



# WEITERENTWICKLUNGEN IM HOLZBAU

Nationales Forschungsprogramm NFP 66 **Ressource Holz**

Jutta Glanzmann und Andrea Frangi



SCHWEIZERISCHER NATIONALFONDS  
ZUR FÖRDERUNG DER WISSENSCHAFTLICHEN FORSCHUNG



**Ressource Holz**  
Nationales Forschungsprogramm NFP 66

## **Die Ergebnisse und Empfehlungen des NFP 66 werden in vier Berichten zu den einzelnen Teilsynthesen veröffentlicht.**

Die Leitungsgruppe des NFP 66 unterteilte das Forschungsgebiet in vier thematische Dialogfelder. Diese decken die wesentlichen Bereiche der Wald-Holz-Wertschöpfungskette ab und umfassen je 4 bis 11 der insgesamt 30 Forschungsprojekte des NFP 66. Im Rahmen des NFP 66 tauschten sich gegen 200 Vertreterinnen und Vertreter aus Wirtschaft, Verbänden und Behörden an 17 Dialogveranstaltungen mit den Forschenden aus.

Die vier Teilsynthesen berichten über die Forschungsprojekte und ihre wichtigsten Ergebnisse sowie über den Dialog mit der Praxis.

- Synthese zum Dialogfeld «Weiterentwicklungen im Holzbau»
- Synthese zum Dialogfeld «Neue Wege zur holzbasierten Bioraffinerie»
- Synthese zum Dialogfeld «Innovative holzbasierte Materialien»
- Synthese zum Dialogfeld «Holzbeschaffung und nachhaltige Holznutzung»

Das Programmresümee baut auf den vier Teilsynthesen auf und fasst die wichtigsten Ergebnisse und Empfehlungen des NFP 66 in einer leicht lesbaren Form zusammen.

# INHALT

- 5 Editorial
- 6 Holzbau auf dem Weg zum Normalfall
- 10 Innovationen entlang des Bauprozesses
- 18 Ein erstes Fazit als Basis für künftige Entwicklungen
- 21 Handlungsoptionen für Akteure aus Forschung und Praxis
- 25 Anhang: Die sieben Forschungsprojekte im Überblick
- 35 Literatur
- 36 Das NFP 66 in Kürze



# EDITORIAL



Der Holzbau ist im Vormarsch: vom Land Richtung Stadt, vom Pavillon zum Hochhaus, vom Neubau zum Bauen im Bestand. Fast täglich werden wir hierzulande Zeugen der emsigen Holzbautätigkeit. Diese zeigt sich mitunter in Form moderner Wohnsiedlungen, schlauer An- und Aufbauten oder prestigeträchtiger Gewerbeliegenschaften.

Das ist alles schön und gut. Im Interesse einer nachhaltigen Ressourcenpolitik braucht es aber noch viel mehr. Das Holz kann Stein, Beton und Stahl im Bauwesen weit besser Paroli bieten. Worauf es dabei ankommt, zeigt das NFP 66. Nötig sind rasche Fortschritte etwa in der Holzverklebungs- und Verbindungstechnik, gekoppelt mit einem vermehrten Einsatz von Laubholz im konstruktiven Bereich. Erfolg versprechend sind zudem die Hybridbauweise sowie der Einsatz neuartiger holzbasierter Verbundbaustoffe. All dies muss einhergehen mit Optimierungen etwa beim Schall- und Erdbebenschutz sowie beim Behandeln und Modifizieren der Oberflächen.

Solche material- und konstruktionsseitigen Fortschritte werden sich in der Praxis jedoch nur durchsetzen, wenn der Schweizer Holzbau auch industriell vorwärtsmacht. Digitale Planungs- und Fertigungstechniken inklusive Robotik müssen Einzug halten. «Industrie 4.0» und «BIM» (Building Information Modeling) werden sich auch für das Bauen mit Holz als Erfolgsfaktoren erweisen.

Wovon träume ich? Natürlich von einem weit grösseren Holzanteil im hiesigen Baubestand. Von immer mehr Investoren, Bauherren, Planern und Architekten, die dem Baustoff Holz offen gegenüberstehen. Und von wettbewerbsfähigen Holzbauunternehmen in der Schweiz, die hier rege bauen, aber global aufgestellt sind. Einige können schon heute ihre Ideen und Technologien ins Ausland exportieren. Das macht Mut. Denn ich bin überzeugt: Bauen mit Holz ist und bleibt eine intelligente und erspriessliche Sache, ob hierzulande oder anderswo.

