12

98. Jahrgang Dezember 2021, S. 907–920 ISSN 0932-8351

Sonderdruck

Bautechnik

Zeitschrift für den gesamten Ingenieurbau



- Hybride Konstruktionen an der BTU Cottbus-Senftenberg
- Zur bodendynamischen Strukturdämpfung von Offshore-Windenergieanlagen
- Aktive und passive Schwingungsreduktion von Bauwerken
- Mit einem Holzhybrid neue Höhen erreichen
- Optimized Hybrid Structures in Bridge Construction
- BIM zur Attribuierung des Fachmodells Baugrund
- Süllkästen zur Inspektion und Sanierung von Uferbauwerken
- Dükerung des Hafenkanals in Duisburg
- Technischer Jahresbericht des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen"





Achim Bleicher et al. AUFSATZ

Hybride Konstruktionen an der BTU Cottbus-Senftenberg

Die angestrebten Ziele einer Ressourcen- und Klimaneutralität erfordern ein radikaleres Umdenken der Bauschaffenden, das mit einer noch viel stärkeren Sensibilisierung der Auftraggeber für die Auswirkungen des Material- und Energieverbrauchs im Bausektor verbunden ist. Ein Ansatz, um diese Ziele zu erreichen, sind hybride Konstruktionen, in denen unterschiedliche Materialien, Elemente, Funktionen und Technologien auf mehreren Konstruktionsebenen ressourcen- und energieeffizient kombiniert sowie im Fall eines Rückbaus sortenrein rezykliert werden. Dieser anspruchsvolle Ansatz ist von Beginn an erklärtes Ziel des Lehrstuhls Hybride Konstruktionen - Massivbau an der BTU Cottbus-Senftenberg und zieht sich durch alle Lehrund Forschungsaktivitäten. Mit ausgewählten Forschungsprojekten werden Motivation und Methoden hybrider Konstruktionen sowie deren Potenzial für ressourcen- und klimaneutrale Konstruktionen anhand von Prototypen aufgezeigt. Hierbei steht neben der ökologischen Weiterentwicklung klassischer hybrider Konstruktionen aus nachwachsenden und rezyklierten Rohstoffen, bspw. Holz und Recyclingbeton, auch die Entwicklung aktiver hybrider Konstruktionen im Fokus. Die gezielte Integration von aktiven Technologien wie Sensorik, Aktuatorik und Regelungstechnik ermöglicht multifunktionale Konstruktionen, einen hohen Nutzungskomfort, einen geringeren Rohstoffverbrauch bis hin zur Energiegewinnung aus dynamischen Einwirkungen.

Stichworte Leichtbau; Schwingungsdämpfung; Doppelfassade; Holz-Beton-Verbund; BauBuche; BTU Cottbus-Senftenberg; hybrid; adaptiv; ressourcenschonend; energieeffizient

1 Einleitung

Hybride Konstruktionen lassen sich verschiedentlich definieren, charakteristisch ist aber in allen Fällen die Kombination von unterschiedlichen Materialien. Elementen. Funktionen und Technologien, die auf mehreren Konstruktionsebenen wie der Werkstoff-, Querschnitts-, Tragwerks- oder Bauwerksebene zu einer vielseitigen Effizienzsteigerung führen [1]. Mit diesem Ansatz stehen hybride Konstruktionen ganz in der Tradition des Leichtbaus. Bei den "klassischen" hybriden Konstruktionen werden vornehmlich verschiedene Materialien zu Verbundwerkstoffen (bspw. Stahl-, Textil- und Carbonbeton) bzw. zu Verbundquerschnitten (bspw. Stahl- und Holz-Beton-Verbund) kombiniert [2, 3]. Eine ökologische Weiterentwicklung dieses Ansatzes wird in Abschn. 2 aufgezeigt. Darüber hinaus können durch geschickte Kombinationen von normal- und biegebeanspruchten Tragelementen (bspw. Unterspannter Träger, seilgestützte Tragwerke)

Hybrid structures at BTU Cottbus-Senftenberg

The intended objectives of resource and climate neutrality require a more radical rethinking on the part of building professionals, combined with a much greater awareness on the part of clients of the effects of material and energy consumption in the building sector. Achieving these goals is possible using hybrid structures, in which different materials, elements, functions and technologies are combined on different levels of construction in a resource- and energy-efficient way as well as recyclable by type into their components in case of deconstruction. This ambitious approach has been the declared goal of the Chair of Hybrid Structures – Structural Concrete at BTU Cottbus-Senftenberg from the very beginning and runs through all teaching and research activities. With the aid of selected research projects, the motivation and methods of hybrid constructions as well as their potential for resource- and climateneutral constructions are shown on the basis of prototypes. In addition to the further ecological development of classical hybrid structures made of renewable and recycled raw materials such as timber and recycled concrete, the focus is also on the development of active hybrid structures. The targeted integration of active/adaptive technologies such as sensor, actuator and control systems enables multifunctional constructions, a high level of user comfort, lower raw material consumption and the possibility of energy harvesting from dynamic loads.

Keywords lightweight construction; vibration control; double-skin facade; timber-concrete composite; beech laminated veneer lumber; BTU Cottbus-Senftenberg; hybrid; adaptive; resource-conserving; energy-efficient

mehr als nur materialminimierte Konstruktionen erzielt werden. Vielmehr eröffnen hybride Konstruktionen über einen intelligenten Lastabtrag, mit größeren Spannweiten und einfacheren Bauverfahren, eine vielfältige Baukultur [4].

Um Rohstoffvorräte zu schonen, muss ein konsequenter Leichtbau das Gebot der kommenden Bauwerksgenerationen sein. Damit verbunden sind große Herausforderungen, insbesondere, da sich infolge der Minimierung des Konstruktionsgewichts die Sensibilität der Tragstruktur gegenüber zeitlich und örtlich veränderlichen Einwirkungen erhöht. Eine konsequente Weiterentwicklung zielt daher auf die aktive Beeinflussung der Tragwerksantwort auf beliebige Einwirkungen und sich ändernde Randbedingungen hin. Die ganzheitliche Integration und Kombination innovativer Technologien und aktiver Ansätze lässt eine neue Generation hybrider Konstruktionen entstehen. International gibt es schon seit längerer Zeit

Ansätze und erfolgreiche Realisierungen aktiver Tragwerke [5]. Untersuchungen im Leicht- und Ultraleichtbau sind dagegen eher selten und insbesondere in der Forschung zu finden. Hier sind bspw. die Demonstratoren an der Universität Stuttgart und der TU Berlin zu nennen [6–8]. Eine Weiterentwicklung dieser aktiven Ansätze hin zu energieeffizienten und autarken hybriden Konstruktionen wird in Abschn. 3 aufgezeigt.

Kombiniert man tragende und funktionale Anforderungen im Sinne von "Tragwerk ist Hülle" und "Hülle ist Tragwerk" (bspw. Infraleichtbeton, Monocoque-Bauweise), kann die Leistungsfähigkeit der Bauteile hinsichtlich einer Multifunktionalität weiter gesteigert werden [9, 10]. Darüber hinaus ermöglichen wandelbare Konstruktionen eine flexible Nutzung [11]. Ressourceneffizient lässt sich dies nur durch konsequenten Leichtbau und eine hybride Konstruktionsphilosophie realisieren. Diese Gedanken werden in Abschn. 4 aufgenommen.

Der Ansatz aktiver und hybrider Leichtbauweisen ist mit neuen und v. a. interdisziplinären Herausforderungen verbunden. Um die Studierenden an die erforderlichen Methoden heranzuführen, bietet der Lehrstuhl Hybride Konstruktionen - Massivbau an der BTU u.a. die Master-Schwerpunktmodule "Aktive Tragwerke", "Vorgespannte Tragwerke" und "Projekt Hybride Konstruktionen" an. Diese werden werkstoffübergreifend, interdisziplinär sowie eng verzahnt mit den anstehenden Forschungsthemen gelehrt. Hybrides Entwerfen und Konstruieren, also die ganzheitliche Integration neuer Technologien zur Auslegung aktiver Tragwerke, stehen hierbei im Fokus. Zudem leistet die Kombination aus experimentellen, numerischen und analytischen Untersuchungen zur Absicherung der Ergebnisse einen wichtigen Beitrag zur Abstimmung unterschiedlicher Modelle.

