

Hoher Züblin-Windkraft-Turm aus Holz

Züblin wooden wind power tower

Une grande éolienne en bois par Züblin

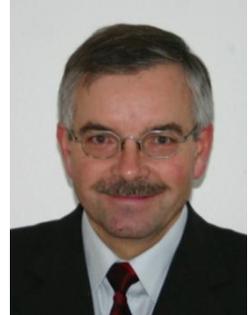
Dr. Jochen Röhm
Ed. Züblin AG
DE-Stuttgart



Stephan Brand
Ed. Züblin AG
DE-Stuttgart



Fritz Kunz
MERK Timber GmbH
DE-Aichach



Hoher Züblin-Windkraft-Turm aus Holz

1. Einleitung

Die Endlichkeit der fossilen Energiequellen, deren immer aufwändiger werdende Erschließung, die Gefahren der Kernenergie sowie der Einfluss des Energiekonsums auf die Umwelt führen zu einer verstärkten Nachfrage nach Erneuerbaren Energien.

Nicht zuletzt verdeutlicht der UN-Weltklimarat im abschließenden Synthese-Band seines Sachstandsberichts, dass bis 2020 die Treibhausgas-Emissionen ihr Maximum erreicht haben müssen. Ein Ausstieg aus der fossilen Energieproduktion müsse bis zum Ende dieses Jahrhunderts gelingen, andernfalls hätte dies gravierend Folgen für das ökologische- und sozio-ökonomische System unserer Erde.

Eine tragende Rolle spielt hierbei die Windenergie. Bisher werden die großen Windturbinen zumeist von Stahlrohrtürmen oder von einer Kombination aus Stahlrohrturm und Spannbetonturm, sogenannten Hybridtürmen getragen. Die Turmkonstruktionen sind «Mittel zum Zweck» und deren Beitrag zur Klimaschutzwirkung eher von untergeordneter Bedeutung.

Die Firma Züblin verfolgt mit der Entwicklung eines Holzturmes für Windenergieanlagen eine ganzheitlichere Philosophie. Holz, aus nachhaltiger Forstwirtschaft entnommen, ist nicht nur ein hervorragender CO₂-Speicher, sondern vervielfacht seine Klimaschutzwirkung durch Substitution anderer, in der Herstellung mit hohen CO₂-Emissionen verbundenen Baustoffen. Die logische Konsequenz einer nachhaltigen und ökologischen Energieversorgung ist somit die Verwendung von Holz als Baumaterial für Windenergieanlagentürme.

2. Der Züblin-Tower

2.1. Überblick

Die Nabenhöhe und damit das Turmkonzept hängen maßgeblich vom Standort ab. Standorte im Binnenland mit großer Bodenrauigkeit (Wald, Siedlungen) weisen im Vergleich zu Küstenstandorte erst in größeren Höhen ein homogenes Windprofil und wirtschaftliche Windgeschwindigkeiten auf. Während bei Nabenhöhen bis 100 m nahezu ausschließlich der Stahlrohrturm zum Einsatz kommt, ist dieser im Binnenland für Nabenhöhen über 100 m nur bedingt geeignet. Aufgrund der Anforderungen an die Systemsteifigkeit wird bei großer Nabenhöhe der erforderliche Turmfußdurchmesser deutlich größer, was zu Problemen beim Transport auf öffentlichen Straßen führen könnte. Hier hat sich deshalb aufgrund der einfacheren Fügechnik der Hybridturm durchgesetzt.

Bei der Entwicklung des Züblin Holzturmes lag der Fokus vor allem auf Binnenlandstandorte und damit auf Türmen für große Nabenhöhen (120 m – 160 m). Der Züblin-Tower besteht aus wandartigen Furnierschichtholz-Elementen, die sich oktogonal zu einem Ring schließen. Die wasserfest verleimten Bauteile aus Furnierschichtholz werden im Werk mittels CNC-Bearbeitung komplett vorgefertigt und die notwendigen Stahlteile - soweit erforderlich - bereits im Werk integriert. Außenseitig wird die Furnierschichtholzkonstruktion durch eine werksseitig aufgebrachte, wasserdichte und gleichzeitig dampfdurchlässige Beschichtung abgedeckt, um die Holzkonstruktion nicht der Witterung auszusetzen und ohne weiteren Holzschutz eine dauerhafte Konstruktion zu gewähren.

Das aktuelle Turmdesign besteht aus einem ca. 129 m hohen Holzturm, der auf einem 5 m hohen, vorgespannten Stahlbetonsockel verankert ist. Der Übergang zur Turbine bildet ein ca. 3,9 m hohes Adapterstahlteil. Der 8-eckige Holzturm ist aus bis zu 30 cm dicken und bis zu 17 m langen Brettsperrholz Bauteilen aus Furnierschichtholz konzipiert.

