

TimberTower: Erfahrungen aus Konstruktion und Betrieb der ersten Windkraftanlage mit Holzturm

Mike Sieder
Technische Universität Braunschweig
Institut für Baukonstruktion und Holzbau
Braunschweig, Deutschland



Carlo Schröder
Reprojekt GmbH
Sachverständigenbüro für Windkraft
Burgdorf/Otze, Deutschland



TimberTower: Erfahrungen aus Konstruktion und Betrieb der ersten Windkraftanlage mit Holzturm

1. Einleitung

Unumstößlicher Fakt ist, dass die Nutzung fossiler Energieträger in den letzten 150 Jahren rasant angestiegen ist. Hält der Trend an, dann hätte die Menschheit erdgeschichtlich gesehen in der Dauer eines Wimpernschlages die über Jahrtausende aufgebauten fossilen Ressourcen verbraucht. Allein vor dem Hintergrund des steigenden Energieverbrauchs und der erkennbaren Endlichkeit der fossilen Ressourcen wird die Bedeutung regenerativer Energien, wie Solartechnik und Windkraft, daher in der Zukunft deutlich zunehmen.

Vor diesem Hintergrund startete die Firma TimberTower 2008 mit der Idee, die regenerative Energiegewinnung mittels Windkraft auch durch eine ressourcenschonende und nachhaltig orientierte Konstruktionsweise der Windkraftanlagen zu ergänzen. So entstand auf dieser Basis mit enormem persönlichen und monetären Einsatz die Entwicklungsgeschichte für eine Windkraftanlage (WKA) mit Holzturm.

2. Entwicklungsgeschichte TimberTower

Das Unternehmen TimberTower GmbH wurde 2008 in Hannover mit dem Ziel der Entwicklung, des Vertriebs und des Betriebs von Windkraftanlagen mit Holzturm gegründet. Nach intensiver Entwicklungsarbeit konnte im Jahre 2009 die Zertifizierung des Konzeptes für einen Holzturm mit 100 m Nabenhöhe für eine Windenergieanlage des Typs Vensys 77 – 1,5 MW durch TÜV Nord erlangt werden. Für die letztendliche bauliche Umsetzung einer entsprechenden Anlage mussten die Herstellungs- und Montageschritte detailliert durchdacht und erprobt werden. Hierzu wurde 2010 ein 22,5 m hohes Testsegment auf dem Gelände der Cordes Holzbau GmbH & Co. KG in Rotenburg/Wümme errichtet. Da die Windenergieanlage selbst zwar als Maschine kategorisiert ist, der Turm als fest mit dem Baugrund verbundene bauliche Anlage jedoch in den Bereich der Bauordnung fällt und hierbei viele baurechtliche Abweichungen vorhanden waren, konnte die bauliche Umsetzung nur im Verfahren der Zustimmung im Einzelfall für einen Prototypen ermöglicht werden. Wesentliche Fragestellungen waren unter anderem das Verhalten des für die Turmkonstruktion eingesetzten Brettsperrholzes (BSP) unter dynamischer Beanspruchung, insbesondere das Ermüdungsverhalten, sowie die qualitative Umsetzung der Verklebungstechnik während der Turmerrichtung und das langzeitige Verhalten der geklebten Verbindungstechnik während des Betriebs.

Für die Verbindungstechnik der Turmsegmente aus BSP kamen eingeklebte Lochbleche zur Anwendung. Bis dato lagen grundsätzlich umfangreiche Untersuchungen der MPA Wiesbaden, Prof. Bathon, zum Tragverhalten dieser Verbindungstechnik vor. Diese bezogen sich im Wesentlichen auf Vollholz in üblicher Anwendung für vorwiegend ruhende Belastungen bzw. statische oder quasi-statische Einwirkungen.



Abbildung 1: Prototyp TimberTower, Marienwerder/Hannover

Ab 2010 wurde der Entwicklungsprozess – die Prüfung der tragwerkstechnischen Berechnung, die Konzeption, Durchführung und Auswertung der Versuche zum Ermüdungsverhalten der geklebten Verbindungstechnik – gutachterlich durch Prof. Kreuzinger (ehemals TU München) und Prof. Sieder begleitet.

Im Jahr 2011 erfolgte die Erteilung der Zustimmung im Einzelfall für die Umsetzung des Turmes mit eingeklebten Lochblechen unter dynamischer Beanspruchung, die mit Auflagen im Hinblick auf die Überwachung und das Monitoring des Turmes verbunden war. Im gleichen Jahr stieg die Kohl Pharma Gruppe, Merzig, als Investor für die TimberTower GmbH ein, welche die Fertigstellung und Inbetriebnahme der ersten WKA mit hölzerner Tragstruktur am Standort Marienwerder/Hannover ermöglichte. Die erfolgreiche Umsetzung dieses Prototyps führte 2013 zur Entwicklung eines Turms für WKA mit 140 m Nabenhöhe, was 2014 zur Erteilung eines umfassenden Patents auf einen Holzturm als Hohlkörper mündete.

3. Konstruktionsprinzip

Die wesentlichen Vorteile, die im Fokus der Entwicklung und Umsetzung einer WKA mit Holzturm standen, waren in den tendenziell geringeren Kosten beim Turm selbst, der Montage, der Wartung, im Aspekt der regionalen Wertschöpfung und im Nachhaltigkeitsgedanken zu sehen. Als rein technische Aspekte sind im Vergleich zu etablierten Bauweisen das günstigere Ermüdungsverhalten aufgrund des Dämpfungsverhaltens der WKA mit Holzturm, das Dämpfungsverhalten des Turmes selbst sowie daraus resultierende, geringere Schallemissionen zu benennen.

