Diplomarbeit: Tragwerksplanung für den Turm einer Windenergieanlage in Holzbauweise

Sommersemester 2004

Name: Markus Golinski, Matrikel Nr.: 301709

markus.golinski
Otto 1
31137 Hildesheim
fon: +49-(0)5121-2892815
mobil: +49-(0)177-7311642
mail: markus@golinski.net

1. Prüfer: Prof. Dipl. Ing. Nikolaus Nebgen (FH Hildesheim)
2. Prüfer: Dipl. Ing. Thorsten Schulz (Ingenieurbüro Aerodyn)

Zusammenfassung:

Ziel dieser Diplomarbeit ist, der hauptsächlich auf die Werkstoffe Stahl und Stahlbeton ausgerichteten Windenergie-Branche die Verwendbarkeit des Baustoffes Holz für Turmkonstruktionen zu zeigen.
Hierzu werden in den ersten drei Kapiteln die Grundlagen der Bemessung von Windenergieanlagen und dynamisch belasteten Holztragwerken erläutert, zwei Bemessungsmodelle für dynamisch beanspruchte Holzbauwerke vorgestellt und verglichen.
Im Anschluss werden verschiedene, technisch machbare Lösungen im Rahmen einer Vorbemessung untersucht und abschließend dazu anhand verschiedener Bewertungskriterien eine geeignete Auswahl getroffen. Die gewählte Variante wird im letzten Abschnitt der Diplomarbeit nach dem „Schluss-Entwurf Bemessungsnorm Holzbau" (BEKS-Entwurf der DIN 1052 vom 28.06.2002) bemessen und konstruiert.

HAWK
HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFT UND KUNST
Fachhochschule Hildesheim/Holzminden/Göttingen
Fachbereich Bauingenieurwesen
Fachrichtung Holzingenieurwesen

In Kooperation mit: aerodyn

aerodyn Energiesysteme GmbH
Provianthausstrasse 9
24768 Rendsburg
www. aerodyn.de

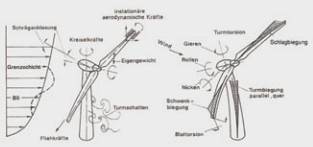
1. ANALYSE

Arbeitsschritte

- Klären der Einwirkungen, Kräfte, Lastannahmen und Anforderungen an die Turmkonstruktionen von Windenergieanlagen
- Erarbeiten der Grundlagen von Schwingungsberechnungen
- Literaturrecherche zu Dauerschwing- und Betriebsfestigkeit von Holz, Holzwerkstoffen und Verbindungsmitteln
- Vergleich von zwei Berechnungsmodellen für die Bemessung dynamisch belasteter Holzkonstruktionen

Grundlagen von Schwingungsberechnungen

- Aufgabe einer Schwingungsuntersuchung ist es, sicherzustellen, dass sich die Erregerfrequenz (bei Windenergieanlagen z.B. Drehzahl des Rotors, Turmvorstau u.a.) außerhalb der Eigenfrequenzen des Bauwerks befindet.
- Überlagern sich Erregerfrequenz und Eigenfrequenz kann es theoretisch zu unendlich hohen Amplituden kommen, (die so genannte Resonanzkatastrophe) die das Versagen des Tragwerkes herbeiführen können.
- „Stellschraube" bei der Auslegung von dynamisch beanspruchten Tragwerken sind die Steifigkeit der Konstruktion sowie die Massenbelegung (Gewicht der Bauteile) innerhalb des Bauwerkes.
- Bei Holztragwerken ist anzustreben eine möglichst steife Konstruktion zu entwerfen um eine Eigenfrequenz oberhalb der Erregerfrequenz zu erreichen.



Wirkende Kräfte an einer Windenergieanlage

Schematischer Aufbau einer Windenergieanlage

Besonderheiten beim Bemessen einer Windenergieanlage

Der Planer und Konstrukteur einer Windenergieanlage muss bei der Dimensionierung und Auslegung eine Reihe von typischen Besonderheiten beachten. Diese unterscheiden sich teilweise erheblich von der Bemessung „üblicher Hochbauten" und sollen im Folgenden stichpunktartig aufgeführt werden.