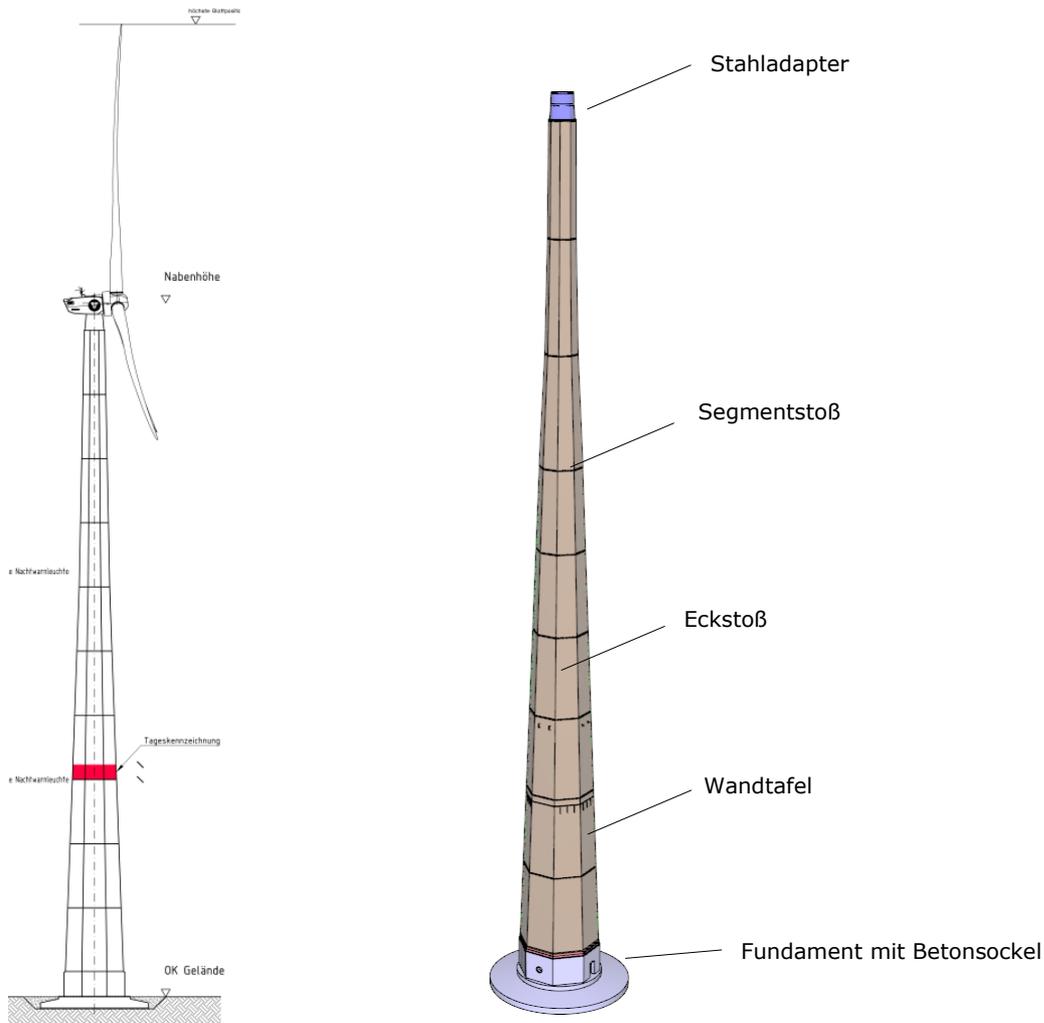


Abbildung 1: Ansicht und Hauptbauteile des Züblin-Tower

2.2. Querschnittsaufbau

Ein entscheidendes Entwurfskriterium ist der Abstand zwischen Blatt und Turm, der sogenannte Blattfreigang. Neben dessen großen Einfluss auf die Lasten am Rotorblatt selbst, sind die Verformungen des Blattes während des Betriebs zu berücksichtigen. Da bei den äußerst schlanken Blättern während des Betriebs Durchbiegungen von mehreren Metern entstehen können, ist der Turmdurchmesser im Blattbereich entsprechend anzupassen. Dies führt aufgrund der begrenzten Querschnittsabmessungen im oberen Turmbereich zu höheren Ausnutzungsgraden und zu einer Verstärkung des Wandaufbaus (vgl. Abbildung 2).

Die Turmwandscheiben bestehen aus verklebten Fichte-Furnierschichtholzplatten, analog Brettsperrholz. Abbildung 2 links zeigt den sechs-lagigen Querschnittsaufbau im unteren Turmbereich und Abbildung 2 rechts den acht-lagigen Aufbau im oberen Bereich. Bei beiden Querschnittsaufbauten kommen jeweils zwei bidirektional-geneigte Querlagen zum Einsatz.