Der TimberTower ist als achteckiger Schaftquerschnitte unter Verwendung von BSP aus Fichte C24 mit einer Plattendicke von 30 cm Wanddicke konzipiert. Aus dem Stahlbetonfundament erstreckt sich bis zu einer Höhe über Gelände von ca. 5,10 m ein achteckiger Stahlbetonquerschnitt, auf dem der 90 m hohe Turm aufgesetzt ist. Der konisch verlaufende Turm weist am Fußpunkt einen Durchmesser von 7,10 m und im Anschlussbereich der Turbinengondel einen Durchmesser von 3,10 m auf. Die 54 BSP-Elemente mit einer Standardlänge von 15 m – insgesamt ca. 400 m³ Holz – sind zur Umsetzung des Turmquerschnittes helixartig angeordnet, sodass höhenmäßig jeweils nur 2 gegenüberliegende Horizontalstöße zwischen den Elementen vorhanden sind. Im Inneren des Turmes befindet sich eine hölzerne Fachwerkstruktur als Lehrgerüst mit Podesten im Abstand von 3,75 m, die einerseits zur Turmmontage diente und andererseits die WKA-spezifischen Komponenten wie Steigleiter, Lift, Kabel und Beleuchtungselemente aufnimmt. Auf dem Stahlbetonsockel befindet sich ein achteckiger Stahlflansch, an dem Lochbleche (Stahl S235) aufgeschweißt sind, welche den Anschluss zwischen Sockel- und Turmquerschnitt gewährleisten. Die Lochbleche greifen in eingebrachte Schlitze in die BSP-Elemente ein und sind mittels eines 2-Komponenten PUR-Klebstoffes der Firma Purbond/Henkel (2K-PUR CR421) eingeklebt. Die Verbindung der Turbinengondel am oberen Ende des Turmes erfolgt in gleicher Weise über einen achteckigen Stahladapter. Die Klebe-Verbindungstechnik mittels eingeklebten Lochblechen kam ebenfalls für die Verbindung der Horizontalstöße der BSP-Elemente zum Einsatz. Die vertikalen Verbindungsstellen zwischen den BSP-Elemente wurden stumpf mittels des genannten Klebstoffes CR421 verklebt. Außenseitig ist der Turm mit einer Abdichtungsbahn SIKApflan als Wetterschutz bekleidet, die werkseitig auf die BSP-Elemente aufgebracht und vor Ort an den Stoßstellen verklebt wurde.

4. Zulassungs-/Genehmigungs-/ Betriebserlaubnisverfahren

Herausforderungen bei der Planung und Umsetzung waren unter anderem die Sicherstellung der Anforderungen für den Einsatz der Holzkonstruktion in Nutzungsklasse 2, die Gewährleistung einer Betriebsdauer von 20 Jahren unter dynamischer, nicht vorwiegend ruhender Beanspruchung, die Abstimmung der technischen Kenngrößen (Steifigkeiten, cw-Wert, Dämpfung) mit dem Anlagenhersteller für die voranstehende Lastrechnung, die

Anwendbarkeit der Bemessungsnorm Eurocode 5 für dynamische Beanspruchung der Bauteile (BSP selbst sowie vor allem der Klebe-Verbindungstechnik) sowie die rechnerische Auslegung für die maßgebenden Beanspruchungen – Torsionsmoment am Turmkopf, Biegemoment am Turmfuß.

Die Genehmigung erfolgte zunächst für den gewählten Standorts auf dem Gelände der Universität Hannover in Marienwerder gemäß Bundesimmissionsschutzgesetz BImSchG im geregelten Verfahren ohne besondere Berücksichtigung des Holzturms. Das gleichfalls notwendige Baugenehmigungsverfahren beinhaltete die Notwendigkeit der statischen Prüfung des Turms. Da die Firma TimberTower als langfristiges Ziel die Umsetzung einer derartigen WKA als Serienprodukt im Fokus hatte, wurde eine Typenprüfung des Turms angestrebt. Mit der beinhalteten Klebe-Verbindungstechnik war die Erteilung der Typenprüfung jedoch nicht ohne weiteres möglich. Hierfür war die Prüfung der Lochblech-Verbindung für alle maßgebenden Belastungszustände – Biegung und Torsion des Turmes – Zug- und Schubbeanspruchung der Lochblech-Verbindung mit daraus resultierenden Kurzzeit- und Dauerschwingversuchen – erforderlich. Im Rahmen eines beantragten Verfahrens auf Zustimmung im Einzelfall (ZiE) bei der Obersten Baubehörde des Landes Niedersachsen mussten die entsprechenden Nachweise für die Lochblech-Verbindung sowie die Umsetzung eines dauerhaften Monitoringsystems erbracht werden. In diesem Zuge wurden in Abstimmung mit den Gutachtern Grenzwerten für Luftfeuchtigkeit, Holzfeuchtigkeit, Temperatur, Biege- und Torsionsmoment, Zugdehnung der Lochbleche, Eigenfrequenz festgelegt und die Umsetzung des Monitoringsystems konzipiert.

Bis auf die Verbindung der BSP-Elemente mit eingeklebten Lochblechen unter dynamischen Beanspruchungen konnten zunächst alle Nachweise erfolgreich geführt werden. Für die Lochblech-Verbindung wurde auf Basis gutachterlicher Stellungnahmen von Prof. Kreuzinger / Prof. Sieder zur Beanspruchung der Verbindung unter dynamischen Beanspruchungen eine ZiE erteilt. Hierzu wurden an der MPA Wiesbaden zahlreiche Versuche durchgeführt und basierend darauf die Ermüdungsrechnung von TimberTower vorgenommen. Zur Überwachung der Anlage im Betrieb wurde als Auflage ein Monitoringkonzept genannt. Dies soll den Verlauf der Holzfeuchtigkeit unter Einhaltung der NKL 2 aufzeichnen. Ferner sollen die Extremlasten in den Betriebszuständen der Anlage sowie die Ermüdungslasten aufgezeichnet und die Lochblechverbindung bzgl. der Ermüdungsbeanspruchung überwacht werden.

Resultierend aus der Notwendigkeit des Vorliegens einer Typenprüfung für in Serie gefertigte Türme besteht hierbei die grundsätzliche Anforderung an Bauprodukte, diese auch unter dynamischer Beanspruchung einsetzen zu können. Es bestand daher seitens TimberTower die Absicht, eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für die in Holz eingeklebte Lochblechverbindung beim Deutschen Institut für Bautechnik Berlin (DIBt) zu beantragen. Hierzu wurde ein entsprechender Arbeitsplan sowohl für die Lochblech-Verbindung als auch für die Zulassungserweiterung des Klebstoffs für den Einsatz unter dynamischer Beanspruchung eingereicht. Das Verfahren wurde nach Einstellung der Aktivitäten von TimberTower ebenfalls eingestellt.

