

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	XI
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Ziele und Gliederung der Arbeit.....	3
2 Stand der Forschung und Grundlagen.....	7
2.1 Schwingungen an Windenergieanlagen.....	7
2.1.1 Kräfte aus aerodynamischer Anregung.....	8
2.1.2 Schwingungen durch den Betrieb der Anlage.....	12
2.1.3 Schwingungen durch Wellenanregung	12
2.1.4 Berechnung von Schwingungen bei Windenergieanlagen	13
2.2 Fundamente von Offshore-Windenergieanlagen	14
2.3 Schwingungsminderungsmaßnahmen.....	15
2.3.1 Maßnahmen ohne Zusatzsysteme	16
2.3.2 Maßnahmen durch Zusatzsysteme	19
2.4 Strukturdynamische Grundlagen.....	26
2.4.1 Mechanische Schwingungssysteme.....	26
2.4.2 Bewegungsgleichung.....	27
2.4.3 Eigenverhalten	28
2.4.4 Modale Entkopplung.....	30

2.4.5	Zustandsraumdarstellung	32
2.4.6	Modellreduktion	34
3	Strukturdynamisches Modell der verwendeten OWEA	36
3.1	Annahmen und Datengrundlage	36
3.2	Dämpfungsermittlung	39
3.2.1	Übersicht	40
3.2.2	Messtechnische Bestimmung der Dämpfung	41
3.2.3	Rechnerische Bestimmung der aerodynamischen Dämpfung	43
4	Auslegung von Tilgern mittels Übertragungsfunktionen.....	46
4.1	Anforderungen an Tilger für Windenergieanlagen	46
4.2	Tilgerplatzierung	47
4.3	Zustandsraummodell eines Tilgers	48
4.4	Auslegung passiver Tilger	49
4.4.1	Optimale Abstimmung	50
4.4.2	Einfluss von Fehlparametrisierung und Massenverhältnis.....	52
4.5	Auslegung adaptiver Systeme.....	58
4.6	Auslegung aktiver Tilger.....	60
4.7	Auslegung hybrider Tilger.....	62
4.8	Vergleich der Konzepte	64
4.8.1	Schwingungsminderung.....	65
4.8.2	Tilgerrelativwege	66

4.8.3 Aktorstellkräfte.....	67
4.9 Fazit.....	67
5 Umweltbedingungen und resultierende Lasten	68
5.1 Datengrundlage	68
5.2 Erregung durch Windlasten.....	72
5.2.1 Windgeschwindigkeitsverteilung.....	72
5.2.2 Leistungsdichespektrum des Windes.....	73
5.2.3 Resultierende Windkräfte am Rotor.....	75
5.3 Erregung durch Wellenlasten	77
5.3.1 Wellenspektren.....	77
5.3.2 Wellenmodell	79
5.3.3 Bestimmung der Wellenkraft	82
5.4 Zusammenhang zwischen Wind- und Wellenrichtung.....	89
5.4.1 Beschreibung von Richtungsdifferenzen.....	90
5.4.2 Reduktion auf zwei Richtungsdifferenzen.....	92
6 Bestimmung der Schädigung durch Umweltlasten.....	95
6.1 Übersicht über das Frequenzbereichsverfahren.....	95
6.2 Abbildung des Strukturverhaltens.....	97
6.2.1 Annahmen und varierte Parameter.....	97
6.2.2 Übertragungsfunktionen für OWEAs ohne Tilger.....	99
6.2.3 Übertragungsfunktionen für OWEAs mit Tilger	102

6.3	Resultierende Turmfußbeanspruchungen	104
6.4	Verfahren zur Bestimmung der Schädigung	104
6.4.1	Bestimmung der Schwingspiele aus dem Leistungsdichtespektrum der Antwort	104
6.4.2	Annahmen zum Ermüdungsverhalten	106
6.4.3	Kombination von Wind- und Wellenlasten	109
6.4.4	Ermittlung der Gesamtschädigung	110
6.5	Einfluss der Dämpfung auf die Schädigung	111
6.6	WEA ohne Tilger	114
6.6.1	Einfluss von Einspannsteifigkeit und Wanddicke des Monopiles	114
6.6.2	Einfluss der Wassertiefe	115
6.7	WEA mit passivem Tilger	117
6.7.1	Optimal abgestimmter Tilger	117
6.7.2	Einfluss von Fehlparametrisierungen	120
6.7.3	Vergleich mit Annahme eines Dämpfungsäquivalents	124
6.7.4	Einfluss eines 1FG-TMDs quer zu dessen Wirkrichtung	125
6.8	Windenergieanlage mit adaptivem Tilger	126
6.9	Fazit	128
7	Bestimmung der Schädigung durch Unwuchtlasten	131
7.1	Allgemeines	131
7.2	Aerodynamische Unwuchtlasten	133

7.2.1	Bestimmung der drehzahlabhängigen aerodynamischen Unwuchtkräfte	133
7.2.2	Bestimmung der Schädigung aus aerodynamischen Unwuchten	142
7.3	Massenunwucht	148
7.3.1	Bestimmung der drehzahlabhängigen Kräfte aus Massenunwuchten	148
7.3.2	Bestimmung der Schädigung aus Massenunwuchten	149
7.4	Fazit	152
8	Extremlasten	154
8.1	Modellierung des Tilgerverhaltens	154
8.1.1	Pendeltilger	155
8.1.2	Tilger mit Anschlag	157
8.2	Transientes Ereignis	159
8.3	Harmonische Last	162
9	Konzepte zur konstruktiven Umsetzung	166
9.1	Allgemeines	166
9.2	Realisierung als Pendel	168
9.3	Optimierung in Hinblick auf Bauraum, Position und Montageort	170
9.3.1	Bauweise mit geringer vertikaler Ausdehnung	171
9.3.2	Bauweise mit geringer Ausdehnung in Windrichtung	173
9.3.3	Konzept zur Montage am Generator bei getriebelosen WEAs	175
9.4	Realisierung von Adaptivität	176

10 Zusammenfassung und Ausblick	180
Anhang	183
Literaturverzeichnis	185