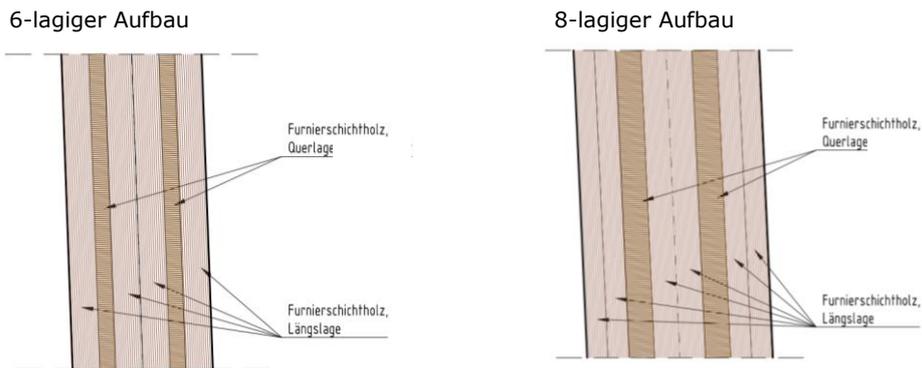


Abbildung 2: Wandaufbau im unteren und oberen Bereich des Turmes

2.3. Fügetechnik

Auf der Baustelle werden die einzelnen Wandelemente auf einer Montagebasis zu einem 8-eckigen Querschnitt bzw. Segment zusammengesetzt und anschließend aufeinander gestellt. Der Innenausbau, die Montage des Blitzschutzes und die Abdichtung der Eckstöße können somit in Bodennähe erfolgen.

Die Fügung der einzelnen Plattenelemente zum geschlossenen Turmsegment wird hierbei mittels eines eingeklebten Keils realisiert (Abbildung 3). Dies gewährleistet zum einen die Aufnahme von Bautoleranzen und zum anderen einen schnellen Montagefortschritt. Die Seitenflächen der Wandelemente werden durch eine Plattenbearbeitungsanlage (PBA) auf die entsprechenden Abmessungen des Keils zugeschnitten. Auf der Baustelle erfolgt der Einbau der ca. 2 m langen Keilelemente mittels Schiebpressklebung. Der Keil wird mit einer Zahnpachtel aufgetragen und der Keil anschließend positioniert. Zur Fixierung und Aufbringung des erforderlichen Pressdrucks werden Teilgewindeschrauben eingedreht. Für die Verklebung kommt ein fugenfüllender Phenol-Resorcin-Harz-Klebstoff zum Einsatz.



Abbildung 3: Ausbildung des Eckstoßes und Aufbringen des Kleber mit der Zahnpachtel

Nach Fertigstellung der einzelnen Turmsegmente werden diese aufeinander gestellt und mittels eines «Mega-Keilzinkenstoßes» kraftschlüssig verbunden (Abbildung 4). Durch die Verklebung der Zinken mit einem Zweikomponenten-Epoxidharzklebstoff entsteht eine, auch in ermüdungstechnischer Hinsicht hochbelastbare, kraftschlüssige Verbindung zwischen den einzelnen Turmsegmenten. Die Herstellung der Zinken erfolgt werksseitig mittels CNC-Bearbeitung. Die optimale Zingengeometrie wurde in einem iterativen Prozess unter Einbeziehung der Fertigungstechnik und in enger Abstimmung mit der MPA Stuttgart ermittelt.



Abbildung 4: Versuchsmodell Segmentstoß

3. Entwurfsaspekte

3.1. Dynamik

Windenergieanlagen sind aufgrund ihrer schlanken Strukturdimensionen, Steifigkeiten und Massenverteilung Systeme die zu Schwingungen neigen. Sie sind, bedingt durch Standort und Nutzung, zeitlich und räumlich stark veränderlichen Belastungen ausgesetzt. Dadurch ist es nicht mehr ausreichend nur die maximale Belastung für die Bemessung heranzuziehen. Es ist vielmehr erforderlich das gesamtdynamische Verhalten der Windenergieanlage auf die unterschiedlichen Anregungen zu untersuchen. Wind und die komplexe Regelungstechnik der Anlage führen zu einer stark dynamischen Interaktion zwischen Gesamtsystem und Umgebung. Die inneren Kräfte (Schnittgröße), resultierend aus den zeitlich veränderlichen Einwirkungen, können deshalb nur anhand einer integralen, dynamischen Simulation, in der das Gesamtspektrum aller möglichen Ereignisse samt ihrer Auftretenshäufigkeit berücksichtigt wird, ermittelt werden. Es ist nicht möglich einzelne Bauteile aus dem System herauszulösen und unter der gegebenen Belastung separat zu betrachten, wie dies im Hochbau der Regelfall ist.

Für den Turm- und Fundamentplaner sind zunächst nur die Resonanzen des Gesamtsystems von Interesse. Bekannte Erregerfrequenzen können im Entwurfsprozess schon vor der Lastberechnung vermieden werden. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der 1. Biegeeigenfrequenz. Durch die Drehung des Rotors können Teile der Struktur zur Schwingung angeregt werden. Hierbei wird zwischen einer 1P- und einer 3P Anregung unterschieden. Die 1P Anregung (typisch für Massenunwucht, z. B. Eisansatz) tritt einmal pro Umdrehung des Rotors auf und erzeugt eine Querschwingung. Die 3P Anregung tritt dreimal pro Umdrehung auf und wird durch die 3 Blätter des Rotors hervorgerufen. Die Eigenfrequenz des Systems wird üblicherweise so gewählt, dass es zu keiner Überschneidung zwischen der Eigenfrequenz und der 1.P und 3.P Anregung kommt (siehe roter Bereich in Abbildung 5).

