

Dipl.-Ing. Andreas Reuter, Bünsdorf

**Standortabhängige
und anlagenspezifische
Lastkollektive von Wind-
kraftanlagen aus
Simulationsrechnungen**

Reihe **6**: Energietechnik

Nr. **338**

Standortabhängige und anlagenspezifische Lastkollektive von Windkraftanlagen aus Simulationsrechnungen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Arbeitsziele.....	2
1.2	Stand der Wissenschaft.....	4
1.2.1	Vorschriften und Normen.....	4
1.2.2	Weitergehende Untersuchungen.....	6
1.2.3	Beschreibung der Windverhältnisse und Simulation von Windkraftanlagen.....	7
1.3	Vorgehensweise.....	9
2	Wind als Ursache von Strukturbelastungen	12
2.1	Die mittlere Windgeschwindigkeit.....	13
2.2	Die Bodengrenzschicht.....	14
2.3	Die Turbulenz.....	16
2.4	Das Windmodell.....	18
2.4.1	Bestimmung der mittleren Windgeschwindigkeit.....	19
2.4.2	Erzeugung von Zeitschrieben der Windgeschwindigkeit.....	21
2.4.3	Räumliche Struktur des Windes.....	21
2.4.4	Windgradient und Schräganblasung.....	23
2.4.5	Turmschatten oder -aufstau.....	24

2.5	Vergleich mit Meßwerten.....	26
2.5.1	Überprüfung der Langzeitprognosen nach WASP und aus Messungen.....	28
2.5.2	Vergleich der Höhenexponenten nach WASP und aus Messungen.....	32
2.5.3	Vergleich der Turbulenz nach WASP und aus Messungen.....	33
2.5.4	Analyse von generierten und gemessenen Zeitreihen im Zeit- und Frequenzbereich.....	34
3	Die Modelle zur Beschreibung des Systems Windkraftanlage.....	36
3.1	Der Rotor.....	37
3.1.1	Aerodynamische Eigenschaften des Rotors.....	38
3.1.2	Strukturdynamische Beschreibung des Rotorblattes.....	47
3.2	Der Triebstrang und das Getriebe.....	51
3.3	Arbeitsmaschinen.....	56
3.3.1	Der Asynchrongenerator.....	56
3.2	Der Synchrongenerator.....	57
3.3.3	Die Kreiselpumpe.....	60
3.4	Regelung und Betriebsführung.....	63
3.4.2	Mechanischer Pitchregler.....	63
3.4.2	Strömungsabriß durch schnelle Lastaufschaltung mit Generatorlastregelung.....	65
3.4.3	Echtzeitsimulation und Einbeziehung externer Betriebsführungen.....	67

3.5	Die modellierten Windkraftanlagen.....	68
3.5.1	<i>TUP 6.0</i> - Windpumpensystem.....	68
3.5.2	<i>Südwind E 710</i>	69
3.5.3	Konzeptstudie zu einer 1-MW-Anlage.....	70
4	Auswertung der Zeitschriebe unter Betriebsfestigkeitsaspekten.....	72
4.1	Betriebslastennachfahrversuche.....	73
4.2	Rechnerische Ermittlung von Lebensdauern - das Nennspannungskonzept.....	74
4.2.1	Rainflow-Zählung.....	75
4.2.2	Ermittlung der Formzahl und des Mittelspannungseinflusses.....	77
4.2.3	Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner.....	78
4.2.4	Lebensdauerberechnung mit dem $\Delta\sigma$ -Verfahren.....	79
5	Ergebnisse.....	81
5.1	Ausgewählte Bauteile.....	81
5.1.1	Flügelflansch der <i>TUP 6.0</i>	81
5.1.2	Wellenflansch der <i>Südwind E 710</i>	82
5.1.3	Wellenflansch der Konzeptstudie einer 1-MW-Anlage.....	83
5.2	Zeitschriebe und Lastkollektive.....	84
5.3	Einfluß der Turbulenz und der mittleren Windgeschwindigkeit auf die Lebensdauer.....	86

5.4	Konstruktive Maßnahmen zur Erhöhung der Lebensdauer.....	88
5.5	Ergebnisse der Simulationsrechnungen für Anlagen an verschiedenen Standorten.....	90
6	Bewertung.....	92
6.1	Ergebnisanalyse.....	92
6.2	Kritik und Perspektive.....	95
7	Zusammenfassung / Abstract.....	97
	Anhang.....	99
	Bezeichnungen.....	118
	Literaturverzeichnis.....	123