Die hybride Konstruktionsphilosophie auf der Grundlage des Leichtbaus liefert vielfältige Lösungen, um den aktuellen Aufgaben und Anforderungen gerecht zu werden. In den drei nachfolgend beschriebenen Forschungsprojekten werden hybride Konstruktionen mit einem Fokus auf Ressourcenschonung, Energiegewinnung und Multifunktionalität vorgestellt.

2 Hybride Konstruktionen zur Ressourcenschonung

2.1 Motivation und Zielstellung

Neue Brandschutzstrategien ermöglichen innovative Trag- und Aussteifungskonzepte für den Hochhausbau aus Holz. Als nachwachsender Konstruktionswerkstoff erzielt Holz in Kombination mit Beton derzeit regelmäßig neue Höhenrekorde und bietet gleichzeitig ein hohes CO₂- und Energieeinsparpotenzial. Durch die Verwendung von Recyclingbeton lässt sich dieses Potenzial weiter steigern.

Holz und Beton im Verbund kommen primär in den Geschossdecken zum Einsatz, um den Schall- und Brandschutz zu gewährleisten. Zur Abtragung der vertikalen und horizontalen Lasten bzw. zur Aussteifung wurden zwischenzeitlich verschiedene Konzepte entwickelt und ausgeführt: (1) Kern aus Stahlbeton mit angeschlossenem Holzskelettbau, (2) Holzskelettbau, ausgesteift durch Kern bzw. Wandscheiben aus Brettsperrholz, und (3) Holzskelettbau, ausgesteift durch Holzfachwerk. Der Holzskelettbau besteht dabei meist aus einem einfeldrigen Brettstapel-, Brettsperrholz- oder Holz-Beton-Verbunddeckensystem und gelenkig angeschlossenen Holzstützen [12–14].

Eine Alternative sind mehrfeldrige und mehrgeschossige Rahmensysteme mit biegetragfähigen Knoten, die sich planmäßig am horizontalen Lastabtrag beteiligen und sich bei großen Bauwerkshöhen effizient mit einem (exzentrischen) Kern kombinieren lassen [15]. Als wesentlicher Vorteil sind hier die höheren Redundanzen bzw. Umlagerungsmöglichkeiten in der Tragstruktur gegenüber außergewöhnlichen Beanspruchungen wie bspw. Stützenausfall zu nennen.

Das Forschungsvorhaben am Lehrstuhl fokussiert sich hierbei auf die Entwicklung und Optimierung biegetragfähiger, robuster und duktiler Knoten, wobei zur effizienten Abtragung der hohen Normalkräfte in den Holzstützen und der Biegemomente im Holz-Beton-Verbundriegel das Furnierschichtholz BauBuche der Pollmeier Massivholz GmbH mit der hohen Festigkeit GL 75 zum Einsatz kommt.

2.2 Holz-Beton-Verbundrahmensystem zur Aussteifung von Hochbauten

Bei der Entwicklung des Holz-Beton-Verbundrahmensystems (HBV-Rahmen) mit integrierten biegetragfähigen Knoten wurde auf ein hohes Maß an Elementierung und Vorfertigung geachtet, um zeitintensive Arbeiten auf der Baustelle zu minimieren. Der Aufbau des HBV-Rahmens beginnt mit der unteren Stützenreihe (Bild 1). Es folgen die Holzträger, welche in einer max. produzier- und transportierbaren Länge geliefert und bei größeren Gebäudeabmessungen gestoßen werden. Über das am Knoten eingesteckte Stahleinbauteil können Normalkräfte, Biegemomente und Querkräfte ohne Querpressung des Holzträgers übertragen werden. Der Anschluss der Stützen an das Stahleinbauteil erfolgt über Stabdübel. Anschließend werden (Halb-)Fertigteile zur Ausbildung der Deckenplatte auf die Holzträger gelegt. Mittels Ortbetonergänzung wird der Verbund (1) zwischen Holzträger und Betonplatte durch Kerven bzw. Nocken und Schrauben, (2) zur Stütz- und Rahmenbewehrung des Verbundträgers und (3) für die Durchlaufträgerwirkung der Deckenplatte quer zum Verbundträger hergestellt. Alternativ zur Flachdecke sind auch kraftflussoptimierte Rippendecken oder Holz-Beton-Verbund- bzw. Brettstapeldecken als (Halb-)Fertigteile zur weiteren Einsparung

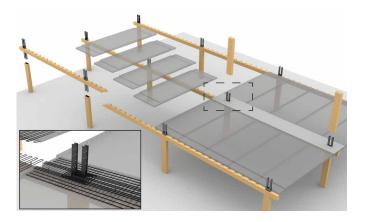


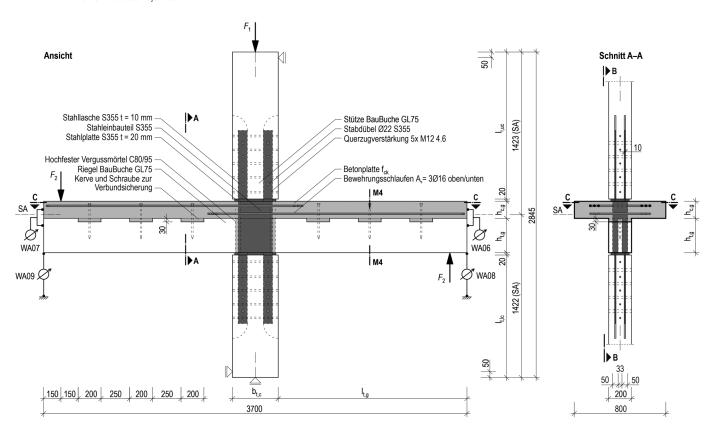
Bild 1 Montagekonzept des Holz-Beton-Verbundrahmensystems mit biegetragfähigen Knoten

Assembly concept of the timber-concrete composite frame system with moment-resistant joints

von Beton denkbar. Final wird die obere Stütze analog zur unteren Stütze angeschlossen.

2.3 Analytische und numerische Untersuchungen des Tragverhaltens

Das Forschungsprojekt konzentriert sich auf die Untersuchung des Tragverhaltens zur Abtragung von horizontalen Windlasten sowie vertikalen Eigen- und Nutzlasten. Zur Generierung der Rahmenschnittgrößen aus der bereits genannten Lastkombination werden die Kraft F_1 und die betragsmäßig gleichen, aber entgegengesetzt gerichteten Kräfte F_2 aufgebracht (Bild 2). Die Normalkraft F_1 überdrückt hierbei einen Großteil der Biegezugspannungen aus F_2 in der Stütze.



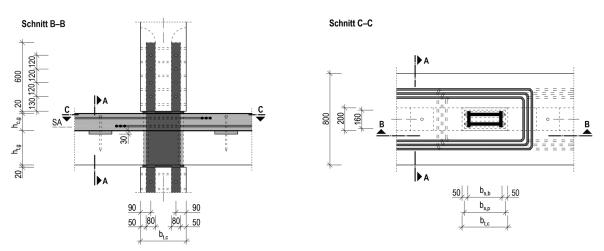


Bild 2 Geometrie und Aufbau des biegetragfähigen Knotens im Holz-Beton-Verbundrahmensystem (Parameter siehe Tab. 1)
Geometry and composition of the moment-resistant joint in the timber-concrete composite frame system (parameter cf. Tab. 1)

Tab. 1 Parameter der Versuchsserie für Versuchskörper VK 1 bis VK 6
Parameters of the test series for specimen VK 1 to VK 6

Parameter		VK 1	VK 2	VK 3	VK 4	VK 5	VK 6
$b_{\mathrm{s,b}}$	[mm]	300	300	300	300	500	300
$b_{s,p}$	[mm]	360	360	360	360	560	360
$b_{t,c}$	[mm]	400	400	400	400	600	400
$h_{\mathrm{c,g}}$	[mm]	150	150	100	150	150	150
$h_{t,g}$	[mm]	300	300	300	200	300	300
$l_{ m t,g}$	[mm]	1650	1650	1650	1650	1550	1650
$l_{ m t,lc}$	[mm]	1070	1070	1111	1154	1070	1070
$l_{ m t,uc}$	[mm]	1285	1285	1294	1301	1285	1285
Querzugverstärkung		ja	ja	nein	nein	ja	nein
Betonfestigkeit $f_{\rm ck}$		C25/30	RC16/20	C25/30	C20/25	C25/30	C25/30
Bruchlast	[kN]	132	116	122	88	165	128

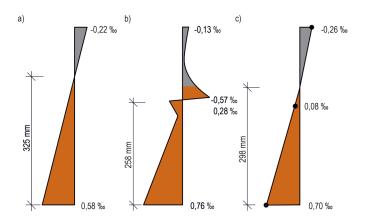


Bild 3 Dehnungen im Verbundquerschnitt in VK 1 in Messebene M4:
a) analytisch, b) numerisch, c) experimentell
Strain in the composite section in VK 1 in measurement plane M4:
a) analytic, b) numeric, c) experimental

Der grundsätzliche Kraftfluss konnte mithilfe von Stabwerkmodellen analysiert und dargestellt werden [16]. Für weitere Analysen wurden insgesamt sechs Versuchskörper (VK) unter Variation verschiedener Knotenparameter (Tab. 1, Bild 2) untersucht.