5. Monitoringsystem

Im Wesentlichen soll mittels des installierten Monitoringsystems ein Nachweis der Standesicherheit sowohl bezogen auf die extremalen als auch auf die ermüdungswirksamen Beanspruchungen geführt werden. Zusätzlich soll der Nachweis der Einhaltung der Nutzungsklasse 2 bzw. 1 für das Holzbauwerk mit dem Monitoringsystem erbracht werden. Hierfür wurde von TimberTower ein Monitoringsystem mit unterschiedlichen Messmitteln entwickelt. Prinzipiell werden bauphysikalische, baustatische und bauldynamische Größen gemeinsam mit den von der Anlage gelieferten Größen (z.B. Gondelposition) aufgezeichnet und ausgewertet. Hierbei sind vor allem die Holzfeuchtemessung zur Überprüfung der Einhaltung der Nutzungsklasse sowie die Messung der mechanischen Beanspruchung der Verbindungsmittel hervorzuheben. Die Daten werden von den einzelnen Messstellen über jeweilige Verstärker, bzw. Datenverarbeitungseinheiten über ein CAN-Bus-System an den Server übertragen. Dort werden die Rohdaten in eine Datenbank

übertragen und unter Berücksichtigung aller zugehörigen Werte in den Ausgabewert umgerechnet, z.B. für die Holzfeuchte wird der elektrische Widerstand unter Berücksichtigung der Holztemperatur und mit Angabe der Messstellenposition berechnet und gespeichert. Für die Datenaufzeichnung, -verarbeitung und -auswertung wurde ein Open Source Code verwendet, so dass Messstellen später hinzugefügt, Komponenten ausgetauscht sowie einzelne Programmpakete verändert werden können. Die Abfrage der Daten und die Einhaltung der Grenzwerte kann online nachvollzogen werden. Abbildung 2 zeigt beispielhaft ein Ablaufschema der Datenverarbeitung und -auswertung des Monitoringsystems.

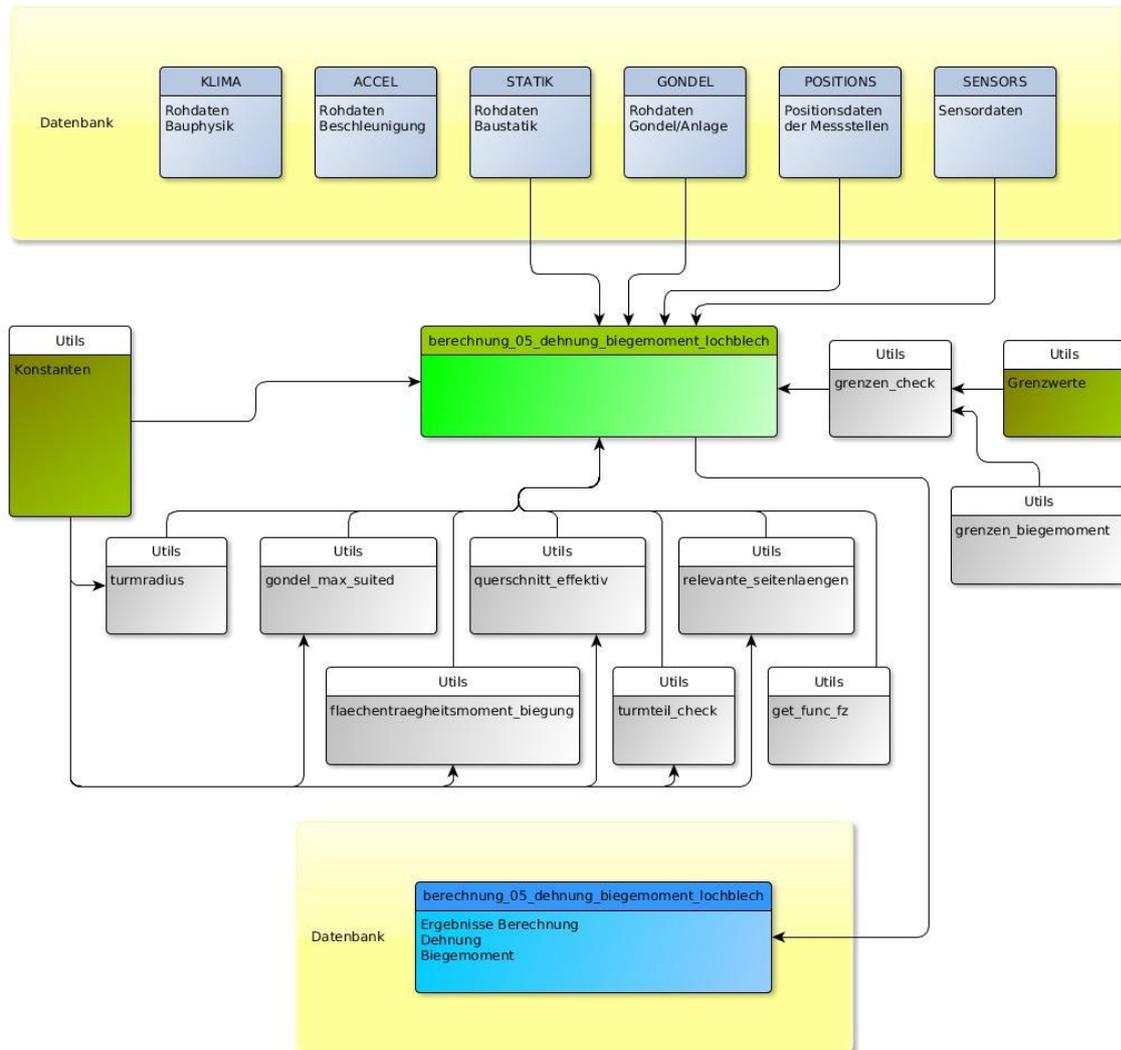


Abbildung 2: Beispielhaftes Ablaufschema der Datenverarbeitung und -auswertung

1. Bauphysikalische Größen

– Holzfeuchte klimatisch

– Art der Messung

Elektrische Widerstandsmethode mit Brückenschaltung und Temperaturkorrektur

– Messmittel

Messung mit teilsolierten Gewindestangenpaaren

– Positionierung der Messmittel

Turmkopf, Turmmitte, Turmfuß jeweils in zwei Messtiefen (Lamelle 2 und 7) und in den vier Haupthimmelsrichtungen. Nah an den Holzfeuchtigkeitsmessungen wird in der 1. und 8. Lamelle die Temperatur mit einer Genauigkeit von mindestens $\pm 2^\circ\text{C}$ bestimmt.

– Intervall der Messdatenaufnahme

Stündlich

Es ist eine Holzfeuchte zwischen 7-15% angestrebt, dies entspricht der Nutzungs-kategorie 1 (nach Tabelle F3 der DIN 1052:2008-12 5-15%). Ein Anstieg der Holzfeuchte bis 20 % würde der Nutzungskategorie 2 entsprechen. Selbst eine Holzfeuchte zwischen 15 und 20 % würde nicht zum Versagen der Konstruktion führen.

→ Minimalwert: 5 %

→ Maximalwert: 20 %

– Holzfeuchte schadensbedingt

– Art der Messung

Elektrische Widerstandsmethode mit Brückenschaltung und Temperaturkorrektur

– Messmittel

Messung mit Gewindestangenpaaren

– Positionierung der Messmittel

An jedem Wandelement je zwei Elektrodenpaare knapp unterhalb der Horizontalstöße. Zusätzlich sind je zwei Elektrodenpaare an jedem Wandelement zum Stahladapteranschluss und zum Anschluss an die Fußflansche zum Fundament positioniert. Nah an den Holzfeuchtemessungen wird in der 1. und 8. Lamelle die Temperatur mit einer Genauigkeit von mindestens $\pm 2^{\circ}\text{C}$ bestimmt.

