

Fachhochschule Köln  
Cologne University of Applied Sciences

Fakultät für Anlagen,  
Energie- und Maschinensysteme

## Fachhochschule Köln

Fakultät für Anlagen-, Energie und Maschinensysteme  
Studiengang Maschinenbau  
Studienrichtung Konstruktionstechnik

Bachelorarbeit

### **Auslegung eines Turms für eine 10 kW Kleinwindenergieanlage mittels Prüfung alternativen Materialien und Konstruktionen in Einbezug einer optimalen Prozesskostenbetrachtung**

vorgelegt von: Fischbach Jean-Jacques  
Matrikel-Nr. 11070652

Referent: Prof. Dr.-Ing. Henning Hallmann

Externer Betreuer: Dipl. Ing. Jan Dabrowski

Datum: 13.06.2014

In Zusammenarbeit mit:



## **Kurzfassung**

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit der konstruktiven Auslegung eines Turmes für eine Kleinwindenergieanlage (KWEA). Mittelfristig ist geplant, dass die Firma *enbreeze* eine Pilotserie von drei Anlagen mit einer Nennleistung von 10 kW bei einer Nabenhöhe um 20 m bundesweit aufbaut. Um ein ernstzunehmendes und konkurrierendes Produkt gegenüber großen Windanlagen auf dem Markt zu etablieren, müssen die Stromgestehungspreise niedrig gehalten werden. Um dieses Ziel neben einem innovativen Regelungssystem zu erreichen, muss auch der Turm, als großer Kostenfaktor wirtschaftlich ausgelegt sein. Es wurde eine Marktanalyse der bestehenden Türme für KWEA durchgeführt, sowie alternative Materialien geprüft, welche als Werkstoff für einen Turm in Frage kommen würden. Nach einer Bewertung der Materialien und Konstruktionen in Einbezug der Anforderungen und Normen wurde eine wirtschaftliche Stahlkonstruktion ausgearbeitet.

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the structural design of a tower for a small wind turbine (SWT). In the medium term the company *enbreeze* want to build up a pilot series of three turbines with a rated output of 10 kW at a hub height of 20 m. In order to establish a serious and competitive product compared to the large wind turbines on the market, the electricity production costs must be kept low. To achieve this in addition to an innovative control system, the tower as a significant cost item needs to be designed economically. Therefor the market of existing towers for small wind turbine was analyzed. As well alternative materials were checked, which could be a possibility for the construction of the tower. After an evaluation of materials and structures in the inclusion of the requirements and standards an economical steel structure has been developed.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	8
2	Stand der Technik	9
2.1	Türme von KWEA	11
2.2	Alternative Türme	13
2.3	Vorgehensweise nach der DIN-EN 61400-2	15
3	Produktspezifikationen	18
3.1	Geometrische Anforderungen	18
3.2	Designtechnische Anforderungen	19
3.3	Technische Anforderungen	19
4	Wirtschaftlicher Hintergrund	25
5	Identifikation von Produktalternativen	26
5.1	Bewertungskriterien	26
5.2	Eigenschaften der Materialien	27
5.2.1	Machbarkeit Holz	29
5.2.2	Machbarkeit Verbundwerkstoffe	31
5.2.3	Zwischenfazit	32
5.3	Eigenschaften ermitteln	33
5.4	Ergebnis der Bewertung	35
6	Auslegung des Turmes	35
6.1	Festigkeitsberechnung	36
6.2	Eigenfrequenzberechnung	38
6.3	Anbindung an Maschinenträger	41
6.4	Überprüfung und Validierung der finalen Konstruktion	43
7	Fazit und Ausblick	44
8	Literaturverzeichnis	46
8.1	Internet	46
8.2	Literatur	46
9	Anhang	48

# 1 Einleitung und Zielsetzung

Die folgende schriftliche Ausarbeitung wurde als Bachelorarbeit, welche in enger Zusammenarbeit mit dem Unternehmen *enbreeze GmbH*, angefertigt. Die Firma *enbreeze* hat sich das Ziel gesetzt, eine neue Generation von Kleinwindenergieanlagen [KWEA] (überstrichene Rotorfläche  $<200\text{m}^2$ ) zu entwickeln und zu vermarkten, indem ein neuartiges Pitchsystem in den Anlagen Verwendung findet. Im April 2011 wurde *enbreeze* mit dem zweiten Platz bei der Cleantechology Challenge, eine renommierte Auszeichnung für Startups, und ein Jahr später war das Cleantech Unternehmen unter den Top 30 der grünen Startups, in der von der Wirtschaftswoche aufgestellten Rangliste.