Zunächst wurde unter Annahme eines starren Verbunds die elastische Dehnungsverteilung am Rand des Diskontinuitätsbereichs (Bild 2, Messebene M4) analytisch ermittelt (Bild 3a). Für eine realitätsnahe Erfassung des Last-Verformungs- und Bruchverhaltens unter Berücksichtigung des nachgiebigen Verbunds wurde ein numerisches Modell mithilfe der Software ANSYS erstellt. Die gewonnene Dehnungsverteilung in VK 1 aus einem Schnitt durch das Modell (Bild 3b) bei 100% Bruchlast zeigt den Einfluss der nachgiebigen Kervenverbindung durch einen Dehnungssprung im braun gekennzeichneten Holzquerschnitt.

2.4 Experimentelle Verifizierung

Zur Verifizierung der numerischen Ergebnisse wurden sechs Versuchskörper im Maßstab 1:1 (Tab. 1) in der For-

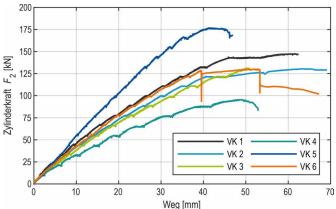


Bild 4 Last-Verformungs-Diagramm der Versuchskörper VK 1 bis VK 6 am linken Trägerende (WA09 in Bild 2)

Vertical load at the hydraulic cylinder vs. vertical displacement of specimen VK 1 to VK 6 on the left side (WA09 in Fig. 2)

schungs- und Materialprüfanstalt (FMPA) der BTU Cottbus-Senftenberg hergestellt und im Versuchsstand bis zum Bruch belastet. Für eine gute Vergleichbarkeit bei den Festigkeiten wurde der Beton auf Basis eigener Voruntersuchungen selbst hergestellt. Für den Versuchskörper 2 wurde ein Beton aus 100% recycelten Gesteinskörnungen verwendet. Die Belastung erfolgte entsprechend Bild 2, wobei für alle Versuchskörper $F_1 = 800 \text{ kN}$ konstant gehalten wurde. Die Kräfte F2 wurden aufgrund der ungleichen Verbundträgersteifigkeiten in Kraftrichtung kraftgeregelt aufgebracht. Anhand der so gewonnenen experimentellen Daten konnte eine erste Validierung der Modelle vorgenommen werden. Die relative Verschiebung zwischen Beton und Holz in der Verbundfuge beträgt am Wegaufnehmer WA06 (Bild 2) 0,35 mm und im Modell 0,21 mm. Die gemessene vertikale Verformung am Wegaufnehmer WA08 (Bild 2) beträgt 35,22 mm und im Modell 38,16 mm. Die aufgetragene bilineare Dehnungsverteilung (Bild 3c) wurde aus drei diskret gemessenen Werten generiert. Der Vergleich zeigt gute Übereinstimmungen bei den lokalen und globalen Verformungen





Bild 5 Bruchbilder der Versuchskörper: a) Schubversagen im Holzträger von VK 4, b) Versagen der Betonplatte von VK 5 Failure mechanism of the test specimen: a) shear failure in timber beam of VK 4, b) failure of the concrete slab of VK 5

sowie im betrachteten elastischen Bereich. In den Diskontinuitätsbereichen sind weitere Analysen erforderlich.

Für die sechs Versuchskörper sind die Bruchlasten in Tab. 1 und die Last-Verformungs-Kurven in Bild 4 dargestellt. Die Auswertung der Bruchmechanismen ist noch nicht vollständig abgeschlossen, weshalb sich die Autoren hier auf die Darstellung erster Erkenntnisse beschränken. Die Last-Verformungs-Kurven in Bild 4 zeigen ein unterschiedliches Nachbruchverhalten. Bei den Versuchskörpern 1 und 2 ist ein duktiles Verhalten zu erkennen, bei den Versuchskörpern 3 bis 6 fällt die Last nach Erreichen der Bruchlast ab.

Bei fast allen Versuchskörpern tritt das Versagen, wie in den Voruntersuchungen angestrebt, im Verbundträger direkt an der Stütze auf, wobei die Art des Versagens aufgrund verschiedener Einflüsse differenziert zu betrachten ist. In Bild 5a ist bspw. das Schubversagen im Holzträger von Versuchskörper 4 zu erkennen und in Bild 5b das Versagen der Betonplatte von Versuchskörper 5 durch eine starke Rissbildung.

Neben der Identifikation von Bruchmechanismen und der Validierung der Modelle werden die Einflüsse der verschiedenen Parameter auf das Trag- und Verformungsverhalten analysiert. Darauf aufbauend wird ein ingenieurmäßiges Modell zur Berechnung der Tragfähigkeit und Rotationsfähigkeit nach dem Vorbild der Komponentenmethode [17] abgeleitet. Für eine schnelle Etablierung dieser nachhaltigen Bauweise sollen schließlich Empfehlungen zur Ausbildung biegetragfähiger, robuster und duktiler Knoten in Holz-Beton-Verbundrahmensystemen für die Praxis ausgesprochen werden.

3 Hybride Konstruktionen zur Energiegewinnung und Schwingungsdämpfung

3.1 Motivation und Zielstellung

Die Effekte aus dynamischer Windeinwirkung auf Bauwerke lassen sich durch eine Optimierung der umström-

ten Bauwerksgeometrie nur bis zu einem gewissen Grad reduzieren. Für weitere Verbesserungen der Gebrauchstauglichkeit bzw. des Schwingungsverhaltens, insbesondere bei sehr schlanken Hochhäusern (Breite/Höhe = 1:7 bis aktuell 1:23), werden bisher zwei grundlegende Ansätze verfolgt. Entweder wird die Reduzierung von Schwingungen durch Steifigkeit und/oder Masse oder durch die gezielte Beeinflussung mittels zusätzlicher Systeme (passiv, semiaktiv, aktiv, hybrid) realisiert. In der Regel erfordert die Wirkungsweise der zusätzlichen Systeme (1) einen großen Bauraum, (2) eine große zusätzliche Tilgermasse von mehreren Hundert Tonnen, die über (3) eine materialintensivere Tragstruktur abgetragen werden muss, und/oder (4) zusätzliche Energie für deren Betrieb. Das Potenzial der Windenergie zur Energiegewinnung an großen Fassadenflächen - vergleichbar mit den aus der Fahrzeugtechnik bekannten Ansätzen und Anwendungen der Energiegewinnung aus Bewegungsenergie – wird bisher nicht genutzt. Genau hier setzt das interdisziplinäre Verbundprojekt an. Zusammen mit dem Fachgebiet Regelungssysteme der TU Berlin und der Josef Gartner GmbH erarbeiten Bauingenieure, Regelungstechniker, Maschinenbauer, Leistungselektroniker und Fassadenbauer Grundlagen zur Entwicklung eines autarken semiaktiven bzw. aktiven Systems zur Schwingungsdämpfung bis hin zur Realisierung eines 1:1-Fassadenprototyps. Hierbei wird der Ansatz verfolgt, ressourcenschonend und energieeffizient eine bereits vorhandene Masse und deren Bauraum in Form einer beweglichen Doppelfassade zu nutzen. Somit übernimmt die Doppelfassade neben den bekannten Funktionen, bspw. den Schutz variabler Verschattungen, die natürliche Lüftung (Zu-/Abluft, Zirkulation), den verbesserten Schallschutz [18], die Funktion eines über die Fassadenbreite und -höhe verteilten Energie-Harvesters und Schwingungsdämpfers.

