und Hexaeder zu den strukturierten Netzen. Ein Nachteil von unstrukturierten Netzen ist, dass sie eine numerische Diffusion erzeugen, die in der Realität nicht auftritt. Insgesamt ist ein strukturiertes Netz wünschenswert, aber bei komplexen Geometrien nicht unbedingt umsetzbar.

Da in dieser Arbeit ein Rotorblatt mit einer komplex gekrümmten Oberfläche vernetzt wird, ist davon auszugehen, dass ein strukturiertes Netz nicht umsetzbar sein wird. Bei der Vernetzung der Domain ist es in Programmen wie zum Beispiel ANSYS Fluent möglich, für unterschiedliche Bereiche unterschiedliche Elementgrößen vorzugeben. Dies ermöglicht ein Abwägen zwischen der lokalen Genauigkeit der Berechnung und der erforderlichen Berechnungszeit.

Ein Beispiel dafür ist die Vernetzung in der Nähe einer reibungsbehafteten Wand. Direkt an der Wand ist die Geschwindigkeit Null, wie bereits im Abschnitt 3.1 erwähnt. Mit zunehmendem Abstand zur Wand nimmt die Strömungsgeschwindigkeit zu und nähert sich v_∞ an. Ist die Vernetzung in der Nähe der Wand zu grob, wird dies nicht korrekt abgebildet. Diese Tatsache ist in Abbildung 3.2 zu sehen. Eine Möglichkeit ist, die Elemente in Richtung der Wand zu verfeinern, was in Abbildung 3.3 zu sehen ist.

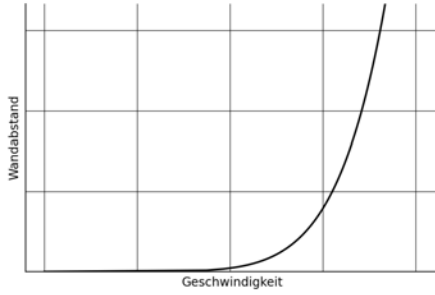


Abbildung 3.2: *Vernetzung ohne Schichtverfeinerung*

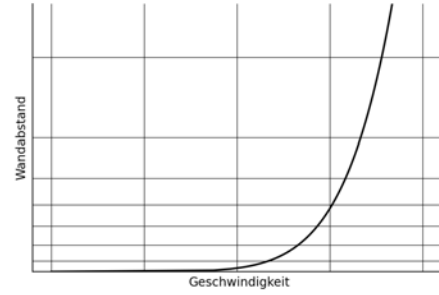


Abbildung 3.3: *Vernetzung mit Schichtverfeinerung*

Um zu überprüfen, ob die Verfeinerung fein genug ist, kann die dimensionslose Wandkonstante y^+ bestimmt werden. Das Ziel ist, dass das erste Element innerhalb der viskosen Unterschicht ist, was $y^+ = 1$ entspricht. Die Formel zur Berechnung von y^+ lautet [2](S. 102 f.):

$$y^+ = \frac{y \cdot u_\tau}{\nu} \quad (3.6)$$

Dabei ist y der Abstand der Zelle zur Wand. ν ist die Viskosität des Fluids und u_τ ist die Wandschubspannungsgeschwindigkeit. Diese kann nach der folgenden Formel bestimmt werden:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (3.7)$$

Hierbei ist ρ die Dichte und τ_w der viskose Spannungsanteil. Dieser kann wie folgt bestimmt werden:

$$\tau_w = \frac{v \cdot \nu \cdot \rho}{y} \quad (3.8)$$

Dabei ist v die Strömungsgeschwindigkeit entlang der Wand. Damit ist y^+ vollständig definiert und kann später zur Kontrolle der Netzfeinheit an der Wand genutzt werden.

Nach dem Vernetzen wird in dieser Arbeit eine Qualitätskontrolle des Netzes durchgeführt. Ein Netz mit geringer Qualität kann zu numerischen Problemen führen. Verschiedene Kontrollgrößen existieren, um die Qualität des Netzes zu bewerten. In dieser Arbeit soll die sogenannte Skewness einer Zelle als Kontrollgröße genutzt werden. Laut der ANSYS Fluent-Dokumentation [13] (Abschnitt 31.4) wird die Volumen-Skewness wie folgt definiert:

$$Skewness = \frac{V_{opt} - V_{cell}}{V_{opt}} \quad (3.9)$$

Dabei ist V_{opt} das Volumen einer gleichseitigen Zelle. V_{cell} ist das Zellvolumen der jeweiligen Zelle. Ist die Skewness Null ist die Zelle gleichseitig. Bei einer Zelle mit einem Wert von Eins spricht man von einer degenerierten Zelle. In der Dokumentation [13] (Abschnitt 6.2.2) wird empfohlen, eine maximale Skewness von 0,95 und einen Durchschnitt von 0,33 zu erreichen.

3.4 Lastberechnung in ANSYS Fluent

In ANSYS Fluent können verschiedene zusätzliche Größen während der Rechnung ermittelt werden. Im Zuge dieser Arbeit sind vor allem die am Rotorblatt wirkenden Kräfte und Momente interessant. Wie diese Werte in ANSYS Fluent ermittelt werden, wird hier erläutert. Die Kräfte, die durch ein Fluid auf eine Fläche wirken, werden mit der folgenden Formel berechnet [11](Abschnitt 20.2.1):

$$\vec{F}_p = \sum_{i=1}^n p \cdot A \cdot \vec{n} \quad (3.10)$$

An einer Fläche können mehrere Zellen anliegen. Diese Zellen haben wiederum Randflächen an der übergeordneten Fläche. Über diese Zellen wird in der Gleichung 3.10 summiert. Dabei ist \vec{n} der Normalenvektor der Randfläche der jeweiligen Zelle. Es gilt $|\vec{n}| = 1$. Per Definition zeigt der Normalenvektor immer aus der Domain heraus [12](Abschnitt 3.2.4). Das bedeutet, dass ANSYS Fluent die Kräfte berechnet, die von dem Fluid auf die Fläche wirken. p ist der Druck in der anliegenden Zelle. A ist der Flächeninhalt der Randfläche der Zelle. Aus diesen Größen wird der Kraftvektor der individuellen Zellen berechnet. Durch die Summation über alle Zellen an der übergeordneten Fläche ergibt sich der gesamte Kraftvektor \vec{F}_p . Dieser gibt die Kräfte im globalen

Koordinatensystem an dieser Fläche an.

Um das Moment bezogen auf einen Punkt A zu berechnen, wird die folgende Formel genutzt:

$$\vec{M}_A = \vec{r}_{AB} \times \vec{F}_p \quad (3.11)$$

Dabei ist \vec{M}_A der Vektor, in dem die Momente um die drei globalen Raumachsen enthalten sind. \vec{r}_{AB} ist der Ortsvektor zum Bezugspunkt A. Die Berechnung von \vec{F}_p wird bereits in Gleichung 3.10 beschrieben. Mit diesen Kraft und Momentdefinitionen werden in dieser Arbeit die verschiedenen Lasten, die in Abschnitt 7.2 erläutert werden, bestimmt.

3.5 Ansätze zur Bewegungssimulation

In der hier geplanten Simulation werden sich die Rotorblätter in einer zeitveränderlichen Simulation bewegen. Dafür werden hier die Möglichkeiten einer Bewegungssimulation in ANSYS Fluent erläutert. In dem Modell wird es eine räumlich bewegliche Randbedingung geben. Dafür muss sich das Netz entweder mitbewegen oder in jedem Zeitschritt der Bewegung verändern. Dies beschreibt bereits die zwei zugrunde liegenden Ansätze, die zur Verfügung stehen. Zuerst wird auf den Ansatz mit einem beweglichen Netz eingegangen. Dieser wird in der ANSYS-Dokumentation [11] (Abschnitt 3.2) beschrieben. In der nachfolgenden Abbildung ist die Grundidee dargestellt.

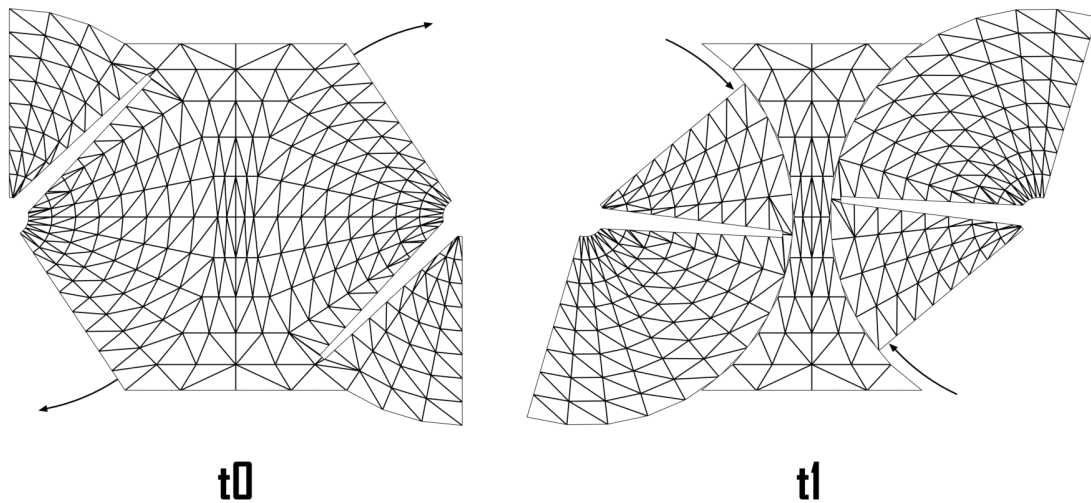


Abbildung 3.4: *Bewegliches Netz*

Das hier dargestellte Modell entspricht vom grundlegenden Aufbau bereits dem geplanten Modell. Links und rechts rotieren zwei Körper im Uhrzeigersinn. Bei diesem Ansatz bewegt sich ein Teil des Netzes mit der sich bewegenden Randbedingung mit. Dies ist in diesem Fall das Rotorblatt. Das Netz muss dafür in Bereiche eingeteilt werden. Die Bereiche an den Körpern rotieren, während der Verbindungsbereich still steht. An den Grenzen dieser Bereiche kommt es durch die Bewegung zu nicht konformen Netzen. Das heißt, dass die Randfläche der Zelle in einem Bereich nicht unbedingt passend zur Randfläche der Zelle des anderen Bereichs ist. Diesem Übergangsbereich muss bei der Modellierung besondere Aufmerksamkeit zugewandt werden, um eine physikalisch sinnvolle Übertragung der Variablen zu garantieren.

Das zweite Konzept, das hier vorgestellt wird, ist das dynamische Netz [11] (Abschnitt 3.3). Hierbei bewegt sich nur die Randbedingung. Das Netz kann sich deformieren und wird bei Bedarf neu vernetzt. Die Lösung des alten Netzes wird auf das neue interpoliert.

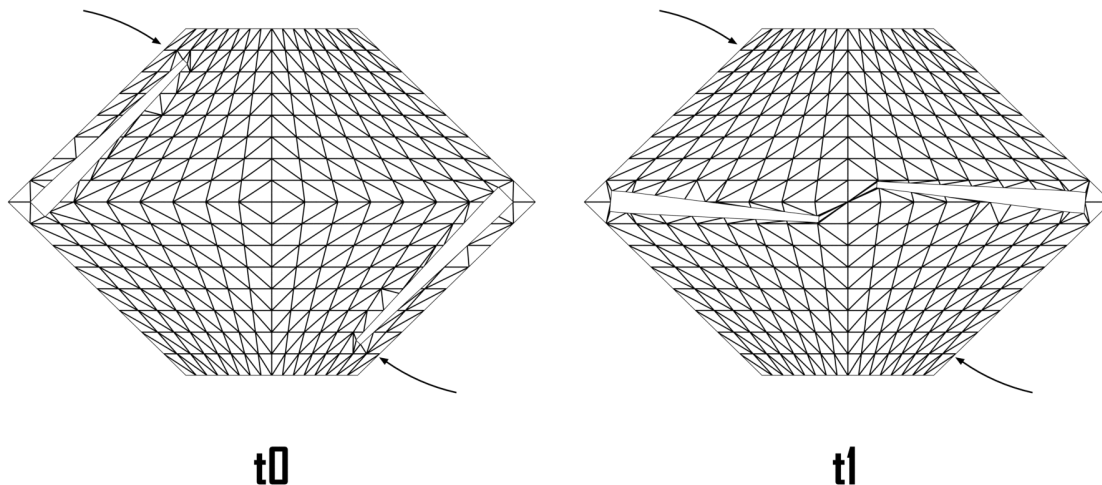


Abbildung 3.5: *Dynamisches Netz*

In ANSYS Fluent steht ein Algorithmus zur Neuvernetzung zur Verfügung. Das Netz kann sich mit der Randbedingung deformieren. Dafür wird für jede Zelle eine Steifigkeit vorgegeben, mit der diese der Bewegung nachgeben kann. Dabei erhöht sich die in Abschnitt 5.4 beschriebene Skewness. Durch die Deformation weicht die ursprüngliche Zelle weiter von einer gleichseitigen Zelle ab. Wenn die Skewness einen definierten Grenzwert überschreitet, wird die Zelle neu vernetzt. Dies minimiert

die nötigen Neuvernetzungen in dem Modell, da nicht das ganze Netz in jedem Schritt neu generiert werden muss. Nach der folgenden Literaturrecherche wird die Wahl des Bewegungsansatzes erörtert.

Kapitel 4

Literaturrecherche

Im vorangegangenen Kapitel werden die verschiedenen Möglichkeiten einer CFD-Simulation beschrieben. In dieser Arbeit soll sich bei der Modellierung an bereits vorhandenen Arbeiten orientiert werden. Diese werden hier beschrieben. In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse einer Literaturrecherche zusammengefasst. Dabei werden sowohl die Simulationenmethoden als auch die Ergebnisse dargestellt.

4.1 Bisherige Modellierung

CFD Simulation of Co-Planar Multi-Rotor Wind Turbine Aerodynamic Performance Based on ALM Method

Zuerst wird hier auf den Artikel „CFD Simulation of Co-Planar Multi-Rotor Wind Turbine Aerodynamic Performance Based on ALM Method“ [16] eingegangen. In dem Artikel wird eine Simulation mit der „Actuator Line Method“ (ALM) CFD beschrieben. Bei dieser Methode wird der Rotor einer WEA durch rotierende Linien repräsentiert. Auf dieser Linie werden gleichmäßig Punkte verteilt. In diesem Fall werden 60 Punkte genutzt. Für diese Punkte müssen tabellierte Kraftwerte vorhanden sein. Diese können dann mit einer Verteilungsfunktion auf das Fluid verteilt werden. Diese Funktion ist notwendig um numerische Instabilität zu vermeiden. In dem Artikel wird eine Gaußsche Projektionsfunktion verwendet. Als Turbulenzmodell wird das bereits in Abschnitt 3.2 erläuterte LES-Modell genutzt. Die Umsetzung des Modells erfolgt in dem Programm OpenFoam.

Als Rotormodell wird der Phase VI Rotor des National Renewable Energy Laboratory (NREL) genutzt. Dieser besitzt einen Radius von 5,029 m mit zwei Blättern. Die Nenndrehzahl beträgt 72 RPM. Die Berechnung wird mit einer Zeitschrittweite von 0,002318 s durchgeführt. Dies entspricht einer Drehung von einem Grad pro Zeitschritt. Es wird die Interaktion von zwei und von drei Rotoren in separaten Simulationen berechnet. Der Abstand beträgt dabei $0,07 \cdot R$. Die Domain des Modells wird in dem Artikel mit den Maßen 100 m · 46,6 m · 24,4 m beschrieben. Als Einlass wird eine Geschwindigkeitsrandbedingung auf 10 m/s gesetzt. Die Turbulenzintensität beträgt 0,2%. Die Auslassrandbedingung wurde als freier Ausfluss definiert. Im näheren Nachlaufbereich der WEA wird das Netz zusätzlich verfeinert. Das Netz besteht aus Hexaederelementen. Um den Einfluss des Netzes zu untersuchen, werden drei Netze erzeugt. Das grösste besitzt 900 Millionen Elemente, das nächst feinere 1 900 Millionen und das feinste 2 500 Millionen. Im Falle des feinsten

Netzes entspricht das einer Elementgröße von ungefähr 6 cm. Das feinste Netz wird für die finalen Ergebnisse genutzt.

In den Ergebnissen werden auch die Nachlaufeffekte beschrieben, die bei dieser MR-WEA auftreten. Da der Fokus in dieser Arbeit auf den Lastbestimmungen am Rotorblatt liegt, wird dies in dieser Zusammenfassung nicht näher erläutert. Zusätzlich zu den Nachlaufeffekten wird auch das Schwenkmoment der Rotoren untersucht. Dabei kann eine maximale Steigerung des Schwenkmoments bei zwei Rotoren um 1,2% gefunden werden. Bei drei Rotoren steigt das Moment um 1,1% bis 2%. Eine Steigerung des Schwenkmoments wurde im Bereich r/R von 0,8 bis 1 festgestellt. Zusätzlich wird in dem Artikel ein Abstand von $0,2 \cdot R$ getestet. Der Einfluss auf das Schwenkmoment wird dadurch schwächer. Das Moment erhöht sich bei einer Interaktion um 0,54%. Abschließend wird in dem Artikel festgehalten, dass es bei einer Rotor-Rotor-Interaktion zu einer Steigerung der Lasten um maximal 2% kommen kann. Die Interaktion findet ungefähr im Bereich ± 15 Grad um den Interaktionspunkt statt.

CFD Validation of a Model Wind Turbine by Means of Improved and Delayed Detached Eddy Simulation in OpenFOAM

Als nächstes sollen die Ergebnisse aus dem Artikel "CFD Validation of a Model Wind Turbine by Means of Improved and Delayed Detached Eddy Simulation in OpenFOAM" [10] vorgestellt werden. In diesem Artikel werden die Messdaten einer experimentellen Modell-WEA aus einem Windtunnel mit CFD-Simulationsergebnissen verglichen. Eine Rotor-Rotor-Interaktion wird nicht untersucht. Dennoch können aus diesem Artikel relevante Informationen zur korrekten und versuchsvalidierten CFD-Simulation einer WEA gewonnen werden.

In dem Artikel werden verschiedene Kenngrößen wie Leistung, Moment, Schub und Nachlaufeffekt verglichen. Die Modell-WEA ist eine MoWiTO 1.8. Die Rotorblätter sind dabei eine um den Faktor 70 herunter skalierte Variante der NREL 5 MW Anlage.

Die Simulation wird mit OpenFoam durchgeführt. In dem Artikel werden verschiedene Zeitschrittwerten getestet. Es werden Zeitschritte getestet, die einer Drehung von $0,1^\circ$, $0,5^\circ$ und 1° entsprechen. Für die Turbulenzmodelle wird als Grundlage das in Abschnitt 3.2 erläuterte DES-Modell genutzt. In dem Artikel wird zusätzlich das Improved-Delayed-Detached-Eddy-Simulation (IDDES) Modell genutzt. Dies ist eine Weiterentwicklung des DES-Modells.

Die Domain der Berechnung misst $36 \text{ m} \cdot 12,6 \text{ m} \cdot 7,75 \text{ m}$. Die Anlage steht im Abstand von 4,8 m vom Einlass. Das Netz wird in Richtung der Blattoberfläche verfeinert. Das resultierende Netz besteht aus 32 Millionen Elementen und besitzt einen y^+ Wert von Eins. Um die Bewegung der

Rotorblätter zu simulieren, wird ein dynamisches Netz genutzt. Dieses wird in dieser Arbeit in Abschnitt 3.5 erklärt. Als Einlass wird ein Geschwindigkeitseinlass genutzt. Am Auslass wird ein Druck von 0 Pa vorgegeben.

In dem Artikel wird festgestellt, dass bei einer Zeitschrittweite, die einer Drehung von $0,5^\circ$ pro Schritt entspricht, ausreichend genaue Ergebnisse erzielt werden können. Das Modell mit einem dynamischen Netz ist in der Lage, die Phänomene korrekt wieder zu geben. Die besten Ergebnisse können mit dem IDDES-Turbulenzmodell erreicht werden. Allerdings erzielt das DES-Modell ähnlich gute Ergebnisse.

Analysis of Interactional Aerodynamics in Multi-Rotor Wind Turbines using Large Eddy Simulations

Des Weiteren werden in dieser Zusammenfassung die Ergebnisse aus dem Artikel „Analysis of Interactional Aerodynamics in Multi-Rotor Wind Turbines using Large Eddy Simulations“ [6] vorgestellt. In dieser Arbeit wird eine LES CFD-Simulation durchgeführt, um die Nachlaufeffekte einer MR-WEA zu untersuchen. Hier wird die ALM verwendet. In dem Artikel werden zwei leistungsäquivalente Anlagen verglichen. Dabei wird ein theoretisches MR-Modell aus vier Rotoren der NREL 1,5 MW Anlage kombiniert. Die Rotoren werden in einem Abstand von 2,5 % des Rotordurchmessers platziert. Als Vergleich wird die NREL 5 MW Anlage herangezogen, die linear auf eine 6 MW Anlage skaliert wurde.

Als Einlass wird eine Geschwindigkeit von 11,4 m/s und eine Turbulenzintensität von 7,5 % vorgegeben. Der Abstand des Einlasses beträgt 4 D. Die gesamte Simulationsdomain besitzt Abmessungen von $10D \cdot 10D \cdot 20D$. Die Seitenflächen der Domain sind reibungsfreie Wände. Als Auslass wird ein Druckauslass gewählt. Die Zeitschrittweite wird so gewählt, dass sich der Rotor um 2 Grad pro Zeitschritt dreht.

Für die MR-WEA können in diesem Artikel Anzeichen für eine schnellere Erholung des Nachlaufs gefunden werden. Da in dieser Arbeit keine Lastsimulation an den Rotorblättern durchgeführt wird, sind dafür auch keine Ergebnisse vorhanden.

Numerical Investigation of the Rotor-Rotor Aerodynamic Interaction for eVTOL Aircraft Configurations

Zuletzt werden hier die Ergebnisse aus dem Artikel „Numerical Investigation of the Rotor-Rotor Aerodynamic Interaction for eVTOL Aircraft Configurations“ [9] vorgestellt. Rotor-Rotor-Interaktionen sind nicht nur in der Windenergie relevant. Auch im Bereich von Flugzeugen, Helikoptern und Drohnen kann es zu Interaktionen kommen. In dem Artikel wird das Simulationswerkzeug „DUST“ genutzt.

Dust ist kein CFD-Programm sondern kombiniert mehrere numerische Simulationsansätze. Die Rotorblätter werden hier auch eindimensional mit tabellierten Auftriebs- und Widerstandswerten simuliert. Dieser Ansatz ähnelt der ALM-Methode die in vorherigen Artikel genutzt wird. Der Nachlauf wird mit Partikeln simuliert. In dieser Arbeit werden Propeller mit drei Blättern und einem Radius von 0,15 m simuliert. Die Anordnung ist in verschiedenen Simulationen coaxial oder koplanar. Die Drehzahl beträgt 7000 Umdrehungen pro Minute.

In dem Artikel wird eine Verringerung der Schubkraft um weniger als 1% festgestellt. Zusätzlich wird festgestellt, dass es zu einer starken Interaktion der Wirbel an den Blattspitzen kommt.

4.2 Modellwahl

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt verschiedene bisherige Modellierungsmethoden und ihre Ergebnisse beschrieben wurden, wird ein Vorgehen für das aufzubauende Modell getroffen.

In den vorgestellten Artikeln wird die ALM genutzt, um die Rotorblätter zu simulieren. Dabei wird das Rotorblatt durch seine Achse repräsentiert. Von dieser wirken Kräfte auf das Fluid. Diese Methode wird sowohl zur Lastsimulation als auch zur Simulation der Nachlaufeffekte genutzt. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Simulation der Blattlasten und den Strömungseffekten nahe der Blattgeometrie. Daher wird in dieser Arbeit die volle Geometrie des Blattes modelliert.

Die zur Verfügung stehenden Rechenressourcen sind in dieser Arbeit begrenzt. In den vorgestellten Artikeln werden alle Blätter der Rotoren simuliert. Dies erfordert große Domains, damit die Rotoren auch innerhalb dieser Platz finden. Zusätzlich liegt in manchen Arbeiten der Fokus auf der Simulation des Nachlaufs, was zusätzlichen Simulationsraum hinter der WEA erfordert. Aufgrund der begrenzten Ressourcen wird in dieser Arbeit die Domain so klein wie möglich gestaltet. Es wird von den drei Blättern eines Rotors nur eins simuliert.

Wie bereits in Abschnitt 3.5 beschrieben, ist bei einer Simulation mit einem beweglichen Rotorblatt eine Veränderung des Netzes erforderlich. Bei der in den Artikeln verwendeten ALM ist dies nicht erforderlich, da sich dort Kräfte durch die Domain bewegen, die keine Neuvernetzung pro Zeitschritt benötigen. In dem Artikel „CFD Validation of a Model Wind Turbine by Means of Improved and Delayed Detached Eddy Simulation in OpenFOAM “ wird eine Vollblattsimulation durchgeführt. Dort wird ein dynamisches Netz genutzt.

Betrachtet man die Abbildungen 3.4 und 3.5, wird sichtbar, dass das insgesamt benötigte Volumen der Domain bei einem beweglichen Netz größer ist. Das rotierende Blatt muss einen Teil der Domain „vor sich herschieben “ und einen anderen Teil „hinter sich herziehen “. Dies führt insgesamt zu

einer größeren Domain. Eine größere Domain benötigt bei gleicher Zellgröße mehr Zellen. Der Berechnungsaufwand ist dabei in diesem Fall bei einem beweglichen Netz größer als bei einem dynamischen Netz. Allerdings darf bei einem dynamischen Netz der zusätzliche Zeitaufwand durch das Vernetzen in jedem Zeitschritt nicht vernachlässigt werden. In ANSYS Fluent ist ein effizienter Algorithmus vorhanden, der die Menge der neu zu vernetzenden Zellen minimal hält. Dieser wird in Abschnitt 3.5 beschrieben. Das zusätzlich vorhandene Volumen in diesem Modell ist groß, wie in der folgenden Abbildung sichtbar ist.