- Windenergieanlagen sind in hohem Maße wechselhaften Beanspruchungen mit beträchtlichen *Lastwechselzahlen* (10^8 und mehr Lastwechsel) infolge von Wind ausgesetzt. Dies führt zu Materialermüdung und Betriebsfestigkeitsproblemen, die oft das ausschlaggebende Kriterium bei Entwurf und Konstruktion darstellen. „Windenergieanlagen sind die perfekten Material-Ermüdungsmaschinen". Meist werden Windenergieanlagen für eine Auslegungsdauer von 20, gelegentlich auch 30 Jahren bemessen, d.h. diese Bauwerke haben eine vorgegebene Lebensdauer.
- Da Windenergieanlagen oftmals weltweit verkauft werden sind erhöhte Annahmen z.B. bezüglich der Windgeschwindigkeiten zu treffen.
- Eine Windenergieanlage ist ein in hohem Maße schwingungsanfälliges Bauwerk. Das bedeutet, die einzelnen Komponenten wie Rotor, Gondel, Turm und Fundament und deren Steifigkeiten müssen sorgsam aufeinander abgestimmt sein, um das Schwingungsverhalten in der Gesamtwirkung unter Kontrolle zu bringen.
- Durch Betrieb des Maschinenteils auf der Turmspitze kommt es zu einer Vielzahl, für den sonstigen Hochbau eher seltenen bzw. nicht vorkommenden Einwirkungen und Belastungen. Beispielsweise erzeugt starkes Abbremsen der Rotorwelle im Notfall eine hohe Momenteneinwirkung an der Turmspitze.
- Ausgangspunkt für fast alle Einwirkungen und Schwingungen ist dabei - im Unterschied zu sonstigen Turmkonstruktionen - der Rotor der Windenergieanlage und dessen verschiedenartigen Belastungen aus Luft- und Massenkräften.

Dauerschwing- und Betriebsfestigkeit von Holz und Holzwerkstoffen

Begriffe

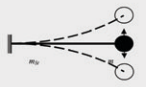
Unter *Dauerschwingfestigkeit* versteht man den um eine gegebene Mittelspannung schwingenden, größten Spannungsausschlag, den eine Probe „unendlich oft" ohne Bruch und ohne unzulässige Verformung aushält.

Unter *Betriebsfestigkeit* versteht man die Ermüdungsfestigkeit eines Bauteils das einer zeitlich, größenmäßig und unregelmäßigen Folge von Beanspruchungen unterliegt und dessen Nutzungsdauer durch den Höchstwert der Lastspielzahlen *N* begrenzt ist.

Werkstoff Holz

- Dynamische Beanspruchungen bewirken in der Regel unkritische, mikrostrukturelle Schädigungen im Holzgefüge, die jedoch unter höheren Lastzyklen zu Ermüdungbrüchen führen können.
- Die Kerbempfindlichkeit (Schwächung durch Wachstumsmerkmale wie Äste u.a.) ist wesentlich weniger ausgeprägt als im Stahlbau und wird deshalb im Holzbau vernachlässigt.
- Gerade durch die Windenergieanlagen-Industrie hat die Erforschung des Ermüdungsverhaltens von Holz und Holzwerkstoffen „Aufwind" bekommen, da sich Holzwerkstoffe im Rotorblatt-Bau sehr gut bewährt haben.
- Die bisherigen Kenntnisse zeigen dass Holz und Holzwerkstoffe für dynamisch belastete Bauwerke gut geeignet sind.
- Es bestehen mehr oder weniger starke Unsicherheiten aufgrund des inhomogenen Aufbaus des Baustoffes Holz und der noch zu erforschenden Grundlagen hinsichtlich der Dauerschwing- und Betriebsfestigkeit von Holz, Holzwerkstoffen und Verbindungsmitteln.