– Intervall der Messdatenaufnahme

Stündlich

Sollte mit Hilfe der genannten Möglichkeiten eine Beschädigung der Witterungsschutzfolie festgestellt werden, wird diese an den detektierten Stellen repariert. Dies geschieht durch das Aufschweißen eines PVC-Folienbandes über die entsprechende Fehlstelle. Da sich über den Wandquerschnitt eine Ausgleichsholzfeuchte einstellt, ist davon auszugehen, dass im Laufe der Zeit eine in den Holzquerschnitt eingedrungene Feuchtigkeit in Richtung Turminneres ausgeglichen wird.

– Temperatur im Holz

– Art der Messung

Direkte Temperaturmessung

– Messmittel

Digitaler TSIC-Temperatursensor

– Positionierung der Messmittel

Turmkopf, Turmmitte, Turmfuß jeweils in zwei Messtiefen (Lamelle 1 und 8) und in den vier Haupthimmelsrichtungen.

– Intervall der Messdatenaufnahme

Stündlich

50 °C ist die maximal zulässige Temperatur für die Verwendung des Klebstoffes. Zum Schutz der Elektronik ist vom Anlagenhersteller ebenfalls die Temperatur auf max. 50 °C beschränkt.

→ Maximalwert: 50°C

– Lufttemperatur/Luftfeuchte

– Art der Messung

Direkte Messung der Luftfeuchtigkeit und -temperatur

– Messmittel

Kombinierter Luftfeuchtigkeits- und Temperatursensor

– Positionierung der Messmittel

Turmkopf, Turmmitte und Turmfuß

– Intervall der Messdatenaufnahme

Stündlich

50 °C ist die maximal zulässige Temperatur für die Verwendung des Klebstoffes. Zum Schutz der Elektronik ist vom Anlagenhersteller ebenfalls die Temperatur auf max. 50 °C beschränkt.

→ Maximalwert: 50 °C

Gemäß Eurocode 5 darf die Holzfeuchte einen Wert von 65% nur für einige Wochen im Jahr überschritten werden.

- Baustatische Größen
- Biegemoment
 - Art der Messung
DMS auf Lochblech, zur Überwachung auf Biegeblech über dem Horizontalstoß
 - Positionierung der Messmittel
Am Turmfuß, auf 7,5 m und 15 m Höhe
 - Intervall der Messdatenaufnahme
Messung mit 10 Hz
Die Grenzwerte für die maximalen Biegemomente betragen:
 $M_{xy}^{II} = 81.781 \text{ kNm}$ bei einer Höhe von 5,15m
 $M_{xy}^{II} = 72.571 \text{ kNm}$ bei einer Höhe von 7,5m
 $M_{xy}^{II} = 63.666 \text{ kNm}$ bei einer Höhe von 15m
 Gondelposition wird berücksichtigt.
- Torsionsmoment
 - Art der Messung
DMS an der Innenseite des Stahladapters
 - Positionierung der Messmittel
Höhe 96,15 m im Stahladapter
 - Intervall der Messdatenaufnahme
Messung mit 10 Hz
Der Grenzwert für das maximale Torsionsmoment liegt bei $M_z = 2960 \text{ kNm}$.
- Dehnung Lochblech
 - Art der Messung
DMS auf eingeklebten Lochblechen
 - Positionierung der Messmittel
Auf Lochblechen in den Ecken der Horizontalstöße auf 7,5 m und 15 m
 - Intervall der Messdatenaufnahme
Messung mit 10 Hz
Der Grenzwert für die Zugdehnung ergibt sich aus der maximal zulässigen Spannung des Lochbleches und beträgt: \rightarrow Grenzwert: $\epsilon = 0,091 \%$
- Baudynamische Größen
- Eigenfrequenz
 - Art der Messung
Tägliche Auswertung aller Messwerte zur Erfassung der Eigenfrequenz mittels kontinuierliche Fourier-Transformation.
 - Messmittel
Dehnmessstreifen auf Lochblechen und Dehnmessstreifen auf Biegeblechen und Beschleunigungssensoren
 - Positionierung der Messmittel
Dehnmessstreifen im Turmfuß in 4 Himmelsrichtungen, Beschleunigungssensoren in 2 Himmelsrichtungen.
 - Intervall der Messdatenaufnahme
Messung mit 10 Hz. Tägliche Auswertung für 24 Stunden
 \rightarrow Grenzwert: min 0,330 Hz max. 0,369 Hz
- Ermüdung
 - Art der Messung
Tägliche Auswertung aller Messwerte. Extrapolierte, summierte Schädigungen aus ermüdungsrelevanten Schwingspielen/Rainflow
 - Messmittel
Dehnmessstreifen auf Lochblechen und Dehnmessstreifen auf Biegeblechen auf Höhe 7,5 m und 15 m
 - Positionierung der Messmittel
Höhe 7,5 m und 15 m in 4 Himmelsrichtungen
 - Intervall der Messdatenaufnahme
Messung mit 10 Hz. Tägliche Auswertung für 24 Stunden
 \rightarrow Grenzwert: PMS=0,9

An sechs Stellen im Inneren des Bauwerks ist über dem Verbindungsstoß ein abnehmbarer Probekörper mit einem planmäßigen Lochblech-Stoß befestigt. Diese Probekörper werden nach vorgegebenen Prüfintervalen auf ihre Resttragfähigkeit hin untersucht. Zusätzlich zu den in der DIBt-Richtlinie für Windenergieanlagen vorgeschriebenen wiederkehrenden Prüfungen der Maschine, Rotorblätter und Tragstruktur, die zweijährlich durchzuführen ist, wird der Turm inklusive des Monitoringsystems einer halbjährlichen Sicht- und Funktionsprüfung unterzogen. Hierfür wurde in Abstimmung mit der Baubehörde und dem Gutachter Prof. Sieder eine Checkliste entwickelt, in der die Zustände und aktuellen Ergebnisse des Bauwerksmonitorings festgehalten werden.

6. Ausgewählte Ergebnisse des Monitorings

Die sich im Anlagenbetrieb einstellende Luftfeuchtigkeit im Turm ist bis auf «wenige Wochen im Jahr» unter 65% und entspricht somit der Definition der NKL 1. Abbildung 3 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Luftfeuchtigkeit im Turminneren für einen ausgewählten Aufzeichnungszeitraum.

