

## 6.8 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand eines Turmes für eine Klein-Windenergieanlage konnte im Rahmen dieser Arbeit gezeigt werden dass der Baustoff Holz für diesen Anwendungsbereich gut geeignet ist. Die Bemessung der Variante 4 veranschaulicht, dass auch für den Holzbau weniger alltägliche Themen wie baulastdynamische Einwirkungen und Betriebsfestigkeit mit dem Baustoff Holz bewältigbar sind.

Auch wenn dynamische Berechnungen oftmals maßgebend für die Wahl der Querschnitte sind, so können dennoch durch eine geeignete Konstruktion wirtschaftliche Auslastungen erreicht werden. Allerdings zeigt sich auch, dass bestimmte Konstruktionen, die unter statischen und wirtschaftlichen Aspekten geeignet erscheinen, in baulastdynamischer Hinsicht als problematisch zu werten sind (siehe Ergebnisse der Variante 1 „Hohlprofil freistehend“). Konstruktionsprinzipien die sich im Stahl- und Stahlbetonbau gut bewährt haben, wie die vielfach gebauten Hohlprofil-Türme, können demnach nur bedingt auf den Holzbau übertragen werden.

Ferner wurde nachgewiesen werden dass trotz ungünstiger Annahmen betriebfestigkeitstechnische Probleme - zumindest im Bereich der Klein-Windenergieanlagen - nicht zu erwarten sind. Die Nachweise der Betriebsfestigkeit können dank der informativen und ergiebigen Arbeit von KREUZINGER UND MOHR (1994) [28] problemlos geführt werden. Wünschenswert wäre es, noch fehlende  $k_{fat}$ -Ermüdungsbeiwerte z.B. für Stabdübel in Zukunft „zur Hand“ zu haben. Es besteht demnach noch Forschungsbedarf im Bereich Zeitfestigkeit von Holz, Holzwerkstoffen und Holzverbindungen.

Problematisch zeigte sich die Ermittlung der Spannungsschwingbreiten für die Turmkonstruktion aus Holz. Software und Programme des Ingenieurbüros Aerodyn sind hier verständlicherweise sehr stark auf den Werkstoff Stahl ausgerichtet, die ermittelten Spannungsamplituden beziehen sich deshalb auf die verschiedenen Steigungen der *Wöhlerlinie*.

Inwieweit die Ergebnisse dieser Arbeit auch auf Windenergieanlagen mit größeren Nabenhöhen zu übertragen sind steht zur Diskussion und muss sicherlich am konkreten Fall überprüft werden. Eine prinzipielle Machbarkeit, Turmkonstruktionen für Windenergieanlagen in Holz und/oder Holzwerkstoffen zu bauen, ist jedoch gegeben. Es bestehen bereits Planungen für Windenergieanlagen mit Holztürmen für Nabenhöhen um die 40 m (Projekt „TWINDO“).

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 (Spiegel Nr.14/2004), sicher nicht schaden, sie eher noch bereichern.

<i>Turmvorstau</i>	Durch den Turm verminderte Windgeschwindigkeit auf der Wind zuge- wandten Seite
<i>Wechselfestigkeit</i>	Die Wechselfestigkeit ist ein Sonderfall der Dauerfestigkeit für die Mittel- spannung Null. Die Spannung wechselt zwischen gleich großen Plus- und Minuswerten.
<i>Weibullverteilung</i>	Mathematische Näherungsfunktion, mit deren Hilfe auf die statistische Verteilung der Windgeschwindigkeiten an einem Standort geschlossen werden kann.
<i>Windgradient auch Höhengradient</i>	Zunahme der Windgeschwindigkeit über die Höhe gesehen, Höhenprofil der Windgeschwindigkeit
<i>Windnachführung</i>	Ausrichten des Maschinenhauses durch Gierbewegung in die Windrich- tung
<i>Wöhlerverfahren</i>	Beim Wöhlerverfahren werden auf die Prüfkörper oft wiederholte, kon- stante Beanspruchungen aufgebracht und die Zahl der <i>Lastspiele</i> bis zum Versagen der Prüfkörper gemessen. Die Wöhlerdiagramme (= <i>Wöh- lерlinie</i> ) entstehen durch das Auftragen der Bruchlastspielzahl auf der Abszisse und der Beanspruchung an der Ordinate.
<i>Zeitfestigkeit</i>	Die Zeitfestigkeit ist die Beanspruchung, die von einem Körper über eine bestimmte, endliche Lastspielzahl (Zeit) ertragen werden kann. Wenn diese überschritten wird, versagt der Körper.