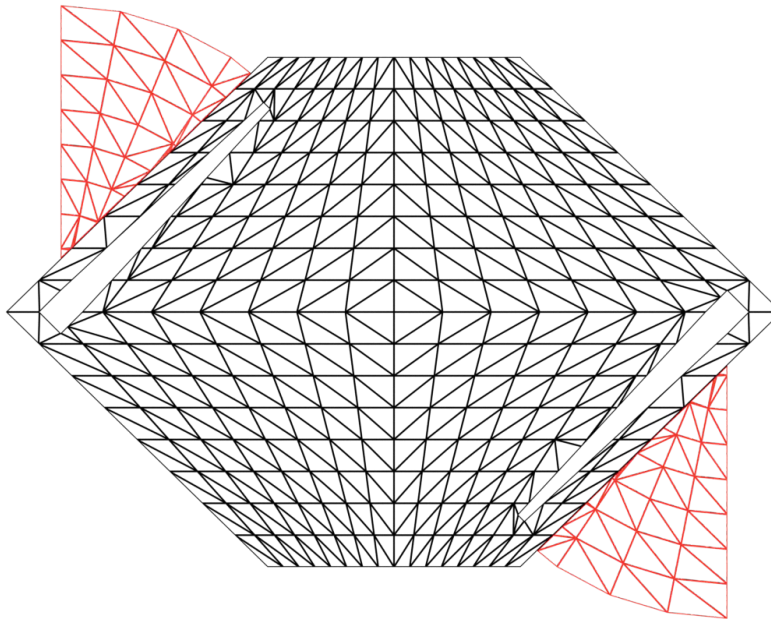


Abbildung 4.1: *Vergleich zwischen beweglichem und dynamischen Netz*

Der rote Bereich ist im beweglichen Netz zusätzlich erforderlich. Daher wird insgesamt davon ausgegangen, dass der Berechnungsaufwand bei einem dynamischen Netz geringer sein wird.

Als Randbedingung für das Modell wird am Einlass ein Geschwindigkeitseinlass genutzt. Auf der Auslassseite wird ein Druckauslass mit einem Druck von 0 bar definiert. Das Rotorblatt wird als reibungsbehaftete Wand modelliert. Die verbleibenden Ränder der Domain werden als reibungsfreie Wände modelliert. Dies entspricht den Randbedingungen, die auch in den Artikeln genutzt werden.

In den Artikeln wird entweder das LES oder eine Variante des DES-Turbulenzmodells genutzt. Diese sind genauer als die RANS-Modelle die in Abschnitt 3.2 vorgestellt werden. Allerdings ist ihre Umsetzung komplexer und rechenintensiver. Daher wird in dieser Arbeit ein simpleres RANS-Modell genutzt. Damit ist der grundlegende Modellierungsansatz definiert.

Kapitel 5

Modellaufbau

Nachdem der grundlegende Modellansatz bestimmt worden ist, können die Details des Modellaufbaus ausgearbeitet werden.

5.1 Rotorblatt

In diesem Abschnitt wird das verwendete Rotorblatt und die zugehörige Anlage erläutert. Als Basis für diese Simulation wird das Rotorblatt der von der technischen Universität Dänemark entwickelten DTU 10MW WEA dienen. Alle weiteren Daten zu dieser Anlage und dem Rotorblatt werden aus dem zugehörigen Bericht [3] entnommen. Da die Anlage einen Rotorradius von $89,166\text{ m}$ besitzt, ist diese zu groß für ein MR-Modell und wird daher um den Skalierfaktor $f = 0,25$ kleiner skaliert. Der neue Radius R ist damit $22,2915\text{ m}$. Das Modell des Rotorblatts wird als .iges Datei zur Verfügung gestellt. Für den Import in ANSYS wird das Modell in das Dateiformat .stl konvertiert, da dieses in ANSYS lesbar ist. Die Geometrie wird in der Open Source Software Blender repariert, da bei der Konvertierung eine ungleichmäßige Oberfläche entstanden ist. Diese Reparatur verbessert die Geometriequalität und vereinfacht ANSYS die Verarbeitung. Es kann allerdings nicht ganz ausgeschlossen werden, dass es bei dieser Reparatur zu minimalen Abweichungen zur originalen Oberfläche kommen kann. Im .stl Dateiformat wird die Geometrie in Form von Punkten und Flächen gespeichert. Das bedeutet, dass die Oberfläche aus vielen kleinen Ebenen besteht, also nicht kontinuierlich gekrümmt ist. Bei einer hinreichend feinen Auflösung der Oberfläche ist dies vernachlässigbar. In der nachfolgenden Abbildung ist das skalierte und reparierte Rotorblatt im .stl Format dargestellt.

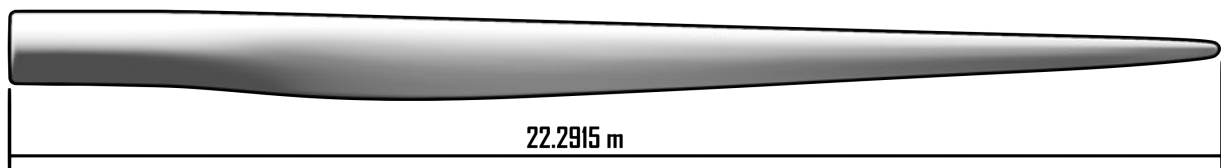


Abbildung 5.1: *Modell des Rotorblatts*

In dem Bericht [3] werden zusätzlich Tabellen für die Leistungskurve, Drehzahl und den Pitchwinkel zur Verfügung gestellt. Da diese auf die Anlage in originaler Größe bezogen sind, müssen die Leistungswerte und Drehzahlen korrekt skaliert werden. Für die Leistung und die Schubkraft gilt, dass $P \propto R^2$ und $F_s \propto R^2$. Daher müssen beide um f^2 skaliert werden, da sich f auf den Radius bezieht. Die Skalierung für die Drehzahl erfolgt anders. Das Ziel ist, in der kleineren Anlage die gleiche Schnellaufzahl zu erhalten, wie in der originalen Anlage. Die Schnellaufzahl ist definiert als:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot R}{v_{wind}} \quad (5.1)$$

Dabei ist n die Drehzahl und v_{wind} die Windgeschwindigkeit. Stellt man diese Gleichung nach n um erhält man:

$$n = \frac{\lambda \cdot v_{wind}}{2 \cdot \pi \cdot R} \quad (5.2)$$

Da sich R hier im Nenner befindet, wird für die Drehzahl durch den Skalierfaktor f dividiert. Die Drehzahl n wird im kleineren, skalierten Modell also um $\frac{1}{f}$ größer. Die Größen, Pitchwinkel, c_p und c_t , sind unabhängig von der Skalierung der Anlage und werden nicht verändert. In der nachfolgenden Tabelle sind die skalierten Werte aus dem Bericht [3] (S.31 ff.) angegeben.

5.1. ROTORBLATT

v_{wind} in m/s	Leistung in kW	Schub in kN	Pitchwinkel in °	RPM	c_p	c_t
4,0	17,5	14,1	2,751	24,000	0.286	0.923
5,0	49,9	22,0	1,966	24,000	0.418	0.919
6,0	95,8	31,1	0,896	24,000	0.464	0.904
7,0	156,6	40,2	0,000	24,000	0.478	0.858
8,0	233,2	49,8	0,000	25,704	0.476	0.814
9,0	332,0	63,1	0,000	28,916	0.476	0.814
10,0	455,4	77,9	0,000	32,128	0.476	0.814
11,0	606,1	94,2	0,000	35,344	0.476	0.814
12,0	664,9	79,4	4,502	38,400	0.402	0.577
13,0	665,5	67,6	7,266	38,400	0.317	0.419
14,0	665,0	60,5	9,292	38,400	0.253	0.323
15,0	667,7	55,7	10,958	38,400	0.207	0.259
16,0	665,1	51,6	12,499	38,400	0.170	0.211
17,0	665,0	48,4	13,896	38,400	0.142	0.175
18,0	665,0	45,8	15,200	38,400	0.119	0.148
19,0	665,8	43,7	16,432	38,400	0.102	0.126
20,0	665,4	41,8	17,618	38,400	0.087	0.109
21,0	665,3	40,1	18,758	38,400	0.075	0.095
22,0	665,1	38,7	19,860	38,400	0.065	0.084
23,0	665,0	37,5	20,927	38,400	0.057	0.074
24,0	665,2	36,4	21,963	38,400	0.050	0.066
25,0	664,7	35,5	22,975	38,400	0.044	0.059

Tabelle 5.1: *Skalierte Kennwerte der DTU 10 MW*

Als nächstes werden die Verteilung der Schubkraftkoeffizienten c_t und des Leistungskoeffizienten c_p über die radiale Position des Rotorblattes dargestellt. Diese sind für die Windgeschwindigkeit von 9 m/s in dem Bericht [3] (S. 25f.) angegeben.

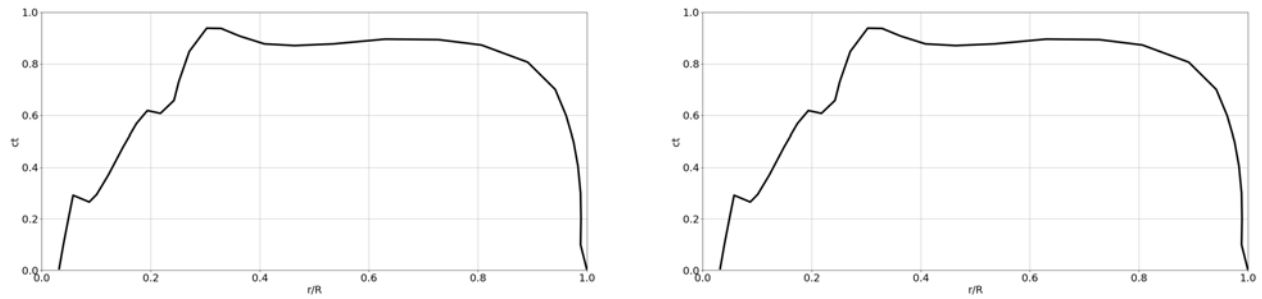


Abbildung 5.2: c_p und c_t Kurve des DTU 10MW Rotorblatts.

Abschließend wird hier eine Veränderung des Pitchwinkels dargestellt.

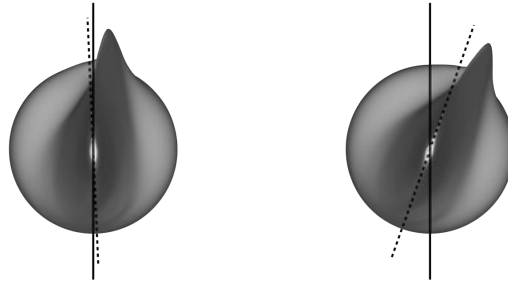


Abbildung 5.3: Pitchwinkel am DTU 10MW Rotorblatt

Hier ist links das Rotorblatt bei einem Pitchwinkel von null Grad dargestellt. Die schwarze Linie ist die Rotorebene. Die gestrichelte Linie ist die Rotorblattsehne an der Blattspitze. Dabei wird sichtbar, dass diese beiden Linien nicht identisch sind. Es existiert ein Einbauwinkel von 2,5 Grad. Rechts wird das Blatt in einer Position mit Pitchwinkel dargestellt. Wie bereits in Abschnitt 2.3 festgelegt, ist der Pitchwinkel positiv im Uhrzeigersinn.

5.2 Modelle

Mit dem im vorherigen Kapitel beschriebenen Rotorblattmodell kann die Geometrie in ANSYS aufgebaut werden. Um die Berechnung validieren zu können, wird ein Validierungsmodell aufgebaut. Dieses Modell überprüft, ob das CFD-Modell in der Lage ist, die Kenngrößen aus der Tabelle 5.1 zu replizieren. Dafür wird das vollständige Blatt simuliert. Dieses Modell trägt den Namen „Validierungsmodell“. Da die Zeit und Berechnungsressourcen in dieser Arbeit begrenzt sind, muss damit effizient umgegangen werden. In dem MR-Modell mit zwei Blättern werden daher nur die Blattspitzen simuliert, um möglichst viele Zellen auf diesen Bereich konzentrieren zu können. Das MR-Modell erhält die Bezeichnung „Basismodell“. Dieses soll mit dem Validierungsmodell verglichen werden, um die Rotor-Rotor-Interaktion hervorzuheben. Der Aufbau des Validierungsmodells ist in der folgenden Abbildung zu sehen.

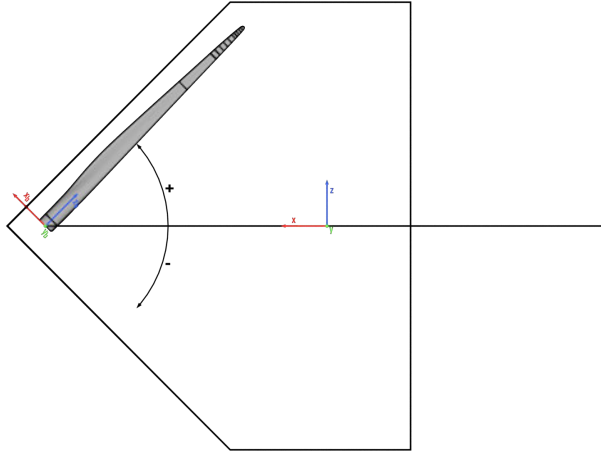


Abbildung 5.4: *Modellaufbau Validierungsmodell*

Der globale Koordinatenursprung befindet sich in der Bildmitte. Das Koordinatensystem des Blattes, das mit dem Index b bezeichnet wird, ist um den Vektor \vec{v}_b verschoben:

$$\vec{v}_b = \begin{pmatrix} R + s/2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

und mit der folgenden Rotationsmatrix verdreht:

$$R_b(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

Die Strömung strömt in negative y-Richtung. Die y-Achse zeigt in dieser Ansicht auf den Leser. Die z_b Achse entspricht der Blattachse. s ist der kleinste Abstand der Blattspitzen im Basismodell. Dieser wird bereits hier verwendet, um in allen Modellen die gleichen Koordinatensysteme zu erhalten. Der Positionswinkel β beschreibt die momentane Position des Blattes. Er wird für das linke Blatt als positiv oberhalb der x-Achse definiert und als negativ unterhalb der x-Achse. Damit nimmt der Positionswinkel β im Uhrzeigersinn ab. Die Blattposition für 0 Grad ist kollinear zur x-Achse. Da hier ein dreidimensionales Modell aufgebaut wird, benötigt die Domain zusätzlich eine Tiefe. Die Tiefe des Modells stromaufwärts vor dem Blatt wird mit d_v bezeichnet, die Tiefe hinter dem Blatt stromabwärts mit d_h . Als nächstes wird in der folgenden Abbildung der Aufbau des Basismodells dargestellt.

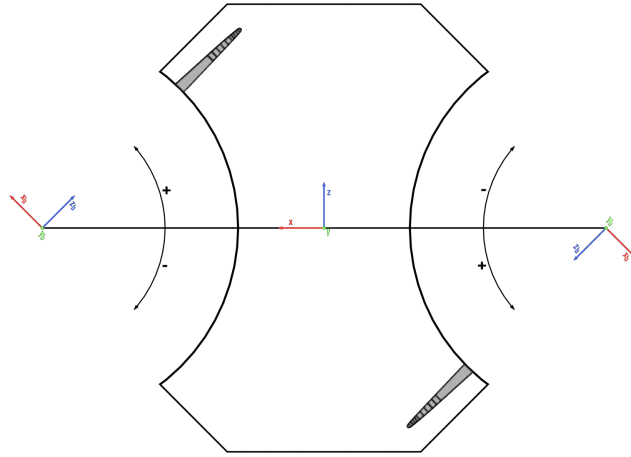


Abbildung 5.5: *Modellaufbau Basismodell*

Wie bereits beschrieben, sind die Berechnungsressourcen in dieser Arbeit begrenzt. In diesem Modell wird um den Blattursprung ein Zylinder mit einem Radius definiert, der aus der Domain entfernt wird. Dieser Radius soll im weiteren Verlauf mit R_s bezeichnet werden. Es wird definiert: $R_s = 0.7 \cdot R$. Das heißt, es werden nur die oberen 30% des Blattes simuliert. Im Basismodell ist eine zweite Blattspitze vorhanden. Dessen Koordinatensystem ist um den Vektor $-\vec{v}_b$ verschoben und 180 Grad um die y_b -Achse zum linken Blatt verdreht. Die Winkeldefinition für das rechte Blatt ist zum linken Blatt an der globalen x-Achse gespiegelt.

Betrachtet man Abbildung 5.4 und 5.5, fällt auf, dass die Blattspitze zusätzlich in Blattelemente unterteilt ist. Diese Blattelemente sind bei allen Modellen gleich groß. Sie ermöglichen später eine individuelle Auswertung der Lasten pro Blattelement. Insgesamt existieren elf Blattelemente in drei unterschiedlichen Längen. Diese sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

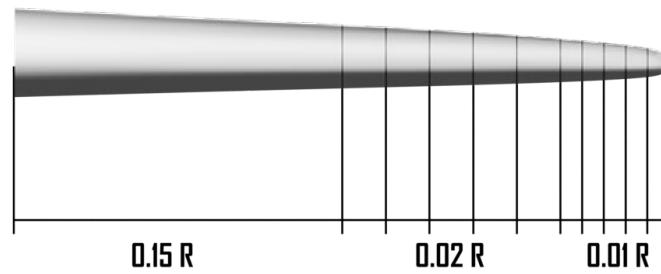


Abbildung 5.6: *Blattelemente*

Die Blattelemente werden von der Spitze in Richtung Wurzel nummeriert. Das erste Element an der Spitze erhält den Index eins. Dementsprechend erhält das Element am linken Rand in Abbildung 5.6 den Index elf.

5.3 Parameter

Für die beschriebenen Modelle sind hier die Parameter in der folgenden Tabelle aufgelistet. Einige dieser Parameter werden in der späteren Parameterstudie variiert.

Beschreibung	Symbol	Formel	Wert
Rotorradius	R	-	22,2915 m
Abstand Blattspitzen	s	$0,005 \cdot R$	0,1114575 m/s
Windgeschwindigkeit	v_{wind}	-	12 m/s
Turbulenzintensität	I_t	-	19,47%
Startwinkel	β_{start}	-	45°
Endwinkel	β_{end}	-	-30°
Endwinkelgeschwindigkeit	Ω_0	-	4.0192 rad/s
Winkelgeschwindigkeit	$\Omega(t)$	-	-
Pitchwinkel	φ	-	4,502°
Simulationszeit	t_{sim}	$(\alpha_{start} + \alpha_{end}) \cdot \frac{1}{\Omega(t)}$	0,3507 sec
Simulationsradius	R_s	$0,7 \cdot R$	15,6041 m
Abstand Blattspitzen	s	$0,005 \cdot R$	0,1115 m
Tiefe der Domain stromaufwärts	d_v	$0,2 \cdot R$	4,4583m
Tiefe der Domain stromabwärts	d_h	$v_{wind} \cdot t_{sim}$	4,2084 m
Rauigkeitshöhe der Blattoberfläche	h_r	-	0,05 mm

Tabelle 5.2: *Modellparameter*

Die Turbulenzintensität wird nach den Formeln 2.4 und 2.5 bestimmt. Die Typklasse der DTU 10 MW Anlage ist laut dem Bericht A [3](S. 13). Das heißt, dass $I_{ref} = 0,16$ ist. In der Tabelle wird die Winkelgeschwindigkeit als Funktion der Zeit t angegeben. Bei Tests mit dem Simulationsmodell hat sich gezeigt, dass bei einem Start mit der Endwinkelgeschwindigkeit keine Konvergenz der Simulation möglich ist. Während die Blätter schon im ersten Zeitschritt die Endwinkelgeschwindigkeit besitzt, ist das beim Fluid in den anliegenden Zellen nicht der Fall. Diese erfahren dadurch eine sehr hohe Beschleunigung, was zur Divergenz der Lösung führt. Um dieses Problem zu umgehen, beschleunigen die Blätter in den ersten 0,05 Sekunden der Simulation linear. Danach erreichen sie die Endwinkelgeschwindigkeit Ω_0 . Die Winkelgeschwindigkeit wird mit der folgenden Funktion definiert:

$$\Omega(t) = \begin{cases} \Omega_0 \cdot \frac{1}{0,05sec} \cdot t, & \text{wenn } t < 0,05sec \\ \Omega_0, & \text{wenn } t \geq 0,05sec \end{cases} \quad (5.5)$$

Ω_0 ergibt sich dabei aus der zur Windgeschwindigkeit korrespondierenden Drehzahl aus Tabelle 5.1. Das gleiche gilt für den Pitchwinkel, der auch aus dieser Tabelle entnommen wird. In der nachfolgenden Abbildung wird das Blattprofil mit einem Pitchwinkel von 0 Grad und 4,502 Grad dargestellt.

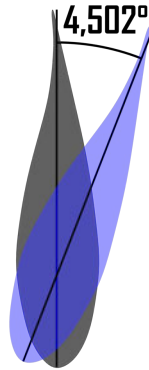


Abbildung 5.7: *Pitchwinkel*

Hier ist in Grau das Profil bei einer Position von $r/R = 0,9$ mit einem Pitchwinkel von 0 Grad dargestellt. In Blau ist das Profil mit einem Pitchwinkel von 4,502 Grad zu sehen. Hier ist zu beachten, dass der dargestellte Winkel nicht wirklich 4,502 Grad entspricht und in dieser Darstellung zur Verdeutlichung des Konzepts vergrößert ist.

Die gesamte Simulationszeit des Modells ergibt sich aus der Division von zurückzulegendem Winkel durch die Winkelgeschwindigkeit. Die Tiefe der Domain vor dem Blatt wird auf $0,2 \cdot R$ gesetzt. Tests haben gezeigt, dass dies ein ausreichender Abstand zum Rotorblatt ist. An dieser Stelle wird das Fluid später in die Domain einströmen. Die Tiefe der Domain hinter dem Blatt wird so definiert, dass die Strömung sich voll entwickeln kann. Das bedeutet, dass hinter dem Blatt genug Platz ist, sodass die Strömung die Strecke vom Blatt zum Ende der Domain nicht in der Simulationszeit zurücklegen kann. Zuletzt wird eine Rauigkeitshöhe für die Rotorblätter benötigt. In dem Artikel „Numerical investigation of blade roughness impact on the aerodynamic performance and wake behavior of horizontal axis wind turbine“ [7] werden verschiedene Rauigkeitshöhen simuliert. Mit zunehmendem Alter der Rotorblätter steigt die Rauigkeit. In dem Artikel werden die Werte 0 mm (komplett glatt), $0,05 \text{ mm}$, $0,1 \text{ mm}$ und $0,2 \text{ mm}$ untersucht. In dieser Arbeit wird als Höhe $0,05 \text{ mm}$ verwendet.

5.4 Vernetzung

Nach der Erzeugung der Geometrie wird das Netz aufgebaut. Es werden Tetraeder-Elemente verwendet. Wie in Abschnitt 3.3 erwähnt, kann das Netz bereichsweise unterschiedlich fein sein, um zwischen Genauigkeit und Rechenaufwand abzuwägen. Dies wird hier implementiert. Um das Rotorblatt wird ein Nahbereich definiert. Dieser ist in der folgenden Darstellung abgebildet.

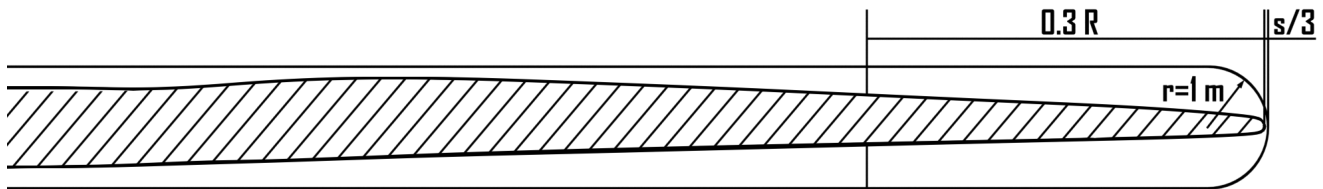


Abbildung 5.8: *Nahbereich*

Um die Blattachse wird ein Zylinder mit verundeten Enden und einem Radius von einem Meter definiert. Dies ist der Nahbereich. Er ist um ein Drittel des kleinsten Blattabstands s länger als das Rotorblatt. Dies stellt sicher, dass bei der Interaktion der Rotorblätter kein Überschneiden der Nahbereiche auftritt und zusätzlich ein Abstand zwischen diesen verbleibt. Der Nahbereich wird zusätzlich in zwei Abschnitte unterteilt. Der untere Abschnitt beginnt an der Wurzel und endet bei $0,7 \cdot R$. Der obere Abschnitt ist demnach $0,3 \cdot R$ lang. Im oberen Abschnitt wird am feinsten vernetzt. Der untere Abschnitt wird gröber vernetzt. Dieser ist nur im Validierungsmodell vorhanden. Im Basismodell liegt dieser Bereich außerhalb der Domain.