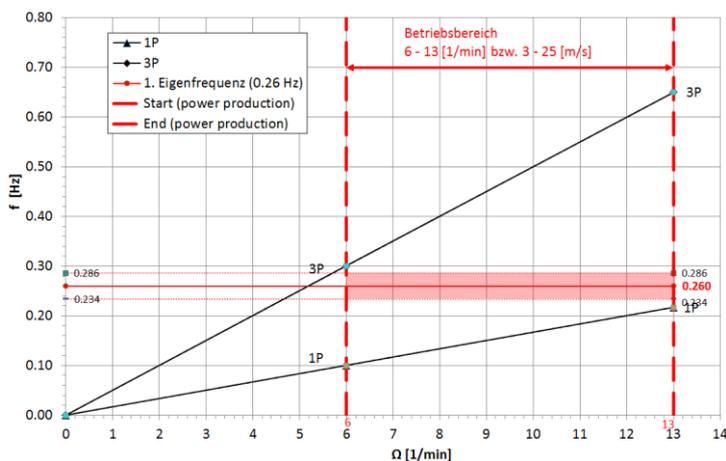


Abbildung 5: Campbell Diagramm

Bei Stahlrohtürmen wird die 1. Biegeeigenfrequenz maßgeblich durch die Biegesteifigkeit der Rohrquerschnitte, der Kopfmasse und der Drehfedersteifigkeit des Fundaments bestimmt [1]. Bei Holztürmen stellt sich zudem die Frage, welchen Einfluss die Verbindungselemente auf die Eigenfrequenzen haben. Die Kurven in Abbildung 6 zeigen das Lastverformungsverhalten von unterschiedlichen Holzverbindungen. Geklebte Verbindungen (Kurve a) weisen eine deutlich höhere Steifigkeit auf als mechanische Verbindungen (Kurve b bis g).

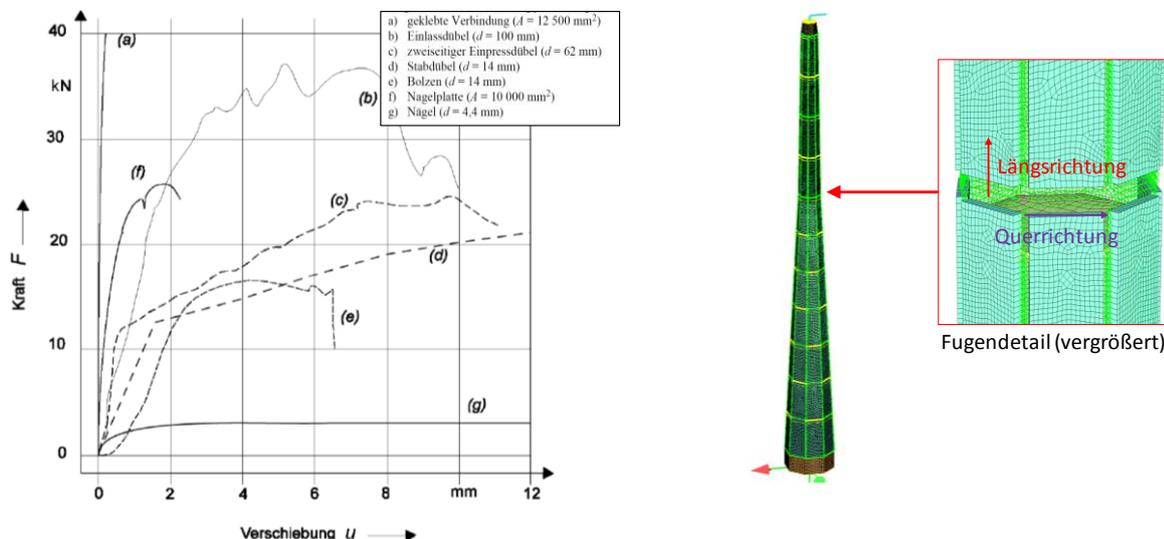


Abbildung 6: Kraft Verschiebungs-Kurven für verschiedene Holzverbindungen [2] (links), FE-Modellierung mit Fugen (rechts)

In umfangreichen Finite-Element-Berechnungen wurde der Einfluss der Verbindungsmittelsteifigkeit von Segment- und Eckverbindungen auf die Eigenfrequenz des Turmes untersucht (Abbildung 6). Abbildung 7 zeigt, dass die erste Biegeeigenfrequenz des Gesamtsystems mit Abnahme der Steifigkeit der Segmentverbindungen ebenfalls deutlich abfällt und sich mit zunehmender Steifigkeit nach oben hin an den Grenzwert eines monolithischen Bauteils annähert. Die horizontale Steifigkeit der Segmentverbindung hat keinen wesentlichen Einfluss auf die 1. Eigenfrequenz des Systems, was aufgrund der dazugehörigen Schwingungsform auch so zu erwarten war.