Beispiel: Abschätzung der Eigenfrequenz am eingespannten Stab



$$w_0 = \sqrt{\frac{c}{m + \frac{17}{35} m_{St}}} \quad [s^{-1}]$$

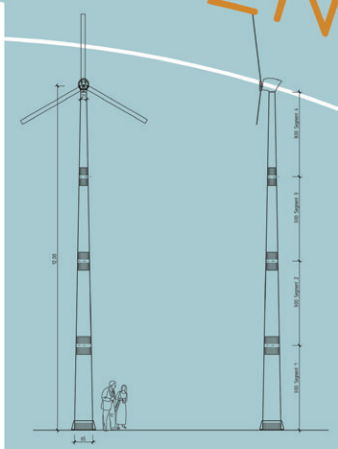
mit: m Einzelmasse am Stabende
c Federsteifigkeit $c = \frac{3EI}{l^3}$
m_{St} Masse des Stabes

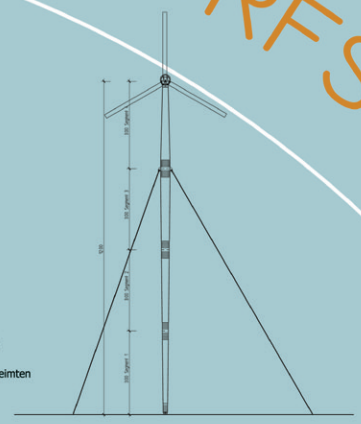
In der Mitte des 19.Jahrhunderts standen ca. 200.000 Windmühlen in Europa. Aus Holz. Heute stehen alleine in Deutschland etwa 15.000 Türme von Windenergieanlagen. Aus Stahl oder Beton. Ein wenig „hölzerne Abwechslung" würde, gerade in Zeiten des wachsenden Unmuts in der Bevölkerung über eine „Verspargelung" der Kulturlandschaften sicher nicht schaden, sie eher noch bereichern.

2. ENTWURFSPLANUNG

Arbeitsschritte

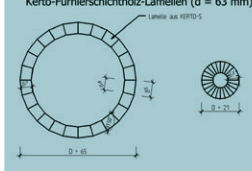
- Klären der technischen Daten der Gondel „aeroSmart 5" und Erstellen eines Pflichtenheftes für die Turmkonstruktion
- Lastannahmen für die Vorbemessung und Ermittlung der Erregerfrequenzen durch Rotorbetrieb
- Vorbemessung von drei segmentierten und drei nicht teilbaren Varianten nach DIN 1052-1988
- Vergleich der Varianten mit Hilfe einer Bewertungsmatrix
- Auswahl einer Variante für die Ausführungsplanung





Variante 1: Hohlprofil eingespannt

- Turmkonstruktion besteht aus röhrenförmigen Segmenten mit verleimten Kerto-Furnierschichtholz-Lamellen (d = 63 mm)

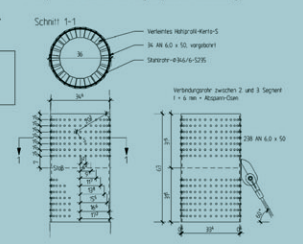


- Verbindung der Segmente mittels „übergestülpter", kreisförmiger Stahl-Hohlprofile und Kammnägel

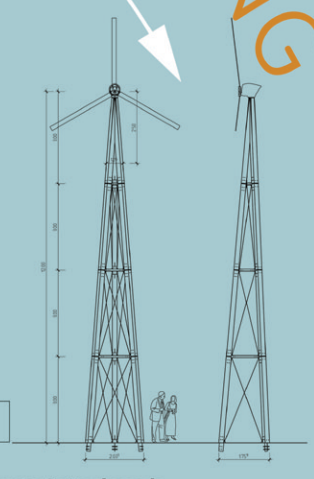
Ergebnis: Statisch unproblematisch, schwingungstechnisch jedoch ungünstig → unwirtschaftlich, da aufgrund niedriger Eigenfrequenz ein statisch nicht ausgelasteter Querschnitt erforderlich wäre

Variante 2: Hohlprofil abgespannt

- Turm besteht aus röhrenförmigen Segmenten aus verleimten Kerto-Furnierschichtholz-Lamellen (d = 59 mm), siehe Variante 1
- Verbindung der Segmente ebenfalls mittels kreisförmiger Stahl-Hohlprofile und Kammnägel (siehe Abbildung)



Ergebnis: Statisch unproblematisch, schwingungstechnisch günstig, Eigenfrequenz ist nicht das dimensionierende Kriterium wie bei Variante 1 → gut geeignete Konstruktion



