

Tragwerksplanung für den Turm einer Windenergieanlage in Holzbauweise

Diplomarbeit

SS 2004

Angefertigt von:

Markus Golinski

Erstprüfer:

Prof. Dipl. Ing. Nikolaus Nebgen

Zweitprüfer:

Dipl. Ing. Thorsten Schulz/ Ingenieurbüro Aerodyn

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	1
AUFGABENSTELLUNG, ZUSAMMENFASSUNG, DANK	5
1 EINLEITUNG	8
2 BEMESSUNG EINES WINDENERGIEANLAGEN-TURMES	10
2.1 Besonderheiten beim Bemessen einer Windenergieanlage	10
2.2 Einwirkungen auf die Turmkonstruktion	11
2.2.1 Einwirkungen aus Rotor- und Gondelbetrieb	11
2.2.1.1 Stationäre Belastungen	11
2.2.1.2 Instationäre Belastungen	12
2.2.2 Sonstige Einwirkungen auf die Turmkonstruktion	16
2.3 Schwingungsprobleme	17
2.4 Betriebsfestigkeit und Lastkollektive	19
2.5 Turmkonstruktion	21
2.5.1 Anforderungen und Kriterien	21
2.5.2 Übliche Turmkonstruktionen	22
2.5.2.1 Freitragende Türme	22
2.5.2.2 Abgespannte Systeme	23
2.5.2.3 Sonderbauformen	24
2.6 Lastannahmen, Lastfälle und Typenprüfung	24
2.6.1 Belastung aus Wind	24
2.6.2 Sonstige Belastungen	24
2.6.3 Typenprüfung in Deutschland	25
2.7 Erforderliche Nachweise	25
3 SCHWINGUNGSBERECHNUNGEN UND BETRIEBSFESTIGKEIT	27
3.1 Grundlagen der Schwingungen	27
3.2 Lineare Schwingungen des Einmassensystems	29
3.2.1 Die ungedämpfte, freie Eigenschwingung	29
3.2.2 Die gedämpfte, freie Eigenschwingung	31
3.3 Besonderheiten bei dynamisch belasteten Holztragwerken	31
3.3.1 Art der Holzbauwerke	31
3.3.2 Eigenschaften des Baustoffes Holz	32
3.4 Dauerschwing- und Betriebsfestigkeit von Holz	32
3.5 Materialspezifische Merkmale	33
3.5.1 Holz allgemein	34
3.5.2 Holzwerkstoffe	36
3.5.3 Brettschichtholz	36
3.5.4 Holzverbindungen	36
3.6 Bestandsaufnahme in der deutschen Holzbaunormung	37
3.7 Bemessungsmodelle für dynamisch beanspruchte Tragwerke im Holzbau	38
3.7.1 Bemessungsmodell für Glockenstühle nach GEROLD	39
3.7.1.1 Tragfähigkeitsnachweise für Einzelstäbe	39
3.7.1.2 Tragfähigkeitsnachweis für mechanische Verbindungen	40
3.7.1.3 Gebrauchsfähigkeit	40
3.7.2 Bemessungsmodell nach EC 5-Teil 2 (DIN V ENV 1995-2)	40
3.7.2.1 Allgemeines	41

3.7.2.2	Tragfähigkeitsnachweis für Einzelstäbe und Verbindungen	41
3.7.3	Vergleich der zwei Bemessungsvorschläge	43
4	ALLGEMEINES ZUR ENTWURFSPLANUNG.....	45
4.1	Der Maschinenteil der Windenergieanlage aeroSmart 5	45
4.1.1	Technische Daten der Gondel „aeroSmart 5“	45
4.1.2	Einsatzbereiche der Kleinwindkraftanlage	46
4.2	Pflichtenheft für die Turmkonstruktion	47
4.3	Lastannahmen für die Vorbemessung	47
4.3.1	Lasten aus der Gondel	47
4.3.1.1	Extremlasten aus Maschinenbetrieb	48
4.3.1.2	Windlasten auf den Turm	49
4.3.2	Sonstige Annahmen	50
4.3.3	Ermittlung der Erregerfrequenzen aus Rotorbetrieb	50
5	VORBEMESSUNG VERSCHIEDENER VARIANTEN.....	52
5.1	Variante 1: Hohlprofil freistehend	52
5.1.1	Methode der Vorbemessung	53
5.1.2	Überschlägliche Nachweise	54
5.1.3	Geschätzte Eigenfrequenz	54
5.1.4	Schnittkräfte und Auslastung	56
5.1.5	Eigenfrequenzanalyse	58
5.1.6	Kontrollrechnung der 1. Biege-Eigenfrequenz	59
5.1.7	Konstruktion und Details	60
5.1.7.1	Querschnitt	60
5.1.7.2	Verbindung der Segmente	61
5.2	Variante 2: Hohlprofil abgespannt	66
5.2.1	Tragverhalten abgespannter Systeme	66
5.2.2	Ermittlung der Vorspannung der Abspannseile	67
5.2.3	Lastfälle	68
5.2.4	Schnittkräfte	69
5.2.5	Ermittlung der Querschnitte	71
5.2.6	Eigenfrequenzanalyse	72
5.2.7	Konstruktion und Details	73
5.2.7.1	Querschnitt	73
5.2.7.2	Verbindung der Segmente	73
5.3	Variante 3: Fachwerkturm freistehend	77
5.3.1	Entwurfsüberlegungen	77
5.3.2	Konstruktive Anforderungen	78
5.3.3	Untersuchung verschiedener Ausfachungs-Varianten	79
5.3.4	Lastfälle	80
5.3.5	Ergebnis des Vergleichs und Auswahl	81
5.3.6	Schnittkräfte	83
5.3.7	Eigenfrequenzanalyse	84
5.3.8	Konstruktion und Details	85
5.3.8.1	Querschnitte	85
5.3.8.2	Verbindungsbemessung	85
5.4	Bewertung der segmentierten Varianten	89
5.4.1	Kriterien für die Bewertung	89
5.4.2	Aufstellung der Bewertungstabelle	91
5.5	Untersuchung nichtsegmentierter Varianten	92