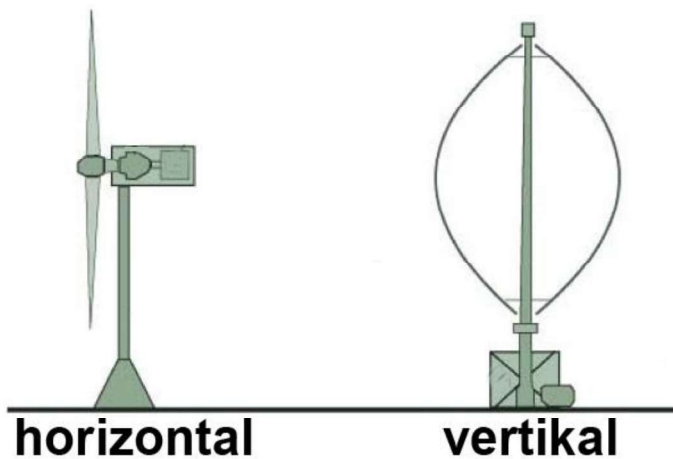
Es sind eine ganze Reihe Unternehmen auf dem KWE Markt zu finden, welche unterschiedliche Bauarten von KWEA anbieten. Man unterscheidet zwei Hauptkategorien: einerseits werden die Vertikal-Achs-Anlagen angeboten und andererseits die besser bekannten und häufiger bekannten Horizontal-Achs-Anlagen. Des Weiteren unterscheidet man die Horizontalen Anlagen durch diverse Arten an Regelungssystemen. Unter anderem gibt es das Pitchsystem und das Stallsystem (unter ‚pitchen‘ versteht man das sich um eine Achse drehende Rotorblatt). Jedoch weisen die auf dem Markt erhältlichen Anlagen, unabhängig vom Regelungssystem, erst eine Nennleistung bei einer Windgeschwindigkeit von um die 10 m/s auf. Da in Deutschland jedoch eine mittlere Windgeschwindigkeit zwischen 3 m/s und 5 m/s liegt, fokussierte sich der Diplom Ingenieur Jan Dabrowski, *Chief Technical Officer* [CTO] des Unternehmens *enbreeze*, auf die Entwicklung einer KWEA für Schwachwindgebiete. Die Entwicklung und Konstruktion mehrerer Prototypen, bestätigte die Umsetzbarkeit der ursprünglichen Idee, eine KWEA für Schwachwindgebiete auszuarbeiten und parallel hierzu die Eigenschaften einer geringen Geräusentwicklung sowie einem konstanten Energieertrag, selbst bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten, zu erzielen. Um all diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde ein innovatives und patentiertes Pitch-Regelungssystem entwickelt und in die Anlage implementiert.

Das Ziel der Entwicklung der *enbreeze* KWEA ist es, ein Produkt auf den Markt zu bringen, welches einen Energieertrag von 10kW bei geringer Windgeschwindigkeit

und hoher Verfügbarkeit erzielt. Potentielle Kunden wären Industriebetriebe welche in eine dezentrale Energieversorgung investieren würden. Neben dem Beitrag zur Energiewende, könnten die Betriebe ebenfalls durch die Einspeisevergütung Kosten eingespart.

## 2 Stand der Technik

Der Markt für Kleinwindenergieanlagen ist in den letzten Jahren stark gewachsen, jedoch ist die Anzahl der Hersteller und Anbieter weiterhin überschaubar. Man unterscheidet bei Windkraftanlagen zunächst zwischen Horizontalen und Vertikalen Windkraftanlagen (Abbildung 1).



