

Windenergietürme aus Holz

Wie bereits häufiger an dieser Stelle dargestellt, besitzen in Holz eingeklebte stählerne Verbindungsmittel eine große Anwendungsvielfalt. Im folgenden Beitrag wird hierzu ein Projekt vorgestellt, bei dem diese neuartige und hoch effiziente Verbindungsmitteltechnologie ihre volle Bandbreite an Vorteilen ausspielen kann. Beim Bau von hölzernen Windenergietürmen sollen eingeklebte Verbindungsmittel aus Stahl dazu verwendet werden, die einzelnen Brettsperrholzelemente des TimberTowers kraft- und formschlüssig miteinander zu koppeln.

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Leander Bathon
Dipl.-Ing. Oliver Bletz-Mühdorfer
M.Eng. Jens Schmidt
Dipl.-Ing.(FH) Michael Weil

Hochschule RheinMain
Fachbereich Architektur und
Bauingenieurwesen,
Institut für Baustoffe und
Konstruktion,
Materialprüfanstalt für Bauwesen
(MPA), Wiesbaden

fertigen. Im Detail hat sich die Firma TimberTower [7] zum Ziel gesetzt, Windkraftanlagen mit Nabenhöhen bis zu 160 m unter vorwiegender Nutzung von Holz zu erstellen. Gefertigt werden sollen solche Holztürme hierbei als Verbundsystem aus werkseitig vorgefertigten Brettsperrholzplatten und Oberflächenkomponenten, die am Anlagenstandort zu einem geschlossenen Hohlkörper mit sechs-, acht- oder zwölfseitigem Querschnitt verbaut werden. Die Dimensionen im Bereich des Turmfußes sollen dabei Abmessungen von bis zu 7,0 m x 7,0 m erreichen können, während sich der Turm nach oben hin verjüngt und im Bereich der Spitze Abmessungen von ca. 2,40 m auf 2,40 m aufweist (Abb. 1).

Vorteile: Wirtschaftlichkeit, Logistik und Nachhaltigkeit

Im Bereich von Windkraftanlagen geht der aktuelle Trend zu immer größeren und höheren Konstruktionen, um Ertragssteigerungen erzielen zu können. Anlagen mit konventionellen Stahltürmen und einer Nabenhöhe von mehr als 85 Metern verlieren i.d.R. jedoch ihre wirtschaftliche Darstellbarkeit für Anlagenbauer, insbesondere bei steigenden Stahlpreisen. Alternativen zu den meist verwendeten Stahlrohrtürmen sind daher gefragt, sowohl für den Einsatz im Onshore-Bereich als auch für die Anwendung als Offshore-Konstruktion.

Nach Ansicht der Planer stellt der hölzerne TimberTower die ökonomisch wegwei-

Abb. 1:
Computersimulationen
einer Windenergie-
anlage aus Holz
(aus [7])



sende Alternative zu bekannten Turmkonzepten dar, denn mit ihm sollen sich größere Nabenhöhen wirtschaftlich realisieren lassen (erreichbar durch die Vergrößerung des Turmfußes, was bei herkömmlichen Ansätzen aus logistischen Gründen nicht möglich ist, siehe unten). Es soll mehr Strom aus regenerativen Energiequellen produziert werden können, was einen wichtigen Schritt beim Klimaschutz bedeuten würde. Gleichzeitig soll die Effizienz der Anlagen steigen – einhergehend mit höheren Renditen.