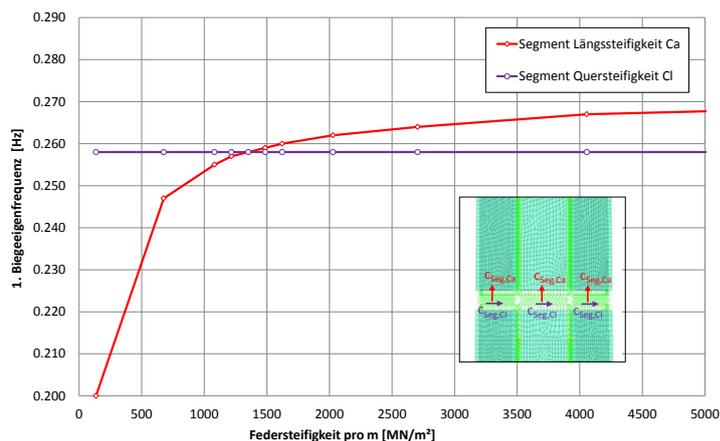


Abbildung 7: Einfluss der Verbindungsmittelsteifigkeit auf die 1. Biegeeigenfrequenz des Gesamtsystems

Die durchgeführte Parameterstudie verdeutlicht den großen Einfluss der Fügetechnik auf die Eigenfrequenz und damit auf das dynamische Verhalten der Windenergieanlage. Dieser Sachverhalt ist vor allem bei mechanischen Verbindungen zu diskutieren und ein eventueller Steifigkeitsabfall bedingt durch die Vielzahl der Lastwechsel zu bewerten. So wurde in einer frühen Entwicklungsphase, die zunächst aufgrund Ihrer Wetterunabhängigkeit favorisierte Stabdübelverbindung wieder verworfen. Am Karlsruher Institut für Technologie wurde im Rahmen der Turmentwicklung ein großmaßstäblicher Versuch mit Stabdübelverbindungen durchgeführt (Abbildung 8). Hierbei waren im Verbindungs-

bereich die Querlagen ausgespart und über Stahlschlitzebleche und Stabdübel die Wandtafeln miteinander verbunden. Neben der Ermittlung der maximalen Traglast, war vor allem das Steifigkeitsverhalten mit zunehmender Lastspielzahl von Interesse.



Abbildung 8: Grossmassstäblicher Versuch einer Passbolzenverbindung am KIT

Die Löcher der Stabdübel wurden im Durchmesser etwas kleiner hergestellt um ein saftes Anliegen der Stabdübel zu gewährleisten. Die aufgebrauchten 12 Belastungskollektive entsprachen der Belastung einer Windenergieanlage während ihres 20-jährigen Betriebs. Abbildung 9 zeigt zwei ausgewählte Last-Verformungskurven. Es ist deutlich zu erkennen, dass zum einen die Passbolzenverbindung im Nulldurchgangsbereich einer Wechselbeanspruchung an Steifigkeit verliert und dieser Effekt mit zunehmender Lastwechselzahl verstärkt wird. Bedingt durch die Herstelltoleranzen beteiligen sich zu Beginn der Belastung nicht alle Stabdübel am Lastabtrag. Erst mit zunehmender Last kann die volle Steifigkeit der Verbindung aktiviert werden. Bereits bei Kollektiv 7 zeigte sich eine deutliche Steifigkeitsabminderung im Nulldurchgang. Der horizontale Ast der Last-Verformungskurve vergrößerte sich mit zunehmender Lastspielzahl. Dies liegt zum einen an den hohen Laibungspressungen der Stabdübel am Holzquerschnitt. Diese führten mit zunehmender Lastspielzahl zu einer Ovalisierung des Lochs im Holz. Zum anderen drehten sich die Stabdübel während der Versuchsdurchführung, was zu großen Kerben in den Bolzen und damit zu einem großen Lochspiel im Bereich der Schlitzebleche führte. Nach dem Ausbau der Bolzen konnte an einem Bolzen ein Ermüdungsbruch festgestellt werden.

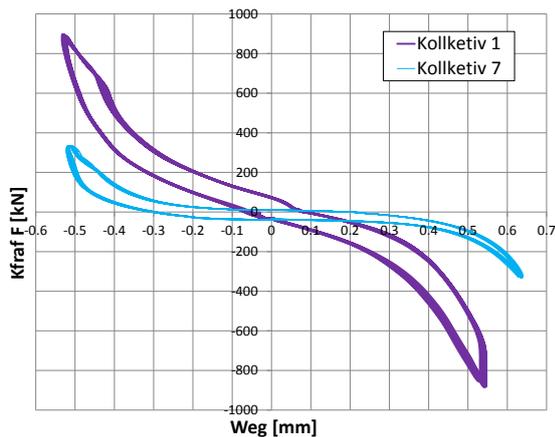


Abbildung 9: Last-Verformungskurve des 1. und 7. Kollektives (links); Kerben im Passbolzen (rechts)

Die Versuchsergebnisse der Stabdübelverbindung, insbesondere die Abnahme der Steifigkeit infolge der Lastwechsel, führten schließlich zur Verwendung von geklebten Verbindungen. Neben den sehr guten Steifigkeitseigenschaften unter zyklischer Belastung zeichnen sich geklebte Verbindungen durch einen Stoffschluss aus, welcher definitionsgemäß kein Spiel aufweist.

