

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>NOMENKLATUR.....</b>	<b>IX</b>
<b>1 EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund und Motivation .....	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit.....	5
1.3 Aufbau der Arbeit .....	7
<b>2 SCHALLPROGNOSE.....</b>	<b>9</b>
2.1 Überblick.....	9
2.2 Struktur des Schallprognosemodells.....	10
2.3 Erweiterte Blade Element Momentum- (BEM-) Theorie .....	14
2.3.1 Grundlegende Theorie .....	14
2.3.2 Blattspitzenkorrektur .....	17
2.3.3 Spezifische Gitterimplementierung .....	17
2.3.4 Scherungs- und Queranströmungsmodellierung.....	17
2.3.5 Dynamische Zuströmmodellierung .....	19
2.3.6 Blattdurchbiegungskorrektur .....	20
2.3.7 Radiales Induktionsmodell .....	21
2.3.8 Instationäre Tragflügelaerodynamik.....	21
2.4 Strukturmodell .....	22
2.4.1 Finite Elemente Methode: Isotropes Balkenelement.....	23
2.4.2 Mehrkörpersystem .....	27
2.5 Akustische Modellierung .....	29
2.5.1 Hinterkantenschallmodell .....	29
2.5.2 Grenzschichtmodell .....	33
2.5.3 Bewegte Schallquellen.....	34
2.5.4 Atmosphärische Dämpfung .....	35
2.6 Synthese der Teilmodelle zu einem Gesamtmodell.....	36
<b>3 VALIDIERUNG DES SCHALLPROGNOSEMODELLS.....</b>	<b>39</b>
3.1 Gewinnung der Messdaten .....	39
3.1.1 Kommerzielle SENVION 3.2M114 Windkraftanlage .....	39

---

3.1.2 Kleine Forschungswindturbine der UNIVERSITÄT SIEGEN.....	42
3.2 Verarbeitung der akustischen Messdaten.....	44
3.2.1 Bestimmung der Schallleistungspegel im Terzband für die Großwindturbine nach DIN EN 61400-11 .....	44
3.2.2 Bestimmung der Schalldruckpegel im Terzband für die Kleinwindturbine ..	45
3.2.3 Bestimmung der Modulationstiefe der Kleinwindturbine .....	46
3.3 Verarbeitung der nicht-akustischen Messdaten .....	50
3.4 Vergleich der Prognose mit Messdaten .....	51
3.4.1 Äquivalente Terzbandspektren des Schallleistungspegels der kommerziellen SENVION 3.2M114 Windkraftanlage.....	51
3.4.2 Äquivalentes Terzbandspektrum des Schalldruckpegels der Forschungswindkraftanlage der UNIVERSITÄT SIEGEN.....	52
3.4.3 Modulationstiefe der Forschungswindkraftanlage der UNIVERSITÄT SIEGEN.....	54
3.5 Zusammenfassung und vorläufige Schlussfolgerung .....	55
<b>4 ZYKLISCHE STELLMOTOREN-PITCHSTEUERUNG FÜR EINE MINIMALE MODULATIONSTIEFE .....</b>	<b>57</b>
4.1 Optimierungsverfahren .....	58
4.2 Initialisierung der Optimierung.....	60
<b>5 ERGEBNISSE DER ZYKLISCHEN BLATTVERSTELLUNG.....</b>	<b>65</b>
5.1 Optimierungsstrategien .....	65
5.1.1 Strategie I.....	66
5.1.2 Strategie II .....	68
5.1.3 Strategie III .....	71
5.1.4 Diskussion.....	74
5.1.5 Vorläufige Schlussfolgerungen .....	76
5.2 Konstruktive und physikalische Einflussparameter.....	76
5.2.1 Die NREL 5 MW Referenzwindkraftanlage .....	78
5.2.2 Einfluss der Blattprofilierung .....	80
5.2.3 Elastizität der Rotorblätter .....	86
5.2.4 Elastische Deformation von Turm- und Gondelstruktur .....	89

5.2.5 Zuströmgeschwindigkeit und Scherungsgrad.....	89
5.2.6 Temperatur und relative Feuchte der Luft.....	91
5.2.7 Einfluss der Hörerposition .....	91
5.2.8 Zusammenfassende Bewertung der einzelnen Einflussparameter.....	93
<b>6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>97</b>
<b>ANHANG A: ABLAUFSCHEMA VON <i>SWIND</i> .....</b>	<b>101</b>
<b>ANHANG B: ZUR THEORIE DER SCHALLPROGNOSE: BEWEGTER LAUTSPRECHER.....</b>	<b>103</b>
<b>ANHANG C: FORSCHUNGSWINTURBINE DER UNIVERSITÄT SIEGEN .....</b>	<b>105</b>
<b>ANHANG D: KONSTRUKTIVE UND PHYSIKALISCHE EINFLUSS-PARAMETER IM VERGLEICH .....</b>	<b>107</b>
D.1 Elastizität der Rotorblätter .....	107
D.2 Zuströmgeschwindigkeit und Scherungsgrad .....	110
D.3 Einfluss der Hörerposition .....	111
<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>119</b>