Ein wesentliches Kriterium bei der Verwirklichung von Windkraftanlagen stellt der Transport dar. Bisher machte der Transport von Windkrafttürmen i.d.R. spezielle Schwertransporte notwendig, mit denen die vorgefertigten röhrenartigen Turmabschnitte vom Herstellungs- zum späteren Zielort bewegt wurden. Diese Transporte limitierten jedoch den Durchmesser konventioneller Türme, da auf-

grund von Brückendurchfahrtschöhen der Turmfuß eines Turms auf einen Durchmesser von 4,20 Meter begrenzt war. Eine größere Wirtschaftlichkeit erfordert jedoch höhere Türme mit größeren Turmfußdurchmessern, was aus transportlogistischen nur sehr schwer zu realisieren ist. Die angedachte Lösung für die hölzerne Windkraftanlage sieht dagegen wie folgt aus: Die einzelnen Komponenten für den TimberTower sollen als vergleichsweise „kleinformatige“ Teile hergestellt, in Containern verpackt und ohne aufwendige Schwerlasttransporte zum Zielort gebracht werden können. Dieses Konzept soll Kosten reduzieren und zudem das Erreichen schwer zugänglicher Standorte ermöglichen, was herkömmlichen Schwerlasttransporten bisher versagt blieb. Durch die Zerlegung des Turmes in mehrere separate Segmente ist die Vergrößerung des Turmfußes leicht erreichbar und eine Limitierung auf

Das Projekt

Bei der Planung und dem Bau von Windkraftanlagen spielt der Werkstoff Holz in der heutigen Zeit keine wesentliche Rolle. Die zumeist vorzufindenden Lösungen stellen Konstruktionen aus Stahlrohren dar. Diese werden i.d.R. werkseitig in Teilabschnitten vorgefertigt, mittels Schwerlasttransporten zum späteren Standort gebracht und dort vor Ort montiert. Auf der Suche nach kostengünstigen und technisch verbesserten Konstruktionskonzepten wurde durch innovative Ingenieure ein Alternativkonzept für Windkraftanlagen entwickelt, welches vorsieht, den eigentlichen Turm aus dem natürlichen und nachwachsenden Rohstoff Holz zu

Nabenhöhen von 85 m nicht mehr gegeben.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil von hölzernen Windkraftanlagen stellt die Nachhaltigkeit dar. Der Einsatz eines Holzturms spart bei einer Turmhöhe von 100 Metern nach Berechnungen der Turmplaner rund 300 Tonnen Stahlblech ein, für dessen Herstellung enorm viel Energie benötigt und klimaschädliches CO₂ freigesetzt werden. Ein Holzurm mit einer Nabenhöhe von 100 m bindet dagegen ca. 400 Tonnen CO₂.

Wissenschaftliche Untersuchungen

Bei der Entwicklung der hölzernen Windenergetürme stellt eine der wesentlichen ingenieurtechnischen Herausforderungen die einzusetzende Verbindungstechnologie dar, mittels der die vorgefertigten Brettsperrholzelemente kraftschlüssig zu koppeln sind. Die einzelnen Konstruktionsteile müssen dabei so effizient verbunden werden, dass sie den statischen und ermüdungsrelevanten Beanspruchungen, die auf sie einwirken, standhalten. Um diesen Nachweis zu führen, wurden seit Sommer 2009 an der MPA Wiesbaden zahlreiche Traglast- und Ermüdungsversuche durchgeführt.

Nach positiv verlaufenden Voruntersuchungen, bei denen u.a. die charakteristische Tragfähigkeit sowie die Ermüdungsfestigkeit des Verbindungssystems „eingeklebte Lochbleche“ im Rahmen von Kleinversuchen ermittelt wurde ([2], [3], [4], [5]), beschäftigte sich das Ingenieurteam der MPA Wiesbaden zuletzt mit Traglastversuchen im Maßstab 1:1 [6].