Zur Anbindung der Turbine an den Holzturm kommt ein Stahlübergangsstück zum Einsatz, welches mittels eines abgewandelten «Stephansknoten» mit dem Holz verbunden

wird. Der «Stephansknoten» wurde bereits 2004 bei verschiedenen Projekten verwendet und trägt einen wesentlichen Teil der Last über Verbundwirkung zwischen geriffeltem Blech und Epoxidharz ab. Im Zuge der Holzturnmentwicklung wurde der Knoten etwas modifiziert und anhand umfangreicher Versuchen an der MPA-Stuttgart getestet. Der Versuchskörper ist in Abbildung 10 (links) dargestellt. Abbildung 10 (rechts) zeigt die nur geringfügige Steifigkeitsabnahme der Verbindung infolge zyklischer Belastung.

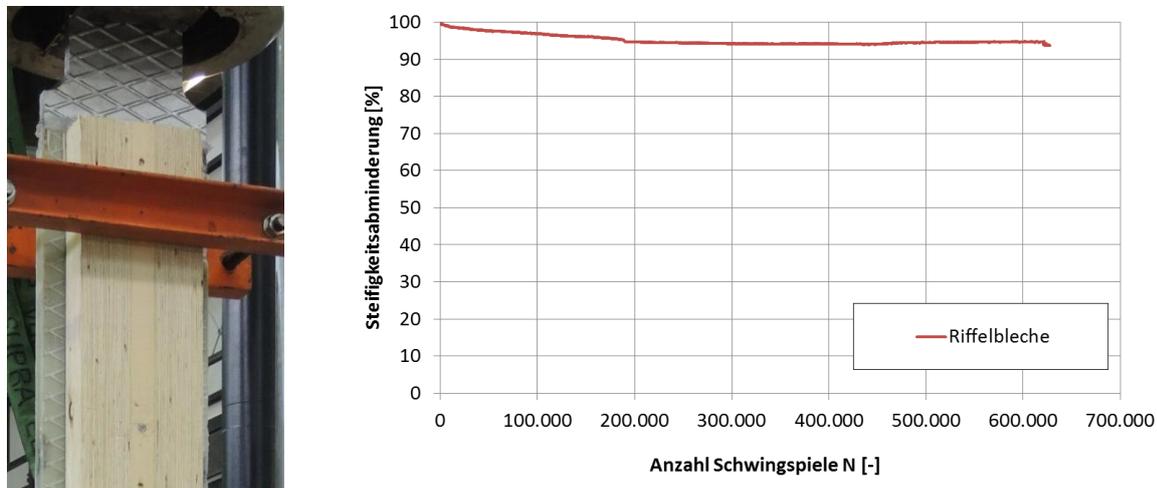


Abbildung 10: Steifigkeitseigenschaften der Riffelblechverbindung infolge zyklischer Belastungen

3.2. Querschnittsaufbau

Der große Vorteil des Werkstoffes «Brettsperrholz» liegt neben der Homogenisierung des Naturmaterials Holz auch in der Möglichkeit seinen Aufbau entsprechend des Kraftflusses und den Anforderungen an die Steifigkeit anzupassen. So lässt sich die geringe Torsionssteifigkeit des Turmes bedingt durch den sehr niedrigen Schubmodul von Holz und den begrenzten Querschnittsabmessungen im oberen Turmbereich durch Einlegen von bidirektional-geneigten Querlagen deutlich erhöhen.

Zur Bestimmung der Materialeigenschaften des aus mehreren Lagen bestehenden Aufbaus, lässt sich mit Hilfe der Laminattheorie die einzelnen Schichten zu einer Gesamtschicht reduzieren, welche dann das Steifigkeitsverhalten des Gesamtaufbaus widerspiegelt (Abbildung 11). Durch die Verdrehung und Anpassung der Stärke einzelner Lagen lässt sich somit der Elastizitäts- und Schubmodul der Brettsperrholztafel gezielt beeinflussen.

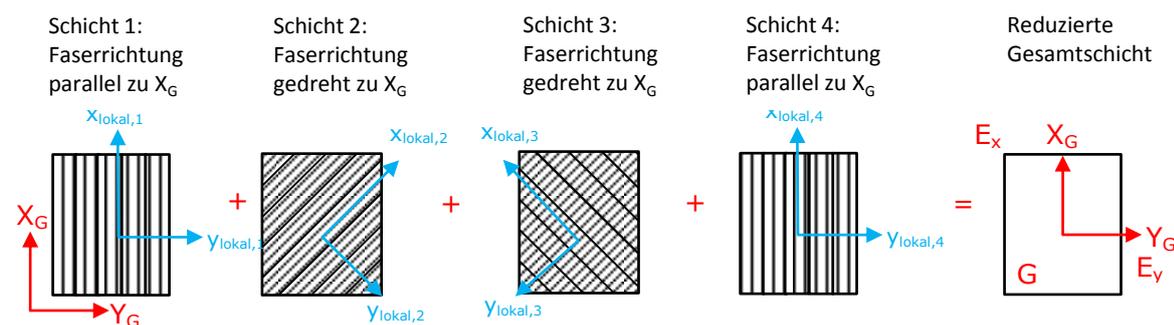


Abbildung 11: Steuerung der Steifigkeitseigenschaften der Gesamtschicht durch Drehung von lokalen Schichten

Die Wirksamkeit der bidirektional-gedrehten Querlagen konnte durch Versuche an der MPA Stuttgart bestätigt und die Berechnungsansätze verifiziert werden (siehe Abbildung 12).