Im oberen Nahbereich ist die Größe der Elemente 5 cm . Im unteren Nahbereich erhöht sich die Größe der Elemente auf 10 cm . Die restliche Domain wird mit 15 cm großen Elementen vernetzt. Damit ANSYS Fluent die Oberfläche des Rotorblattes möglichst formgetreu vernetzen kann, wird das Profil über den Umfang mit 60 Elementen vernetzt. Dies führt zu feineren Elementen an der Blattspitze als an der Blattwurzel, da an der Spitze der Umfang des Blattes kleiner ist. Dies ist zusätzlich vorteilhaft, da ein feineres Netz an der Blattspitze wünschenswert ist. Zuletzt wird eine Randschichtverfeinerung durchgeführt, wie sie in Abschnitt 3.3 erläutert wird. Die Höhe der ersten Zellschicht ist $0,0005\text{ m}$. Es werden darüber sieben weitere Schichten erzeugt. Die Schichten werden von einer zur nächsten um 40% größer. Das aus diesen Einstellungen resultierende Netz ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

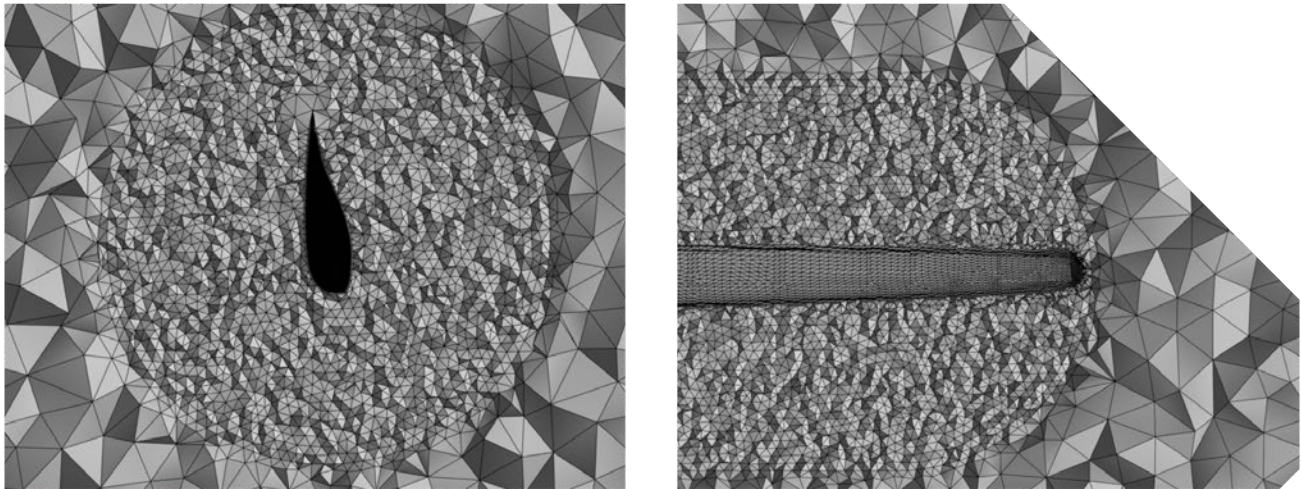


Abbildung 5.9: *Netz Schnittbilder*

Links ist ein Schnitt durch das erzeugte Netz mit Blick von der Blattwurzel zur Blattspitze zu sehen. Rechts ist ein Schnitt entlang der Blattachse abgebildet. Die Netze werden in allen Modellen mit den gleichen Einstellungen erzeugt.

5.5 Simulation

5.5.1 Randbedingungen

An dem definierten Netz müssen in Fluent Randbedingungen vorgegeben werden. Diese sind in Abschnitt 4.2 aus der Literaturrecherche bestimmt worden. In der folgenden Abbildung sind die Randbedingungen für das Validierungsmodell dargestellt. Die Randbedingungen des Basismodells sind gleich.

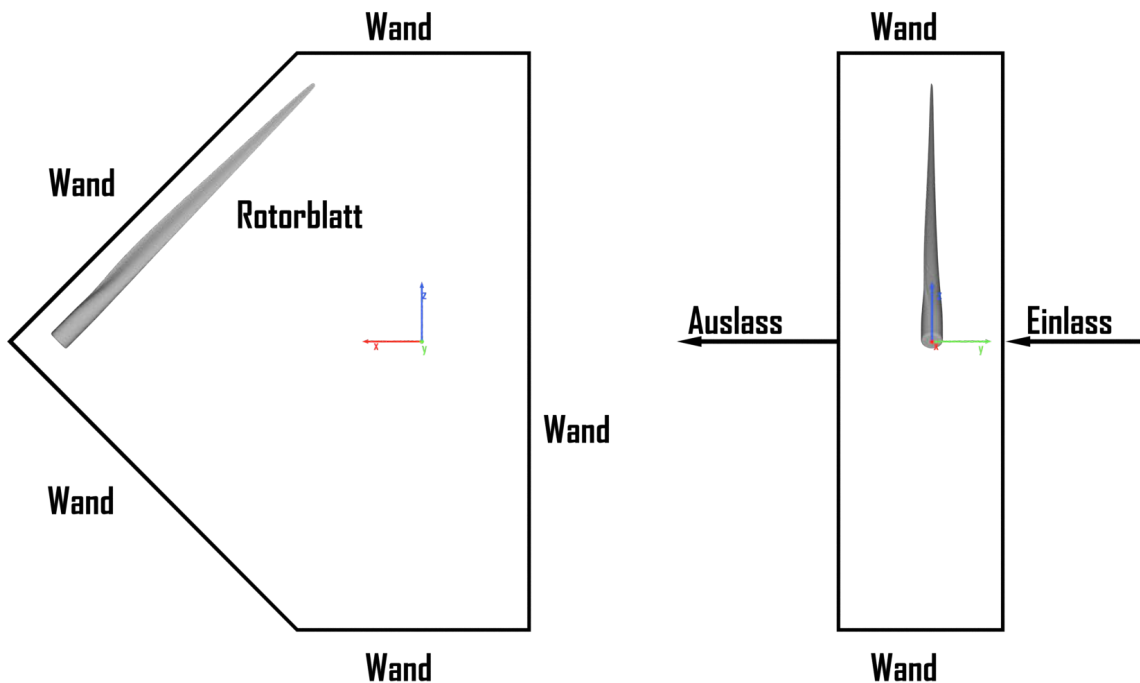


Abbildung 5.10: *Randbedingungen Validierungsmodell*

Am Einlass wird die Windgeschwindigkeit v_{wind} definiert. Der Geschwindigkeitsvektor zeigt in Normalenrichtung der Einlassfläche, also in negative y-Richtung. Zusätzlich wird die Turbulenzintensität I_t aus Tabelle 5.2 vorgegeben.

Am Auslass wird ein Druckauslass vorgegeben. Der vorgegebene Druck beträgt dort 0 bar. Für die Interpretation der Ergebnisse bedeutet dies, dass das berechnete Druckfeld die Abweichung vom Umgebungsdruck p_0 beschreibt. Damit sind auch rechnerisch negative Druckwerte möglich. Die Werte werden erst unplausibel, wenn der Betrag des berechneten negativen Drucks größer als der Umgebungsdruck wird. Dies würde bedeuten, dass ein absoluter Druck $p < 0$ existiert. Das ist

physikalisch nicht möglich. Diese Plausibilitätskontrolle muss bei der Betrachtung des berechneten Druckfeldes durchgeführt werden.

Das Rotorblatt wird als Wand definiert. Für die Rauigkeit dieser Wand wird die Rauigkeitshöhe aus Tabelle 5.2 vorgegeben. Für die verbleibenden Ränder der Domain wird eine reibungsfreie Wand definiert. Das heißt, dass die Scherspannungen, also die Kräfte in tangentialer Richtung, an dieser Wand als Null festgesetzt werden. Die Wand ist in normalen Richtung nicht durchlässig. Damit sind die Randbedingungen des Modells definiert.

5.5.2 Dynamische Berechnungselemente

Zusätzlich zu den Randbedingungen muss das dynamische Netz definiert werden. In Abschnitt 3.5 wird erklärt, wie dieses System in ANSYS Fluent funktioniert. Die Einstellungen für die Deformation des Netzes werden auf den Standardeinstellungen belassen. Für die Neuvernetzung müssen Skewness-Grenzwerte angegeben werden, ab denen eine Zelle neu vernetzt werden soll. Für die Skewness des Zellvolumens wird 0,8 und für die Skewness der Netzoberfläche 0,5 vorgegeben. Zur Erinnerung an Abschnitt 3.3: Bei einem Skewnesswert von Eins spricht man von einer degenerierten Zelle. Zellen zu nahe an diesem Wert können zu numerischen Problemen und nicht konvergierenden Lösungen führen. Setzt man die Werte niedriger an, führt dies zu mehr Neuvernetzungen, da die Zellen die Grenzwerte dann schneller überschreiten. Dies verlängert die Berechnungszeit. Die hier gewählten Werte werden als gute Abwägung zwischen diesen beiden Aspekten angesehen.

Nicht alle Bereiche der Domain müssen oder sollten neu vernetzt oder deformiert werden. Diese können in ANSYS Fluent explizit von dem Einfluss des dynamischen Netzes ausgeschlossen werden. So werden der Einlass, der Auslass und die Wände vom dynamischen Netz exkludiert. Einzige Ausnahme bilden die Wände, an denen sich das Rotorblatt entlang bewegt. Diese sind zum Beispiel in Abbildung 5.5 links und rechts zu sehen. Der Innenraum der Domain verformt und wird neu vernetzt.

Das Rotorblatt rotiert nach der Funktion $\Omega(t)$ um den Blattursprung mit dem in Abschnitt 5.4 definierten Nahbereich zusammen. Auch diese Bereiche werden nicht neu vernetzt. Würde man ANSYS Fluent erlauben, im Nahbereich neu zu vernetzen, würde im ersten Zeitschritt die Randschichtverfeinerung verschwinden. Die Zellen der Randschicht verletzen das gesetzte Skewness-Kriterium, da sie in einer Richtung eine wesentlich kleinere Ausdehnung haben als in den verbleibenden zwei Richtungen. Der Algorithmus für das dynamische Netz würde diese Zellen dadurch sofort ersetzen. Deshalb kann der Nahbereich nicht in das dynamische Netz inkludiert werden und muss sich mit dem Rotorblatt mitbewegen. Der Nahbereich entspricht damit dem beweglichen Netz aus Abschnitt 3.5. Dieses bewegliche Netz ist hier in ein dynamisches Netz eingebettet. Das bedeutet

zusätzlich, dass das Rotorblatt starr ist. Eine Verformung durch die wirkenden Kräfte findet nicht statt.

5.5.3 Zeitschrittweite

Für das Modell muss eine Zeitschrittweite ermittelt werden, mit welcher die Berechnung voranschreitet. Diese Zeitschrittweite ist von verschiedenen Aspekten abhängig. Ein Kontrollkriterium für die Zeitschrittweite ist die Courant-Zahl (CFL) [2](S. 57). Diese ist als:

$$CFL = \frac{v_{max} \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (5.6)$$

definiert. v_{max} ist dabei die maximale Strömungsgeschwindigkeit. Ist die CFL-Zahl Eins, ist sichergestellt, dass die Strömung die Größe einer Zelle Δx nicht in der Zeitschrittweite Δt zurück legen kann. Dies ist vor allem für die Stabilität der Lösung wichtig. Größere CFL-Zahlen als Eins können zu nicht konvergierenden Lösungen führen. In ANSYS Fluent steht ein impliziter Löser zur Verfügung. Dieser ist auch bei höheren CFL-Zahlen als Eins stabil. In dem Buch „Computational Fluid Dynamics for engineers“ wird angegeben, dass ein voll impliziter Löser für alle Zeitschrittweiten stabil sein sollte. Es wird empfohlen, mit einer CFL-Zahl von Fünf zu starten und diese wenn notwendig und möglich zu erhöhen.

In diesem Modell muss noch ein weiterer Aspekt beachtet werden. Wie in Abschnitt 3.5 beschrieben, deformiert das Netz mit dem rotierenden Rotorblatt. Wird die Zeitschrittweite dabei zu grob gewählt, kann es passieren, dass ein „negatives“ Zellvolumen entsteht. Dies führt in ANSYS Fluent zu einem Abbruch der Berechnung. In der folgenden Abbildung ist das für eine Zelle dargestellt.

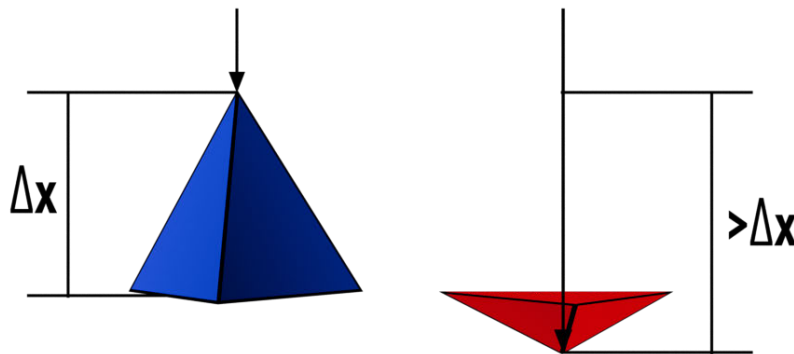


Abbildung 5.11: *Beispiel für ein negatives Zellvolumen*

Die blauen Flächen symbolisieren dabei die „wahren“ Außenflächen der Zelle. Ist die Fläche rot,

ist dies für ANSYS Fluent die Innenseite. Wird die Zeitschrittweite zu groß gewählt, kann es passieren, dass die Zellen quasi „auf links“ gedreht werden. Das kann vorkommen, wenn die Zelle um eine größere Länge als ihre eigene Ausdehnung verformt wird. Um dies zu verhindern, muss die Zeitschrittweite so klein sein, dass das dynamische Netz die deformierte Zelle neu vernetzen kann, bevor ein negatives Volumen auftritt. Tests haben gezeigt, dass die Zeitschrittweite für diesen Aspekt ungefähr der folgenden Formel folgt:

$$\Delta t = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta x}{v_{Blatt}} \quad (5.7)$$

Hierbei ist v_{Blatt} die maximale lineare Geschwindigkeit mit der sich das Blatt fortbewegt. Der Term $\frac{\Delta x}{v_{max}}$ beschreibt die Dauer, die das Blatt braucht, um eine Zelle zu durchqueren. Erfahrungswerte haben gezeigt, dass dieser Wert mit $\frac{1}{4}$ multipliziert werden muss, um negative Zellvolumen sicher zu umgehen.

Die deformierenden Zellen sind außerhalb des Nahbereichs und wie in Abschnitt 5.4 beschrieben 15 cm groß. Die maximale Geschwindigkeit des Rotorblattes liegt an der Blattspitze vor und berechnet sich mit $\Omega \cdot R$ und den Werten aus Tabelle 5.2. Setzt man dies in die Gleichung 5.7 ein, erhält man eine Zeitschrittweite von $\Delta t = 0,0004186s$.

Diese Zeitschrittweite kann in Gleichung 5.6 eingesetzt werden, um die CFL-Zahl zu bestimmen. In dem Modell sind, wie in Abschnitt 5.4 beschrieben, in verschiedenen Bereichen verschieden große Elemente vorhanden. Für die Elementgröße von 15 cm ergibt sich eine CFL-Zahl von 0,25. Für die Zellen im Nahbereich mit einer Größe von 5 cm ergibt sich ein Wert von 0,75. Am kritischsten sind die Zellen in der Randschichtverfeinerung. Die erste Zellschicht hat eine Höhe von 0,05 cm. Die CFL Zahl ist damit 75. In diesen Zellen werden CFL-Zahlen deutlich größer als Eins erreicht. Dies betrifft aber nur wenige Zellen direkt auf der Blattoberfläche. Da in ANSYS Fluent ein impliziter Löser verwendet wird, sind auch CFL-Zahlen größer als Eins akzeptabel. Tests mit dem Modell haben gezeigt, dass trotz der hohen CFL-Zahl eine konvergierende Lösung erreicht werden kann. Damit wird die Zeitschrittweite Δt des Modells auf 0,0004186s gesetzt.

5.5.4 Solvareinstellungen

Um das Modell berechnen zu können, müssen verschiedene Einstellungen für den Löser in ANSYS Fluent gesetzt werden. Das Modell wird transient, also zeitveränderlich, gerechnet. Die Schwerkraft wird vernachlässigt. Als Fluid wird Luft in den Voreinstellungen von ANSYS Fluent verwendet. Das Fluid wird als inkompressibel angenommen. Die Dichte ρ beträgt $1,225 \frac{kg}{m^3}$. Die dynamische Viskosität η ist $1,7894 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}$.

In Abschnitt 3.1 werden verschiedene Diskretisierungsschemata vorgestellt. Hier werden die zweiten Ordnung Aufwind-Schemata genutzt. Tests mit diesem Modell haben gezeigt, dass auch die Schemata zweiter Ordnung stabil sind und zu konvergierenden Lösungen führen.

Als Turbulenzmodell wird ein RANS-Modell genutzt, wie in Abschnitt 4.2 festgelegt wird. Hier wird das *SST* – *k* – ω – *Modell* eingestellt. Dies kombiniert die Vorteile des *k* – ω – *Modells* mit denen des *k* – ϵ – *Modells* [13] (Abschnitt 4.5.2). Die Einstellungen des Modells werden auf den Standardeinstellungen belassen.

Dividiert man die gesamte Simulationszeit aus der Tabelle 5.2 durch die Zeitschrittweite Δt aus Kapitel 5.5.3 und rundet auf den nächsten ganzzahligen Wert, erhält man die Anzahl der notwendigen Zeitschritte. In diesem Modell sind das 838. In jedem Zeitschritt wird, wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, durch Iterieren eine Näherungslösung gefunden. In jedem Zeitschritt werden maximal 20 Iterationen durchgeführt. Sinken die Residuen bei diesen Iterationen von einer zur nächsten um weniger als 0,001 wird der Zeitschritt als konvergiert angesehen. Der Lösungsprozess für diesen Zeitschritt wird dann vor Erreichen der 20 Iterationen beendet. Der Wert 0,001 entspricht der Standardeinstellung in ANSYS Fluent. Damit kann die Berechnung mancher Zeitschritte verkürzt werden und somit auch die gesamte Berechnungszeit verringert werden. Mit diesen Einstellungen kann das Modell gestartet werden.

5.5.5 Abstürze

Im Verlauf der Berechnungen für diese Arbeit hat sich herausgestellt, dass es zu modellspezifischen Abstürzen kommen kann. Der Umgang damit soll hier beschrieben werden. Während der Berechnung kann es passieren, dass sich das Programm ohne Fehlermeldung schließt. In den Verzeichnissen der Berechnung kann eine Fehleraufzeichnung gefunden werden, die auf einen „Cortex-Error“ verweist. Weitergehende Details sind nicht vorhanden. Es kann nicht bestimmt werden, ob es sich bei diesem Problem um einen Fehler im Modell oder einen Fehler im Programm handelt. Durch sukzessives Aktivieren und Deaktivieren verschiedener Modellteile kann die Fehlerquelle eingegrenzt werden.

Die Berechnung von ANSYS Fluent findet auf dem Prozessor (CPU) statt. Moderne CPUs erreichen hohe Rechengeschwindigkeiten durch die Parallelisierung von Aufgaben auf mehreren sogenannten Prozessorkernen. Dies wird auch in ANSYS Fluent genutzt. Die Zellen werden partitioniert, also in Gruppen möglichst gleichmäßig auf die verschiedenen Kerne verteilt. In diesem Modell kommt hinzu, dass sich das Netz in den Zeitschritten verändert. Das heißt, dass die Zellen regelmäßig neu zugeteilt werden müssen. In der Dokumentation [13] wird dies detaillierter in Abschnitt 32.5.6 beschrieben. Bei dieser Neuzuteilung scheint es in manchen Fällen zu einem Fehler

zu kommen, der zu einem direkten Absturz von ANSYS Fluent führt.

Um trotz dieses Problems die Berechnungen durchführen zu können, ist eine Möglichkeit entwickelt worden, mit der dieses Problem umgangen werden kann. Die Berechnung speichert den aktuellen Simulationsstand alle fünf Zeitschritte ab. Nach einem Absturz kann der letzte Simulationsstand geladen werden, um die Berechnung fortzusetzen. Wird dabei allerdings keine Änderung an dem Modell durchgeführt, tritt der Absturz wieder auf. Der Fehler ist also reproduzierbar. Beim Start von ANSYS Fluent gibt der Nutzer die Anzahl der Kerne vor, die das Programm benutzen darf. Wird dieser Wert leicht geändert, zwingt der Nutzer ANSYS Fluent den letzten Speicherstand neu zu partitionieren. Wird die Berechnung nun neu gestartet, schafft es das Programm häufig den Fehler zu vermeiden.

In manchen Fällen ist auch dies nicht ausreichend. Als alternative Lösungsmöglichkeit können die Skewness-Grenzwerte aus Abschnitt 5.5.2 leicht verändert werden. Auch dadurch wird das Programm gezwungen, die Partitionierung in den folgenden Schritten anders durchzuführen und den vorherigen Fehler zu umgehen. Bei der zweiten Methode ist zu beachten, dass es sich dabei um einen Eingriff in die Berechnungseinstellungen während der Rechnung handelt. Dies ist nicht rückwirkungsfrei auf die Berechnungsergebnisse. Sollten in den Ergebnissen dieser Arbeit ungewöhnliche Werte auftreten, die auf diese Lösungsmöglichkeit zurückzuführen sind, werden diese Werte markiert.

Kapitel 6

Plausibilisierung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Modelle zuerst validiert, bevor im nachfolgenden Kapitel eine Analyse erfolgt.

6.1 Netzqualität

In Abschnitt 3.3 wird die Skewness zur Bewertung der Elementqualität eingeführt. Diese wird hier exemplarisch für das Basismodell untersucht. Dieses Modell wird später die eigentliche Berechnung der Rotor-Rotor-Interaktion durchführen. Die Vernetzung aller Modelle erfolgt gleich. Daher sind keine nennenswerten Qualitätsunterschiede zwischen den Modellnetzen zu erwarten. In der folgenden Abbildung ist die prozentuale Verteilung der Skewness aller Elemente zu sehen.

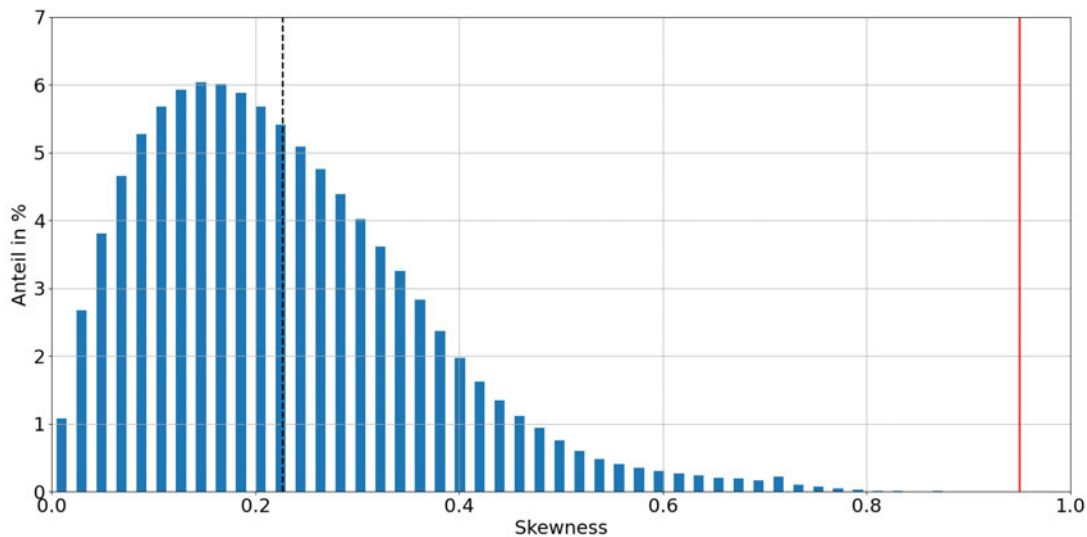


Abbildung 6.1: *Basismodell Netzqualität*

Dabei befindet sich die gestrichelte Linie am Mittelwert der Skewness, der hier für alle Zellen 0,226 beträgt. Dies erfüllt das in Abschnitt 3.3 gennante Kriterium für die mittlere Skewness unter 0,33. Die rote Linie markiert den dort empfohlenen Maximalwert von 0,95. Insgesamt haben 0,00037%

der Zellen einen Wert größer als 0,95. Dieser Wert wird als vernachlässigbar klein angesehen.

Des Weiteren wird der in Abschnitt 3.3 vorgestellte y^+ Wert analysiert. In dem nachfolgenden Diagramm ist der durchschnittliche y^+ Wert jedes Blattelements des linken Rotorblattes (5.6) über der Winkelposition β aufgetragen. Das Blattelement elf direkt an der Grenze der Domain wird hier und auch in allen weiteren Darstellungen nicht mit ausgewertet, da an diesem Element aufgrund der Nähe zur Wand der Domain von unplausiblen Ergebnissen auszugehen ist.