Hierbei wurden Prüfkörper eingesetzt, bei denen jeweils zwei definierte Brettsperrholzquerschnitte ($b/h = 200/300$ mm) über ins Holz eingeklebte Lochbleche miteinander verbunden wurden. Das Brettsperrholz besaß jeweils einen symmetrischen Aufbau mit 8 Lagen (Kreuzlagenholz KLH, 3 x 2 Längs-

lagen à 40 mm sowie 2 Querslagen à 30 mm). Die mittlere Rohdichte der Prüfkörper betrug $\rho_m = 0,426$ g/cm³. Die mittlere Holzfeuchtigkeit der Prüfkörper lag bei $u_m = 10,6\%$. Zur Kopplung der Holzquerschnitte wurden die beiden Holzquerschnitte über eingeklebte Lochbleche miteinander verbunden. Die Lochbleche bestanden aus Stahl S235 und besaßen eine Stärke von 2,5 mm. Der Durchmesser der Lochungen betrug stets 10 mm. Zum Einkleben der Lochbleche ins Holz wurden die Hölzer stirnseitig geschlitzt (Schlitzbreite ca. 4,2 mm). Die Schlitztiefe variierte in Abhängigkeit der Lochblechdimensionen. Im Rahmen der Untersuchungen kamen zweikomponentige Klebstoffsysteme zum Einsatz.

Ziel der Untersuchungen war die Bestimmung der Tragfähigkeit und der Ermüdungsfestigkeit der Holz-Lochblech-Klebeverbindung. Hierzu wurden an den Prüfkörpern sowohl Kurzzeitzugversuche als auch Zugversuche unter Zugschwellenbeanspruchung durchgeführt. Die Durchführung der Kurzzeitzugversuche wurde an einer hydraulischen Prüfmaschine in Normalklima (20°C, 65% r.F.) vollzogen. Die Lastaufbringung erfolgte weggesteuert. Aufgebrachte Lasten und resultierenden Kolbenwege wurden von der Prüfmaschine und dem angeschlossenen Computer automatisch erfasst und für die Versuchsauswertung herangezogen. Zudem erfolgte eine exakte Verformungsmessung über mehrere externe induktive Wegaufnehmer (Abb. 2).

Die Durchführung der Ermüdungsversuche erfolgte – ebenfalls unter Normalklima – an einer Hydropulsmaschine. Hierbei wurden mehrere identische Prüfkörper so lange periodisch schwingend beansprucht, bis entweder ein Bruchversagen der Prüfkörper eintrat oder eine definierte Grenzlasterzahl von $N_{max} = 10.000.000$ Schwingspiele erreicht wurde. Die Beanspruchungsverhältnisse bei den Ermüdungsversuchen wurden



am Beginn eines Versuchs definiert und über die Dauer eines Versuchs nicht mehr verändert. Die Beanspruchung wurde jeweils in Form einer sinusförmigen Schwingbelastung mit einer bestimmten Mittelspannung und einer zugehörigen Lastamplitude aufgebracht. Die Frequenz der Lastaufbringung schwankte in Abhängigkeit der Prüfkörpergeometrie und der Beanspruchungsverhältnisse zwischen 2 Hz und 10 Hz. Bei allen Versuchen lag ein Spannungsverhältnis $\kappa \approx 0,10$ vor. Tabelle 1 zeigt die Beziehungen zwischen den einzelnen Versuchsparametern.

Abb. 3 zeigt exemplarisch für die Kurzzeitzugversuche das Kraft-Verformungs-Diagramm eines Prüfkörpers mit einreihig eingeklebten Lochblechen, aus dem sehr deutlich das „gutmütige“ Traglastverhalten der Brettsperrholz-Lochblech-Klebeverbindung abgelesen werden kann. Bis zu einer Zuglast von ca. 125

Abb 2:
In die hydraulische Prüfmaschine eingebauter Prüfkörper bei der Durchführung eines Kurzzeitzugversuchs

kN und einer Relativverformung von ca. 0,4 mm liegt ein sehr steifes und nahezu lineares Kraft-Verformungsverhalten des Prüfkörpers vor, ehe es zu überproportionalen Verformungszunahmen kommt. Diese Verformungszunahmen sind auf ein Fließen des Lochblechs zurückzuführen und reichen bis zu einer Relativverformung von ca. 7,5 mm. Das globale Versagen des Prüfkörpers erfolgt auf einem Lastniveau von ca.