3.2 Ansatz und Funktionsweise

Ziel ist es, sowohl die windinduzierten Gebäudeschwingungen zu dämpfen als auch die aus diesen Schwingungen gewonnene Energie in einer Batterie zu speichern und bei Bedarf zur semiaktiven bzw. aktiven Schwin-

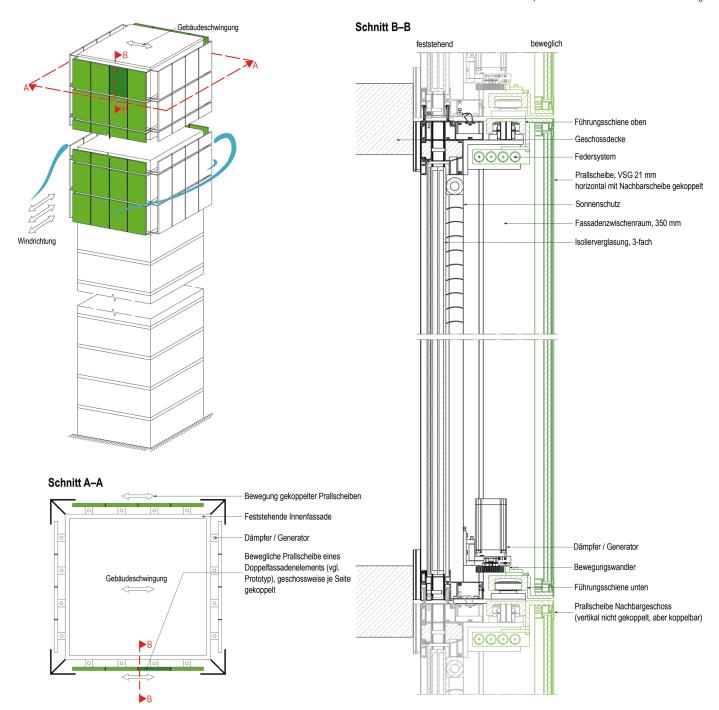
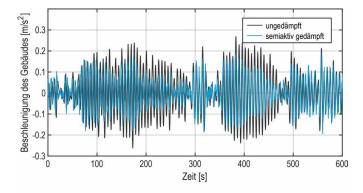


Bild 6 Konzept und Aufbau des beweglichen Doppelfassadensystems
Concept and composition of the moveable double-skin facade system

gungsdämpfung zu nutzen. Die Windanregung erfolgt dabei primär durch Wirbelablösung (vortex shedding), welche orthogonal zur Windrichtung wirkende Kräfte verursacht. Im Vergleich zu bisherigen Ansätzen [19, 20] erfolgt hier die Übertragung der Kräfte auf das Gebäude über eine orthogonal zur Gebäudehülle fixierte, aber parallel bewegliche Prallscheibe einer Doppelfassade, wobei die bewegliche Prallscheibe durch das Gebäude angeregt wird (Bild 6). Vorteilhaft ist hier u.a. eine deutlich einfachere konstruktive Anbindung der beweglichen Prallscheibe [21, 22]. Zugrunde gelegt wird, dass die beweglichen Prallscheiben geschossweise je Seite gekoppelt sind und sich im Eckbereich in einen feststehenden Fassadenteil schieben können.

Die in Bild 6 (Schnitt B-B, dunkelgrün) dargestellte bewegliche Prallscheibe ist über Federelemente, die auf die dominierende erste Eigenfrequenz des Gebäudes abgestimmt sind, sowie über leichtgängige Führungsschienen mit der feststehenden Fassade verbunden. Eine vertikale Verbindung der Prallscheiben über zwei oder mehr Geschosse ist möglich und erlaubt die Einsparung mechatronischer Komponenten. Für die Realisierung verschiedener geschossabhängiger Dämpfungskoeffizienten und einer zeitlich veränderlichen Dämpfung wurde ein mechatronischer Schwingungsdämpfer inklusive Energie-Harvester entwickelt. Kernelement ist ein Schrittmotor, der als Generator fungiert. Durch die Entwicklung einer spezifischen Leistungselektronik kann ein definierter me-



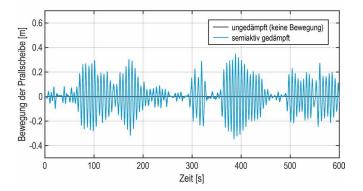


Bild 7 Zeitlicher Verlauf der Beschleunigung des Gebäudes und der Bewegung der Prallscheibe im 76. Stockwerk
Time course of building acceleration and moveable outer skin in the 76th story

chanischer Dämpfungskoeffizient gewährleistet und Energie in einer Batterie gespeichert werden. Über einen Bewegungswandler wird die Relativbewegung zwischen Geschoss und beweglicher Prallscheibe auf den Generator übertragen.

3.3 Modellbildung, Simulation und Regelung

Zur simulativen Untersuchung im Vorfeld einer Umsetzung sowie zum Vergleich der Ergebnisse mit anderen Ansätzen wurde ein 306 m hohes Benchmark-Gebäude mit 76 Stockwerken betrachtet, für das ein Starrkörperund Windlastmodell vorliegt [23, 24]. Dieses wurde um bewegliche Prallscheiben in den obersten Stockwerken erweitert, wobei auch in der Praxis auftretende Rollreibung in den Führungsschienen sowie viskose Reibung und Haftreibung im Generator berücksichtigt wurden. Im Rahmen einer multikriteriellen Optimierung mittels genetischer Algorithmen wurden die Anzahl von Stockwerken mit beweglicher Doppelfassade (Prallscheibe) und deren Dämpfungsparameter für die Anbindung bestimmt [22]. Hierbei wurden zunächst zwei Ansätze verfolgt: eine passive Schwingungsdämpfung und eine semiaktive in Form einer geschwindigkeitsbasierten Ground-Hook-Regelung, bei der zwischen zwei Dämpfungsgraden in Abhängigkeit von der Relativbewegung zwischen beweglicher Prallscheibe und Gebäude umgeschaltet wird. Für eine Windgeschwindigkeit von 13,5 m/s in 10 m Höhe (Zehnjahresperiode) wurden der Betrag der max. Beschleunigung des obersten Stockwerks und die max. Relativbewegung der Prallscheibe minimiert. Anhand der da-

raus resultierenden Pareto-Fronten wurden Parametersätfür beide Dämpfungsansätze mit beweglichen Doppelfassaden in den obersten 20 Stockwerken ausgewählt. Da eine größere Fassadenbewegung zu einer besseren Schwingungsreduktion führt, wurde beim passiven Ansatz ein Parametersatz gewählt, welcher zu der konstruktiv max. erlaubten Relativbewegung (+/- 500 mm) führt. Die max. Beschleunigungsamplitude im 76. Stockwerk konnte so um rd. 28% von 0,269 m/s² beim ungedämpften Gebäude mit feststehenden Prallscheiben auf 0,195 m/s² reduziert werden. Wählt man beim semiaktiven Ansatz einen Parametersatz mit gleicher max. Beschleunigungsamplitude, so kann die relative Fassadenbewegung um 34% auf +/- 330 mm reduziert werden. Größere Fassadenbewegungen beim semiaktiven Ansatz führen nur zu min. Verbesserungen in der Beschleunigungsreduktion. Die zeitlichen Verläufe der Beschleunigung und Fassadenbewegung für das ungedämpfte und das semiaktiv gedämpfte Gebäude sind in Bild 7 dargestellt. Die Gebrauchstauglichkeit für eine Hotel- und Büronutzung ist damit gewährleistet [15, 25].

3.4 Validierung am Fassadenprototyp

Um die Machbarkeit einer praktischen Umsetzung der Konzepte zu untersuchen, wurde ein Fassadenelement mit beweglicher Prallscheibe (Breite: 2,6 m; Höhe: 2,8 m) in Zusammenarbeit mit der Fima Josef Gartner GmbH konstruiert und aufgebaut (Bild 8). Das Fassadenelement ist auf einem beweglichen Gebäuderahmen montiert. Bild 9 zeigt den Generator für die Realisierung der semiaktiven Dämpfung und Energiegewinnung. Der Fassadenprototyp erlaubt die experimentelle Identifikation von parasitären Reibungswerten, welche in der zuvor beschriebenen Optimierung berücksichtigt sind.