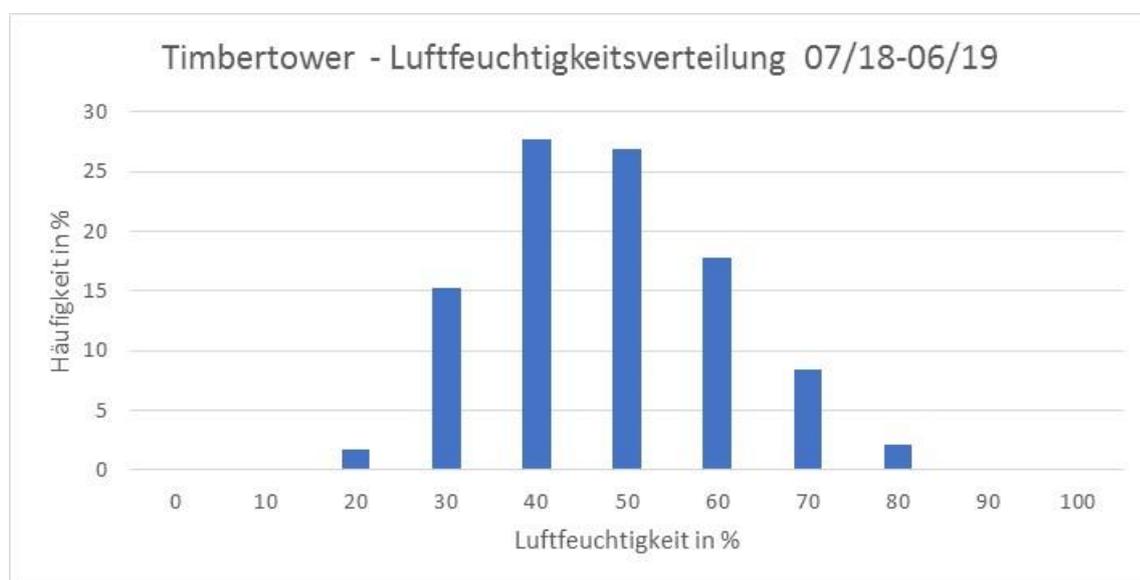


Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung der Luftfeuchtigkeit im Turminneren

Seit Beginn des Anlagenbetriebes hat sich die Holzfeuchte so entwickelt, wie es aufgrund der Planung erwartet wurde. Im unteren Bereich des Turmes, in dem sich die elektrische Anlagentechnik befindet, d.h. ca. bis zu einer Höhe von 7,50 m ist das Holz über die Nutzungsdauer heruntergetrocknet – im Mittel ca. 6%. Im oberen Turmbereich, in dem die Außenluft angesaugt wird, sind erwartungsgemäß die höchsten Holzfeuchten zu verzeichnen – im Mittel ca. 12%. Im übrigen Turm befinden sich die Holzfeuchten im Bereich der Einbau-Holzfeuchten von ca. 10%. In Abbildung 4 ist die Häufigkeitsverteilung der aufgetretenen Holzfeuchten in den BSP-Elemente dargestellt. Es ist ersichtlich, dass Holzfeuchten mit der größten Häufigkeitsverteilung in einem Bereich zwischen 6% und 12 % aufgetreten sind.

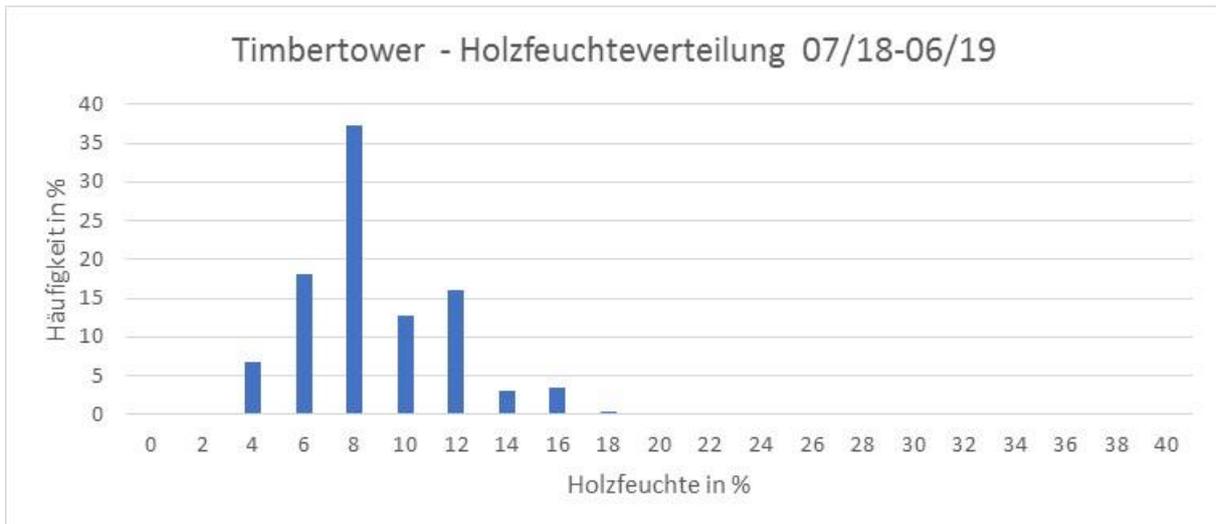


Abbildung 4: Häufigkeitsverteilung der Holzfeuchte in den BSP-Elemente

Bei der Untersuchung der Verbindungsmittel im Hinblick auf eine statische Auslastung ist festzustellen, dass die Beanspruchung insgesamt betrachtet im bisherigen Anlagenbetrieb ca. 30% der Beanspruchung aus der Lastrechnung / Statischen Berechnung entspricht. Abbildung 5 zeigt die Häufigkeitsverteilung der aufgezeichneten Biegemomente im Bereich des Turmfußes. Dadurch, dass die Gondel der Windkraftanlage automatisch dem Wind nachgeführt wird, ergibt sich ein Relativwinkel zwischen der jeweils zu betrachtenden Messstelle auf dem Lochblech und der Gondel. Die Messstellen befinden sich nur in bestimmten Positionen der Horizontalstöße zweier Wandelemente – abhängig von der Höhe des Turmes. Um die gemessene Belastung des Lochblechs in die maximale Belastung des Querschnitts auf derselben Turmhöhe überführen zu können, sind die ermittelten Biegemomente aus den Dehnungen der Lochbleche zu faktorisieren (gondelmaximiertes Biegemoment).