Tabelle 1: Kenngrößen zur Beschreibung der Ermüdungsversuche

Kenngröße	Einheit	Definition
Oberspannung σ_o	N/mm ²	Betragsmäßige größere Spannung
Unterspannung σ_u	N/mm ²	Betragsmäßige kleinere Spannung
Mittelspannung σ_m	N/mm ²	$\sigma_m = (\sigma_u + \sigma_o) / 2$
Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$	N/mm ²	$\Delta\sigma = \sigma_o - \sigma_u$
Spannungsamplitude $\Delta\sigma_A$	N/mm ²	$\sigma_A = (\sigma_o - \sigma_u) / 2$
Spannungsverhältnis κ	-	$\kappa = \sigma_u / \sigma_o$

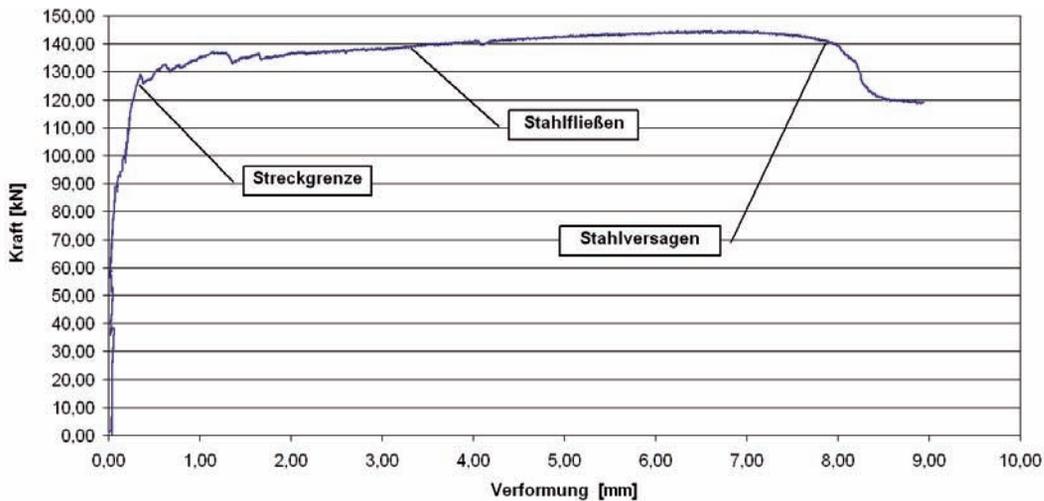


Abb. 3:
Kraft-Verformungs-Diagramm für einen Prüfkörper mit ausgeprägt plastischem Fließverhalten und anschließendem Versagen des eingeklebten Lochblechs.

145 kN. Es ist gekennzeichnet durch einen Abriss des Stahlquerschnitts zwischen den einzelnen Lochungen des Lochblechs. Die Klebeverbindung selbst weist bei diesem Prüfkörper keinerlei Anzeichen eines Versagens auf. Bezogen auf die vorliegende Querschnittsfläche des Stahls an der Stelle des Versagens liegt auf Bruchlastniveau eine Stahlbruchspannung von $340,21 \text{ N/mm}^2$ vor.

In Abb. 4 ist exemplarisch für die bisher durchgeführten Zugschwellenversuche die Detaildarstellung eines geöffneten Prüfkörpers dargestellt. Bei diesem Prüfkörper wurde eine Oberlast von $F_o = 84,00 \text{ kN}$ sowie eine Unterlast von $F_u = 8,40 \text{ kN}$ aufgebracht. Nach 547.437 Schwingspielen kam es zum Versuchsabbruch. Beim Öffnen des Prüfkörpers konnte ein Lochblechversagen (Ermüdungsbruch) festgestellt werden.