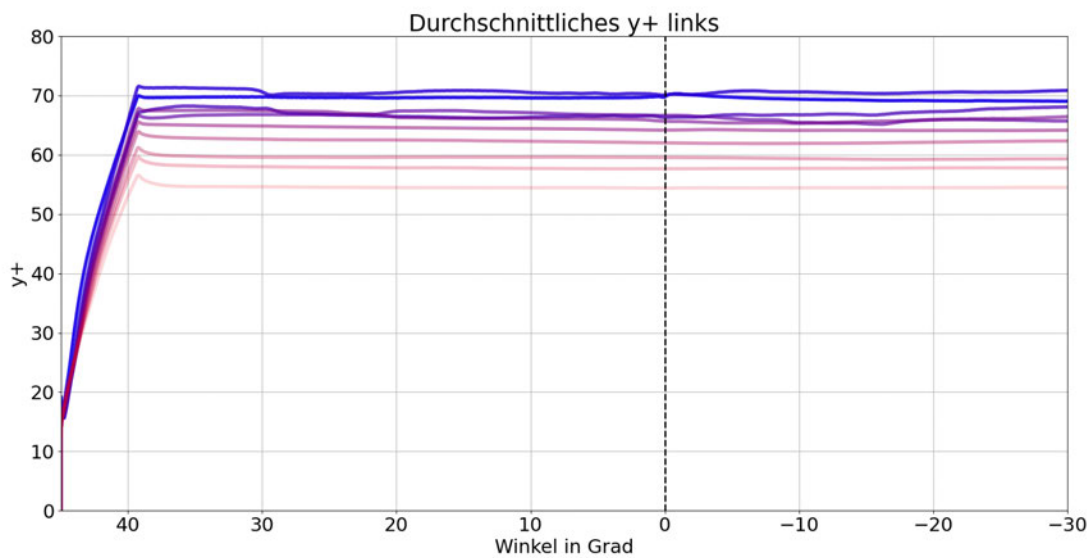


Abbildung 6.2: *Durchschnittlicher Wert von y^+ in den Blattelementen des linken Rotorblattes*

Die Farben sind den verschiedenen Blattelementen zugeordnet. Blau wird dem obersten Blattelement an der Spitze zugeordnet. Die weiteren Elemente werden mit zunehmend roter Farbe und mehr Transparenz dargestellt. In dem Diagramm wird sichtbar, dass sich nach dem Start der Simulation konvergierte Werte für y^+ einstellen. Diese liegen im Bereich zwischen 50 und 75. An der gestrichelten Linie treffen sich die Rotorblätter. In der folgenden Abbildung ist der Maximalwert für jedes Blattelement dargestellt.

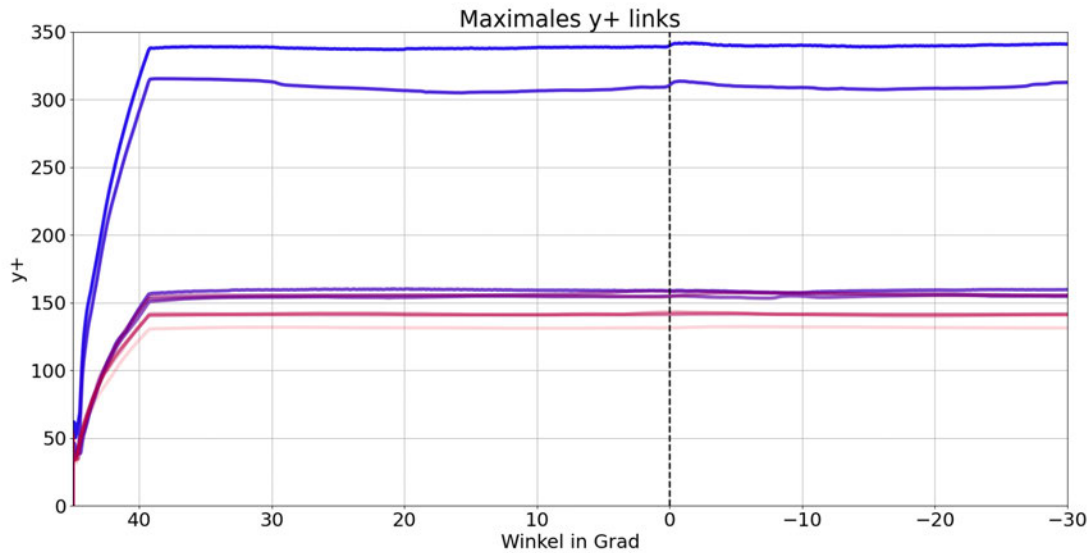


Abbildung 6.3: *Maximaler Wert von y^+ in den Blattelementen des linken Rotorblattes*

Diese Werte sind, wie zu erwarten, größer. Die unteren Blattelemente liegen hier zwischen 130 und 160. Die oberen zwei Elemente erreichen höhere Maximalwerte zwischen 300 und 350. An der gestrichelten Linie ist eine Veränderung der y^+ Werte sichtbar. Dies ist der Einfluss der Rotor-Rotor-Interaktion, da es bei der Interaktion zu einer schnellen Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit kommt. Laut Gleichung 3.8 ist y^+ von der Geschwindigkeit v abhängig. Insgesamt ist damit festzustellen, dass der ideale Wert von $y^+ = 1$ nicht erreicht werden kann. Dafür wäre eine flachere Randschicht als die in Abschnitt 5.4 beschriebenen 0,05 cm notwendig. In Abschnitt 5.5.3 wird bereits gezeigt, dass sich in den Randschichtzellen eine hohe CFL-Zahl ergibt. Tests haben gezeigt, dass bei einer nennenswert weiteren Erhöhung der CFL-Zahl keine konvergierende Lösung mehr möglich ist. Für eine ausreichend feine Randschichtvernetzung müsste die Zeitschrittweite signifikant reduziert werden. Dies würde die Berechnungszeit wiederum verlängern. Halbiert sich zum Beispiel die Zeitschrittweite, verdoppelt sich damit die Anzahl der Zeitschritte und damit auch die gesamte Berechnungszeit. Daher ist in dieser Arbeit keine weitere Verfeinerung der Randschicht möglich. Dies schmälert die Aussagekraft des Modells und muss bei der folgenden Untersuchung der Ergebnisse mit beachtet werden.

6.2 Konvergenz

In Abschnitt 3.1 wird das Residuum vorgestellt. In jedem Zeitschritt werden Iterationen zur Berechnung der Lösung durchgeführt. Das Residuum sagt aus, wie weit die momentane Lösung von der Erfüllung des Gleichungssystems abweicht. Wird der Wert Null, ist das Gleichungssystem exakt gelöst. In der folgenden Abbildung sind die Residuen der verschiedenen Größen beispielhaft für den Zeitschritt 500 des Basismodells dargestellt.

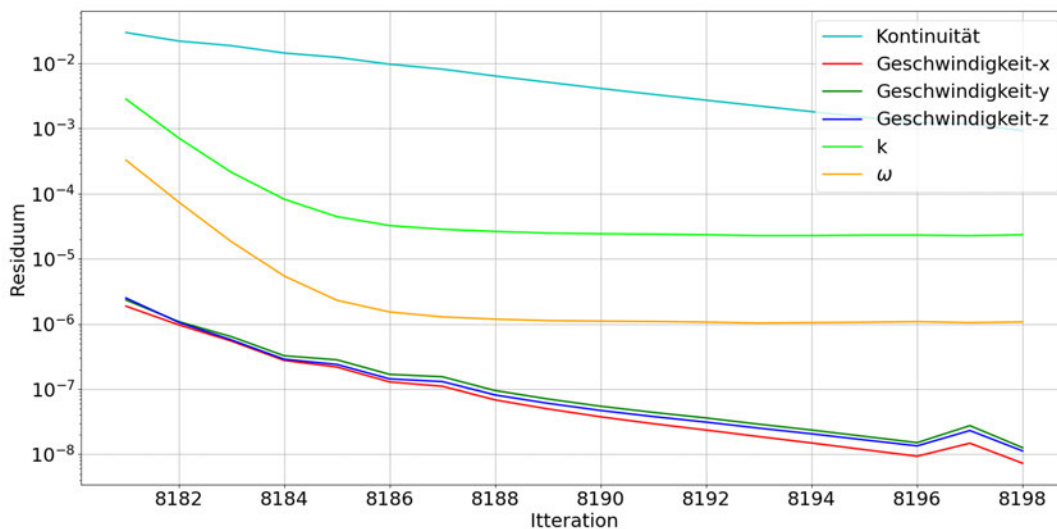


Abbildung 6.4: Residuen des Basismodell im Zeitschritt 500

Auf der Abszisse sind die Iterationen des Zeitschritts aufgetragen. In ANSYS Fluent werden die Iterationen kontinuierlich weitergezählt. Der Iterationsindex beginnt nicht wieder bei Null in jedem Zeitschritt. Dieser Zeitschritt beginnt bei Iteration 8181 und endet bei 8198. Es wird sichtbar, dass die Residuen wie erwünscht sinken. Die Residuen sinken um ungefähr zwei Zehnerpotenzen. Am geringsten sinkt das Residuum der Kontinuität. Es beschreibt, wie gut die Gleichung 3.2 erfüllt wird. Insgesamt werden die Residuen in diesem Zeitschritt als akzeptabel angesehen. Dieser Zeitschritt ist exemplarisch für andere Zeitschritte und Modelle. In der nächsten Abbildung sind die Werte des Residuums in der jeweils letzten Iteration der Zeitschritte dargestellt. Dies wären für Zeitschritt 500 in Abbildung 6.4 zum Beispiel die Werte in Iteration 8198.

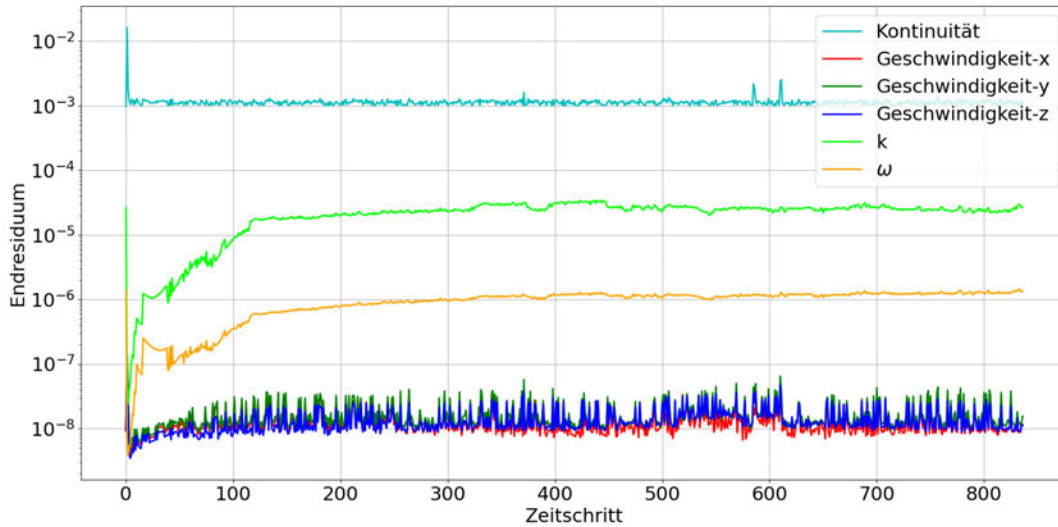


Abbildung 6.5: *Endresiduen des Basismodells in den Zeitschritten*

Zu sehen ist, dass die Endwerte ab Zeitschritt 200 ungefähr konstant bleiben. Das heißt, dass in den Zeitschritten immer ungefähr das gleiche Endresiduum erreicht wird. Das Gleichungssystem wird ab Zeitschritt 200 immer gleich gut gelöst. Die Schwankungen vor Zeitschritt 200 sind auf das Beschleunigen des Rotorblattes zurückzuführen. Die zu berechnenden Werte unterliegen dort selbst größeren Schwankungen. Die Residuen für die Geschwindigkeitskomponenten sind dabei am kleinsten. Insgesamt werden die Residuen für das ganze Modell als gut genug für eine aussagekräftige Rechnung angesehen. Zu beachten ist hierbei, dass die Residuen nur beschreiben, wie gut das Gleichungssystem gelöst werden konnte. Das ist keine Garantie, dass der grundsätzliche Modellierungsansatz korrekt ist. Es zeigt aber, dass eine konvergierende Lösung für das Modell existiert.

6.3 Validierungsmodell

Als nächstes werden die Ergebnisse aus dem Validierungsmodell genutzt, um das Modell zu validieren. Dafür werden die berechnete Schubkraft und das berechnete Schwenkmoment mit den jeweiligen Referenzwerten verglichen. Wie in Abschnitt 3.4 erklärt, bestimmt ANSYS Fluent die Kräfte und Momente, die vom Fluid auf das Rotorblatt wirken. Die Berechnung des Referenzwerts der Schubkraft erfolgt mit Gleichung 2.1. Der dort berechnete Wert muss mit $\frac{1}{3}$ multipliziert werden. Im Validierungsmodell wird nur ein Blatt berechnet, während die Referenzanlage drei Rotorblätter besitzt. Die Berechnung des Referenzschwenkmoments erfolgt aus der Division von Leistung P durch die Winkelgeschwindigkeit Ω und durch Multiplikation mit $\frac{1}{3}$. Die Leistung wird mit Gleichung 2.2 bestimmt. Als Eingabegrößen dienen die Werte aus Tabelle 5.1. Für die Schubkraft ergibt sich folgendes Diagramm:

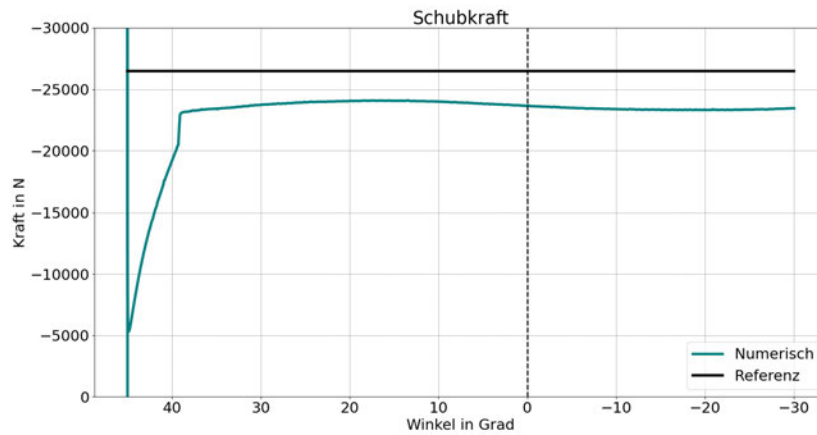


Abbildung 6.6: Schubkraft aus dem Validierungsmodell bei 10 m/s

Auf der Abszisse ist der Positionswinkel β des Rotorblattes aufgetragen. Die schwarze Linie markiert den Referenzwert bei 26 482 N. In Türkis ist die berechnete Schubkraft aus ANSYS Fluent über der Zeit aufgetragen. Die Beschleunigungsphase bis 0,05 Sekunden ist eindeutig erkennbar. Die Schubkraft beträgt nach der Beschleunigungsphase im Durchschnitt 23 629 N. Im Durchschnitt ist die berechnete Schubkraft 11% niedriger als der Referenzwert. Die Schubkraft unterliegt nach der Beschleunigungsphase leichten Schwankungen. Die gestrichelte Linie markiert den Zeitpunkt, an dem die Rotorblätter bei 0 Grad aufeinander treffen würden. Im Validierungsmodell ist nur ein Blatt vorhanden. Als nächstes wird das Schwenkmoment dargestellt.

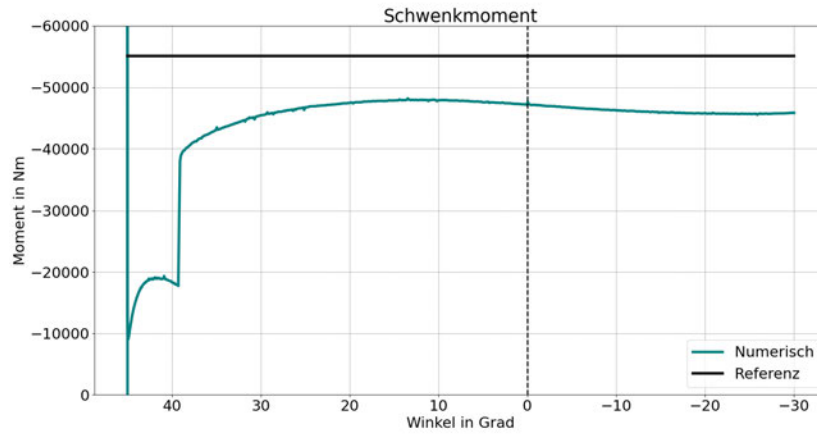


Abbildung 6.7: *Schwenkmoment aus dem Validierungsmodell bei 10 m/s*

Der Kurvenverlauf des Schwenkmoments ist ähnlich zu dem Verlauf der Schubkraft. Auch das Schwenkmoment ist nach der Beschleunigungsphase nicht ganz konvergiert und schwankt leicht. Das Schwenkmoment erreicht nach der Beschleunigung einen Mittelwert von 46 159 Nm. Der Referenzwert beträgt 55 086 Nm. Das Schwenkmoment aus ANSYS Fluent ist um 16% kleiner als der Referenzwert.

Die Abweichung der Berechnungsergebnisse von den Referenzgrößen kann verschiedene Gründe haben. Zum einen ist der y^+ Wert, wie in Abschnitt 6.1 festgestellt, zu groß. Zum anderen ist das gewählte Turbulenzmodell zu simpel, um die Schubkraft und das Schwenkmoment genau zu reproduzieren. Zusätzlich kann sich die Geometrie des Blattprofils durch die verschiedenen Dateiformat-Konvertierungen leicht verändert haben. Das hätte einen Einfluss auf die berechneten Größen.

Zur weiteren Plausibilisierung der Ergebnisse sollen das errechnete Druckfeld und die daraus resultierenden Kräfte dargestellt werden. Um die Auftriebs- und Widerstandskraft darstellen zu können, muss der Anströmwinkel bestimmt werden. Dies ist mit Gleichung 2.6 möglich. Der tangentielle Induktionsfaktor a' wird mit Null angenommen. Der axiale Induktionsfaktor a wird aus dem errechneten Geschwindigkeitsfeld bestimmt. Die Geschwindigkeit in der Rotorebene sollte geringer sein, als die Windgeschwindigkeit v_{wind} weit von der Anlage entfernt. Im folgenden Diagramm ist die Geschwindigkeit in y-Richtung dargestellt. Diese wird beispielhaft für das achte Blattelement ausgewertet. Die Daten werden entlang einer Messlinie vom Einlass der Domain bis zur Vorderkante des Rotorblatts entnommen.

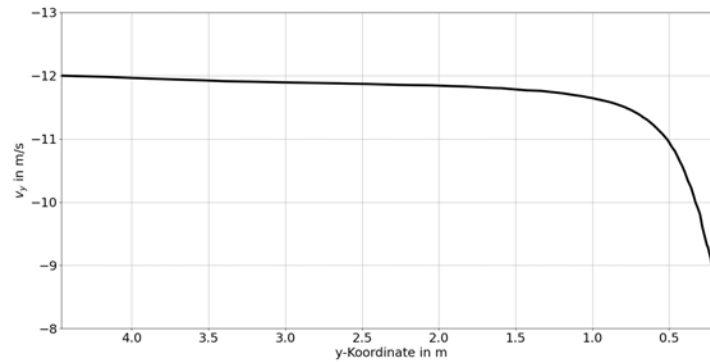


Abbildung 6.8: *Geschwindigkeit in y-Richtung bis zur Blattvorderkante*

Die Geschwindigkeit ist am Einlass links wie vorgeben -12 m/s. Das negative Vorzeichen resultiert einzig aus der Richtung der Strömung. An der y -Koordinate 0 befindet sich die Rotorebene, in der sich das Rotorblatt befindet. Es wird sichtbar, dass die Geschwindigkeit in Richtung des Rotorblatts sinkt. Die niedrigste Geschwindigkeit beträgt ungefähr $8,7$ m/s. Stellt man Gleichung 2.3 nach a um, kann man diesen berechnen. Der Induktionsfaktor ist damit $0,275$. Damit kann der Anströmwinkel nach Gleichung 2.6 bestimmt werden.

In den nachfolgenden Abbildungen sind das errechnete Druckfeld und die daraus resultierenden äußeren Kraftvektoren dargestellt. Dies erfolgt exemplarisch für Rotorblattelement acht.

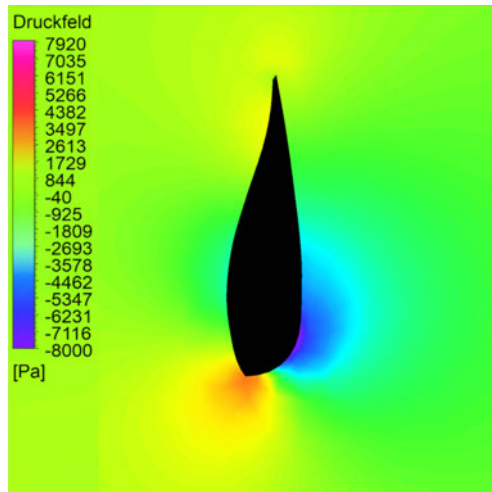


Abbildung 6.9: *Druckfeld bei $r/R = 0,9$ und 10 m/s*

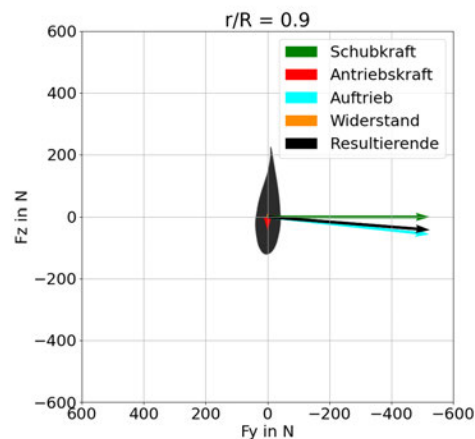


Abbildung 6.10: *Kräfte am Profil bei $r/R = 0,9$ und 10 m/s*

In der linken Abbildung ist das errechnete Druckfeld bei einem Positionswinkel β von 0 Grad dargestellt. Der Wind strömt das Profil von links an. Durch die Rotation wird das Profil zusätzlich von unten angeströmt. Auf der Wind abgewandten Seite des Profils rechts ergibt sich ein Unterdruck. In dieser Ansicht unterhalb des Profils entsteht ein Überdruck. Die errechneten Drücke liegen zwischen plus und minus 8000 Pa. Wie in Abschnitt 5.5.1 beschrieben, gibt das berechnete Druckfeld die Abweichung vom absoluten Druck p_0 an. Nimmt man an, dass $p_0 \approx 1$ bar ist, sind die Ergebnisse plausibel. 1 bar entspricht 100 000 Pa. Subtrahiert man vom Umgebungsdruck p_0 den minimalen Druck des Druckfeldes mit einem Wert von -8000 Pa, ergibt sich ein absoluter Druck $p > 0$.

In der rechten Abbildung 6.10 sind die aus dem Druckfeld resultierenden Kräfte dargestellt. In Rot ist die Antriebskraft aufgetragen, aus der das Schwenkmoment resultiert. Diese zeigt nach unten. In Grün ist die Gegenkraft zur Schubkraft aufgetragen. Wie bereits erwähnt, berechnet ANSYS Fluent die äußeren Kräfte vom Fluid auf das Rotorblatt. Die Schubkraft wirkt per Definition vom Blatt auf das Profil. Wenn das Blatt nicht beschleunigt wird, müssen sich alle äußeren und inneren Kräfte am Profil im Gleichgewicht befinden. In Orange und Türkis sind Widerstands- und Auftriebskraft dargestellt. Die Richtung dieser Kräfte resultiert aus dem Anströmwinkel, der weiter oben bestimmt wird.

Vergleicht man Abbildung 6.10 mit Abbildung 2.4 wird sichtbar, dass das Modell konzeptionell die gleichen Ergebnisse produziert wie in Abbildung 2.4. Die Widerstandskraft und die Antriebskraft sind im Vergleich zu den anderen Kräften klein und daher in der Abbildung schwer zu erkennen. Abschließend ist festzuhalten, dass das Validierungsmodell plausible Werte produziert. Die Abweichungen zu den Referenzgrößen sind kleiner als 20%. Das Druckfeld und die daraus resultierenden Kräfte entsprechen den Vorgaben aus der Literatur, wie sie in Abschnitt 7.2 beschrieben werden.

Mögliche Gründe für die Abweichung könnten in unzureichend feiner Vernetzung oder einem unzureichenden Turbulenzmodell liegen. In Abschnitt 6.1 wird festgestellt, dass der y^+ Wert zu groß ist. Eine feinere Randschichtvernetzung könnte die Abweichung minimieren. In Abschnitt 3.2 werden die verschiedenen Turbulenzmodelle vorgestellt. Das hier gewählte RANS-Modell vereinfacht das Strömungsverhalten stärker als zum Beispiel das LES- oder DES-Modell. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass es durch den Geometrie-Import durch Blender in ANSYS Fluent zu einer Veränderung der Geometrie gekommen ist. Vergleicht man die Profile in Abbildung 6.9 und 6.10 wird sichtbar, dass die Profilform nicht identisch ist. Das Profil in ANSYS Fluent besitzt eine schärfere Vorderkante als das Ursprungsprofil.

Kapitel 7

Ergebnisdarstellung

Nachdem der Modellaufbau validiert ist, werden hier die Ergebnisse aus dem Basismodell betrachtet. Dort wird die Rotor-Rotor-Interaktion berechnet.

7.1 Strömungsdarstellung

In diesem Abschnitt erfolgt eine visuelle Betrachtung des errechneten Strömungsfeldes. Die Ergebnisse werden für die Positionswinkel β -3, 0 und 3 Grad dargestellt. Die Definition der Winkel erfolgt in 5.2. In der folgenden Abbildung ist ein Ausschnitt des Geschwindigkeitsfelds dargestellt.