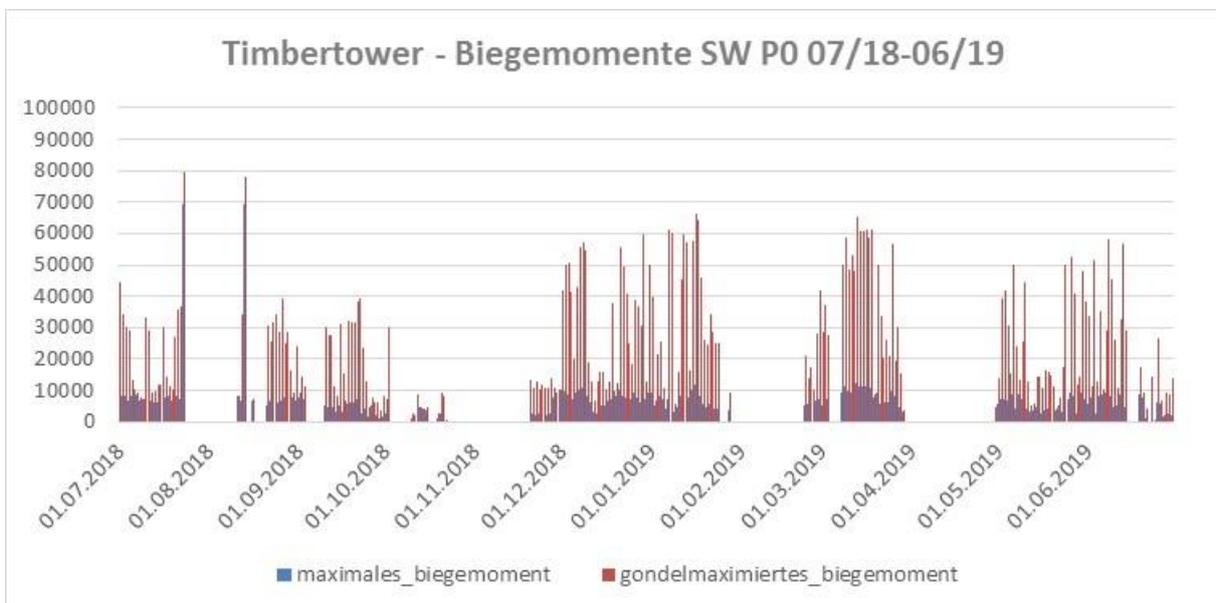


Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung der Biegemomente am Turmfuß

Nach einem Anlagenbetrieb von ca. 7 Jahren beträgt die Ermüdung der Lochblechverbindung ca. 5%. Unter Annahme der bis zum betrachteten Zeitpunkt aufgezeichneten Beanspruchungen wird die Schädigung auf die veranschlagte Betriebsdauer von 20 Jahren hochgerechnet, diese Gesamtschädigung beträgt derzeit ca. 37%.

In Abbildung 6 ist die Häufigkeitsverteilung der gemessenen Eigenfrequenz des Turmes dargestellt. Wie aus der Verteilung ersichtlich ist, verteilt sich die aufgezeichnete Eigenfrequenz zwischen dem angesetzten Minimal- und Maximalwert der Berechnung zwischen 0,330 Hz max. 0,369 Hz.

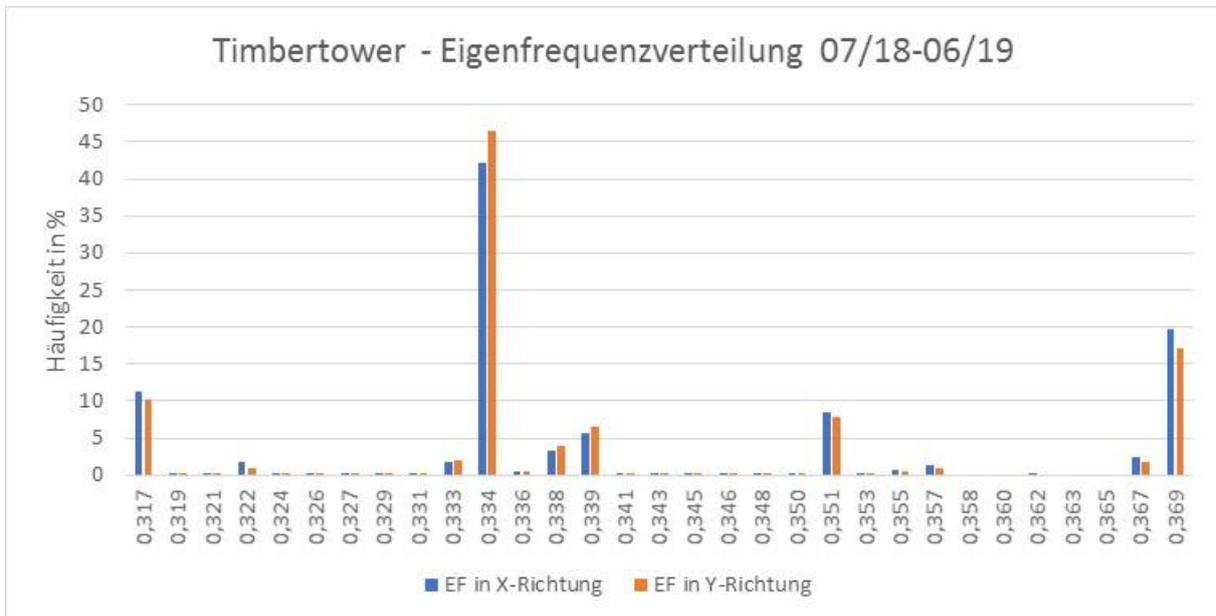


Abbildung 6: Häufigkeitsverteilung der Eigenfrequenz des Turmes

Die Strukturdämpfung von Holz ist laut gängiger Literatur höher als die von Stahl. Die Ermittlung der Dämpfung der Holzkonstruktion ist komplex, da sie sich aus dem Gesamtsystem der Windkraftanlage aus Gondel, Rotor, Fundament, Boden und dem Material zusammensetzt. Für die Berechnung des logarithmischen Dekrements wurde das Verhältnis vom ersten Maximalausschlag des Zug-DMS nach Not-Stopp der Anlage zum Maximum der Ausschwingkurve nach 30 Schwingungen gebildet. Abbildung 7 zeigt die aufgezeichnete Ausschwingkurve des TimberTowers für den in situ durchgeführten Fall eines Not-Stops der Anlage.