5.5.1	Entwurfsüberlegungen und konstruktive Anforderungen	93
5.5.2	Statisches Modell.....	94
5.5.3	Schnittkräfte.....	94
5.5.4	Eigenfrequenzanalyse	95
5.5.5	Konstruktion und Details.....	96
5.6	Bewertung der nichtsegmentierten Varianten	98
5.6.1	Kriterien für die Bewertung	98
5.6.2	Bewertungstabelle	99
6	BEMESSUNG UND KONSTRUKTION VON VARIANTE 4	100
6.1	Lastannahmen.....	100
6.1.1	Eigengewicht	100
6.1.2	Wind.....	100
6.1.2.1	Windlasten am Turmkopf durch Gondel und Rotor	101
6.1.2.2	Wind auf Turmkonstruktion	102
6.1.3	Vorspannkräfte.....	105
6.1.4	Temperatur.....	105
6.1.5	Betriebsfestigkeitslasten	106
6.1.5.1	Vorgehensweise im Stahlbau.....	106
6.1.5.2	Vorgehensweise im Holzbau.....	107
6.2	Sonstige Annahmen	108
6.2.1	Imperfektionen	108
6.2.2	Bodendrehfeder der Fundamentierung	108
6.2.3	Verschieblichkeit der Verbindungsmittel.....	110
6.2.4	Statisches Modell.....	110
6.2.5	Zusammengesetzter Querschnitt der Turmspitze	111
6.3	Untersuchung der Optimierungsmöglichkeiten	112
6.3.1	Konstruktive Optimierung	112
6.3.2	Tragwerksoptimierung	113
6.4	Statische Nachweise	115
6.4.1	Lastfälle Festigkeitsversagen	115
6.4.2	Schnittkräfte für Festigkeitsnachweise	116
6.4.3	Kontrolle der Schnittkräfte	118
6.4.4	Berechnung der statischen Bemessungsfestigkeiten:.....	119
6.4.5	Montage.....	120
6.4.6	Ansichten und Positionsübersicht.....	123
6.4.7	Position 1 – gekrümmter Eckgurt	125
6.4.7.1	Querschnitts- und Stabilitätsnachweis	125
6.4.7.2	Nachweis des Anschlusses am Fußpunkt.....	126
6.4.7.3	Nachweise Stützenfuß-Variante STF 1	128
6.4.7.4	Nachweise Stützenfuß-Variante STF-2.....	135
6.4.8	Position 2 – Zusammengesetzter Querschnitt	137
6.4.8.1	Variante 1: Ausführung als Block-verleimter Querschnitt.....	137
6.4.8.2	Variante 2: Nachgiebig verbundener Querschnitt	138
6.4.9	Position 3 – Druckriegel.....	140
6.4.10	Position 4 – Rundstahldiagonalen, Stabanker DETAN-S und Anschluss.....	141
6.5	Betriebsfestigkeitsnachweise	142
6.5.1	Lastfälle Ermüdungsversagen	142
6.5.2	Schnittkräfte für Betriebsfestigkeitsnachweise	142
6.5.3	Ausgewählte Betriebsfestigkeits-Nachweise	143
6.5.3.1	Nachweis des Eckgurt-Querschnitts	143

6.5.3.2	Nachweis des Schlitzblech-Anschlusses am Fußpunkt	144
6.6	Nachweis der dynamischen Stabilität	145
6.6.1	Annahmen	145
6.6.2	Eigenfrequenzanalyse	145
6.7	Zusammenfassung und Ausblick.....	147
7	VERZEICHNISSE	149
7.1	Glossar	149
7.2	Literaturverzeichnis	150
7.3	Abkürzungsverzeichnis.....	152
7.4	Abbildungsverzeichnis.....	152
7.5	Diagrammverzeichnis	154
7.6	Tabellenverzeichnis	154
8	ANHANG	156
8.1	R-Stab-Ausdruck der Schnittgrößen.....	
8.2	R-Stab-Ausdruck für Betriebsfestigkeitsnachweise.....	
8.3	R-Stab-Ausdruck für den Nachweis der dynamischen Stabilität	
8.4	Berechnung des nachgiebig miteinander verbundenen Querschnitts.....	
8.5	Konstruktionsplan und Materialliste.....	

Benutzungshinweis:
Kursiv gedruckte Begriffe sind im Glossar erklärt.