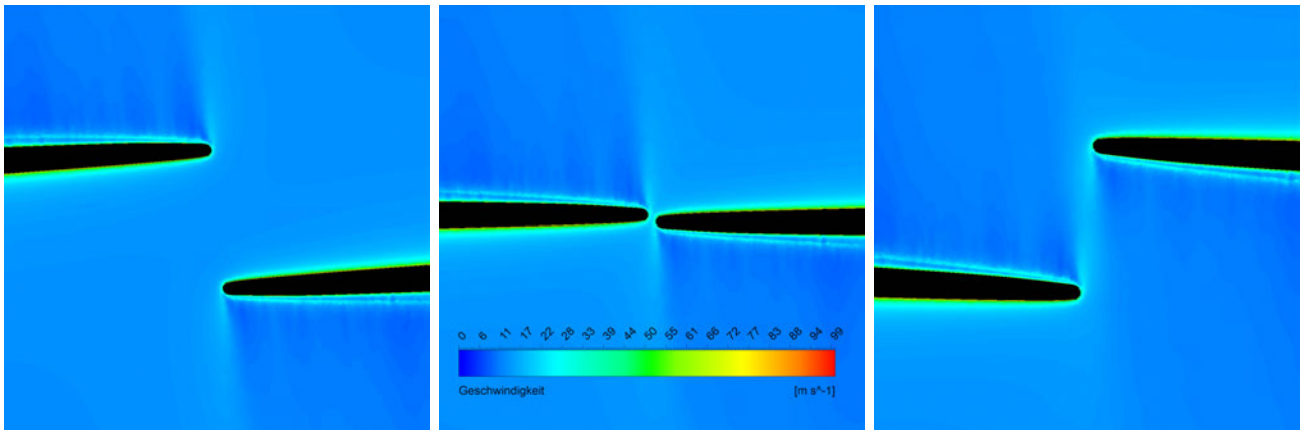


Abbildung 7.1: Geschwindigkeitsfeld bei 3, 0 und -3 Grad

Dabei ist der Betrag der Geschwindigkeit dargestellt, also $|\vec{v}|$. Die Rotorblätter ziehen einen Bereich mit einem Geschwindigkeitsdefizit hinter sich her. An den Blattspitzen ist die Geschwindigkeit erhöht. In der Nähe der Blätter bewegt sich die Strömung mit der gleichen Geschwindigkeit wie die Rotorblätter. Die maximale Geschwindigkeit entspricht direkt in Blattnähe ungefähr $\Omega \cdot R$. Effekte, die eindeutig der Rotor-Rotor-Interaktion zuzuordnen sind, sind nicht erkennbar. Als nächstes wird das Geschwindigkeitsvektorfeld dargestellt.

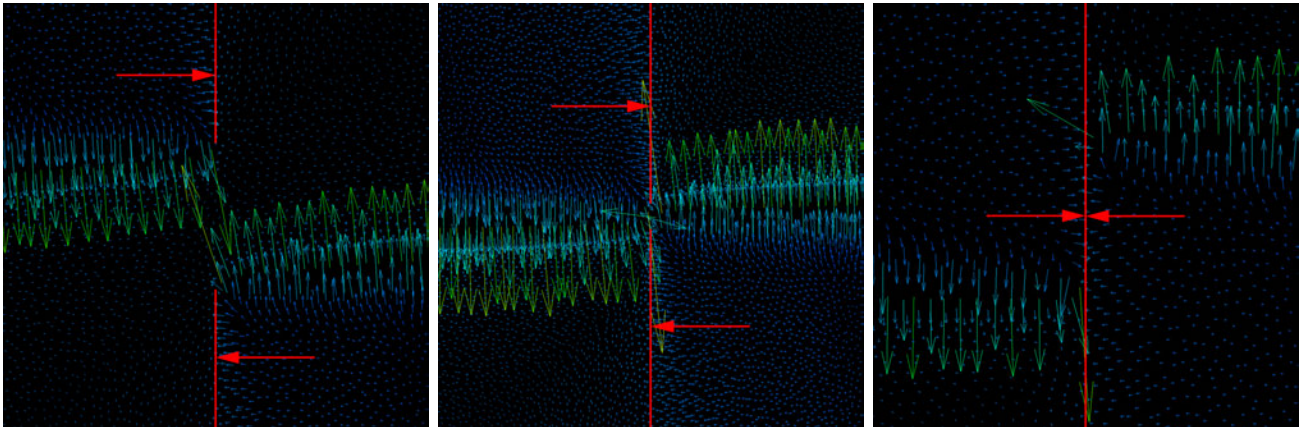


Abbildung 7.2: *Geschwindigkeitsvektorfeld bei 3, 0 und -3 Grad*

In der Nähe des Blattes sind die längsten Vektoren, also die mit der höchsten Geschwindigkeit, sichtbar. Wie bereits in der vorherigen Abbildung zu sehen, bewegt sich das Fluid in der Nähe des Rotorblatts mit annähernd der gleichen Geschwindigkeit wie das Blatt. Der vorherige beschriebene Bereich mit einem Geschwindigkeitsdefizit wird auch hier sichtbar. Am Rande des Bereichs bewegt sich das Fluid in radialer Richtung nach außen. Das wird zusätzlich mit roten Pfeilen und Linien verdeutlicht. Bei der Rotor-Rotor-Interaktion treffen diese beiden Strömungsfronten aufeinander. Eindeutige Effekte, die der Rotor-Rotor-Interaktion zuzuordnen sind, sind auch hier nicht zu erkennen.

7.2 Lasten am Rotorblatt

An dem Rotorblatt entstehen verschiedene Kräfte und Moment, wie in Abschnitt 2.2 erläutert. Hier werden die Schubkraft, das Schwenkmoment und die Radialkraft betrachtet. Die Radialkraft zeigt in dieser Arbeit entlang der Blattachse. In dem in Abbildung 5.5 eingeführten Blattkoordinatensystem entspricht das der z_b -Achse.

7.2.1 Schwenkmoment

Zuerst werden hier die Ergebnisse für das Schwenkmoment dargestellt. In der folgenden Abbildung ist das Schwenkmoment aus dem Basismodell dargestellt. In diesem Modell werden die oberen 30% des Rotorblattes berechnet. Zum Vergleich wird auch das errechnete Schwenkmoment der oberen 30% aus dem Validierungsmodell aufgetragen.

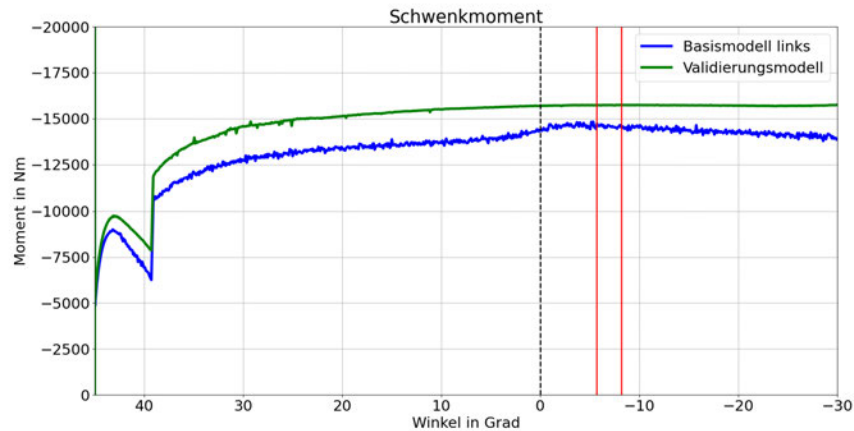


Abbildung 7.3: *Schwenkmoment aus dem Basismodell*

In dieser Abbildung wird sichtbar, dass das Schwenkmoment im Basismodell niedriger ist als das Moment im Validierungsmodell. An der gestrichelten Linie treffen die Blätter aufeinander. In den Ergebnissen des Basismodells ist zu erkennen, dass es durch die Interaktion zu einer Erhöhung des Schwenkmoments kommt. Die zwei roten Linien markieren Abstürze des Modells, die nur durch Veränderung der Skewness-Grenzwerte des dynamischen Netz umgangen werden konnten. Dieses Vorgehen wird in Abschnitt 5.5.5 erläutert. An den markierten Stellen kann es zu unplausiblen Abweichungen der Ergebnisse kommen. Um die generelle Abweichung zwischen Validierungsmodell und Basismodell weiter zu untersuchen, wird das folgenden Diagramm erzeugt.

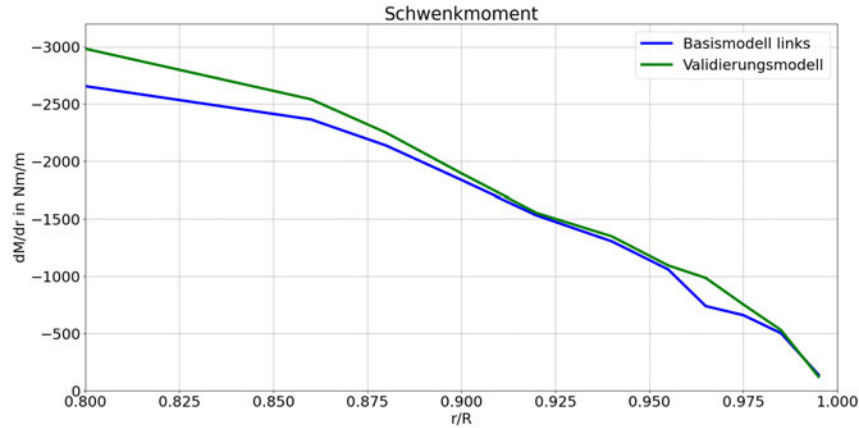


Abbildung 7.4: *Schwenkmoment-Verteilung im Validierungs- und Basismodell bei 3 Grad*

Auf der Abszisse ist die radiale Position r/R aufgetragen. Auf der Ordinate ist die radiale Ableitung des Schwenkmoments dM/dr aufgetragen. Summiert man die Werte aller Blattelemente auf, erhält man das gesamte Schwenkmoment dieser Blattelemente. Hier wird sichtbar, dass die Abweichung mit niedrigerem Wert von r/R zunimmt. Im Basismodell existiert bei $r/R = 0,7$ eine reibungsfreie Wand. Diese hat dennoch einen Einfluss auf das Strömungsfeld. Die zunehmende Abweichung bei kleinerem r/R ist darauf zurückzuführen. Allerdings ist in dieser Abbildung auch eine Abweichung bei $r/R = 0,965$ zu sehen. Diese wird nicht durch die glatte Wand entstanden sein. Diese Abweichung deutet darauf hin, dass die Ergebnisse nicht netzunabhängig sind. In beiden Modellen wird das Netz mit den gleichen Einstellungen erzeugt. Das kann trotzdem bedeuten, dass die individuelle Form und Position der Zellen nicht exakt gleich ist. Durch ein leicht anderes Netz entstehen auch andere Ergebnisse. Wenn das Netz fein genug wäre, würde diese Abweichung vernachlässigbar klein werden. Das ist hier nicht der Fall. Generell sind die Abweichungen in dieser Verteilung klein. Beide Modelle berechnen den gleichen Trend, mit ähnlichen Werten. Die Aussagekraft sinkt mit zunehmender Annäherung an die Domaingenzen des Basismodells. In dieser Arbeit ist vor allem das Verhalten an der Blattspitze relevant. Damit ist insgesamt festzustellen, dass die Vereinfachung des Basismodells zulässig ist.

Um in der weiteren Auswertung nur die Rotor-Rotor-Interaktion zu isolieren, wird eine Korrekturfunktion eingeführt. In der Auswertung wird die durchschnittliche Differenz des Schwenkmoments zwischen dem Validierungsmodell und dem Basismodell im Bereich 13 Grad bis 3 Grad für jedes Blattelement berechnet. Bei einem Abstand von 3 Grad vor der Interaktionsposition von $\beta = 0$ Grad wird davon ausgegangen, dass in die Korrekturfunktion nicht die Rotor-Rotor-Interaktion mit einbezogen wird. Betrachtet man Abbildung 7.3 beginnt die Interaktion ungefähr 3 Grad vor

dem Treffpunkt der Blätter. Die Ergebnisse des Validierungsmodells werden um die Werte dieser Korrekturfunktion in jedem Blattelement korrigiert. Die sich daraus neu ergebene Verteilung ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

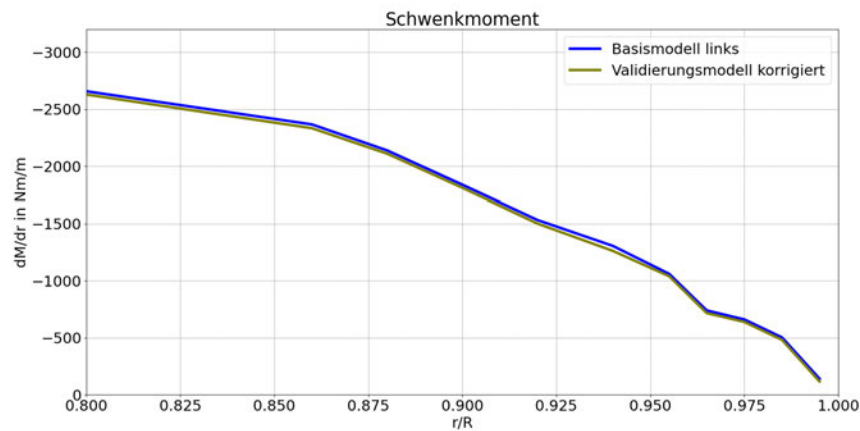


Abbildung 7.5: *korrigierte Schwenkmoment-Verteilung im Validierungs- und Basismodell bei 3 Grad*

Hierbei wird sichtbar, dass der Abstand zwischen den beiden Schwenkmomentverteilungen minimiert werden konnte.

Um eine genauere Analyse der Veränderungen des Schwenkmoments durchzuführen, werden in der nächsten Abbildung die Schwenkmomente der oberen zehn Blattelemente individuell dargestellt. Dabei wird zusätzlich der Vergleichswert und der korrigierte Vergleichswert aus dem Validierungsmodell mit eingezeichnet.

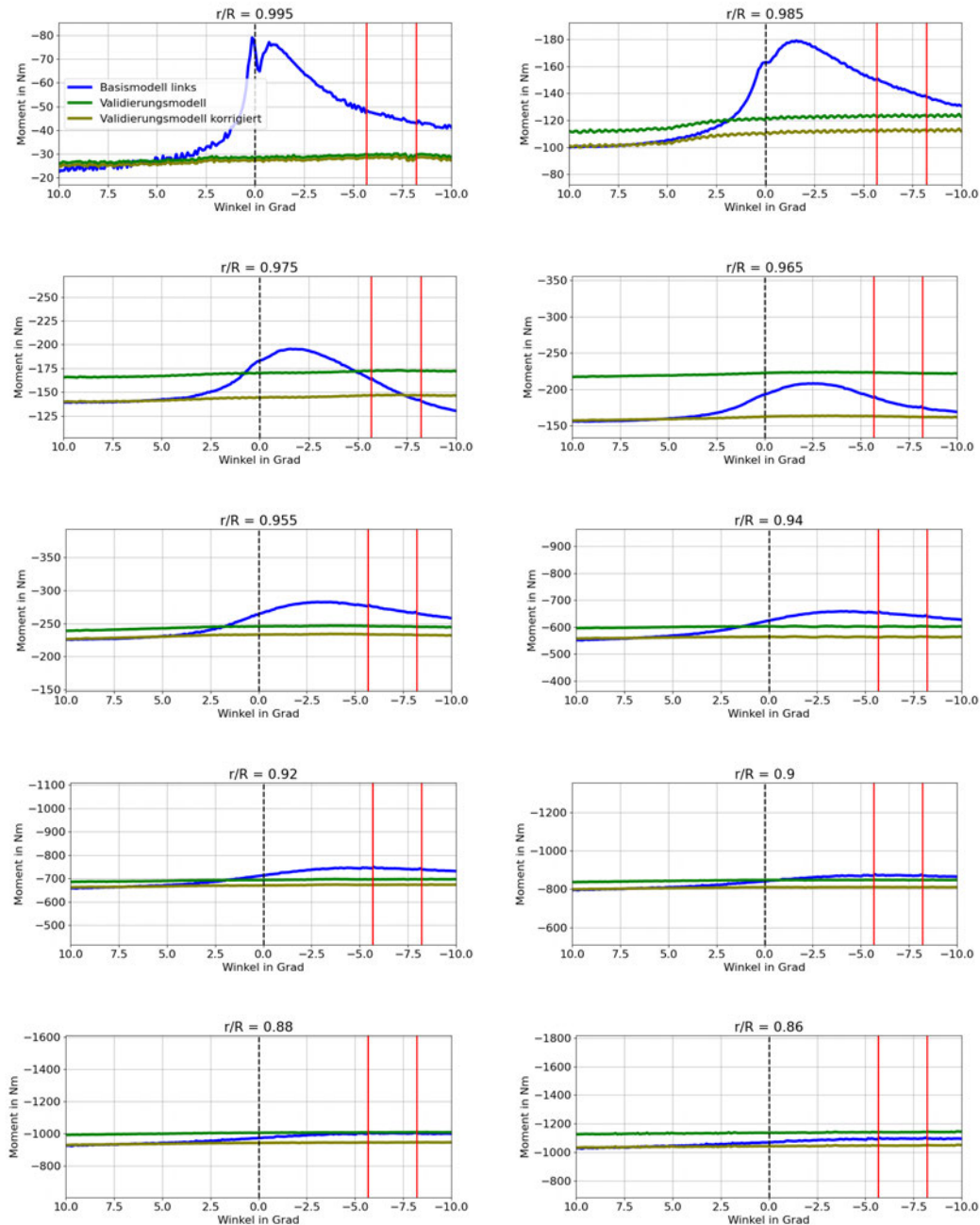


Abbildung 7.6: Schwenkmomente der einzelnen Blattelemente

Die stärkste Steigerung des Schwenkmoments findet im ersten Element statt. Dort steigt das Moment von ungefähr 30 Nm auf 80 Nm. Im ersten Blattelement steigt das Moment erst und sinkt danach wieder. Dann erhöht es sich wieder, bis es wieder sinkt und sich dem ursprünglichen Wert annähert. In den anderen Elementen kommt es zu einer Steigerung des Moments. Nach

der Interaktion sinkt das Moment wieder und nähert sich dem ursprünglichen Wert an. Auffällig sind dabei Element drei und vier. Dort sinkt das Moment nach der Interaktion teilweise unter den Referenzwert und steigt dann nochmal wieder an. Mit zunehmendem Abstand zur Blattspitze nimmt die Intensität der Veränderung ab. In allen Elementen ist eine Veränderung erkennbar. In der nächsten Abbildung wird die prozentuale Abweichung des Schwenkmoments aus dem Basismodell zu den korrigierten Werten des Validierungsmodells dargestellt.

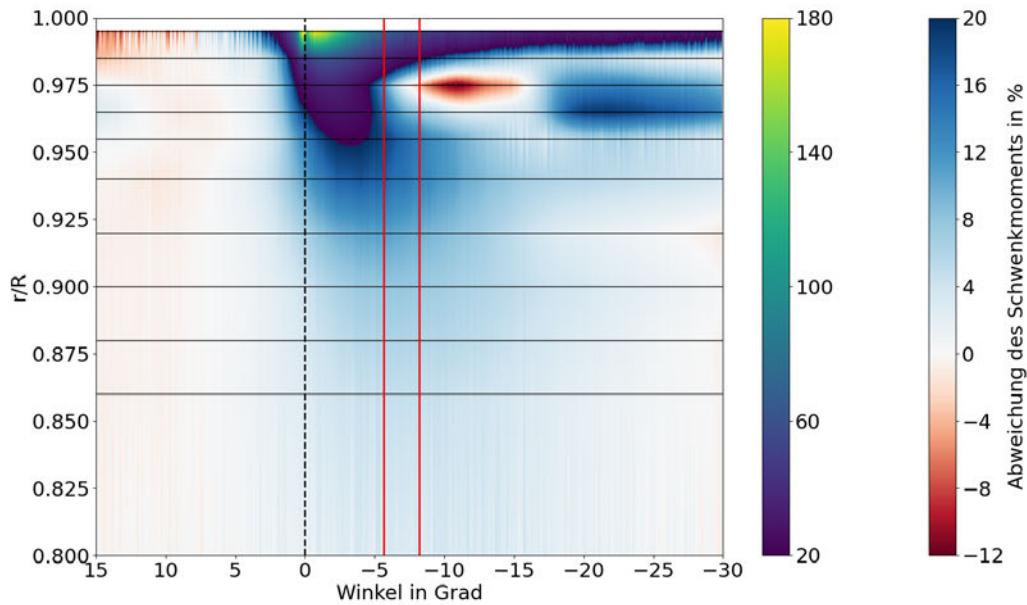


Abbildung 7.7: *prozentuale Abweichung des Schwenkmoments*

Auf der Abszisse ist hier der Positionswinkel β des Blattes aufgetragen. Zur Erinnerung: positive Winkel sind vor der Interaktion, negative nach der Interaktion. Auf der Ordinate ist die radiale Position r/R aufgetragen. In dieser Darstellung werden zwei Farbskalen genutzt. Die prozentualen Abweichungen sind in den oberen Blattelementen wesentlich größer als in den unteren. Würde man für alle die gleiche Farbskala verwenden, wären die Effekte bei niedrigeren Werten von r/R nicht mehr erkennbar. In einem divergierenden Farbverlauf von rot zu blau sind die Abweichungen zwischen -12% und 20% eingetragen. Die Farbe Weiß entspricht dabei einem Wert von 0% . Für Abweichungen größer als 20% wird die zweite Skala genutzt, die bis 180% reicht. Vor der Interaktion ist die Abweichung ungefähr 0% . Im obersten Blattelement kommt es kurzzeitig zu einer Steigerung um 180% bezogen auf den Referenzwert. In den obersten fünf Blattelementen ist die maximale Steigerung des Schwenkmoments größer als 20% . Für Werte von $r/R < 0.9$ ist die prozentuale Abweichung so klein, dass keine Veränderung mehr erkennbar ist. In Blattelement drei

kommt es nach der Interaktion als einziges zu einem Sinken des Schwenkmoments um -12% . Dies hält nur kurz an. Die Effekte der Rotor-Rotor-Interaktion sind beim Ende der Simulationsrechnung bei -30 Grad noch nicht abgeklungen.

Zuletzt wird hier die prozentuale Änderung bezogen auf das gesamte Schwenkmoment des Blattes dargestellt. In der vorherigen Abbildung ist dies für die Werte innerhalb der Blattelemente erfolgt. Das gesamte berechnete Schwenkmoment ist nur im Validierungsmodell vorhanden, da nur dort ein ganzes Rotorblatt gerechnet wird. Es beträgt dort, wie in Abbildung 6.7 zu sehen, ungefähr $46\,000$ Nm. Im Basismodell werden nur die oberen 30% gerechnet. Diese erzeugen ein Schwenkmoment von ungefähr $13\,000$ Nm. Um für das Basismodell ein gesamtes Schwenkmoment zu erhalten, wird zu diesen $13\,000$ Nm der Wert der unteren 70% addiert. Ein Einfluss der Rotor-Rotor-Interaktion auf die unteren 70% des Blattes ist nicht zu erwarten. Damit steht ein gesamtes Schwenkmoment des Blattes mit und ohne Interaktion zur Verfügung. Die Korrekturfunktion, die bereits erwähnt wurde, wird auf die Ergebnisse des Validierungsmodells angewandt. Berechnet man den prozentualen Unterschied zwischen den beiden gesamten Schwenkmomenten, ergibt sich das folgende Diagramm.

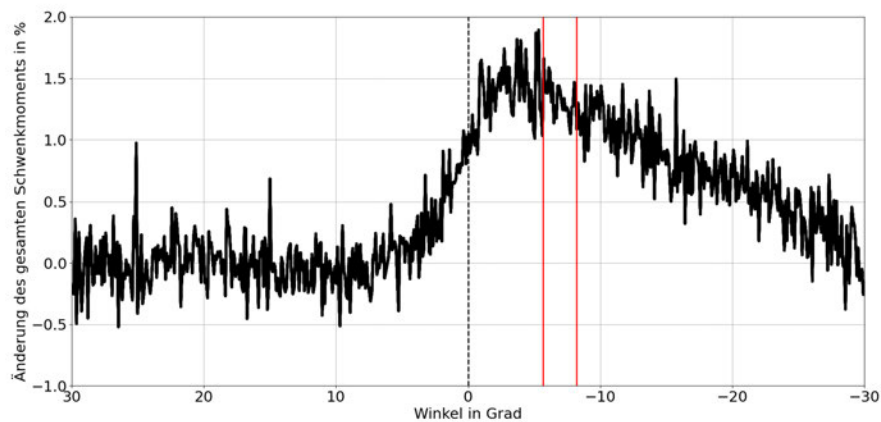


Abbildung 7.8: *prozentuale Abweichung des gesamten Schwenkmoments*

Bezogen auf das gesamte Schwenkmoment erzeugt die Rotor-Rotor-Interaktion eine Steigerung von ungefähr $1,5\%$. In diesem Diagramm erreicht das Schwenkmoment seinen ursprünglichen Wert nach 30 Grad. Obwohl die Änderung in den individuellen Blattelementen deutlich größer ist, ändert sich das gesamte Schwenkmoment wenig. Die oberen Elemente des Blattes erfahren zwar große Änderungen des Moments, ihr Beitrag zum gesamten Moment ist aber gering.

7.2.2 Schubkraft

Eine ähnliche Betrachtung erfolgt nun für die Schubkraft. In der nächsten Abbildung ist die Schubkraft aus dem Basismodell und die Schubkraft der oberen 30% aus dem Validierungsmodell dargestellt.

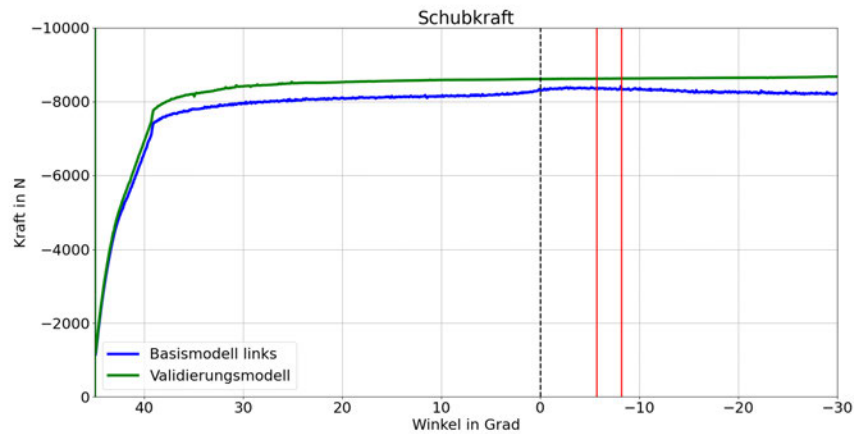


Abbildung 7.9: *Schubkraft aus dem Basismodell*

Wie beim Schwenkmoment existiert hier eine Abweichung zwischen dem Basismodell und dem Validierungsmodell. Eine Erhöhung der Schubkraft ist zu erkennen. In der folgenden Abbildung ist die Verteilung der Schubkraft über das Rotorblatt dargestellt.