Die Funktionsweise des Fassadenelements wird in Hardware-in-the-Loop- (HiL-) Simulationen untersucht (Bild 10). Hierbei wird das gesamte Hochhaus bis auf ein herausgelöstes Fassadenelement, das durch den Fassadenprototyp ersetzt wird, mithilfe der Software MATLAB und Simulink simuliert. Die daraus resultierende Bewegung eines ausgewählten Stockwerks wird mittels eines geregelten Linearantriebs am Gebäuderahmen realisiert. Um die Rückwirkung der beweglichen Prallscheibe auf das Gebäude zu erfassen, wird die Interaktionskraft mittels eines Kraftsensors erfasst und in die Gebäudesimulation zurückgeführt.

Erste Untersuchungen zeigen, dass die geerntete elektrische Energie bei der betrachteten Windgeschwindigkeit von 13,5 m/s ausreicht, um das eingebettete System (Mikrocontroller, Sensoren und Leistungselektronik) aller Fassadenelemente in sämtlichen Stockwerken zu versorgen und die Batterie in jedem Fassadenelement zu laden. Der Wirkungsgrad in der Umwandlung von mechanisch dissipierter Energie in elektrische Energie im elektronisch geregelten Dämpfer beträgt ca. 70%. Bild 11 zeigt die generierte elektrische Leistung für ein Fassadenelement im



Bild 8 Fassadenprototyp bestehend aus Basisrahmen, Gebäuderahmen und Doppelfassadenelement mit beweglicher Prallscheibe Facade prototype consisting of base frame, building frame and moveable double-skin facade element

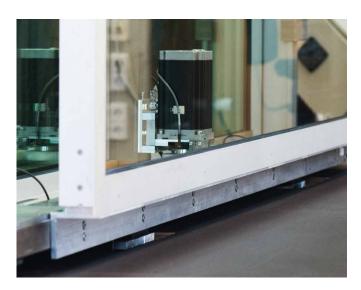


Bild 9 Generator für semiaktive Dämpfung und Energiegewinnung Generator for semi-active damping and energy harvesting

obersten Stockwerk. Aus ersten Versuchen konnte eine mittlere Leistung eines Elements von 2,8 W ermittelt werden, was deutlich über dem durchschnittlichen Verbrauch des eingebetteten Systems liegt und den autarken Betrieb des gesamten semiaktiven Dämpfungssystems erlaubt. Eine weitere Minimierung des Energieverbrauchs ist mög-

lich, wenn mechanisch gekoppelte Fassadenelemente eine reduzierte Anzahl von Sensoren und Generatoren erfordern. Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass eine bewegliche Prallscheibe mit sehr geringer Rollreibung von 0,002 realisiert werden kann und dass ein Schrittmotor für die präzise Realisierung von gewünschten Dämpfungen bei simultaner Energiegewinnung geeignet ist.

4 Multifunktionale hybride Konstruktionen

4.1 Motivation und Zielstellung

Multifunktionale Konstruktionen sind hinsichtlich des Einsparpotenzials von Ressourcen besonders reizvoll. Ausgeführt in Form von wandelbaren Überdachungen für Kultur- und Sportstätten oder als Fassadensysteme mit adaptiver Verschattung, übernehmen sie mehrere Aufgaben bei einfachem Ressourcenverbrauch, d.h., es ist nur eine Konstruktion bzw. ein Gebäude für mehrere Funktionen notwendig. Die gesteigerte Funktionalität trägt zudem zur Erhöhung der Lebensqualität für Nutzerinnen und Nutzer bei.

Am Lehrstuhl Hybride Konstruktionen – Massivbau werden in diesem Forschungsschwerpunkt neue effiziente

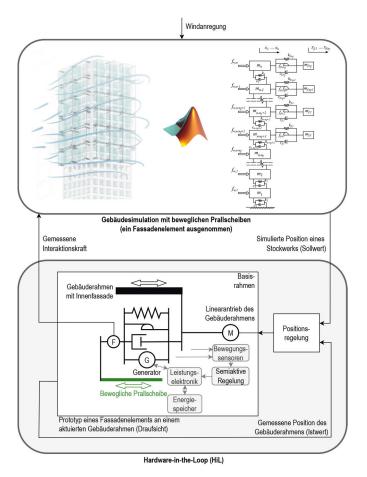


Bild 10 Hardware-in-the-Loop-Simulation HiL-Simulation

Lösungen für multifunktionale Konstruktionen erarbeitet. Ziel ist es, solche Konstruktionen stärker in das Bewusstsein zu rücken und als eine nachhaltige Alternative (Ressourceneinsparung bei Gewinn an Funktionalität) gegenüber herkömmlichen Konstruktionen aufzuzeigen. Die Anwendung von Leichtbauprinzipien zur Steigerung der Effizienz ist bei multifunktionalen Konstruktionen aus zweierlei Sicht von großer Bedeutung: zum einen zur grundsätzlichen Ressourceneinsparung, zum anderen zur Einsparung von Energie, die für den Betrieb der Konstruktion benötigt wird. Hierfür gilt, je kleiner die bewegte Masse, desto einfacher gestaltet sich die Transformation.

Die vorhandenen Grenzen des Leichtbaus können durch Integration aktiver Systeme aufgeweitet werden. Diese erlauben die gezielte Anpassung an statische Lasten sowie die aktive Beeinflussung der Systemantwort infolge dynamischer Belastungen, wodurch die Materialausnutzung weiter verbessert werden kann. Sie zeichnen sich durch (1) Sensorik zur Erfassung des aktuellen Bauwerkszustands, (2) Regelalgorithmen zur sensorbasierten Berechnung geeigneter Aktuatoreingriffe im Fall externer Störungen sowie (3) Aktuatorik zur Umsetzung der berechneten Eingriffe aus [26]. Multifunktionale Konstruktionen sind tw. ohnehin mit diesen Komponenten ausgestattet, wodurch bei der Integration zusätzlicher aktiver Systeme Synergieeffekte ausgenutzt werden können.

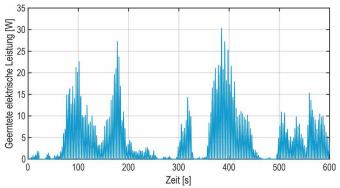


Bild 11 Geerntete elektrische Leistung eines Fassadenelements im 76. Stockwerk Harvested electrical power of one facade element in the 76th story

4.2 Entwicklung eines aktiven hybriden Dachtragwerks

Das am Lehrstuhl entwickelte aktive hybride Dachtragwerk (Bild 12a) kombiniert nachhaltig Leichtbau mit Multifunktionalität. Als Ergebnis mehrerer Vorarbeiten dient es als Untersuchungsobjekt und soll die Herausforderungen im Umgang mit multifunktionalen Konstruktionen aufzeigen. Zur Durchführung experimenteller Untersuchungen und zur Validierung entwickelter Methoden und Modelle wurde vor Kurzem ein Dachsegment als Demonstrator am Lehrstuhl realisiert (Bilder 12b, 13).

An den Entwurf des aktiven hybriden Dachtragwerks wurden die folgenden Anforderungen gestellt: (1) Wandelbarkeit basierend auf elastischer und Starrkörpertransformation, (2) Lastabtrag über Prinzipien des Leichtbaus, wie bspw. der Kurzschluss von Kräften, (3) Adaption gegenüber zeitlich und örtlich veränderlichen statischen und dynamischen Lasten.

Das Dach besteht aus radial angeordneten Segmenten (Bild 12a). Ein Segment setzt sich aus zwei oberen Flanken und einer unteren Flanke zusammen, wobei die Flanken mittels Spreizen gelenkig um die Querachse miteinander verbunden sind. Die Reaktionskräfte aus den oberen Flanken der einzelnen Dachsegmente werden über einen Druckring und die aus den unteren Flanken über einen Zugring kurzgeschlossen (Bild 12b).