## 7.2 Literaturverzeichnis

- [1] HAU E.: Windenergieanlagen: Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. 2.Auflage Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1988.
- [2] GOLINSKI M.: Hausarbeit zur Diplomarbeit, Eine Einführung in Windenergieanlagen, unveröffentlicht, Hildesheim, 2004.
- [3] GASCH R.: Windenergieanlagen: Grundlagen und Entwurf. 3. Auflage Stuttgart: Teubner- Verlag, 1996.
- [4] MOLLY J.-P.: Windenergie: Theorie, Anwendung, Messung. 2. Auflage Karlsruhe: C.F. Müller- Verlag, 1990.
- [5] GERMANISCHER LLOYD: Richtlinie zur Zertifizierung von Windenergieanlagen, Hamburg: Selbstverlag der Germanischer Lloyd Windenergie GmbH. 2003.
- [6] DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK: Richtlinie für Windenergieanlagen: Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 2004.
- [7] HERING E., MARTIN R., STOHRER M.: Physik für Ingenieure. 7. Auflage Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1999.
- [8] RUSCHEWEYH H.: Dynamische Windwirkung an Bauwerken: Band 1: Grundlagen, Anwendungen. 1. Auflage Wiesbaden, Berlin: Bauverlag: 1982.
- [9] KANYA J.: Glockentürme: Entwurf, Konstruktion, Berechnung. 1.Auflage Wiesbaden, Berlin: Bauverlag GmbH, 1968.
- [10] WRYCZA W.: Praktische Schwingungsberechnungen von Türmen, Schornsteinen, Maschinenpo- desten, Fundamenten und Hochbauten. 2. Auflage Berlin, München: Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 1983.
- [11] HARNACH R.: Zur Schwingungsberechnung von Holztragwerken. Teil 1 und 2 Bauen mit Holz 11/87, S.725- 729 und 12/ 87, S. 810- 814.
- [12] DIN 1052 – 1, 1988 – 04 „Holzbauwerke, Berechnung und Ausführung“ Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [13] GEROLD M.: Zur Berechnung und Konstruktion von Glockenstühlen. Bauen mit Holz 4/89, S.232- 234
- [14] ANSELL M.P.: Ermüdung von Holz und Holzwerkstoffen. In: Holzbauwerke, Bauteile, Konstruktio- nen, Details nach Eurocode 5, STEP 2. 1.Auflage Düsseldorf: Fachverlag Holz, 1995

- [15] TSAI K.T., ANSELL M.P.: The fatigue properties of wood in flexure. Journal of materials science 25, 1990, S.865-878
- [16] BONFIELD W., ANSELL M.P.: Fatigue properties of wood in tension, compression and shear Journal of materials science 26, 1991, S.4765-4773
- [17] NEBGEN N.: Präfabrikation 2. Skriptum zur Vorlesung, FH Hildesheim, Fachbereich Bauingenieurwesen, Studiengang Holzingenieurwesen, 2002.
- [18] EHLBECK J.: Dauerschwingfestigkeit von Holz und Holzverbindungen – eine Bestandsaufnahme. In: Ingenieurholzbau in Forschung und Praxis. 1. Auflage Karlsruhe: Bruderverlag, 1982.
- [19] GEROLD, M.: Persönliche Mitteilung am 17.03.2004
- [20] STAMPA U., BREDOW W.: Die Windwerker. 2.Auflage Freiburg: ökobuch Verlag, 1989
- [21] LOSE W.: Stahlbau, Teil 2. 19. Auflage Stuttgart, Leipzig: B.G. Teubner-Verlag, 1997
- [22] DIN V ENV 1995 – 2, 1999-08 „Bemessung und Konstruktion von Holzbauten, Teil 2: Brücken“ Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [23] CECOTTI A.: Holzverbindungen unter Erdbebenbeanspruchung. In: Bemessung und Baustoffe, Holzbauwerke nach Eurocode 5, STEP 1. 1.Auflage Düsseldorf: Fachverlag Holz, 1995
- [24] Aerodyn GmbH: Kleinwindenergieanlage aeroSMART 5, Technische Beschreibung. Rendsburg: Firmenschrift, 2003
- [25] HALLER M.: Verbundwerkstoffe – Ist Holz dem Leichtbau gewachsen? Mikado, 11/2003, S.52-56
- [26] CROME H.: Handbuch Windenergie Technik. Staufen bei Freiburg: ökobuch-Verlag, 2000
- [27] BECKER K.: Untersuchung der dynamischen und duktilen Eigenschaften von mechanischen Verbindungsmitteln im Hinblick auf die Beschreibung der Eigenschaften in den europäischen Regelwerken (EC). Abschlussbericht der TH Darmstadt Darmstadt: 1993
- [28] KREUZINGER H., MOHR B.: Holz und Holzverbindungen unter nicht vorwiegend ruhenden Einwirkungen. Abschlußbericht der TU München München: 1994
- [29] GEROLD M.: Dynamisch beanspruchte Holzkonstruktionen. Bautechnik, 8/98
- [30] ARGYRIS J.H., BRAUN K.A.: Statische und dynamische Untersuchung verschiedener Türme für Windturbinen. ISD-Bericht Nr. 261 Stuttgart: 1979
- [31] PETERSEN C.: Stahlbau. Braunschweig: Friedrich Vieweg-Verlagsgesellschaft mbH, 1988
- [32] MILBRANDT E., Verbindungsmittel – Verbindungen nach DIN 1052 und 18800 Holzbauhandbuch, Reihe 2, Teil 2, Folge 1, Überarbeiteter Nachdruck Düsseldorf: EGH, 1997
- [33] BLAß H.-J. ET AL: Schlussentwurf Bemessungsnorm Holzbau BEKS. Karlsruhe: 2002
- [34] SCHAUMANN P., SEIDEL M.: Eigenschwingverhalten von Windenergieanlagen, Berechnungen und Messungen der Universität Hannover, Institut für Stahlbau Hannover: Datum nicht bekannt
- [35] GEROLD, M.: Persönliche Mitteilung am 12.05.2004
- [36] GEROLD, M., MILBRANDT E: Glockenturm Allmersbach im Tal Bauen mit Holz 02/94, S.88-94.
- [37] MILBRANDT E., Verbindungsmittel – Genauere Nachweise; Holzbauhandbuch, Reihe 2, Teil 2, Folge 2, Düsseldorf: EGH, 1991
- [38] DIN 18800–1, 1990–11 „Stahlbauten, Bemessung und Konstruktion“ Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [39] WETZELL OTTO-W.: Wendehorst-Bautechnische Zahlentafeln. 30. Auflage Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B. G. Teubner-Verlag, 2002