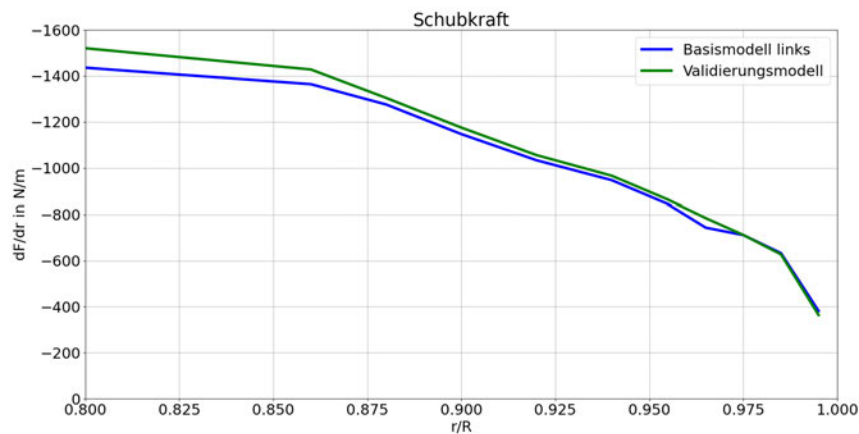


Abbildung 7.10: *Schubkraft-Verteilung im Validierungs- und Basismodell bei 3 Grad*

Wie beim Schwenkmoment steigt die Abweichung zwischen den beiden Modellen mit zunehmendem Abstand zur Blattspitze. Insgesamt produzieren beide Modelle ähnliche Verteilungen der Schubkraft. Um die Rotor-Rotor-Interaktion zu isolieren, wird die Korrekturfunktion, die in Abschnitt 7.2.1 für das Schwenkmoment beschrieben wird, hier für die Schubkraft angewandt. Damit ergibt sich die folgende korrigierte Verteilung.

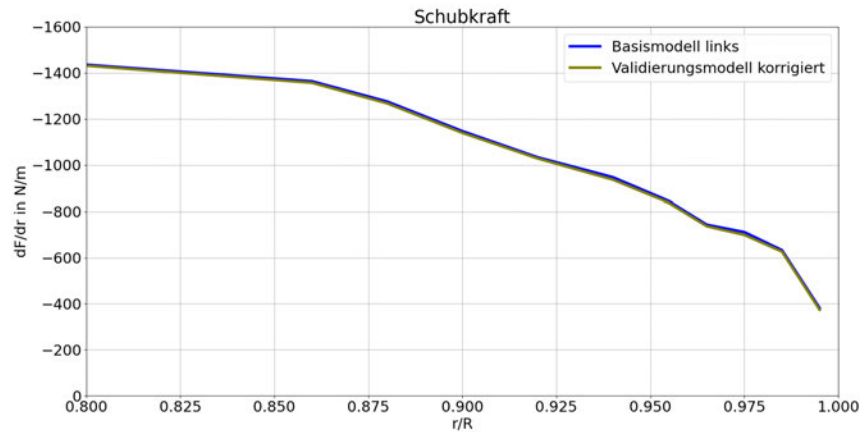


Abbildung 7.11: *korrigierte Schubkraft-Verteilung im Validierungs- und Basismodell bei 3 Grad*

Wie beim Schwenkmoment wird auch hier deutlich, dass die Korrekturfunktion die Abweichungen zwischen den beiden Modellen entfernt. So sollten nur noch die Effekte der Rotor-Rotor-Interaktion verbleiben.

Wie beim Schwenkmoment wird hier die Schubkraft in den individuellen Blattelementen dargestellt.

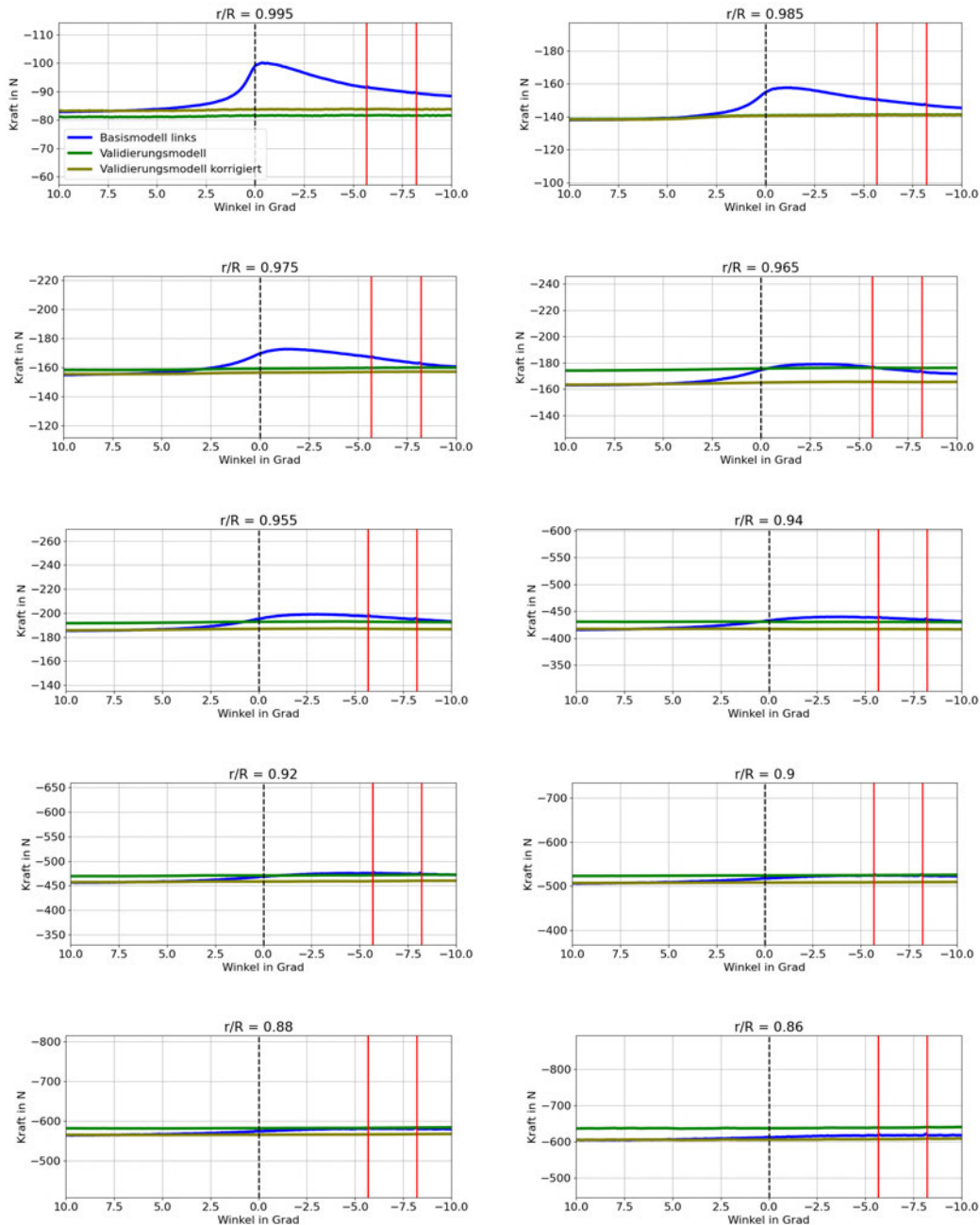


Abbildung 7.12: Schubkräfte der einzelnen Blattelemente

Im ersten Element findet die größte Steigerung statt. Dort steigt die Schubkraft von 80 N auf 100 N. Nach dem Maximalwert beginnt die Schubkraft wieder zu sinken und nähert sich ihrem Ursprungswert an. Mit zunehmendem Abstand von der Blattspitze nimmt die Steigerung der Schubkraft ab. In allen Elementen ist ein Effekt der Rotor-Rotor-Interaktion zu erkennen. Wie beim

Schwenkmoment stechen Blattelement drei und vier hervor. Dort sinkt die Schubkraft kurzzeitig unter den ursprünglichen Wert. In der nächsten Abbildung sind die prozentualen Abweichungen der Schubkräfte in den Blattelementen dargestellt.

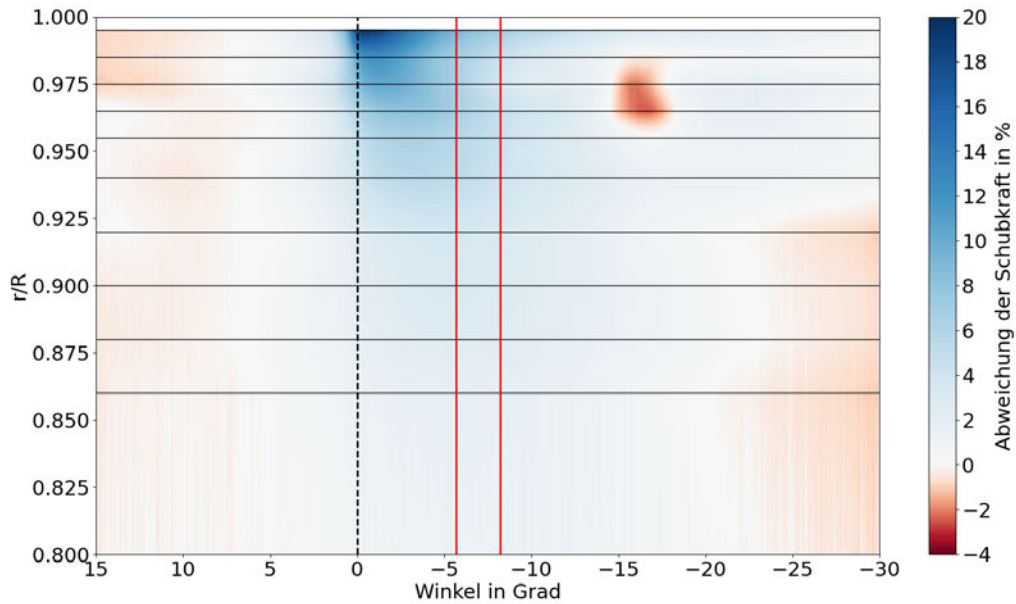


Abbildung 7.13: *prozentuale Abweichung der Schubkraft*

In der Blattspitze steigt die Schubkraft um maximal 20%. Eine Änderung der Schubkraft ist in dieser Abbildung nur in den oberen fünf Blattelementen zu sehen. Bei den unteren fünf Elementen ist die prozentuale Änderung so gering, dass sie hier nicht erkennbar ist. Wie bereits zu Abbildung 7.12 festgestellt, kommt es in Blattelement drei und vier zu einer kurzzeitigen Verringerung der Schubkraft. Die Verringerung beträgt maximal 4%.

Wie beim Schwenkmoment wird zuletzt die prozentuale Änderung der gesamten Schubkraft des Blattes bestimmt. Auch hier steht für die unteren 70% des Blattes nur das Ergebnis des Validierungsmodells zu Verfügung. Dies wird wie beim Schwenkmoment für beide Modell genutzt. Die Ergebnisse des Validierungsmodells werden auch hier mit den Werten der Schubkraft-Korrekturfunktion verändert. Aus der prozentualen Abweichung zwischen beiden Modellen ergibt sich das folgende Diagramm.

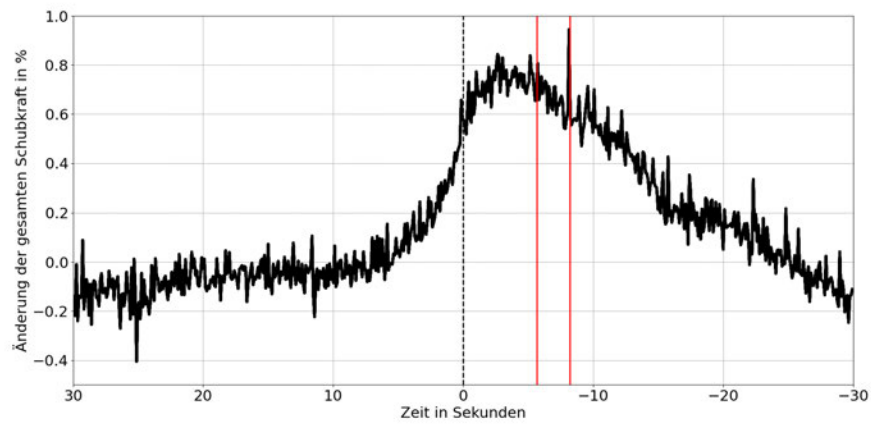


Abbildung 7.14: *prozentuale Abweichung der gesamten Schubkraft*

Die gesamte Schubkraft erhöht sich um ungefähr 0,8%. Am Ende der Simulation bei -30 Grad erreicht die Schubkraft wieder ihren ursprünglichen Wert.

7.2.3 Radialkraft

Zuletzt werden die gleichen Betrachtungen wie bei der Schubkraft und beim Schwenkmoment für die Radialkraft durchgeführt. Die Radialkraft zeigt im Blattkoordinatensystem aus Abbildung 5.5 entlang der Blattachse. Zuerst wird hier die gesamte Radialkraft aus dem Basismodell dargestellt und mit dem Validierungsmodell verglichen.

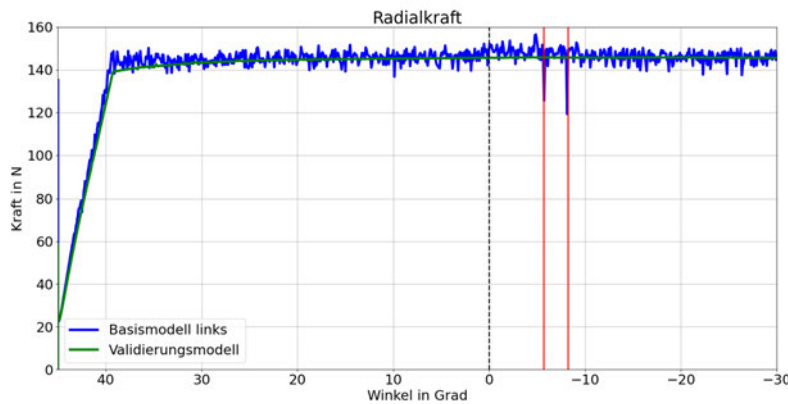


Abbildung 7.15: *Radialkraft aus dem Basismodell*

Für die Radialkraft ergibt sich im Validierungsmodell und im Basismodell der gleiche Kurvenverlauf. Im Basismodell unterliegt die Radialkraft hochfrequenten Schwankungen, im Validierungsmodell nicht. Die beiden Abstürze sind hier, wie in den anderen Darstellungen, markiert. Diese hatten besonders hier kurzfristige Auswirkungen auf die berechnete Radialkraft. Als nächstes wird die radiale Ableitung der Radialkraft dargestellt.

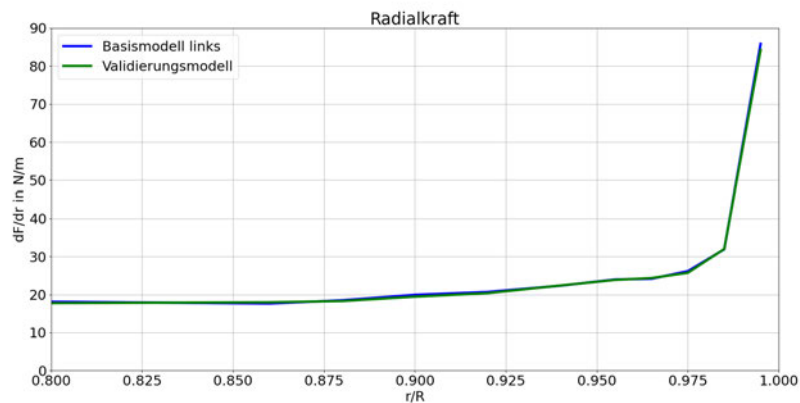


Abbildung 7.16: *Radialkraft-Verteilung im Validierungs- und Basismodell bei 3 Grad*

In dieser Abbildung wird wie in Abbildung 7.15 sichtbar, dass beide Modelle die gleichen Ergebnisse erzeugen. Eine Abweichung weiter von der Blattspitze entfernt ist nicht sichtbar. Dies ist bei der Schubkraft und beim Schwenkmoment der Fall. Die Radialkraft ist an der Blattspitze am größten. Dies scheint plausibel, da das oberste Blattelement die größte projizierte Fläche in z_b -Richtung besitzt. Da sich die Kraft aus $p \cdot A$ ergibt, resultiert aus der größten Fläche A auch die größte Kraft.

Für die Radialkraft wird die Korrekturfunktion wie bei Schubkraft und Schwenkmoment auch angewendet. Zwar sind die Abweichungen zwischen den Modellen hier wesentlich kleiner, aber alle Kräfte sollen nach dem gleichen Vorgehen untersucht werden. Durch die Korrekturfunktion ergibt sich die folgende Verteilung.

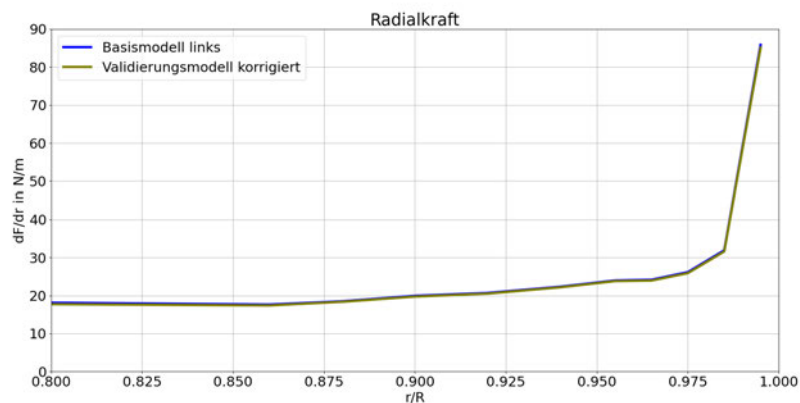


Abbildung 7.17: *korrigierte Radialkraft-Verteilung im Validierungs- und Basismodell bei 3 Grad*

Die Veränderung durch die Korrekturfunktion ist hier gering. In der nächsten Abbildung wird die Radialkraft in jedem der zehn Blattelemente dargestellt.

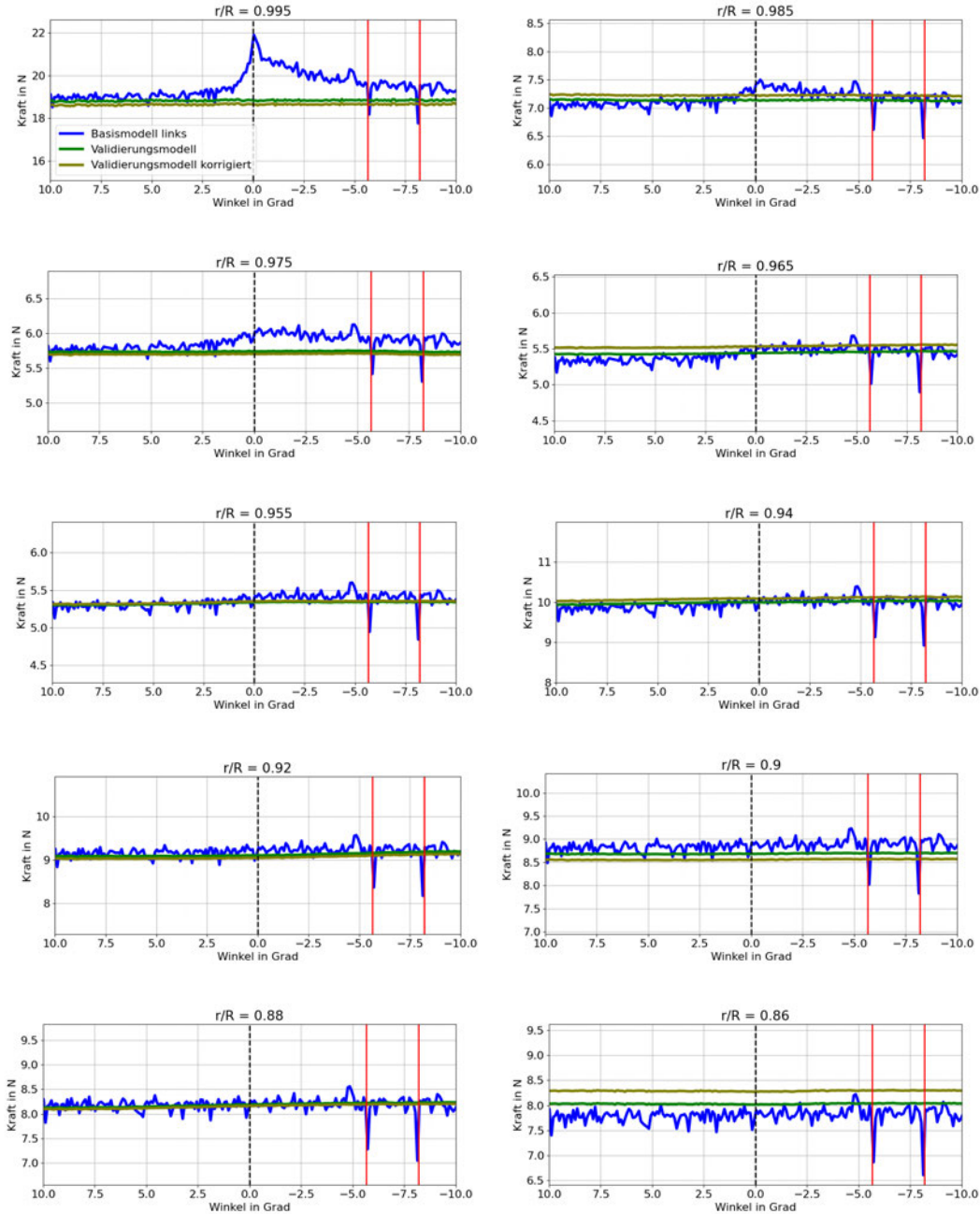


Abbildung 7.18: Radialkräfte der einzelnen Blattelemente

Im ersten Element des Blattes steigt die Radialkraft von 19 N auf 22 N. Danach sinkt die Kraft wieder und nähert sich dem Ursprungswert an. Ab einem Wert von $r/R = 0,9$ ist kein Einfluss der

Rotor-Rotor-Interaktion auf die Radialkraft sichtbar. Folgend wird die prozentuale Abweichung der Radialkräfte in den Blattelementen dargestellt.

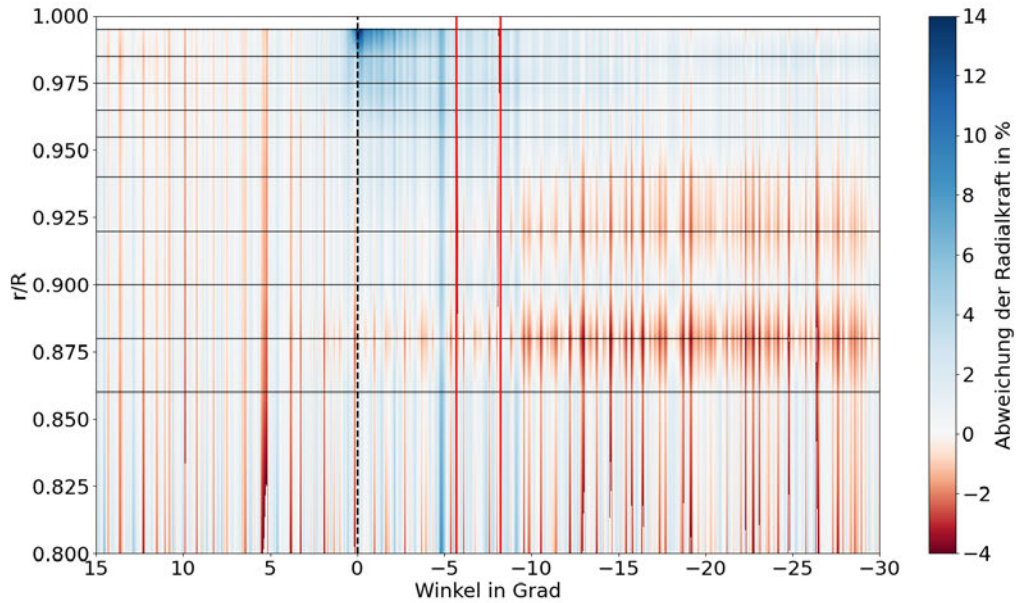


Abbildung 7.19: prozentuale Abweichung der Radialkraft

Die hochfrequente Schwenkung der Radialkraft tritt auch in diesem Diagramm hervor. Während das Validierungsmodell konstantere Ergebnisse erzeugt, tut das Basismodell dies nicht. Dies führt zu schwankenden prozentualen Abweichungen. In der Blattspitze steigt die Radialkraft um maximal 14%. Ein eindeutiger Einfluss ist in dieser Darstellung für die Blattelemente eins und zwei sichtbar. Die Radialkraft erreicht schneller als die Schubkraft und das Schwenkmoment wieder ihren ursprünglichen Wert. Zuletzt wird hier wieder die Änderung der gesamten Radialkraft analog zu den Darstellungen von Schwenkmoment (7.8) und Schubkraft (7.14) dargestellt.