Das Konzept zur Transformation sieht eine Verkürzung des Zugrings vor, welche zur simultanen Öffnung aller Dachsegmente führt. Dafür muss das Seil des Zugrings an den Enden der unteren Flanken durchgleiten können (Bild 14a). Um eine möglichst große Transformation zu erreichen, wird eine Starrkörpertransformation mit einer elastischen Transformation kombiniert. Dafür werden die oberen Flanken gelenkig an den Druckring angeschlossen, wobei im geschlossenen und weit geöffneten Zustand mechanische Anschläge über ein Kräftepaar eine Einspannung generieren und folglich eine elastische Transformation ermöglichen. Die elastische Transformation der einzelnen Segmente nutzt dabei den Fin-Ray-

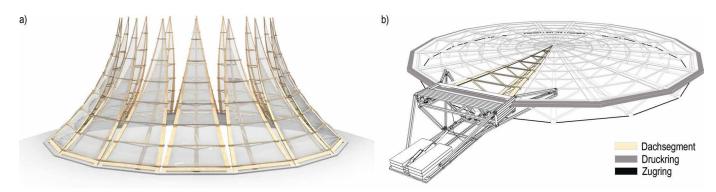


Bild 12 a) Entwurf eines aktiven hybriden Dachtragwerks, b) Realisierung eines Dachsegments als Demonstrator
a) Concept of an active hybrid roof structure, b) realization of a prototype representing a single roof segment



Bild 13 Demonstrator in mehreren Transformationszuständen von geschlossen bis vollständig geöffnet Prototype in multiple transformation states from closed to fully open

Effekt [27], bei dem bereits eine relativ kleine Auflagerverschiebung zu einer relativ großen Verschiebung der Spitze führt.

Das Konzept zur Adaption sieht für jedes Dachsegment in jedem Transformationszustand die Möglichkeit der aktiven Beeinflussung der Systemantwort infolge dynamischer und statischer Lasten vor. Die Umsetzung erfolgt durch im Druckring an den Auflagern der oberen Flanken integrierte kompakte, hoch dynamische Lineardirektantriebe (Bild 14b). Die horizontale Auflagerkraft wird von je zwei parallelen, symmetrisch um die Aktuatoren angeordneten Federn aufgenommen, sodass die Aktuatoren keine permanente statische Belastung erfahren und folglich effizient ausgelegt werden können.

Die Realisierung eines Dachsegments als Demonstrator ist in Bild 13 dargestellt. Das Herauslösen eines einzelnen

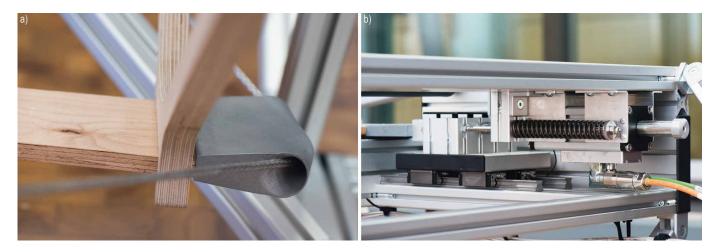


Bild 14 a) Umlenkung des Seils an der unteren Flanke über ein 3-D-Druckdetail, welches das Durchgleiten des Seils erlaubt, b) in den Druckring integrierte Lineardirektantriebe zur statischen und dynamischen Adaption sowie Federn zur Aufnahme der Horizontalkräfte aus den oberen Flanken a) Redirection of the cable at the lower flank via a 3-D printed detail, which allows the cable to slide through, b) linear motors integrated in the compression ring for static and dynamic adaptation and support springs for the horizontal forces of the upper flanks

Segments lässt keinen Kurzschluss zu, weshalb eine im Vergleich zum Druck-Zug-Ring aufwendigere Konstruktion erforderlich wurde. Das Seil des Zugrings wird mittels Umlenkrollen an einen elektrischen Linearaktuator angeschlossen, der die Verkürzung des Seils und damit die Transformation des Dachsegments ermöglicht. Die vollständige Öffnung des Dachsegments ist bei einer Rotation der Spitze von rd. 75° erreicht und durch die Biegetragfähigkeit der Flanken nach Erreichen des oberen mechanischen Anschlags begrenzt.

Die Flanken des Dachsegments bestehen aus dem Furnierschichtholz BauBuche der Pollmeier Massivholz GmbH, welches sich als hochfestes Holz mit großem Verhältnis von Festigkeit zu Steifigkeit sowie geringer Wichte für die Realisierung multifunktionaler Strukturen basierend auf elastischer Transformation gut eignet. Die dreiecksförmigen Spreizen aus Birkensperrholz wurden mittels CNC-Fräse aus einem Stück gefertigt. Die Dimension des Demonstrators wurde maßgeblich durch den verfügbaren Laborraum begrenzt. Die konisch zulaufenden Flanken haben eine Länge von rd. 4 m bei einer konstanten Höhe von nur 12,5 mm. Der Abstand der oberen Flanken am Auflager beträgt rd. 1,5 m, der Abstand zur unteren Flanke 0,5 m. Die Hülle besteht aus einem für die Transformation verträglichen integrierten PVC-Mehrkammer-Folienkissen.

4.3 Untersuchungsmethodik

Multifunktionale Konstruktionen bringen gegenüber herkömmlichen Konstruktionen eine Reihe besonderer Herausforderungen mit sich. Für alle möglichen Zustände, die solche Konstruktionen annehmen können, müssen Sensoren und insbesondere Aktuatoren in geeigneter Weise platziert werden. Ziel ist, die Kosten für Aktuatoren durch Minimierung der Anzahl sowie durch energieeffiziente Platzierung gering zu halten. Dafür werden Optimierungsalgorithmen mit Gütekriterien zur

Berücksichtigung der Anzahl und Energieeffizienz verwendet [28]. Basierend auf diesen Untersuchungen konnte die Platzierung der Aktuatorik beim Entwurf des aktiven hybriden Dachtragwerks vorgenommen werden.

Das Mess- und Aktuierungskonzept sowie das Transformations- und Regelungskonzept am Demonstrator sind in Bild 15 dargestellt. Die Aktuatorstellgröße u_1 ermöglicht die Transformation, die Stellgrößen der Lineardirektantriebe u_{21} und u_{22} unterdrücken statische und dynamische Störungen w(t), deren Wirkung mittels Dehnungsmessstreifen S_{1-6} und Inertialsensoren I_{1-3} erfasst wird. Aufgabe der Regelalgorithmen zur Transformation und Adaption ist es, Stellgrößen u(t) derart vorzugeben, dass die in y(t) zusammengefassten Messgrößen möglichst gut mit den Führungsgrößen r(t) übereinstimmen und der Regelfehler e(t) verschwindet.

Eine Herausforderung hierbei ist die Auslegung der Regelalgorithmen zur dynamischen Adaption, welche eine reduzierte modelltechnische Beschreibung des dynamischen Strukturverhaltens erfordert. Dieses ist bei multifunktionalen Strukturen zustandsabhängig, bedingt durch sich ändernde (1) Auflagerbedingungen, (2) Massenverteilung sowie (3) geometrische Steifigkeit. Die klassischen linearen zeitinvarianten (LZI) Modelle sind nicht in der Lage, dieses Verhalten global zu beschreiben, stattdessen werden lineare parameterveränderliche (LPV) Modelle verwendet [29]. Diese können in zwei Schritten auf der Basis numerischer Modelle hergeleitet werden. Zunächst werden für diskrete Transformationszustände reduzierte LZI-Modelle abgeleitet, welche die Strukturdynamik lokal beschreiben. Anschließend wird parameterabhängig zwischen den lokalen LZI-Modellen interpoliert, um das globale Verhalten in Form eines LPV-Modells abzubilden. Dafür wird der veränderliche Parameter so gewählt, dass er ein Maß der aktuellen Transformation darstellt (bspw. Auflagerverschiebung oder -rotation). Für eine, dem Demonstrator ähnliche, ebene Struktur wurde ein LPV-Mo-

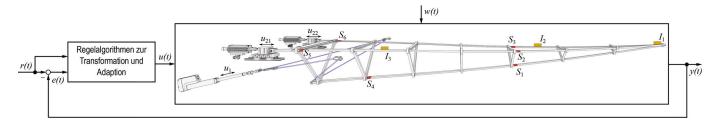


Bild 15 Mess-, Regelungs-, Aktuierungs- und Transformationskonzept am Demonstrator Measurement, control, actuation and transformation concept of the prototype

dell in dieser Weise hergeleitet und durch nichtlineare transiente Simulationen mit dem zugrunde liegenden numerischen Modell validiert [30]. Darauf aufbauend konnten Regler zur dynamischen Adaption während der Transformation sowie in diskreten Transformationszuständen entworfen und simulativ validiert werden [31, 32].