Variante 3: Fachwerk

- Turm besteht aus quadratischen Querschnitten NH S10; Eckgurte 17/17 cm²; Horizontalriegel 7/7 cm²; Zugstabdiagonalen Ø 12 mm, S 235
- Verbindung der Einzelstäbe durch universal einsetzbare Stahlblech-Knoten und Stabdübel
- Untersuchung verschiedener Ausfachungs-Varianten auf statische und dynamische Eignung

Ergebnis: Statisch unproblematisch, schwingungstechnisch aufgrund hoher Steifigkeit günstig → geeignete Konstruktion

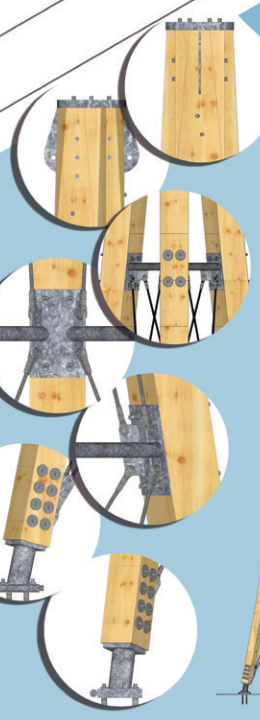
	Gewichtung	Wertung 1-10	Variante 1 Hohlprofil eingespannt	Wertung 1-10	Variante 2 Hohlprofil abgespannt	Wertung 1-10	Variante 3 Fachwerk
1. Herstellungskosten	450	5,6	2520	6,4	2880	6,2	2790
2. Montageaufwand	50	7	350	10	500	5	250
3. Wartungsaufwand	100	9	900	7	700	5	500
4. Externe Fertigung	75	2	150	2	150	8	600
5. Transportkosten	75	6	450	7	525	5	375
6. Optischer Eindruck	100	7	700	8	800	4	400
7. Erweiterbarkeit	50	6	300	8	400	6	300
8. Dyn. Eigenschaft	100	2	200	9	900	7	700
Summe:	1000		5570		6855		5915
Erreichte Prozent:			55,7 %		68,6 %		59,2 %
Wertung 1...10 (ungünstig.....sehr günstig)							

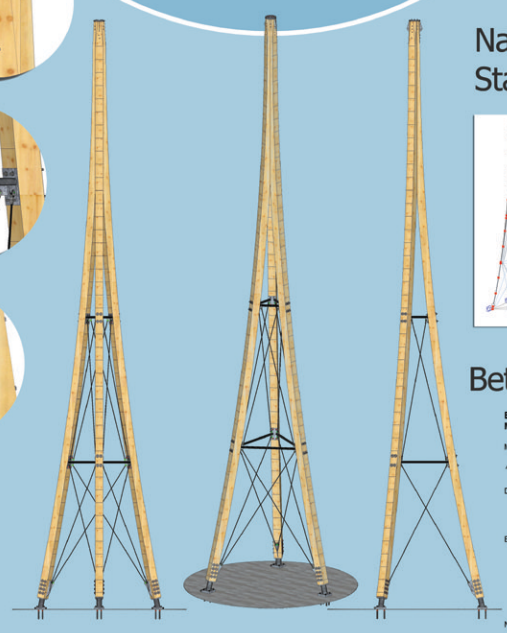
Bewertungsmatrix für den Vergleich der Varianten

Vergleich

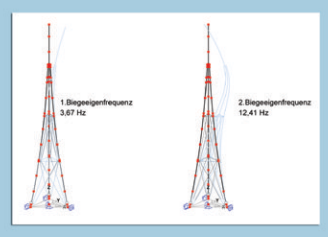
Start

Ziel





Nachweis der dynamischen Stabilität



Betriebsfestigkeitsnachweise

Bemessungsbeispiel Betriebsfestigkeit:
Maximale Spannung bei Biegung und Zug im Eckgurt 16/16-BS 28h

Maßgebende Schnittgrößen: $\Delta N_{t,d}$ = 25,82kN, $\Delta M_{y,d}$ = 0,99 kNm, $\Delta M_{z,d}$ = 0,92 kNm