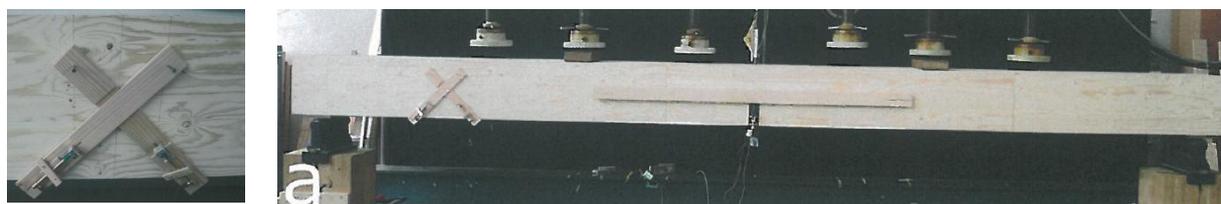


Abbildung 12: Messung der Schubverzerrungen am 4-Punkt Biegeversuch an der MPA Stuttgart

3.3. Materialermüdung

Üblicherweise haben moderne Windenergieanlagen der Multimegawatt Klasse eine Nutzungsdauer von 20 Jahren. In diesem Zeitraum vollführt der Rotor bis zu 100 Millionen Umdrehungen. Durch jede Umdrehung des Rotors entstehen unter anderem zyklische Belastungen in den Rotorblättern und der Turmstruktur. Neben diesen rein periodischen Belastungen treten auch in stationäre Lastwechsel in Folge der Turbulenz des Windes auf. Im Laufe der Nutzungsdauer summieren sich somit bis zu 10^9 Lastwechsel. Damit liegen bei Windenergieanlagen höhere Lastwechselzahlen vor, wie diese in der Automobilbranche oder im Flugzeugbau zu berücksichtigen sind [3]. Dieser Umstand führt dazu, dass für die Turmauslegung der Ermüdungsnachweis von besonderer Bedeutung ist.

Für die beiden gängigen Materialien Stahl und Beton bzw. Spannbeton gibt es bereits umfangreiches und detailliertes Wissen über den Einsatz im Bereich der Windenergie. So regelt die DIBt Richtlinie für Windenergieanlagen [4] die Bemessung von Stahl- und Beton- bzw. Spannbetontürmen. Der Eurocode 5 Teil 2 (Holzbrücken) [5] legt hingegen lediglich fest, dass bei Relevanz die Materialermüdung zu beachten ist und stellt im Anhang informativ ein vereinfachtes Nachweisverfahren zur Verfügung. Umfangreicher Informationen zur Holzermüdung finden sich in wissenschaftlichen Arbeiten wie bspw. in [6].

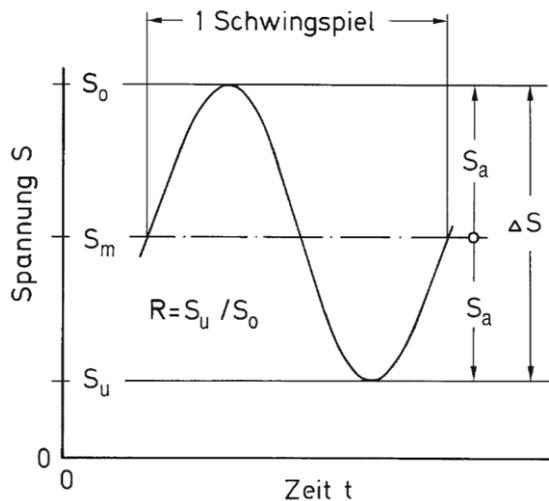


Abbildung 13: Kennwerte eines Schwingenspiels (links) [7]