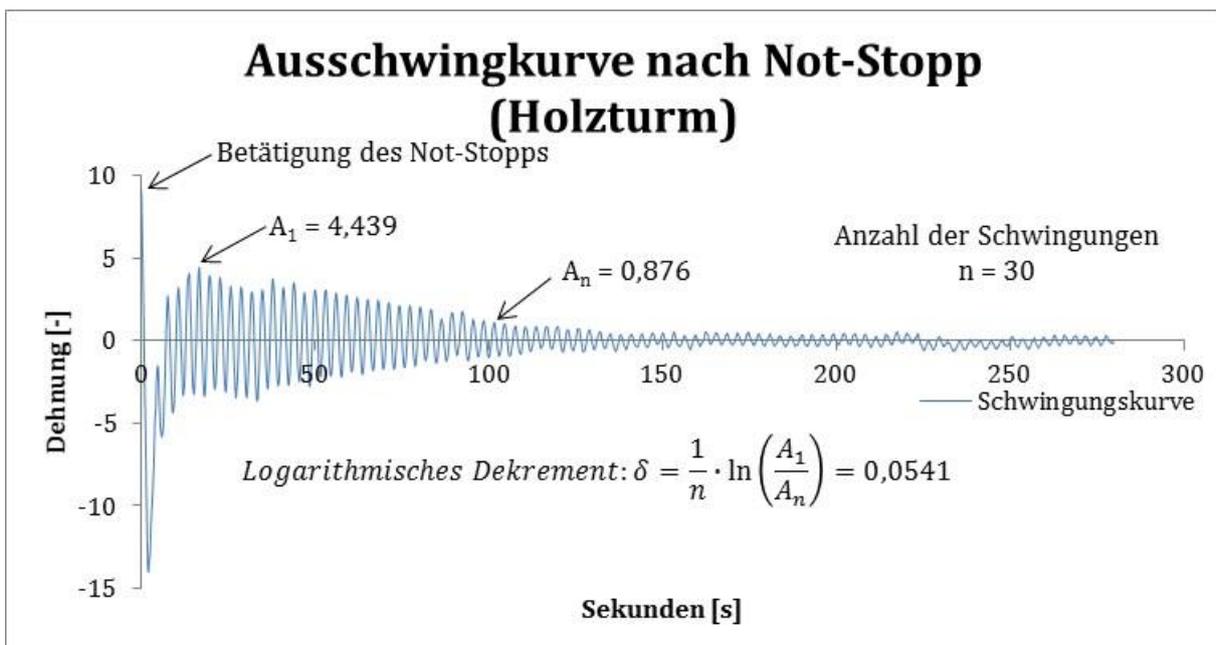


Abbildung 7: Ausschwingkurve des TimberTowers aus einem in situ durchgeführten Not-Stopp der Anlage

Vergleichend dazu ist in Abbildung 8 die aufgezeichnete Ausschwingkurve eines vergleichbaren Stahlturmes mit identischer Anlage (d.h. Anlagentyp ebenfalls Vensys 77, 1.5 MW, Nabenhöhe 100m, ähnliche Fundamentabmessungen) für den in situ durchgeführten Fall eines Not-Stopps der Anlage dargestellt. Es zeigt sich, dass die Dämpfung der Anlage mit Holzturm wesentlich größer als die der Anlage mit Stahlrohrturm ist. Dieser Effekt wurde bei der Auslegung und Lastrechnung des Turms nicht berücksichtigt, so dass auch hier noch ein Einsparpotential bei der Auslegung des Turmquerschnitts aufgrund geringer, anzunehmender Lasten zu erwarten ist.

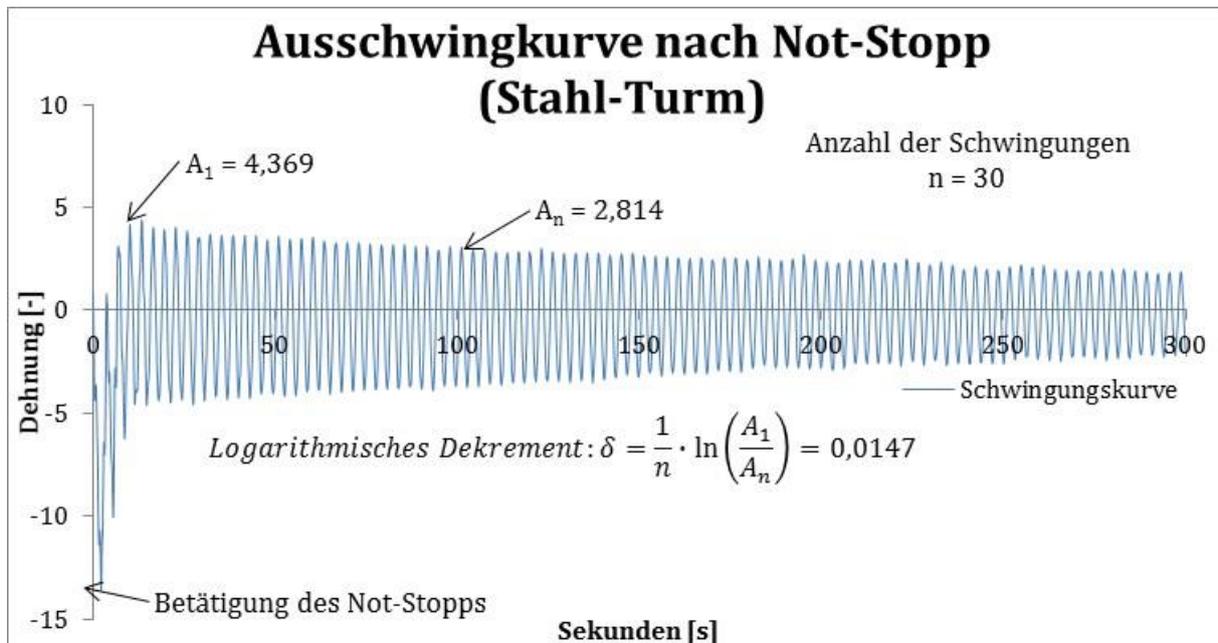


Abbildung 8: Ausschwingkurve eines vergleichbaren Stahlturmes aus einem in situ durchgeführten Not-Stopp der Anlage

Die im Inneren des Turmes über horizontalen Verbindungsstößen angebrachten Probekörper werden nach vorgegebenen Prüfintervallen auf ihre Resttragfähigkeit hin untersucht, PK 1 nach 2 Jahren (12/2014) / PK 2 nach 15 Jahren (12/2027) / PK 3 nach 1 Jahr (12/2013) / PK 4 nach 7 Jahren (12/2019) / PK 5 nach 5 Jahren (12/2017) / PK 6 nach 10 Jahren (12/2022). Unter Zugrundelegung der 3 bisher geprüften Probekörper ergibt sich bei statistischer Auswertung ein Wert der charakteristischen Tragfähigkeit von $R_k \approx 123,40$ kN. Damit konnten die für die statische Berechnung getroffenen Annahmen im Hinblick auf eine maßgebende charakteristische Zugtragfähigkeit von $R_k = 118,2$ kN bisher bestätigt werden.