$A = 16 \times 16 = 256\ cm^2$ $\quad W_{y,z} = 16 \times 16^2 / 6 = 682\ cm^3$

Die folgende Bedingung nach BEKS, 10.2.7 muss erfüllt sein:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_{red} \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \le 1$$

Berechnung der Betriebsfestigkeiten mit Beiwert k_{fat}

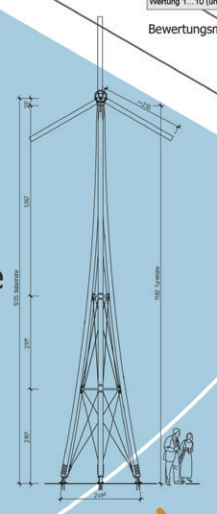
$$f_{t,0,fat,d} = \frac{k_{fat} \cdot f_{t,0,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_{M,fat}} = \frac{0,5 \cdot 1,95 \cdot 0,7}{1,0} = 0,6825\ kN/cm^2$$

$$f_{m,y,fat,d} = f_{m,z,fat,d} = \frac{k_{fat} \cdot f_{m,y,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_{M,fat}} = \frac{0,3 \cdot 2,80 \cdot 0,7}{1,0} = 0,588\ kN/cm2$$

Nachweis:

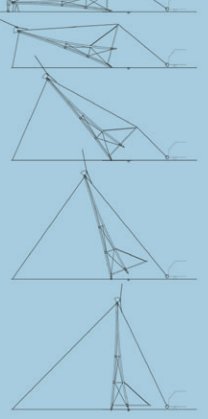
$$\frac{\Delta N_{t,0,d} / A}{f_{t,0,fat,d}} + \frac{\Delta M_{y,d} / W}{f_{m,y,d}} + k_{red} \cdot \frac{\Delta M_{z,d} / W}{f_{m,z,d}} \le 1$$

$$\frac{25,82 / 256}{0,6825} + \frac{0,99 \cdot 10^6 / 682}{0,588} + 1,0 \cdot \frac{0,92 \cdot 10^6 / 682}{0,588} = 0,148 + 0,247 + 0,229 = 0,62 \le 1$$

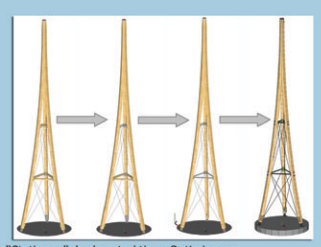


Montage und Wartung

Turm mit montiertem Stellbaum für Montage



Konstruktive Optimierung



"Stationen" der konstruktiven Optimierung

- Eckgurte aus gekrümmten Brettschichtholz-Bindern – 16/16 cm² - BS 28h
- Horizontale Druckriegel aus kreisförmigen Stahl-Hohlprofilen Ø 42,4x4 mm – S235
- Ausfachung mit Zugstabsystem Detan-S, Ø 10 mm + Stabanker
- Blockverleimung im oberen Turmbereich (Schiftung)
- Turm kann komplett vorgefertigt an die Baustelle geliefert werden
- Montage und Wartung der Gondel erfolgt mit Hilfe scharnierartiger Stützenfüße, Stellbaum und Winde

3. AUSFÜHRUNGSPLANUNG

Arbeitsschritte

- Lastannahmen nach der „Richtlinie für Windenergieanlagen" des DIBt, der „Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen" des Germanischen Lloyds und der DIN 1055 „Lastannahmen für Bauten"
- Berechnung der Verbindungsmittelsteifigkeiten und der Bodendrehfederung der Fundamentplatte
- Untersuchung von statischen und konstruktiven Optimierungsmöglichkeiten
- Führen der statischen Nachweise nach E DIN 1052 („BEKS-Entwurf") „Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken" sowie der DIN 18800 „Stahlbauten-Bemessung und Konstruktion"
- Überprüfung der Holzbauteile auf Betriebsfestigkeit nach EC 5-Teil 2: Brücken sowie der Forschungsarbeit „Holz und Holzverbindungen unter nicht vorwiegend ruhenden Einwirkungen" der TU München
- Nachweis der dynamischen Stabilität mit Hilfe von RS-DYN (Modul des Stabwerksprogramms R-STAB)
- Anfertigen von Konstruktionsplänen mit CAD-System CADwork