

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>XIX</b>
<b>Abstract</b>	<b>XXI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Historie der Windenergieanlagen	1
1.2 Heutiger Stand	3
1.3 Stand der Forschung	3
1.4 Ziele der Arbeit	11
<b>2 Methoden zur Berechnung der Aerodynamik von WEA</b>	<b>13</b>
2.1 Numerische Grundgleichungen	13
2.1.1 Mittelung der Navier-Stokes-Gleichungen	13
2.1.2 Filterung der Navier-Stokes-Gleichungen	14
2.2 Simulationsmethoden für Windenergieanlagen	15
2.2.1 Die Blattelement-Impulstheorie	15
2.2.2 Die Actuator Methoden	16
2.2.3 Die direkte Methode	18
<b>3 Prozesskette zur Simulation von Windenergieanlagen</b>	<b>21</b>
3.1 Der Strömungslöser FLOWer	21
3.1.1 Originalversion von FLOWer	21
3.1.2 Randbedingung zur Vorgabe turbulenter Zuströmdaten	22
3.2 Automatisierte Blattvernetzung für Rotoren	25
3.3 Fluid-Struktur-Kopplung	29
3.3.1 Beschreibung des Strukturlösers SIMPACK	30
3.3.2 FLOWer-SIMPACK-Kopplung	31
<b>4 Validierung der Prozesskette anhand des MEXICO-Rotors</b>	<b>37</b>
4.1 Das MEXICO-Projekt	37
4.2 Simulation des MEXICO-Rotors	38
4.2.1 Numerisches Rechenmodell und Setup	39
4.2.2 Einfluss der Blattgitterdiskretisierung	45
4.2.3 Einfluss der Hintergrundnetzdiskretisierung	49
4.2.4 Einfluss des Turbulenzmodells	60
4.2.5 Vergleich von URANS und DES97	64

<b>5</b>	<b>Simulation einer Offshore-WEA in maritimer Grenzschicht</b>	<b>69</b>
5.1	Simulation der turbulenten Atmosphäre . . . . .	71
5.1.1	Numerisches Setup zur Simulation einer Bodengrenzschicht . . . . .	72
5.1.2	Ergebnisse der Bodengrenzschichtsimulationen . . . . .	77
5.1.3	Mögliche Ursachen der Turbulenzdissipation . . . . .	89
5.2	Analyse der Interaktion zwischen Turbulenz und Windenergieanlage . . . . .	91
5.2.1	Das Modell der Referenzanlage . . . . .	91
5.2.2	Der Vorstau effekt . . . . .	99
5.2.3	Auswirkungen auf Blatt und Rotor . . . . .	109
5.2.4	Auswirkungen auf den Nachlauf . . . . .	126
5.3	Einfluss der Aeroelastik auf die Turbulenzinteraktion . . . . .	145
5.3.1	Das Modell der Aeroelastiksimulation . . . . .	145
5.3.2	Auswirkungen auf Blattlasten und -deformation . . . . .	147
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>167</b>
	<b>Anhang</b>	<b>171</b>
<b>A</b>	<b>Grundlagen von CFD-Methoden</b>	<b>171</b>
A.1	Navier-Stokes-Gleichungen . . . . .	171
A.2	Die turbulente Strömung . . . . .	174
A.2.1	Die RANS-Methode . . . . .	176
A.2.2	Die DES97 . . . . .	180
<b>B</b>	<b>Simulationsmethoden für WEA</b>	<b>183</b>
B.1	Grundlagen der Blattelement-Impulstheorie . . . . .	183
B.2	Grundlagen der Actuator Disc . . . . .	184
B.3	Grundlagen der Actuator Line . . . . .	186
B.4	Grundlagen der Actuator Surface . . . . .	186
<b>C</b>	<b>FLOWer</b>	<b>189</b>
C.1	Beschreibung des Standardumfangs . . . . .	189
C.1.1	Das CHIMERA-Modul . . . . .	190
C.1.2	Das ROT-Modul . . . . .	191
C.1.3	Das HELI-Modul . . . . .	194
C.2	Zeitschrittverfahren . . . . .	194
C.2.1	Local Time Stepping . . . . .	194
C.2.2	Dual Time Stepping . . . . .	195
<b>D</b>	<b>AutoMesh</b>	<b>197</b>
D.1	Korrekturverfahren der CAD-Schnittstelle . . . . .	197
D.2	Untersuchung zur Performance von AutoMesh . . . . .	198
<b>E</b>	<b>Betrachtung von Frequenzspektren</b>	<b>201</b>
E.1	Aussagekraft niedriger Frequenzen . . . . .	201

---

E.2	Vergleich von Geschwindigkeitsspektren mit Energiespektrum . . . . .	202
<b>F</b>	<b>Strömungseffekte am Rotor</b>	<b>205</b>
F.1	Strömung am Profilschnitt . . . . .	205
F.2	Einfluss von Tiltwinkel und Schräganströmung . . . . .	205
F.3	Einfluss des Konuswinkels . . . . .	207
<b>G</b>	<b>Wirbelsystem des MEXICO-Rotors</b>	<b>209</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>211</b>