Wie die bisher an der MPA Wiesbaden durchgeführten

Untersuchungen somit gezeigt haben, kann bei richtiger Wahl der Randbedingungen und richtigem Design der Prüfkörper das Traglastverhalten der Brettsperrholz-Lochblech-Klebeverbindung so eingestellt werden, dass sowohl in Kurzzeitzugversuchen als auch in Ermüdungsversuchen das globale Prüfkörperversagen durch den Werkstoff Stahl hervorgerufen wird. Dies ist insofern von Bedeutung, als das hierdurch die Einflüsse von Materialschwankungen reduziert (der Variationskoeffizient von Stahl ist niedriger als der Variationskoeffizient von Holz) und Bemessungen einfacher vollzogen (z.B. Ermüdungsnachweise für Lochbleche gemäß DIN V ENV 1993-1-1) werden können. Zudem kündigt sich das Versagen der Verbindung in Kurzzeitzugversuchen durch die vorliegende Duktilität über einen langen Weg an. Es bleibt zu erwähnen, dass es sich bei den bisher erzielten Untersuchungsergebnissen um vorläufige Zwischenergebnisse handelt. Das FuE-Vorhaben ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen.

Fertigung und Montage des Testturms

Im Frühjahr 2010 wurde auf dem Betriebsgelände der Firma Holzbau Cordes [8] in Waffensen der Prototyp eines TimberTowers erstellt (Abb. 14). Hierbei handelt um einen 25 m hohen Turmabschnitt, der im Maßstab 1:1 erstellt wurde und dem obersten

Turmanschnitt des typengeprüften Prototypenturms entspricht. Ziel des Aufbaus war die Simulation und Optimierung der Montageprozesse. Mit dem Aufbau des Testturms konnte nach Ansicht der Planer ein reibungsloser und standardisierter Ablauf zur Montage der Holztürme entwickelt werden. Fertigung und Aufbau stellten sich im Einzelnen wie folgt dar:

- Vorfertigung der Brettsperrholzelemente im Werk inklusive Aufbringen der außenseitigen Oberflächenbeschichtung (Abb. 5, Abb. 6)
- Vorfertigung der hölzernen Teilkomponenten für das Lehrgerüst
- Transport aller Teilkomponenten zum Standort (Abb. 7)
- Erstellen der Lehrgerüsts auf dem vorher betonierten Fundament (Abb. 8, Abb. 9)
- Montage der Brettsperrholzelemente auf der Baustelle, wobei die Elemente leicht mit einem Kran verhooben werden konnten (Abb. 10, Abb. 11)
- Kraftschlüssige Kopplung der einzelnen Brettsperrholzelemente auf der Baustelle über insitu-Einkleben der Lochbleche durch Spezialisten [9]
- Verkleben der Stöße der Oberflächenbeschichtung mit einem außenseitigen Aufzugsystem (Abb. 12, Abb. 13)

Fazit

Die Holz-Stahl-Klebetechologie stellt eine innovative und leistungsstarke Variante zur Ausführung von Holzverbindungen dar. Die Vorteile dieser Verbindungsmitteltechnologie sind eindeutig: starr, duktil und mit nur minimaler Querschnittschwächung des Holzes. Zur Kopplung von Brettsperrholzelementen bei dem Anwendungsfall „hölzerne Windkraftanlage“ wurden an der MPA Wiesbaden zahlreiche Untersuchungen zur Kurzzeittragfähigkeit und Ermüdungsfestigkeit der Holz-Stahl-Klebeverbindung durch-

Abb. 4:
Detaildarstellung eines im Rahmen eines Zugschwellenversuchs getesteten Prüfkörpers mit einem Ermüdungsversagen des Lochblechs





Abb. 5:
Vorfertigung der Brettsperrholzelemente (aus [7])



Abb. 6:
Brettsperrholzelemente während der Produktion (aus [7])



Abb. 7:
Herstellung der Brettsperrholzelemente (aus [7])



Abb. 8:
Aufstellen des Lehrgerüsts für den
TimberTower (aus [7])