*Abbildung 1: Horizontal/ Vertikal Windkraftanlage [1]*

Des Weiteren differenziert man die Anströmrichtung der Rotorblätter in Luv und Lee (Abbildung 2). Der Vorteil eines Leeläufers ist, dass keine aktive Windnachführung benötigt wird. Um eine senkrechte Anströmung auf die Rotorebene und somit eine optimale Anströmung der Rotorblätter zu gewährleisten, muss die Anlage stets dem Wind nachgeführt werden. Dieses wird aktiv durch einen elektrischen Stellantrieb und passiv durch eine meist große und optisch nicht ansprechende Windfahne realisiert. Der Nachteil eines Leeläufers ist der Windschatten des Turmes. Da der Rotor sich ‚hinter‘ dem Turm befindet, spielt die Form und die somit erzeugten Turbulenzen des Turmes eine entscheidende Rolle. Da die Reynoldszahl und somit die Intensität der Verwirbelungen am Turm einen direkten Einfluss auf den Energieertrag haben, muss der Abstand zwischen Turmmantelfläche und

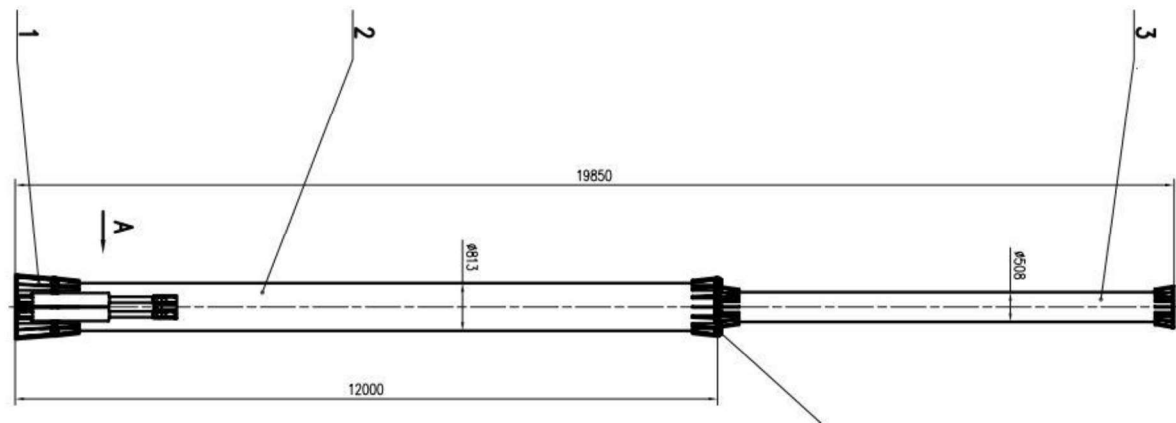


Abbildung 18: Finaler Turm

Weiter wurde der nach den Normen vorgegebene und für die Baugenehmigung erforderliche Standsicherheitsnachweis berechnet. Das kombinierte Moment im Betrieb, sprich Belastungen durch Winddruck und maximalen Schub, liegt bei 415 kNm. In diesem Lastfall wird ein Sicherheitsfaktor von 3,9 erreicht. Das Moment bei der Montage liegt bei 520 kNm und es ergibt sich somit ein Sicherheitsfaktor von 3,1. Sämtliche Anforderungen und Sicherheitsnormen wurden nach Norm erfüllt. Schlussfolgernd gilt der Turm als standsicher und das Verfahren zur Erteilung der Baugenehmigung für die *enbreeze* KWEA kann in die Wege geleitet werden.

## 7 Fazit und Ausblick

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit der Auslegung und Konstruktion eines geeigneten Turmes für eine Pilotserie von drei Anlagen. Die KWEA weist eine Nennleistung von 10 kW bei einer Nabenhöhe von ungefähr 20 m auf.