7. Resümee aus technischer Sicht

Nach der Montage und den ersten sieben Betriebsjahren lässt sich aus Betriebsführungs-sicht festhalten, dass die WKA mit Holzturm aus technischer Sicht alle an sie gestellten Erwartungen erfüllt hat. Von der Fertigung einzelner Brettsperrholzplatten mit sehr hoher Genauigkeit des CNC-Abbands bis zur Montage der eingeklebten Lochbleche als Verbindungsmittel der Holzelemente gibt es aus derzeitiger Sicht grundsätzlich keine Bedenken im Hinblick auf die technische Basis für die Umsetzung einer WKA mit Holzturm. Die Abstimmungen mit den Zertifizierungs- und Genehmigungsinstitutionen auf Ingenieurebene waren durchweg leichter zu führen, als die Erfüllung formalrechtlicher Anforderungen für viele unterschiedliche Teilgebiete.

Technische Optimierungspotentiale:

- Bauprodukt Brettsperrholz
Der Einsatz von Brettsperrholz hat sich durchweg als positiv herausgestellt. Die statisch notwendigen Anforderungen an Festigkeit und Steifigkeit für die gegenständige Anwendung sind grundlegend erfüllt. Bei der Turmauslegung wurde aufgrund der bis dato

fehlenden Zulassung von BSP-Produkten aller Hersteller für dynamische Beanspruchung nicht mit den Festigkeits- und Steifigkeitswerten der Zulassung für BSP sondern mit denen von Bauholz der Festigkeitsklasse C24 gerechnet. Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten des BSP sowie der Klebe-Verbindungstechnik zeigten durchweg positive Ergebnisse.

Es besteht daher großes Optimierungspotential, das Bauprodukt BSP mit dessen vorliegenden Eigenschaften auch adäquat einzusetzen. Die Wanddicken des Turmes könnten somit deutlich reduziert und der Turm dadurch kostengünstiger umgesetzt werden. Die guten Erfahrungen im Anlagenbetrieb sprechen eindeutig dafür, BSP auch unter Ermüdungsbeanspruchungen einzusetzen.

– Klebe-Verbindungstechnik

Auf Basis vielzähliger Versuche wurde die Tragfähigkeit der eingeklebten Lochbleche unter Ermüdungsbeanspruchungen ermittelt. Diese ist wiederum deutlich höher, als für die rechnerische Auslegung der Verbindungen zugrunde gelegt werden konnte, da Abminderungsfaktoren bzgl. der Tragfähigkeit der Lochbleche für deren Zulassung und die gutachterlichen Stellungnahmen für den Prototypen berücksichtigt werden mussten.

Daher besteht ebenfalls großes Optimierungspotential in Bezug auf die anwendbaren Tragfähigkeitskennwerte des Verbindungsmittels, die bereits in den Versuchen bestätigt wurden.

8. Warum ist das Projekt TimberTower ein Prototyp geblieben?

Dadurch, dass bis dato wenig Kenntnisse zum Ermüdungsverhalten von Holz und Holzprodukten vorliegen und keine Zulassungen für das eingesetzte BSP und die Klebe-Verbindungstechnik unter dynamisch Beanspruchung existierten, musste ein langer Zertifizierungs- und Zulassungsprozess durchschritten werden. Das Ergebnis war eine Typenprüfung, die in Verbindung mit einer ZiE nur für den aktuellen Standort des TimberTower umsetzbar war. Obgleich die technische Machbarkeit bestätigt wurde, muss für die Umsetzung eines weiteren Windenergieanlagenprojekt (zumindest für Standorte in Deutschland) erneut eine ZiE für den vorgesehenen Standort beantragt werden. Da dieses Verfahren nicht vereinheitlicht ist, kann der Turm so nicht kosteneffizient umgesetzt werden.

Die aus den Kurzzeit- und Dauerschwingversuchen resultierende Tragfähigkeit der Lochblechverbindung wurde für deren bauaufsichtliche Verwendung im Projekt mit entsprechenden Sicherheitsfaktoren belegt. Die sich daraus für die Verwendung im Turm für WKA ergebende hohe Anzahl und größere Abmessungen und demzufolge entstehenden Kosten sind ebenfalls hinderlich.

Da für das Bauprodukt Brettsperrholz zwar bauaufsichtliche Zulassungen vorliegen, ein Einsatz bis dato jedoch für ermüdungsbeanspruchte Bauteile baurechtlich nicht möglich war, mussten bei der Auslegung des Bauwerks mit bis dato verfügbaren normativ definierten Materialeigenschaften gerechnet werden. Dies hat einen größeren Querschnitt der eingesetzten BSP-Elemente und damit ebenfalls höhere Kosten zur Folge.

Um die Montage möglichst einfach zu gestalten, wurde der Wandquerschnitt nicht den Belastungen angepasst, sondern über die Höhe des Turmes konstant umgesetzt. Eine Optimierung der Bauteildicke und die Gestaltung der Verbindungsmittel korrespondierend zu den Einwirkungen birgt zusätzliches Einsparpotential.

Das für die Montage vorgesehene Lehrgerüst wurde mit nur sehr geringem Vorfertigungsgrad und ebenfalls mit konstanten Querschnitten der verwendeten KVH- und BSP-Elemente hergestellt. Eine Optimierung der Tragstruktur würde ebenfalls zur Kostenersparnis beitragen.

Das Montagekonzept, der Ablauf und die Logistik auf der Baustelle wirken sich direkt auf die Errichtungskosten der Windkraftanlage aus. Dadurch, dass die Montage durch gutachterlich notwendige Tätigkeiten zur Überwachung der Verklebung unterbrochen wurde, sind die Kosten für die Vorhaltung von Personal und Montagemittel überdurchschnittlich

angestiegen. Das Verfahren zum Einkleben der Lochbleche auf der Baustelle ist reproduzierbar und gut dokumentiert, so dass einer schnellen sukzessiven Montage der Turmkonstruktion nichts im Wege stehen sollte.

Die TimberTower GmbH trat als Entwickler und Vertreiber von Holztürmen für Windkraftanlagen am Markt auf. Letztendlich wird vom «Endkunden» eine errichtete WKA sozusagen «schlüsselfertig» erworben. Das wiederum bedeutet, dass ein Anlagenhersteller den Turm als Großkomponente für die gesamte WKA mit in sein Portfolio aufnehmen sollte, um ein passendes Gesamtpaket anbieten zu können. TimberTower ist kein Hersteller mit eigenen Produktionskapazitäten, sondern würde durch Zukaufen aller Komponenten einen entwickelten Turm vertreiben und errichten. Eine Serienfertigung mit speziell auf den Turmbau ausgerichteter Fertigungskonzept war somit im eigenen Unternehmen ebenso wenig möglich, wie den Großteil der Wertschöpfung im eigenen Unternehmen zu behalten.