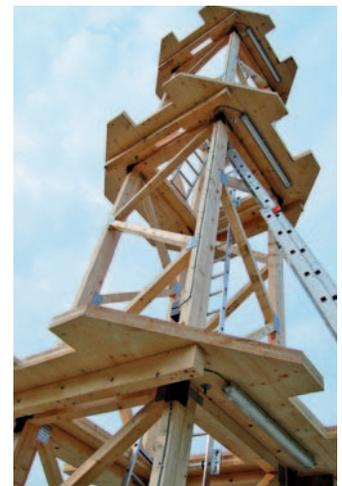


Abb. 9:
Lehrgerüst des TimberTowers (aus [7])



Abb. 10:
Montage der vorgefertigten Wandelemente (aus [7])



Abb. 11:
Montage der vorgefertigten Wandelemente, wobei das Gewicht der Windkraftanlage ausschließlich über die Platten abgetragen wird (aus [7])



Abb. 12:
Verklebung der Oberflächenbeschichtung mit systemintegriertem Aufzugssystem (aus [7])



Abb. 13:
Verklebung der Oberflächenbeschichtung (aus [7])

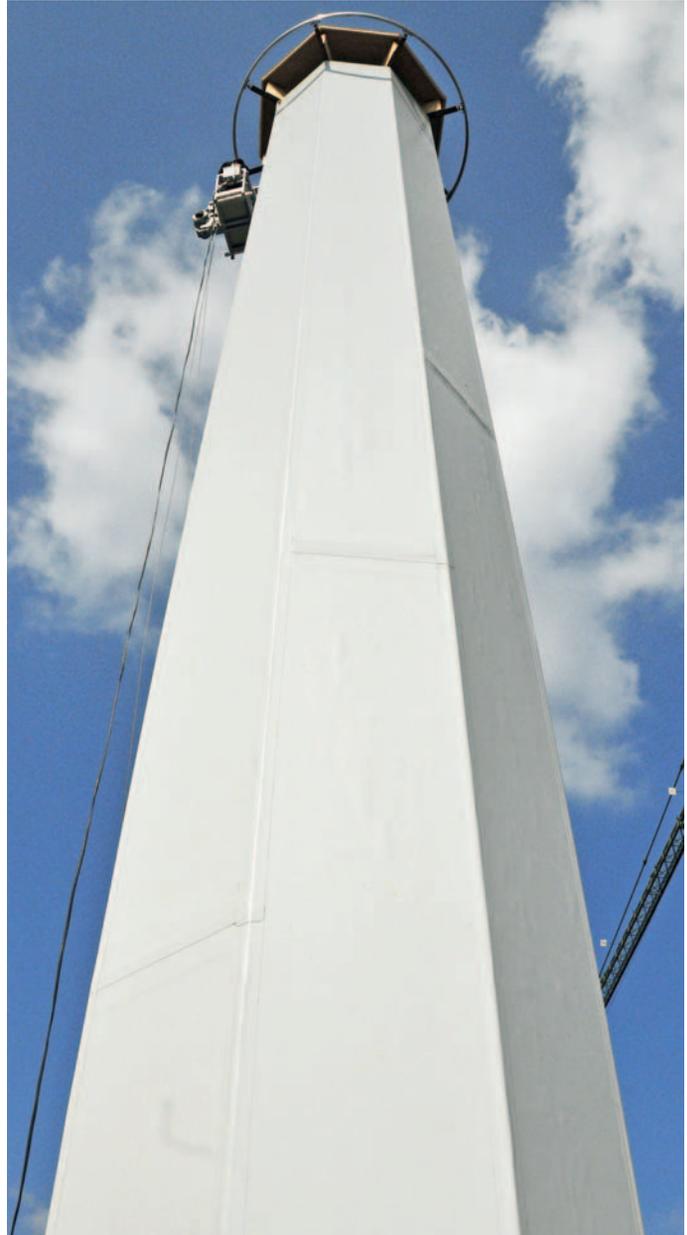


Abb. 14:
Fertiger 25 m hoher Turmabschnitt (aus [7])