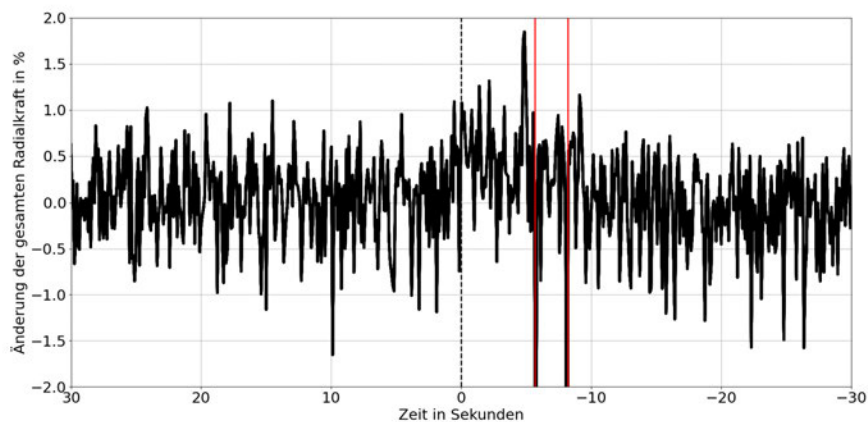


Abbildung 7.20: *prozentuale Abweichung der gesamten Radialkraft*

Die prozentuale Änderung der gesamten Radialkraft ist in dieser Darstellung nicht erkennbar. Die gesamte Erhöhung der Radialkraft ist so gering, dass sie in den hochfrequenten Schwankungen untergeht.

Damit sind die Einflüsse der Rotor-Rotor-Interaktion dargestellt. Im folgenden Kapitel wird eine darauf aufbauende Parameterstudie durchgeführt.

Kapitel 8

Parameterstudie

Um den Einfluss der Eingangsparameter zu untersuchen, werden hier die Rechnungen mit neuen Parametern wiederholt. Es ist davon auszugehen, dass die Interaktion vom Abstand der Rotorblätter beeinflusst wird. Dafür wird der Abstand s von $0,005 \cdot R$ auf $0,02 \cdot R$ erhöht. Zusätzlich wird hier untersucht, welchen Einfluss der Pitchwinkel auf die Rotor-Rotor-Interaktion hat. Das bisherige Basismodell ist mit einer Windgeschwindigkeit von 12 m/s und einem Pitchwinkel von 4,502 Grad berechnet. Die Windgeschwindigkeit wird auf die maximale Windgeschwindigkeit von 25 m/s erhöht. Damit verändert sich der Pitch nach Tabelle 5.1 auf 22,975 Grad. Um für die höhere Windgeschwindigkeit Vergleichswerte zu erhalten, wird zusätzlich eine zweite Rechnung des Validierungsmodells für 25 m/s durchgeführt.

8.1 Variation des Abstands

In dieser Rechnung wird der Abstand auf $0,02 \cdot R$ erhöht. Das Modell ist an verschiedenen Zeitpunkten abgestürzt. Dort ist ein Eingriff in die Skewness-Grenzwerte erforderlich, wie in Abschnitt 5.5.5 beschrieben. Diese Zeitpunkte sind mit einer roten Linie markiert. Dort kann es zu kurzzeitigen Veränderungen der berechneten Größen kommen, die nicht mit der Rotor-Rotor-Interaktion zusammenhängen. Zum Ende der Simulation reichen auch die Lösungsansätze aus Abschnitt 5.5.5 nicht aus, um die Abstürze zu umgehen. Die Berechnung dieses Modells kann nicht beendet werden. Sie endet bei einem Positionswinkel β von -27 Grad und nicht wie geplant bei -30 . Die eigentliche Interaktion bei $\beta = 0$ wird berechnet. Daher können die Ergebnisse zur Auswertung genutzt werden.

Als Vergleichswerte werden die Ergebnisse aus dem Validierungsmodell herangezogen. Wie bei den Ergebnissen in Abschnitt 7.2.1 ist eine systematische Abweichung der Ergebnisse aus den beiden Modellen vorhanden. Um die systematische Abweichung zu entfernen, wird wieder die Korrekturfunktion, wie in Abschnitt 7.2.1 beschrieben, auf die Ergebnisse des Validierungsmodells angewendet. Damit wird das gleiche Schaubild wie in Abbildung 7.7 erzeugt. Diese beiden Schaubilder werden in der nachfolgenden Abbildung gegenübergestellt.

8.1. VARIATION DES ABSTANDS

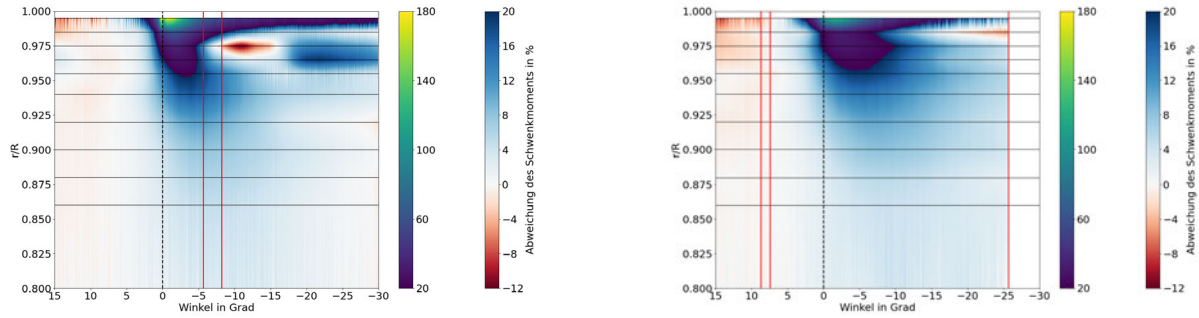


Abbildung 8.1: *prozentuale Abweichung des Schwenkmoments bei verschiedenen Abständen*

Links ist dabei die Abweichung, wie in Abbildung 7.7, bei einem Abstand von $0,005 \cdot R$ dargestellt. Rechts erfolgt die Darstellung bei einem Abstand von $0,02 \cdot R$. Es wird sichtbar, dass die maximale Steigerung im obersten Blattelement bei einem größeren Abstand kleiner wird. Dies entspricht der intuitiven Erwartung. Die maximale Erhöhung beträgt im obersten Blattelement bei einem Abstand von $0,02 \cdot R$ ungefähr 100%. Die von der Interaktion beeinflussten Elemente sind annähernd gleich geblieben. Ein Sinken des Schwenkmoments setzt bei einem größeren Abstand erst später ein als bei einem Abstand von $0,005 \cdot R$. Eine detailliertere Auflistung der Blattelemente kann im Anhang (9.2) gefunden werden.

Die Änderung des Schwenkmoments, die vom ganzen Rotorblatt erzeugt wird, ist im folgenden Diagramm dargestellt.

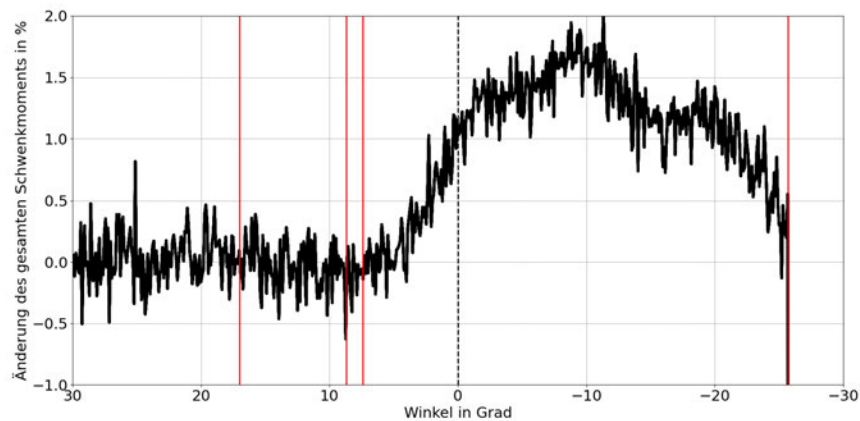


Abbildung 8.2: *prozentuale Abweichung des gesamten Schwenkmoments bei höherem Abstand*

Die maximale Steigerung des gesamten Schwenkmoments bei einem Abstand von $0,02 \cdot R$ beträgt

ungefähr 1,5%. Vergleicht man diese Abbildung mit Abbildung 7.8 kann man feststellen, dass die gesamte Steigerung bei beiden Abständen ähnlich groß ist. Bei einem größeren Abstand wird die maximale Erhöhung später erreicht.

Als nächstes werden die Schubkraftergebnisse betrachtet. Auch hier ist eine systematische Abweichung zwischen Basis- und Validierungsmodell vorhanden. Diese wird im Weiteren mit der Korrekturfunktion entfernt. Als nächstes werden die prozentualen Abweichungen in den Blattelementen miteinander verglichen.

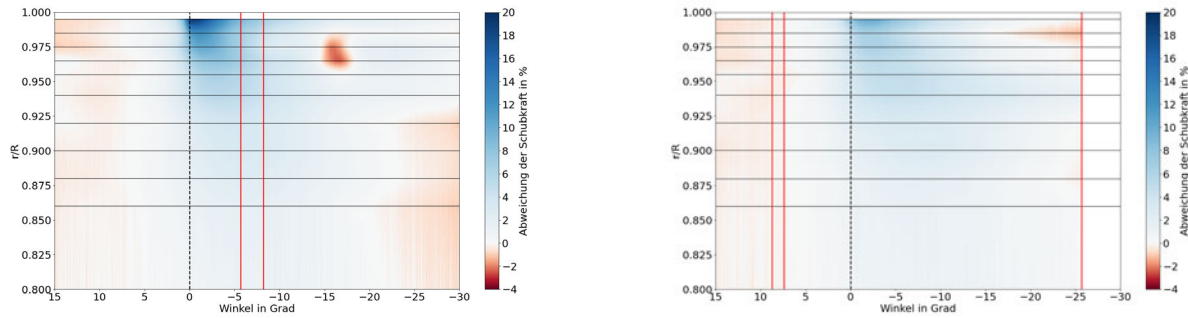


Abbildung 8.3: *prozentuale Abweichung der Schubkraft bei verschiedenen Abständen*

Hierbei sind links wieder die Ergebnisse bei einem Abstand von $0,005 \cdot R$ dargestellt. Rechts erfolgt die Darstellung bei einem Abstand von $0,02 \cdot R$. Bei einem größeren Abstand ist die Steigerung der Schubkraft geringer. Die maximale Steigerung im obersten Blattelement beträgt ungefähr 10%. Im Gegensatz zu einem Abstand von $0,005 \cdot R$ wird hier kein Schubkraftdefizit in den Elementen drei und vier nach der Interaktion deutlich. In Element zwei sinkt die Schubkraft ab einem Winkel von -20 Grad um ungefähr 2% ab. Eine genauere Darstellung der Schubkräfte in den Blattelementen sind im Anhang (9.3) zu finden.

Die Änderung der Schubkraft, die vom ganzen Rotorblatt erzeugt wird, ist im folgenden Diagramm dargestellt.

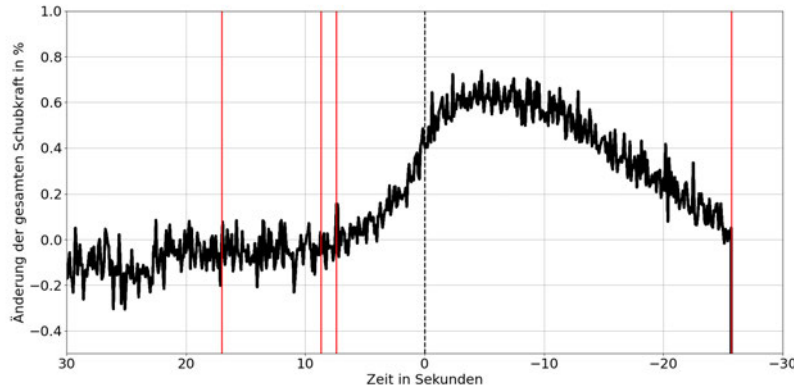


Abbildung 8.4: *prozentuale Abweichung der gesamten Schubkraft bei höherem Abstand*

Die maximale Steigerung der gesamten Schubkraft bei einem Abstand von $0,02 \cdot R$ beträgt ungefähr 0,6%. Vergleicht man dies mit Abbildung 7.14, wird sichtbar, dass die Steigerung der Schubkraft bei größerem Abstand geringer ist. In diesem Abschnitt wird auch die Radialkraft dargestellt. Dies erfolgt analog zur Präsentation von Schwenkmoment und Schubkraft. Die Abweichung zwischen Validierungsmodell und Basismodell ist bei der Radialkraft kleiner. Um alle Modelle nach den gleichen Kriterien auszuwerten, wird die Korrekturfunktion nach den bereits vorgestellten Regeln trotzdem angewandt. Im folgenden werden die prozentualen Abweichungen in den Blattelementen bei beiden Abständen gegenübergestellt.

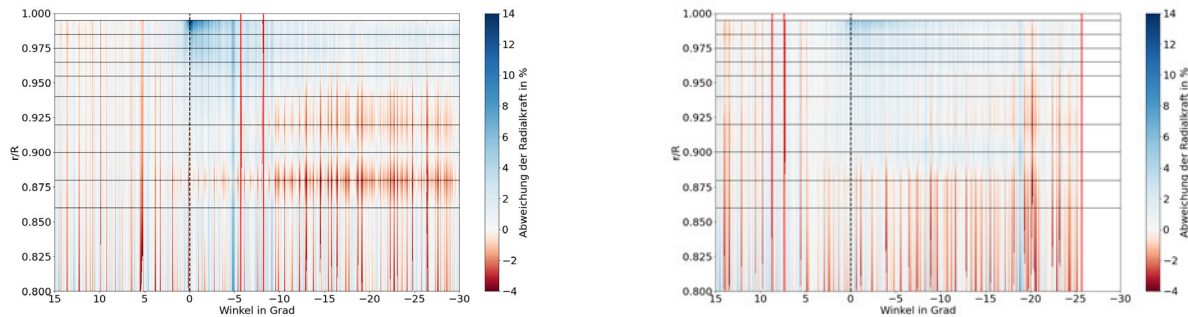


Abbildung 8.5: *prozentuale Abweichung der Radialkraft bei verschiedenen Abständen*

Ein Effekt der Rotor-Rotor-Interaktion ist hier nicht mehr eindeutig zu erkennen. Die maximale Steigerung des obersten Elements beträgt weniger als 4%. Dies geht in den generellen Schwankungen der Radialkraft unter. Die Diagramme der individuellen Blattelemente sind im Anhang (9.4) zu finden.

8.1. VARIATION DES ABSTANDS

Die gesamte Änderung der Radialkraft des ganzen Rotorblattes ist im folgenden Diagramm dargestellt.

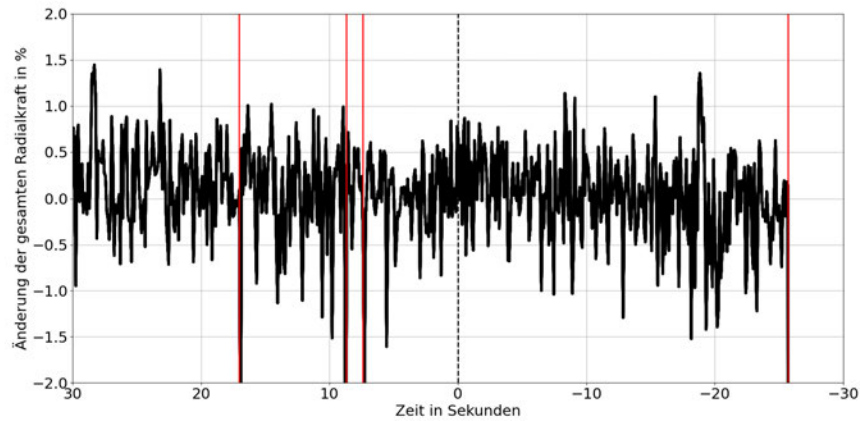


Abbildung 8.6: *prozentuale Abweichung der gesamten Radialkraft bei höherem Abstand*

Eine Veränderung der Radialkraft ist in diesem Diagramm nicht erkennbar.

Insgesamt erhöhen sich die betrachteten Größen weniger stark bei einem größeren Abstand der Rotorblätter. Dies entspricht der intuitiven Erwartung.

8.2 Variation der Windgeschwindigkeit

Nach der Variation des Abstands wird nun die Windgeschwindigkeit auf 25 m/s geändert. Damit geht eine Erhöhung des Pitchwinkels einher. Zuerst werden hier die Ergebnisse aus der erneuten Rechnung des Validierungsmodells mit 25 m/s dargestellt. Dafür wird als erstes das errechnete Schwenkmoment dargestellt.

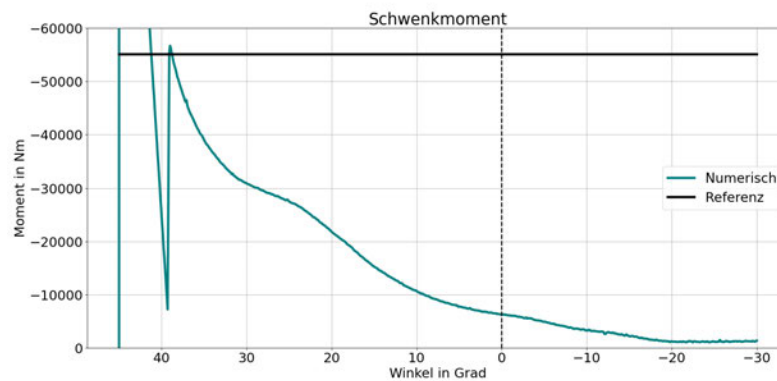


Abbildung 8.7: *Schwenkmoment aus dem Validierungsmodell bei 25 m/s*

Hierbei wird direkt ein grundlegendes Problem im berechneten Modell sichtbar. Das Schwenkmoment konvergiert nicht und weicht vom Referenzwert ab. Die Abweichung ist größer als in Abschnitt 6.3. Zum Ende der Simulation nähert sich das Schwenkmoment Null an. Das ist nicht plausibel. Ein ähnliches Bild wird bei der Schubkraft sichtbar.

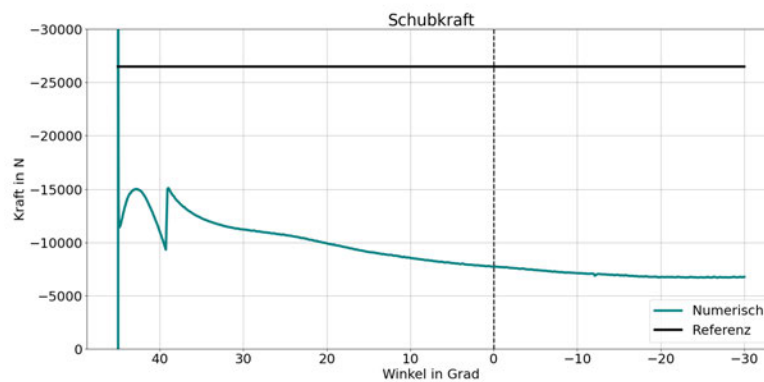


Abbildung 8.8: *Schubkraft aus dem Validierungsmodell bei 25 m/s*

Die Schubkraft konvergiert nicht und weicht vom Referenzwert ab. Die berechnete Schubkraft entspricht ungefähr einem Drittel des Referenzwerts. Dies deutet auf ein Problem im Modell hin. Um diesem Problem weiter auf den Grund zu gehen, wird das Druckfeld betrachtet. Dies erfolgt wie in Abschnitt 6.3 exemplarisch für Blattelement acht.

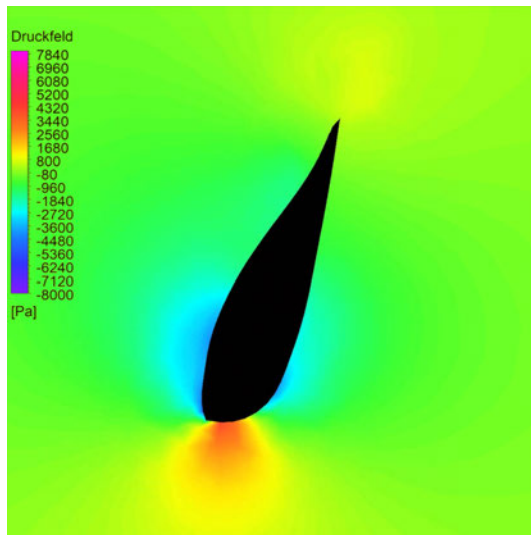


Abbildung 8.9: *Druckfeld bei $r/R = 0,9$ und 25 m/s*

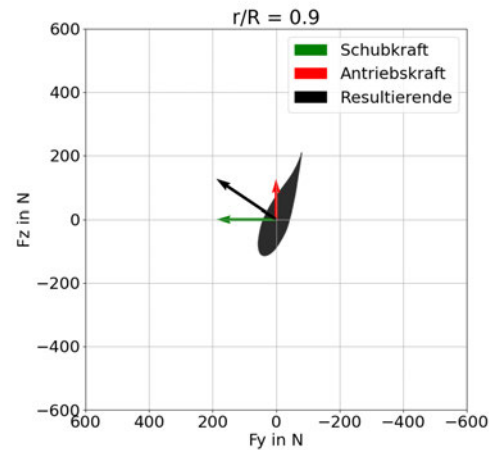


Abbildung 8.10: *Kräfte am Profil bei $r/R = 0,9$ und 25 m/s*

Das Druckfeld ist nicht plausibel. Der erhöhte Pitchwinkel in dem Modell beeinflusst das Druckfeld. Auf der Überdruckseite des Profils links ist ein Unterdruckgebiet berechnet worden. Die aus dem Druckfeld resultierenden Kräfte zeigen in die entgegengesetzte Richtung der Vektoren in Abbildung 2.4. Die Auftriebs- und Widerstandskraft werden hier nicht dargestellt, da ein Anströmwinkel nicht bestimmbar ist. Dies macht die Ergebnisse aus dem Modell bei hohem Pitchwinkel nicht aussagekräftig. Das Modell ist nicht in der Lage, die Strömungsverhältnisse bei einem erhöhten Pitchwinkel zu berechnen. Auf eine Berechnung der Rotor-Rotor-Interaktion wird in diesem Fall verzichtet. Die Abweichung des Modells ist zu groß, um verlässliche Ergebnisse zu erhalten.

In Abschnitt 6.3 werden Gründe gelistet, warum das Validierungsmodell bei 10 m/s zwischen 11% und 16% von den Referenzwerten abweicht. Bei einem höheren Pitchwinkel scheinen diese Unzulänglichkeiten des Modells stärker zum Tragen zu kommen.

Kapitel 9

Schluss

9.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Simulation einer Rotor-Rotor-Interaktion einer MR-WEA mit dem CFD-Simulationsprogramm ANSYS Fluent durchgeführt (3). Es wird eine Literaturrecherche durchgeführt (4.1). Basierend auf den Ergebnissen dieser Recherche (4.2) wird ein Modell (5.2) aufgebaut. Als Basisrotorblatt dient in dieser Arbeit das Blatt der DTU 10MW Anlage (5.1). In der CFD-Simulation wird ein dynamisches Netz (3.5) genutzt, um die Rotorblätter zu bewegen. Das bedeutet, dass das Netz in jedem Zeitschritt deformiert und bei qualitativ zu schlechten Elementen neu vernetzt wird. Als Turbulenzmodell wird das RANS $SST - k - \omega$ -Modell angewendet (5.5.4). Dieses kombiniert die Vorteile eines $k - \epsilon$ -Modells mit denen des $k - \omega$ -Modells (3.2). Die Windgeschwindigkeit beträgt 12 m/s. Der Abstand der Rotorblätter beträgt das 0,005-fache des Rotorradius (5.3).

Eine Qualitätskontrolle des erzeugten Netzes wird durchgeführt (6.1). Die Skewness der Elemente in dem erzeugten Netz erfüllen die gesetzten Qualitätskriterien. Ein y^+ Wert des Netzes von Eins kann nicht erreicht werden. Dies reduziert die Aussagekraft der Ergebnisse. Der Strömungsgradient am Rotorblatt, wie in Abbildung 3.3 dargestellt, wird nicht genau abgebildet.

Die Konvergenz der Berechnungsergebnisse wird überprüft (6.2). Die Lösung konvergiert in den Zeitschritten. Das Gleichungssystem wird ausreichend genau gelöst.

Um die Ergebnisse zu validieren, wird zusätzlich zum Rotor-Rotor-Modell ein Validierungsmodell aufgebaut. Dieses ist in der Lage das, Referenzschwenkmoment mit einer Abweichung von 16% zu reproduzieren (6.3). Die Abweichung der Schubkraft vom Referenzwert beträgt 11%. Das errechnete Druckfeld erzeugt plausible Kräfte am Rotorblattprofil. Die errechneten Kraftvektoren entsprechen konzeptionell den Vorgaben aus der Literatur.

Im Basismodell wird die Rotor-Rotor-Interaktion berechnet. Das gesamte Schwenkmoment erhöht sich durch die Interaktion um 1,5% (7.2.1). Nach der Erhöhung des Schwenkmoments sinken die Werte wieder. Die Interaktion beginnt ungefähr 3 Grad, bevor sich die Blätter treffen. Die Effekte der Interaktion sind bis zum Ende der Interaktion bei -30 Grad nicht zu Ende abgeklungen. In den einzelnen Blattelementen treten größere Steigerungen des Schwenkmoments auf. Die maximale

Steigerung liegt in der Blattspitze mit einem Wert von 180% vor. Die Rotor-Rotor-Interaktion beeinflusst das Schwenkmoment sicher ab einer radialen Position von $r/R = 0,86$.

Die gesamte Schubkraft erhöht sich um 0,8% (7.2.2). Es kommt erst zu einer Steigerung der Schubkraft, die dannach wieder sinkt. Die Effekte der Interaktion halten genauso lange an wie beim Schwenkmoment. Sie beeinflussen auch den oberen Teil des Rotorblattes, mindestens ab einem Wert von $r/R = 0,86$.