4.4 Validierung am Demonstrator

Zur Verdeutlichung der zuvor beschriebenen zustandsabhängigen Strukturdynamik multifunktionaler Strukturen sind im Folgenden die Ergebnisse erster dynamischer Experimente sowie ein erster Vergleich mit einem numerischen Modell dargestellt.

Die numerischen und experimentellen Ergebnisse in Bild 16 zeigen den Verlauf der Eigenfrequenzen der ersten Biege- und der ersten Torsionseigenform über der Transformation. Die experimentellen Ergebnisse wurden anhand von Ausschwingversuchen ermittelt, für welche die Holzstruktur zunächst per Hand in die entsprechende Biege- bzw. Torsionseigenform ausgelenkt wurde. Die daraus resultierende Strukturantwort wurde in Form von Beschleunigungen und Drehraten mittels der drei Inertialsensoren aufgenommen. Die Simulationsergebnisse konnten durch die Modalanalyse eines numerischen Modells mithilfe der Software SOFiSTiK generiert werden. In Simulation und Experiment ist ein unstetiger Verlauf der Eigenfrequenzen, bedingt durch die sich ändernden Lagerbedingungen, erkennbar. Die als Einspannung wirkende Lagerung im Bereich des geschlossenen und weit geöffneten Transformationszustands führt zu sichtbar größeren Eigenfrequenzen als die gelenkige Lagerung im mittleren Bereich. Innerhalb der einzelnen Bereiche sind ebenfalls Änderungen der Eigenfrequenzen sichtbar. Im mittleren Bereich (Starrkörpertransformation durch gelenkige Lagerung) sind diese Änderungen primär bedingt durch eine Änderung der Massenverteilung, in den äußeren Bereichen (elastische Transformation durch Einspannung) durch eine Änderung der geometrischen Steifigkeit.

Die am Demonstrator experimentell ermittelten Ergebnisse bestätigen die numerisch bestimmten Verläufe, sie veranschaulichen die Herausforderungen im Umgang mit multifunktionalen Konstruktionen und motivieren den Einsatz und die Weiterentwicklung zuvor beschriebener Untersuchungsmethoden.

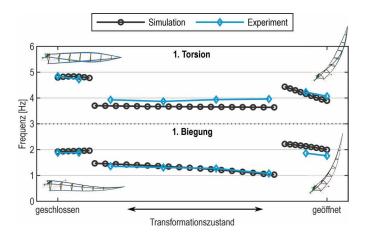


Bild 16 Verlauf der Eigenfrequenzen der ersten Biege- und der ersten Torsionseigenform über der Transformation

Development of the natural frequencies of the first bending and the first torsional mode shape over the transformation

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellten Forschungsprojekte zeigen ein breites Spektrum hybrider Konstruktionsansätze auf der Grundlage des Leichtbaus. Die Nutzung nachwachsender und rezyklierter Rohstoffe im vorgestellten Holz-Beton-Verbundrahmensystem mit robustem, biegetragfähigem Knoten in Verbindung mit einem hohen Grad an Vorfertigung ermöglicht effizientes und nachhaltiges Bauen im Hochhausbau. Am Beispiel des semiaktiven Doppelfassadensystems mit Energiegewinnung zur Schwingungsdämpfung bei Hochhäusern wurde gezeigt, dass die gezielte Integration aktiver Technologien Einsparungen von Ressourcen bei autarkem Betrieb ermöglicht. Das am Lehrstuhl entworfene aktive hybride Dachtragwerk zeigt die Herausforderungen im Umgang mit sehr leichten multifunktionalen Konstruktionen auf, die relativ großes Potenzial für Ressourceneinsparungen bei gleichzeitig gesteigertem Komfort für Nutzerinnen und Nutzer bieten.

Das gemeinsame Ziel der vorgestellten Forschungsprojekte ist das Finden und Aufzeigen von Lösungen für ein ressourcenschonendes und klimaneutrales Bauen in der Zukunft. Auf dem Weg dorthin ist noch viel Forschungs-, Entwicklungs- und Aufklärungsarbeit notwendig. Insbesondere ist es wichtig, vielversprechende Ansätze und Methoden frühzeitig in die Lehre einzubinden.

Detaillierte Informationen zu den Forschungsprojekten sind in weiteren Publikationen auf der Homepage des Lehrstuhls zu finden (https://www.b-tu.de/fg-hybride-konstruktionen-massivbau).

Dank

Die Autorin und die Autoren danken den folgenden Einrichtungen für die Förderung der vorgestellten Forschungsprojekte:

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI), Zukunft Bau Forschungsförderung: Projektnummer 10.08.18.7-18.22 und 10.08.18.7-18.04

Industriepartner: Josef Gartner GmbH, Gundelfingen; Pollmeier Massivholz GmbH & Co. KG, Creuzburg; HEIM Deponie und Recycling GmbH, Berlin Graduate Research School (GRS) der BTU Cottbus-Senftenberg mit Mitteln des Landes Brandenburg nach Graduiertenförderverordnung (GradV)

Forschungs- und Materialprüfanstalt (FMPA), Medienwerkstatt, Modellbauwerkstatt und Dekanat der Fakultät 6 sowie Multimediazentrum und Zentralwerkstatt der BTU Cottbus-Senftenberg

Ein herzlicher Dank gilt auch Sylke Schubert, Sandy Kalz, Michael Petke, Maik Helmchen und Laurenz Wernicke.

Literatur

- [1] Bleicher, A. [Hrsg.] (2018) Hybride Konstruktionen: 25. Brandenburgischer Bauingenieurtag BBIT 2018. BTU Cottbus-Senftenberg.
- Beckmann, B. et al. (2021) Standortübergreifende Forschung zu Carbonbetonstrukturen im SFB/TRR 280. Bautechnik 98, H. 3, S. 232–242. https://doi.org/10.1002/ bate.202000116
- [3] Stroetmann, R.; Podgorski, C. (2014) Zur Nachhaltigkeit von Stahl- und Verbundkonstruktionen bei Büro- und Verwaltungsgebäuden, Teil 1: Tragkonstruktionen. Stahlbau 83, H. 4, S. 245–256. https://doi.org/10.1002/stab. 201410198
- [4] Schlaich, J.; Wagner, R. (1988) Hybride Tragwerke 1 + 1 = 3, Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile. Baukultur 6, S. 27-29.
- [5] Spencer, B. F.; Nagarajaiah, S. (2003) State of the Art of Structural Control. Journal of Structural Engineering 129, no. 7, pp. 845–856. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:7(845)
- [6] Sobek, W. et al. (2021) Adaptive Hüllen und Strukturen. Bautechnik 98, H. 3, S. 208–221. https://doi.org/10.1002/bate.202000107
- [7] Körner, A. et al. (2021) Integrative design and fabrication methodology for bio-inspired folding mechanisms for architectural applications. Computer-Aided Design 133, pp. 1–18. https://doi.org/10.1016/j.cad.2020.102988
- [8] Bleicher, A.; Schlaich, M.; Fujino, Y.; Schauer, T. (2011) Model-based design and experimental validation of active vibration control for a stress ribbon bridge using pneumatic muscle actuators. Engineering Structures 33, no. 8, pp. 2237–2247. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011. 02.035
- [9] Schlaich, M.; Hückler, A. (2017) Infraleichtbeton: Reif für die Praxis. Beton- und Stahlbetonbau 112, H. 12, S. 772–783. https://doi.org/10.1002/best.201700046
- [10] Schlaich, M.; Bleicher, A.; Pasternak, H. (2014) Der Porsche Pavillon in Monocoque-Bauweise. Bauingenieur 89, H. 1, S. 1–10.
- [11] Göppert, K. (2005) *Adaptive Tragwerke Wandelbare Dachkonstruktionen für Sportbauten*. Bautechnik 82, H. 3, S. 157–161. https://doi.org/10.1002/bate.200590057