Der Werkstoff Holz als Naturprodukt besitzt ein deutlich komplexeres Materialverhalten im Vergleich zu Stahl. Diese Eigenschaft spiegelt sich auch im Ermüdungsverhalten wider. Bei Stahl ist die aufnehmbare Anzahl an Lastwechseln im Wesentlichen nur von der Schwingweite ΔS abhängig (Abbildung 13), während hingegen bei Holz auch das Belastungsniveau bzw. die Mittelspannung S_m von entscheidender Bedeutung ist. Diese Mittelspannungsabhängigkeit wird im Ermüdungsnachweis des Eurocode 5 [5] über das Spannungsverhältnis R , welches das Verhältnis zwischen Ober- zur Unterspannung wieder gibt, berücksichtigt. Bei $R > 0$ handelt es sich um eine rein schwellende ($R > 0$) Belastung, bei $R < 0$ um eine Wechselbeanspruchung. Der eigentliche Ermüdungsnachweis nach Eurocode [5] wird über eine abgeminderte statische Festigkeit geführt. Der Abminderungskoeffizient k_{fat} berücksichtigt die Festigkeitsabnahme bzw. die Schädigung infolge zyklischer Belastungen und bestimmt sich aus dem Spannungsverhältnis R , der Anzahl der Lastwechsel und der Art der Beanspruchung (Biegung, Druck, Schub etc.). Die Holzart bzw. die Art des Holzwerkstoffes und dessen Materialgüten werden nur über die statische Festigkeit berücksichtigt. Ein Vollholz oder Brettschichtholz Bauteil hat den gleichen Abminderungsfaktor wie bspw. ein Bauteil aus Furnierschichtholz. Ziel der Materialversuche war es gesicherte Bemessungskurven für den konkreten Anwendungsfall zu bestimmen um hierdurch die Leistungsfähigkeit des Werkstoffes voll ausnutzen zu können.

Aufgrund der Mittelspannungsabhängigkeit des Holzes waren umfangreiche Dauerschwingversuche, sowohl im Schwellbereich, als auch im Wechselbereich notwendig. Abbildung 14 zeigt den Dauerschwingversuch zur Ermittlung der Bemessungskurven für Furnierschichtholz an der MPA Stuttgart.



Abbildung 14: Dauerschwingversuch mit Biegebelastung an der MPA Stuttgart

Durch den Beiwert k_{fat} , der zwischen 0 und 1 liegt, und dem R Verhältnis, wird der komplette Bemessungsraum aufgespannt. In Abbildung 15 (links) wurden die Bemessungskurven für Biegung aus dem Eurocode 5 für den kompletten Wertebereich bestimmt. Zum Vergleich zeigt Abbildung 15 (rechts) die ermittelten Bemessungskurven für Brettsperrholz aus Furnierschichtholz an der MPA Stuttgart.

Es ist deutlich zu erkennen, dass generell im Wechselbereich die Materialschädigung mit zunehmender Lastwechselzahl deutlich schneller voranschreitet und somit wesentlich früher zum Ermüdungsversagen führt als dies im Schwellbereich der Fall ist. Zudem ergaben die Versuche ein deutlich besseres Ermüdungsverhalten vor allem im Schwellbereich gegenüber den Eurocode Kurven.

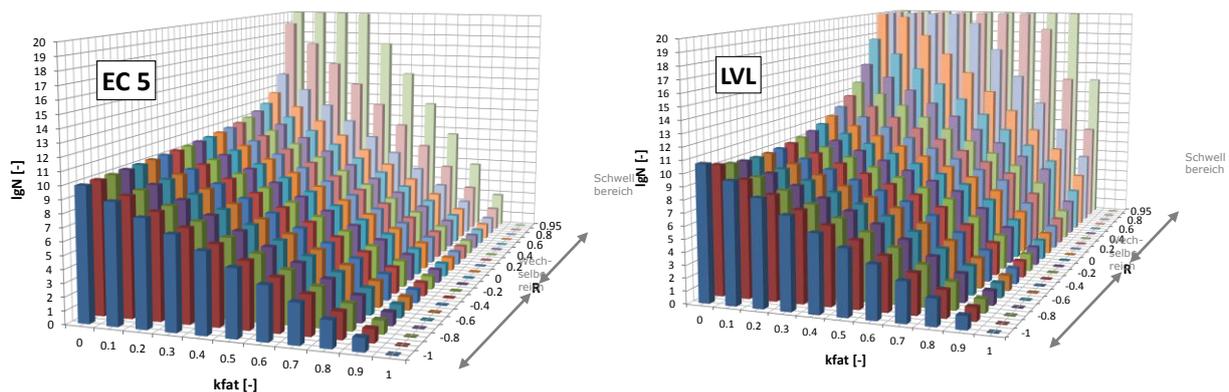


Abbildung 15: Aufnehmbare Lastwechselzahl unter Biegebeanspruchung nach Eurocode 5 (links) und Ergebnis der Ermüdungsversuche (rechts)

4. Referenzen

- [1] Seidel M.: Auslegung von Hybriddürmen für Windenergieanlagen, Beton- und Stahlbetonbau 97, 2002, Heft 11, 564-575
- [2] Blaß H., Görlacher R., Steck G.: Holzbauwerke Bemessung und Baustoffe nach Eurocode 5 Step 1, 1995
- [3] Gasch R.: Windkraftanlagen, Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb, 6. Auflage, 2010
- [4] DIBt Richtlinie für Windkraftanlagen: Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung, Reihe B, 2012
- [5] DIN EN 1995-2 Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 2: Brücken, 2010
- [6] Mohr B.: Zur Interaktion der Einflüsse aus Dauerstands- und Ermüdungsbeanspruchung im Ingenieurholzbau, Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau, 2010
- [7] Haibach E.: Betriebsfestigkeit Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung, 2006