

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	VII
Symbolverzeichnis	XI
Kurzfassung	XIX
Abstract	XXI
1 Einleitung	1
1.1 Historie der Windenergieanlagen	1
1.2 Heutiger Stand	3
1.3 Stand der Forschung	3
1.4 Ziele der Arbeit	11
2 Methoden zur Berechnung der Aerodynamik von WEA	13
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
3 Prozesskette zur Simulation von Windenergieanlagen	21
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
4 Validierung der Prozesskette anhand des MEXICO-Rotors	37
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

5 Simulation einer Offshore-WEA in maritimer Grenzschicht	69
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 Vorstaueffekt	99
5.2.3 Auswirkungen auf Blatt und Rotor	109
5.2.4 Auswirkungen auf den Nachlauf	126
5.3 Einfluss der Aeroclastik auf die Turbulenzinteraktion	145
5.3.1 Das Modell der Aeroclastiksimulation	145
5.3.2 Auswirkungen auf Blattlasten und -deformation	147
6 Zusammenfassung und Ausblick	167
Anhang	171
A Grundlagen von CFD-Methoden	171
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 Simulationsmethoden für WEA	183
B.1 Grundlagen der Blattement-Impulstheorie	183
B.2 Grundlagen der Actuator Disc	184
B.3 Grundlagen der Actuator Line	186
B.4 Grundlagen der Actuator Surface	186
C FLOWer	189
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
D AutoMesh	197
D.1 Korrekturverfahren der CAD-Schnittstelle	197
D.2 Untersuchung zur Performance von AutoMesh	198
E Betrachtung von Frequenzspektren	201
E.1 Aussagekraft niedriger Frequenzen	201

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