- [12] Kaltenbach, F. (2019) *Holz Höher Hybrid*. DETAIL Zeitschrift für Architektur + Baudetail, H. 10, S. 28–33.
- [13] Baker, W.; Horos, D. R.; M. Johnson, B.; Schultz, J. (2014) Timber Tower Research: Concrete Jointed Timber Frame in: Bell, G. R. et al. [eds.] Proceedings of the Structures Congress 2014. Boston, Apr. 3–5, 2014, pp. 1255–1266.
- [14] Kaufmann, H.; Krötsch, S.; Winter, S. (2017) Atlas Mehrgeschossiger Holzbau. DETAIL – Zeitschrift für Architektur + Baudetail. https://doi.org/10.11129/9783955533540
- [15] Sarkisian, M. P. (2016) Designing tall buildings: Structure as architecture. 2nd ed. New York: Routledge, Taylor & Francis Group.
- [16] Höltke, T.; Bleicher, A. (2019) *Timber-concrete composite* frame joint for high-rise buildings. Proceedings of the 20th IABSE Congress The Evolving Metropolis, New York City, Sept. 4–6, 2014, pp. 1137–1141.
- [17] Kuhlmann, U.; Gauß, J. (2019) Optimierung und Systematisierung von Anschlüssen im Holzbau zur Verbreitung der ressourcenschonenden Bauweise. Abschlussbericht F 3185, Forschungsinitiative Zukunft Bau.
- [18] Weller, B.; Fahrion, M.-S.; Horn, S.; Pfuhl, A.-M. (2014) Doppelfassaden im Zeichen des Klimawandels. Bauphysik 36, H. 2, S. 68–73. https://doi.org/10.1002/bapi.201410018
- [19] Moon, K. S. (2016) Integrated damping systems for tall buildings: Tuned mass damper/double skin facade damping interaction system. The Structural Design of Tall and Special Buildings 25, no. 5, pp. 232–244. https://doi.org/10.1002/tal.1237
- [20] Fu Tat, S.; Zhang, R. (2016) Integrating Double-Skin Façades and Mass Dampers for Structural Safety and Energy Efficiency. Journal of Architectural Engineering 22, no. 4, pp. 1–12. https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568. 0000218
- [21] Zhang, Y.; Schauer, T.; Wernicke, L.; Wulff, W.; Bleicher, A. (2020) Facade-Integrated Semi-Active Vibration Control for Wind-Excited Super-Slender Tall Buildings. IFAC-PapersOnLine 53, no. 2, pp. 8395–8400. https://doi.org/ 10.1016/j.ifacol.2020.12.1585
- [22] Zhang, Y.; Schauer, T.; Wernicke, L.; Vrontos, A.; Engelmann, M.; Wulff, W.; Bleicher, A. (2021) Design of Moveable Facade Elements for Energy Harvesting and Vibration Control of Super Slender Tall Buildings under Wind Excita-

- tion in: Auer, T.; Knaack, U.; Schneider, J. [eds.] *Proceedings of the 9th Powerskin Conference*. TU Delft, Apr. 9, 2021, pp. 327–338.
- [23] Yang, J. N.; Agrawal, A. K.; Samali, B.; Wu, J.-C. (2004) Benchmark Problem for Response Control of Wind-Excited Tall Buildings. Journal of Engineering Mechanics 130, no. 4, pp. 437–446. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:4(437)
- [24] Samali, B.; Kwok, K. C. S.; Wood, G. S.; Yang, J. N. (2004) Wind Tunnel Tests for Wind-Excited Benchmark Building. Journal of Engineering Mechanics 130, no. 4, pp. 447–450. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:4(447)
- [25] Richtlinie VDI 2038 Blatt 2 (2013) Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen – Untersuchungsmethoden und Beurteilungsverfahren der Baudynamik – Schwingungen und Erschütterungen – Prognose, Messung, Beurteilung und Minderung. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure.
- [26] Soong, T. T. (1990) Active Structural Control: Theory and Practice: Theory and Applications. Essex: Longman Scientific & Technical.
- Bögle, A.; Hartz, C.; Schlaich, M. (2012) Flexible Structures
 A Parametrical Analysis of the Fin Ray. IASS Annual

- Symposium: IASS-APCS 2012: From Spatial Structures to Space Structures. Seoul, Sept. 3, 2012, pp. 214–215.
- [28] Marker, P.; Stammen, L.; Bleicher, A. (2019) *Energy-efficient actuator placement for a convertible bending-active structure.* Proceedings of the IASS Annual Symposium 2019 Structural Membranes 2019 Form and Force, Barcelona, Oct. 7–10, 2019, pp. 1717–1724.
- [29] Mohammadpour, J.; Scherer, C. W. [eds.] (2012) Control of Linear Parameter Varying Systems with Applications. New York: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1833-7
- [30] Jirasek, R.; Schauer, T.; Bleicher, A. (2019) Linear Parameter-Varying Models for Convertible Structures in Civil and Structural Engineering. IFAC-PapersOnLine 52, no. 15, pp. 555–560. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.734
- [31] Jirasek, R.; Schauer, T.; Bleicher, A. (2019) *Active Vibration Control of a Convertible Structure based on a Linear Parameter-Varying Model.* IFAC-PapersOnLine 52, no. 28, pp. 190–195. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.375
- [32] Jirasek, R.; Schauer, T.; Bleicher, A. (2020) Active Vibration Control of a Convertible Structure based on a Polytopic LPV Model Representation. IFAC-PapersOnLine 53, no. 2, pp. 8389–8394. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12. 1590

Autorin und Autoren

Prof. Dr.-Ing. Achim Bleicher achim.bleicher@b-tu.de BTU Cottbus-Senftenberg Lehrstuhl Hybride Konstruktionen – Massivbau Konrad-Wachsmann-Allee 2 03046 Cottbus

Dr. Thomas Schauer schauer@control.tu-berlin.de Technische Universität Berlin Fachgebiet Regelungssysteme Einsteinufer 17 10587 Berlin

Robert Jirasek, M.Sc. (Korrespondenzautor) robert.jirasek@b-tu.de BTU Cottbus-Senftenberg Lehrstuhl Hybride Konstruktionen – Massivbau Konrad-Wachsmann-Allee 2 03046 Cottbus

Tim Höltke, M.Sc. tim.hoeltke@b-tu.de BTU Cottbus-Senftenberg Lehrstuhl Hybride Konstruktionen – Massivbau Konrad-Wachsmann-Allee 2 03046 Cottbus

Yangwen Zhang, M.Sc. yangwen.zhang@b-tu.de BTU Cottbus-Senftenberg Lehrstuhl Hybride Konstruktionen – Massivbau Konrad-Wachsmann-Allee 2 03046 Cottbus

Paul Marker, M.Sc. paul.marker@b-tu.de BTU Cottbus-Senftenberg Lehrstuhl Hybride Konstruktionen – Massivbau Konrad-Wachsmann-Allee 2 03046 Cottbus Dipl.-Ing. Wulf Wulff fg-hybride-konstruktionen-massivbau@b-tu.de BTU Cottbus-Senftenberg Lehrstuhl Hybride Konstruktionen – Massivbau Konrad-Wachsmann-Allee 2 03046 Cottbus

Johannes Manfrecola, B.Sc. johannes.manfrecola@b-tu.de BTU Cottbus-Senftenberg Lehrstuhl Hybride Konstruktionen – Massivbau Konrad-Wachsmann-Allee 2 03046 Cottbus

Therese Schmidt, M.Sc. fg-hybride-konstruktionen-massivbau@b-tu.de BTU Cottbus-Senftenberg Lehrstuhl Hybride Konstruktionen – Massivbau Konrad-Wachsmann-Allee 2 03046 Cottbus

Zitieren Sie diesen Beitrag

Bleicher, A.; Schauer, T.; Jirasek, R.; Höltke, T.; Zhang, Y.; Marker, P.; Wulff, W.; Manfrecola, J.; Schmidt, T. (2021) *Hybride Konstruktionen an der BTU Cottbus-Senftenberg.* Bautechnik 98, H. 12, S. 907–920. https://doi.org/10.1002/bate.202100056

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 8. Juli 2021; angenommen: 5. Oktober 2021.

HYBRIDE KONSTRUKTIONEN MASSIVBAU btu

Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg Lehrstuhl Hybride Konstruktionen – Massivbau Prof. Dr.-Ing. Achim Bleicher

Konrad-Wachsmann-Allee 2, 03046 Cottbus fon +49 355 69 2471 fax +49 355 69 2478 fg-hybride-konstruktionen-massivbau@b-tu.de www.b-tu.de/fg-hybride-konstruktionen-massivbau