Die Steigerung der gesamten Radialkraft ist nicht eindeutig sichtbar (7.2.3). In den einzelnen Blattelementen ist eine Veränderung erkennbar. Diese betrifft vor allem die Blattspitze. Ab einem Wert von $r/R = 0,9$ kann keine Veränderung der Radialkraft beobachtet werden.

Um den Einfluss des Abstands der Rotoren zu untersuchen, wird eine Parameterstudie durchgeführt. Der Abstand wird von $0,005 \cdot R$ auf $0,02 \cdot R$ erhöht (8.1). Die maximale Steigerung des Schwenkmoments bleibt bei diesem größeren Abstand bei 1,5%. Die Schubkraft erhöht sich beim größeren Abstand um ungefähr 0,6% und damit etwas weniger als beim kleineren Abstand. Bei einem Abstand von $0,02 \cdot R$ ist eine Veränderung der Radialkraft nicht mehr eindeutig sichtbar.

Des Weiteren wird in zusätzlichen Änderungen die Windgeschwindigkeit auf 25 m/s erhöht. Damit erhöht sich auch der Pitchwinkel (8.2). Dabei ist festzustellen, dass das Modell nicht in der Lage ist, die Strömungsverhältnisse bei einem hohen Pitchwinkel zu berechnen. Das Druckfeld erzeugt Kraftvektoren, die nicht zu den Referenzen aus der Literatur passen.

Insgesamt ist das aufgebaute Modell in der Lage, eine Rotor-Rotor-Interaktion zu berechnen. Dies gilt unter der Einschränkung, dass der Pitchwinkel nicht zu groß wird. Das Validierungsmodell erzeugt bei der Schubkraft eine Abweichung von 11% und beim Schwenkmoment eine Abweichung von 16%. Daher ist davon auszugehen, dass die Abweichung der Ergebnisse der Rotor-Rotor-Interaktion mindestens genauso groß ist.

Das Ziel dieser Arbeit aus der Einleitung (1) wird erreicht. Mit dieser Arbeit wird das Verständnis für das aerodynamische Verhalten einer Rotor-Rotor-Interaktion vertieft. Der Unterschied zwischen den Lasten an einer ER-WEA und einer MR-WEA wird herausgearbeitet. Es werden konkrete Laständerungen berechnet. Der Einfluss des Rotorabstands wird untersucht. Der Einfluss der Windgeschwindigkeit konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden.

9.2 Häufigkeit der Interaktionen

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt auf der Untersuchung der Laständerungen bei einer Rotor-Rotor-Interaktion. In diesem Abschnitt werden einige erste Ideen gesammelt, um zu bestimmen, wie häufig diese Interaktionen auftreten. Dafür werden zuerst die untere und obere Grenze der Interaktionshäufigkeit bestimmt. Dabei erfolgt nur eine Betrachtung für Rotoren mit drei Blättern. Die folgende Abbildung zeigt die in der Einleitung beschriebene Situation für zwei unterschiedliche Startpositionen.

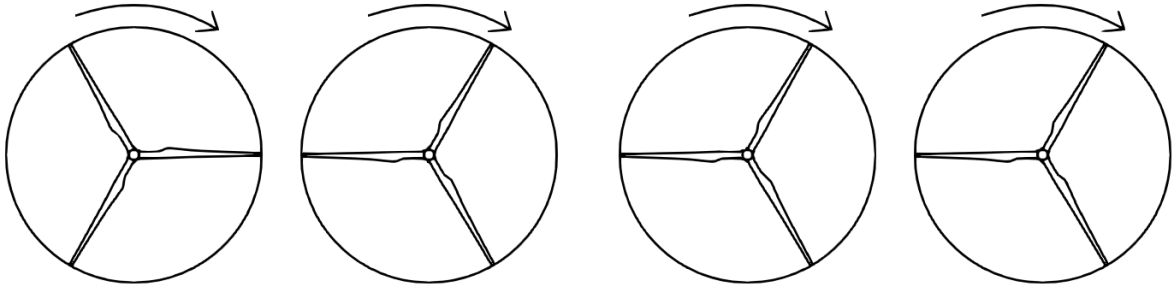


Abbildung 9.1: *Startpositionen MR*

Links sind die Rotoren in der Ausgangsposition, wie sie bereits in Abbildung 1.1 gezeigt werden. Rechts ist der linke Rotor um 60 Grad verdreht. Nun wird angenommen, dass sich alle Rotoren mit gleicher Geschwindigkeit drehen. Ihre Drehung ist also synchronisiert. Dies bedeutet für den linken Fall, dass sich die Rotorblätter bei jeder Drehung treffen. Die Anzahl n der Interaktionen in einem Zeitraum bestimmt sich dabei nach der folgenden Formel:

$$i_{max} = 3 \cdot \frac{\Omega}{2\pi} \cdot t \quad (9.1)$$

Dabei ist Ω die Winkelgeschwindigkeit der Rotoren. t ist die Länge des betrachteten Zeitraums. Die Anzahl der Rotorblätter ist drei. Nach einer Umdrehung des Rotors haben drei Interaktionen stattgefunden, nach zwei Umdrehungen sechs und so weiter. Dies ist die maximale Anzahl möglicher Interaktionen bei den gegebenen Annahmen. Für den rechten Fall ist die Anzahl der Interaktionen Null. Die Blätter verbleiben in einem größtmöglichen Abstand zueinander, unabhängig von der Länge des Zeitraums t .

In der Praxis müssen die einzelnen Rotoren einer MR-WEA nicht synchronisiert sein. Die Anzahl der Interaktionen in einem Zeitraum t befindet sich dann zwischen Null und dem Wert aus Gleichung 9.1. Es ist davon auszugehen, dass die Funktion von den folgenden Parametern abhängig ist: $i(t, \Omega, s, d_{grenz})$. Dabei ist t die Zeit und Ω die Winkelgeschwindigkeit. s ist der kürzeste Abstand

zwischen den Blattspitzen. d_{grenz} beschreibt den Abstand, ab dem eine Interaktion stattfindet. In Abschnitt 8.1 wird bereits gezeigt, dass mit zunehmendem Abstand die Intensität der Interaktion sinkt. Es ist davon auszugehen, dass ein Abstand existiert, ab dem keine Interaktion mehr stattfindet. Des Weiteren ist es logisch, dass die Anzahl der Interaktionen linear mit dem betrachteten Zeitraum und der Winkelgeschwindigkeit steigt. Ist ein Zeitraum doppelt so lang, ist mit doppelt so vielen Interaktionen zu rechnen. Genauso gilt für die Winkelgeschwindigkeit: Eine verdoppelte Winkelgeschwindigkeit wird zu doppelt so vielen Interaktionen führen. Darauf basierend kann die folgende Gleichung aufgestellt werden:

$$i(t, \Omega, s, d_{grenz}) = t \cdot \Omega \cdot u(s, d_{grenz}) \quad (9.2)$$

Dabei verbleibt auf der rechten Seite ein Term $u(s, d_{grenz})$. Die Anzahl der Interaktionen i ist von einem weiteren Faktor u abhängig. Dieser muss die verbleibenden Effekte beschreiben. Ist zum Beispiel $s > d_{grenz}$ können gar keine Interaktionen auftreten und der Faktor u muss zu Null werden. Die genaue Bestimmung des Faktors u übersteigt den Rahmen dieser Nebenaufgabe. In diesem Abschnitt werden einige erste Ansätze gegeben, um die Anzahl der Interaktionen zu bestimmen.

9.3 Fehlerhafte Ansätze

In der Entwicklung der hier verwendeten Modelle ist ein Fehler unterlaufen. Dieser wurde später korrigiert. Um zu vermeiden, dass in zukünftigen Fortsetzungen dieser Arbeit der gleiche Fehler gemacht wird, soll dieser hier erläutert werden. In ersten Tests des Modells ist am Geschwindigkeitseinlass die reduzierte Geschwindigkeit nach Gleichung 2.3 vorgegeben worden. Später ist dies geändert worden und am Einlass wird im finalen Stand des Modells die unreduzierte Windgeschwindigkeit v_{wind} vorgegeben. In Abschnitt 6.3 wird gezeigt, dass eine Induktion der Geschwindigkeit durch die Berechnung der CFD stattfindet. Gibt man am Einlass zusätzlich eine induzierte Geschwindigkeit vor, findet die Induktion durch die Rechnung zusätzlich am Blatt statt. Damit wird ein Modell erzeugt, in dem die Geschwindigkeit doppelt induziert wird. Das ist falsch. Diese doppelte Induktion erzeugt zu kleine Werte für Schubkraft und Schwenkmoment.

9.4 Ausblick

Am Ende dieser Arbeit wird ein Ausblick gegeben, wie mit diesen Ergebnissen weitergearbeitet werden kann. Dabei steht vor allem eine weitere Verbesserung des Modells im Vordergrund.

Im vorangegangenen Abschnitt werden die Schwierigkeiten mit der korrekten Modellierung der in-

duzierten Windgeschwindigkeit beschrieben. In Abschnitt 6.3 kann gezeigt werden, dass dieser Abstand reicht, damit sich eine induzierte Geschwindigkeit einstellt. Ob der dort bestimmte Induktionsfaktor korrekt ist, wird nicht überprüft. Es besteht die Möglichkeit, dass der Einlass zu nah ist und damit einen Einfluss auf den Induktionsfaktor hat. In zukünftigen Arbeiten sollte der Abstand d_v stromaufwärts des Rotorblatts größer gewählt werden. Dies kann sicherstellen, dass die Strömung genug Strecke zur Verfügung hat, um eine Induktion der Geschwindigkeit sicher zu ermöglichen. Der Abstand d_v in dieser Arbeit wird in Abschnitt 5.3 klein gewählt. Dort steht vor allem im Vordergrund, die Domain klein zu halten, um den Berechnungsaufwand zu minimieren.

Des Weiteren wird in dieser Arbeit festgestellt, dass die Randschichtvernetzung am Rotorblatt nicht den gewünschten y^+ Wert von Eins erreicht. Hier besteht Verbesserungspotential. Außerdem würde eine generell feinere Vernetzung die Ergebnisse weiter verbessern.

Zusätzlich könnte ein besseres Turbulenzmodell verwendet werden. In der Literaturrecherche dieser Arbeit wird festgestellt, dass das üblich genutzte Turbulenzmodell das DES-Modell ist. Es ist empfehlenswert, diese Turbulenzmodell in der Zukunft zu verwenden, um verlässlichere Ergebnisse zu erhalten.

Außerdem führt die mehrfache Konvertierung des Blattmodells zu Veränderungen in der Geometrie. Dies sollte in Zukunft vermieden werden. Das Blattmodell sollte in einem Format zur Verfügung stehen, dass von ANSYS direkt gelesen werden kann. Damit kann die Anzahl der Konvertierungen minimiert werden.

In Abschnitt 8.2 hat sich gezeigt, dass das Modell nicht in der Lage ist, das korrekte aerodynamische Verhalten bei hohen Pitchwinkeln zu berechnen. Mit den vorher genannten Aspekten kann ein verbessertes Modell aufgebaut werden. Mit diesem verbesserten Modell muss untersucht werden, ob das Verhalten des Modells bei einem hohen Pitchwinkel verbessert werden kann.

Um in konkreten Anwendungsfällen aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, sollte das Rotorblatt durch ein MR-Blatt der geplanten Anlage getauscht werden. In dieser Arbeit wird das kleiner skalierte Blatt der DTU 10MW WEA genutzt. Zuletzt wird es für weitere Erkenntnisse sinnvoll sein, vollständige Rotoren zu simulieren. In dieser Arbeit wird nur die Interaktion von zwei Blättern simuliert. Simuliert man vollständige Rotoren, ist auch die Simulation wiederholender Interaktionen möglich. Auch können dann die Interaktionen von mehr als zwei Rotoren simuliert werden.

Mit den hier genannten Verbesserungen kann, aufbauend auf dieser Arbeit, ein verbessertes MR-WEA-CFD-Modell aufgebaut werden. Damit wäre eine genauere Aussage zu Laständerungen möglich.

Literaturverzeichnis

- [1] IEC 61400-1: Wind turbines - Part 1: Design requirements, 2019. Edition 4.0.
- [2] Prof. Bengt Anderson, Prof. Dr. Ronnie Anderson, Love Håkansson, Dr. Mikael Mortensen, Dr. Rahman Sudiyo, and Berend van Wachem. *Computational Fluid Dynamics for engineers*. Cambridge University Press, 2012.
- [3] Christian Bak, Frederik Zahle, Robert Bitsche, Taeseong Kim, Anders Yde, Lars Christian Henriksen, Anand Nata rajan, and Morten Hartvig Hansen. Dtu wind energy report-i-0092. Technical report, Technical University of Denmark, DTU Wind Energy, 2013.
- [4] Majid Bastankhah and Mahdi Abkar. Multi-rotor wind turbine wakes. *Physics of Fluids*, 2019.
- [5] Martin O. L. Hansen. *Aerodynamics of Wind Turbines*. Earthscan, 2008.
- [6] Ullhas Hebbar, Jitesh Rane, Farhan Gandhi, and Onkar Sahni. Analysis of interactional aerodynamics in multi-rotor wind turbines using large eddy simulations. *AIAA SciTech Forum*, 2020.
- [7] Haris Hameed Mian, Muhammad Salman Siddiqui, Liang Yang, Trond Kvamsdal, and Taimoor Asim. Numerical investigation of blade roughness impact on the aerodynamic performance and wake behavior of horizontal axis wind turbine. *Journal of Physics*, 2023.
- [8] Takafumi Nishino and Scott Draper. Local blockage effect for wind turbines. *Journal of Physics*, 2015.
- [9] Riccardo Piccinini, Matteo Tugnoli, and Alex Zanotti. Numerical investigation of the rotor-rotor aerodynamic interaction for evtol aircraft configurations. *MDPI*, 2020.
- [10] Camilo A. Sedano, Frederik Berger, Hamid Rahimi, Omar D. Lopez Mejia, Martin Kühn, and Bernhard Stoevesandt. Cfd validation of a model wind turbine by means of improved and delayed detached eddy simulation in openfoam. *MDPI*, 2019.
- [11] ANSYS; https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm. Ansys fluent 12.0 theory guide, 2009. Accessed on August 1, 2024.
- [12] ANSYS; https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/udf/main_pre.htm. Ansys fluent 12.0 udf manual, 2009. Accessed on August 1, 2024.

- [13] ANSYS; https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main_pre.htm. Ansys fluent 12.0 user's guide, 2009. Accessed on August 1, 2024.
- [14] <https://www.windindustrie-in-deutschland.de/fachartikel/wind-technology-what-will-the-future-bring>. Wind technology - what will the future bring?, 2024. Accessed on September 11, 2024.
- [15] Maarten Paul van der Laan, Søren Juhl Andersen, Nikolas Angelou Néstor Ramos García, Georg Raimund Pirrung, Søren Ott, Mikael Sjöholm1, Kim Hylling Sørensen, Julio Xavier Vianna Neto, Mark Kelly, Torben Krogh Mikkelsen, and Gunner Christian Larsen. Power curve and wake analyses of the vestas multi-rotor demonstrator. *Wind Energy Science*, 2019.
- [16] Yuan Zhang, Xin Cai, Shifa Lin, Yazhou Wang, and Xingwen Guo. Cfd simulation of co-planar multi-rotor wind turbine aerodynamic performance based on alm method. *MDPI*, 2022.

Anhang

Variation des Abstands

Schwenkmomente

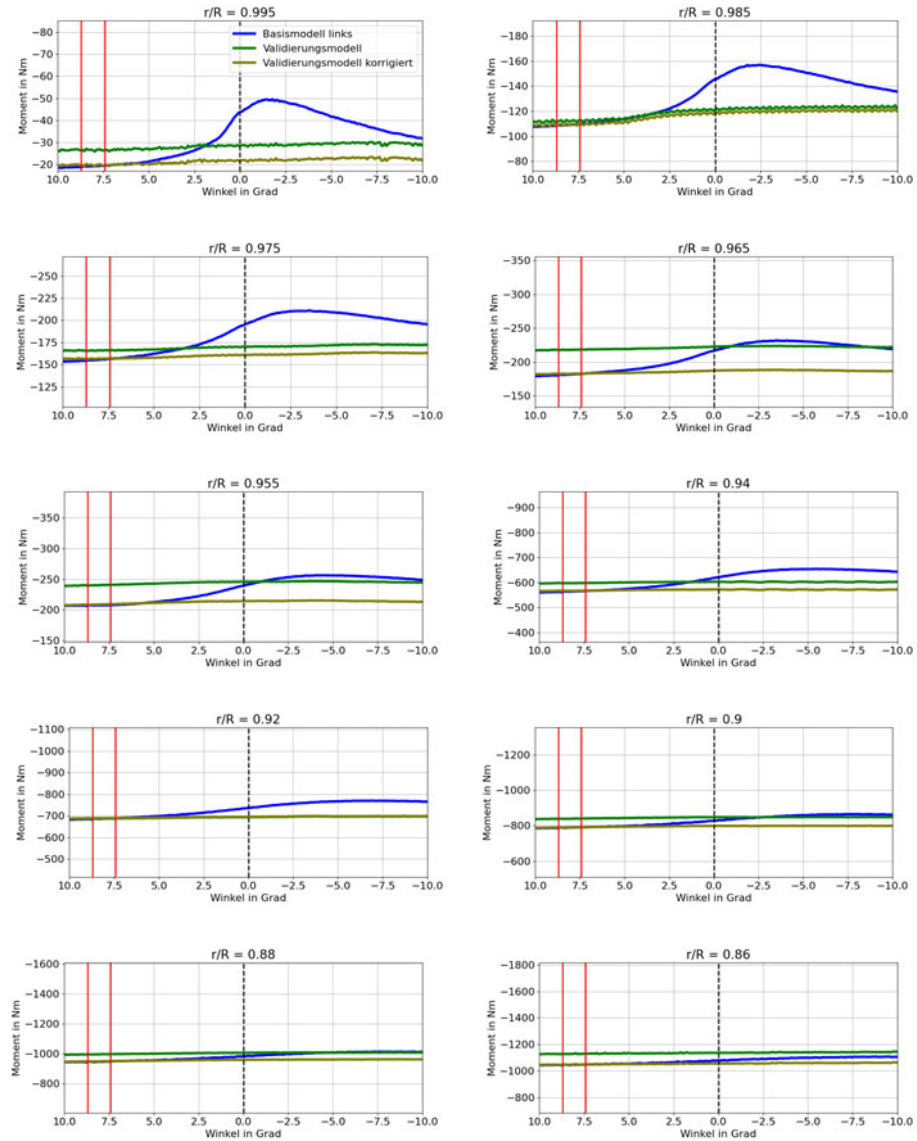


Abbildung 9.2: Schwenkmomente der einzelnen Blattelemente bei höherem Abstand

Schubkräfte

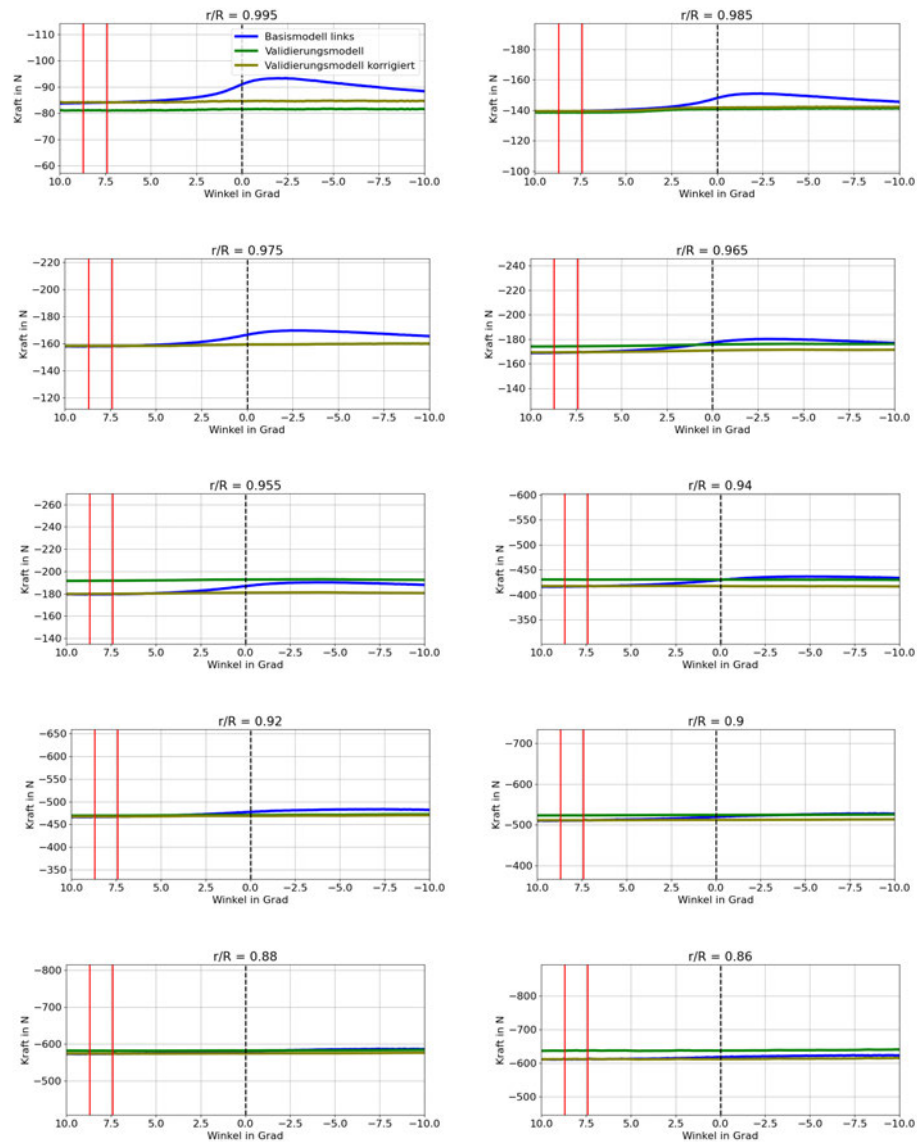


Abbildung 9.3: Schubkräfte der einzelnen Blattelemente bei höherem Abstand

Radialkräfte

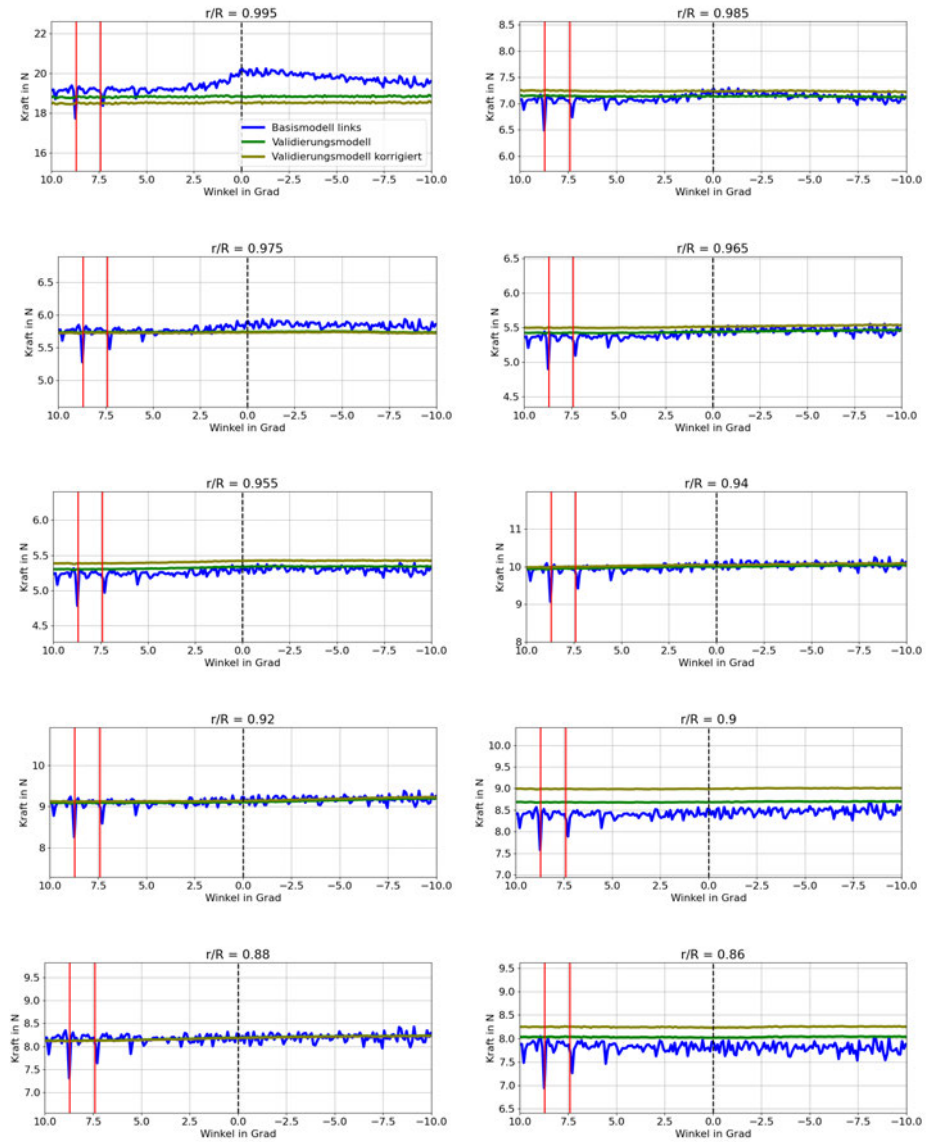


Abbildung 9.4: Radialkräfte der einzelnen Blattelemente bei höherem Abstand

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit wird erklärt, dass die Arbeit mit obigem Thema selbstständig verfasst und noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt wurde. Weiterhin sind keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel verwendet und wörtliche sowie sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet worden.

Hamburg, den 22.09. 2024

A large black rectangular box used to redact the signature of the declarant.

Lutz Rohlfing