Durch die Analyse der unterschiedlichen auf dem Markt verfügbaren Turmvarianten wurde ein wirtschaftliches und den Anforderungen entsprechendes Produkt entwickelt. Es zeichnete sich nach der Betrachtung alternativen Materialien für den Turmbau ab, dass durch den fortgeschritten Stand der Technik in der Metallverarbeitung Stahltürme eine wirtschaftliche und qualitativ hochwertige Basis aufweisen, um einen optimierten Turm für KWEA zu entwickeln. Es kristallisierte sich jedoch aus dem Entwicklungsprozess heraus, dass die spezifische Norm für den Kleinwindbereich sich oftmals auf die Standards der großen Windkraftanlagen stützt.

Sicherheitsfaktoren werden zu hoch und Lastfälle zu unspezifisch dargestellt voraus dann eine Überdimensionierung der Bauteile hervorgeht. Solange die KWEA nach dem Prinzip des vereinfachten Lastmodells ausgelegt werden, um die aufwendige Zertifizierung zu erlangen, wird eine Optimierung des Turmes sich als sehr komplex gestalten. Optimierungen werden auf jeden Fall für spätere *enbreeze* Anlagen sowie die Serien möglich sein. Einerseits durch die sich im Prozess befindende aeroelastische Simulation und andererseits durch den zu erwartenden Fortschritt in der Herstellung und Verarbeitung der Materialien, welche während der Ausarbeitung analysiert wurden.

Mittelfristig ist geplant die Anlage auf Basis der DIN EN 61400-2 für die Serie zu zertifizieren, da so die Erteilung der Baugenehmigung einfacher wird.

Zusammenfassend lässt sich sagen dass durch unterschiedlichen Kriterien eine Optimierung des Turmes und somit die Wirtschaftlichkeit der gesamten *enbreeze* Anlage verbessern lässt. Der grundsätzliche Wandel der Energieversorgung zur dezentralen Stromerzeugung wird in den kommenden Jahren noch viel weiter fortschreiten und die Firma *enbreeze* sowie weitere innovative Unternehmen werden diesen Wechsel mit gestalten.

## 8 Literaturverzeichnis

### 8.1 Internet

- [11] <http://kleinwindkraft.wordpress.com/technische-faktoren/>
- [12] <http://www.wind-energie.de/infocenter/technik/funktionsweise/leelaeufer>
- [13] <http://www.klein-windkraftanlagen.com/allgemein/preise-fuer-kleinwindkraftanlagen-fehlinvestitionen-vermeiden/>
- [14] [http://www.zeroemissioncities.at/fileadmin/referenten/Vortraege2013/04\\_Liersch.pdf](http://www.zeroemissioncities.at/fileadmin/referenten/Vortraege2013/04_Liersch.pdf)
- [15] [https://www.fos.de/de/Aktuelles\\_News\\_Detail.htm?id=376&type=1](https://www.fos.de/de/Aktuelles_News_Detail.htm?id=376&type=1)
- [16] <http://www.timbertower.de/medien>

### 8.2 Literatur

- [DIN 1-06] DIN EN 61400-2: 2006: Sicherheit kleiner Windenergieanlagen
- [JD-10] Dabrowski, Jan: Entwicklung von Kleinwindkraftanlagen für Schwachwindgebiete mittels des SPALTEN Produktentwicklungsprozesses, Diplomarbeit, Uni Karlsruhe 2010
- [KM 14] Kleinwind Marktreport 2014\_V1.5
- [VDI 2225] VDI 2225 Blatt 4 Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Bemessungslehre
- [JTDM 02] Jan van der Tempel and David-Pieter Molenaar, (2002), Wind Turbine Structural Dynamics – A Review of the Principles for Modern Power Generation, Onshore and Offshore, Wind engineering volume 26, no. 4, pp 211–220
- [RM-09] Roloff/Matek Maschinenelemente Normung, Berechnung, Gestaltung - Lehrbuch und Tabellenbuch Wittel, H., Muhs, D., Jannasch, D., Voßiek, J. 19Aufl. 2009



- [PB-13] Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung Feldhusen, Jörg, Grote, Karl Heinrich (Hrsg.) 8., vollst. überarb. Aufl. 2013,
- [TF-12] Tobias Finken: Konstruktive Auslegung der Nabe einer Kleinwindkraftanlage mit Pitchregelung, 2010