geführt. Die bisher erzielten vorläufigen Untersuchungsergebnisse deuten darauf hin, dass bei der geplanten Kopplung der Brettsperrelemente mittels eingeklebter Lochblechabschnitte sowohl unter Kurzzeitbeanspruchung als auch unter Ermüdungsbeanspruchung ein Stahlversagen erzielt werden kann. Die Montage des 25 m hohen Turmabschnitts in Waffensen bestätigt zudem: Die Umsetzung der Vision vom TimberTower als wirtschaftliche und nachhaltige Alternative für Windkraftanlagen rückt in greifbare Nähe. ■

Literatur

[1] Bathon, L.; Bletz, O.; Schmidt, J.; Weber, M.; Weil, M. (2009): „Holz-Stahl-Klebeverbindungen mit Flachkörpern – Entwicklungen und Anwendungen“, Tagungsband des Internationalen Holzbauforums 2009, Garmisch-Partenkirchen

[2] Bathon, L.; Bletz, O.; Schmidt, J.; Weil, M. (2009): „Untersuchung der Ermüdungsfestigkeit von in Holz eingeklebten Lochblechen im Hinblick auf das Projekt TimberTower“, Untersuchungsbericht HB 105/VI-09, Hochschule RheinMain, Institut für Baustoffe und Konstruktion

[3] Bathon, L.; Bletz-Mühdorfer, O.; Schmidt, J.; Weber, M.; Weil, M. (2010): „Untersuchungsbericht HB 102/I-10 – Untersuchung eines Verbindungssystems für die Kopplung von Holzelementen im Rahmen des Projektes TimberTower – Bestimmung der charakteristischen Kurzzeittrag-

fähigkeit eines Klebstoffdübels in Abhängigkeit des verwendeten Klebstoffsystems“, Hochschule RheinMain, Fachbereich Architektur und Bauingenieurwesen, Institut für Baustoffe und Konstruktion

[4] Bathon, L.; Bletz-Mühdorfer, O.; Schmidt, J.; Weil, M. (2010): „Untersuchungsbericht HB 104/II-10 – Untersuchung der Ermüdungsfestigkeit von mit einem 2K-Polyurethanklebstoff in Holz eingeklebten Lochblechen im Hinblick auf das Projekt TimberTower“, Hochschule RheinMain, Fachbereich Architektur und Bauingenieurwesen, Institut für Baustoffe und Konstruktion

[5] Bathon, L.; Bletz-Mühdorfer, O.; Schmidt, J.; Diehl, F. (2010): „Untersuchungsbericht HB 107/IV-10 – Untersuchungen zur Ermittlung der charakteristischen Tragfähigkeit von Klebstoffdübeln im Hinblick auf das Projekt TimberTower (Tragfähigkeitsversuche an in Brettschichtholz eingek-

lebten Lochblechen mit 4x8 Lochungen)“, Hochschule RheinMain, Fachbereich Architektur und Bauingenieurwesen, Institut für Baustoffe und Konstruktion

[6] Bathon, L.; Bletz-Mühdorfer, O.; Schmidt, J.; Weil, M. (2010): „Untersuchungsbericht HB 108/V-10.V1 – Untersuchungen von eingeklebten Lochblechen im Hinblick auf das Projekt TimberTower – Großversuche“, Hochschule RheinMain, Fachbereich Architektur und Bauingenieurwesen, Institut für Baustoffe und Konstruktion

[7] Fa. TimberTower GmbH, Vahrenwalder Straße 7, 30165 Hannover, www.timbertower.de

[8] Fa. Ing. Holzbau Cordes GmbH & Co. KG, Waffensener Dorfstraße 20, 27356 Rotenburg, www.cordes-row.de

[9] Fa. TiComTec GmbH, Goethestraße 60, 63808 Haibach, www.ticomtec.de