Allen, die an den Forschungsarbeiten, den vielen Dialogveranstaltungen und zum Schluss an diesem Synthesebericht persönlich mitgewirkt haben, sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

**Dr. Martin Riediker**

Präsident Leitungsgruppe NFP 66 Ressource Holz

# HOLZBAU AUF DEM WEG ZUM NORMALFALL

**Holz als Baustoff ist herausfordernd und ingenieurtechnisch anspruchsvoll, spannend und höchst interessant zugleich. Das Erkennen der Zusammenhänge und der Dialog zwischen Forschung und Praxis helfen, den Holzbau weiterzubringen.**

Holz ist einer der ältesten und wichtigsten Roh- und Werkstoffe der Menschheit und war für lange Zeit ein unersetzbares Material. Im Bauwesen hat Holz eine lange Tradition. Gerade im Brückenbau war Holz neben dem Stein der erste Baustoff und im Schiffsbau konnte Holz einst seine volle Leistungsfähigkeit entfalten (Steurer, 2006). Die Brennbarkeit des Holzes hat aber dazu geführt, dass weltweit mehr und mehr nicht brennbare Baumaterialien bevorzugt wurden. In den letzten Jahrzehnten haben jedoch viele Staaten die Brandschutzvorschriften – auch die Schweiz – dank umfangreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten revidiert, wodurch sich der Anwendungsbereich des Holzes erweitern liess.

Denn als Baumaterial hat Holz mehrere Vorteile: Es ist leicht, verfügt über gute thermische und mechanische Eigenschaften und lässt sich einfach verarbeiten. Holz ist ein nachwachsender Rohstoff und der Einsatz von Holz als Baumaterial erlaubt die langfristige Bindung von Kohlenstoff, den Bäume im Lauf des Wachstums absorbiert haben. Im Schweizer Gebäudepark sind heute nach Abzug aller Emissionen durch den Herstellungsprozess rund 45 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> in Holz gebunden (Lignum, 2012). Die Herstellung der meisten Holzprodukte verbraucht zudem markant weniger Energie als die Fertigung anderer Produkte. Durch die Energieeffizienz bei der Verarbeitung von Holz beanspruchen leichte Holzbauten im Vergleich zur Stahlbetonbauweise weniger graue Energie und verursachen weniger Treibhausgasemissionen (Glanzmann et al., 2012; Heeren et al., 2013).

Bauen mit Holz hat sich in den letzten Jahren von einem Nischendasein (Holz ist «heimelig» und kommt allenfalls für ein Einfamilienhaus in Frage) zu einem innovativen Baustoff mit grossem Potenzial für die Zukunft entwickelt. Die vielseitigen Qualitäten des Baustoffs Holz sind neuerdings auch im urbanen Umfeld geschätzt (TEC21, 2016b). Zunehmend setzt sich die Erkenntnis durch, dass die noch nicht ausgereizten Möglichkeiten der Holzbauweise für das nachhaltige Gebäude der Zukunft unabdingbar sind. Die Herausforderungen auf dem Weg zum Normalfall sind jedoch immer noch vielfältig.

## **Ingenieurtechnisch anspruchsvolles Material**

Die Anisotropie des Baustoffs Holz bedingt gerichtete Materialeigenschaften, die aufgrund des natürlichen Wachses eine grosse Variabilität aufweisen. Im Weiteren führen Äste und Wuchsunregelmässigkeiten lokal zu ausgeprägten Veränderungen von Faserstruktur und Orientierung im Holz. Für die konstruktive Verwendung von Holz bedeutet dies, dass die Materialeigenschaften des Baustoffs signifikanten Streuungen unterworfen sind und Äste sowie Wuchsunregelmässigkeiten oft die Tragfähigkeit von Holzbauteilen dominieren. Dadurch lassen sich die sehr guten mechanischen Eigenschaften von ungestörtem Holz bislang nicht ausschöpfen.

Holz ist auch ein hygroskopisches Material: Die Holzfeuchte steht im Gleichgewicht mit der relativen



Luftfeuchtigkeit und der Temperatur der Umgebung. Bei Änderungen der Luftfeuchtigkeit bzw. der Temperatur ändert sich das Volumen des Holzbauteils (sogenanntes Schwinden bzw. Quellen des Holzes), wobei Schwind- und Quellmasse unter anderem abhängig von der Faserrichtung sind. Zudem sind die mechanischen Eigenschaften von der Holzfeuchte und der Dauer der Belastung abhängig. Hohe Holzfeuchte erhöht auch die Fäulnisgefahr und gefährdet damit die Dauerhaftigkeit von Holzbauteilen (Niemz und Sonderegger, 2017).

Ein weiterer ingenieurtechnisch äusserst wichtiger Aspekt ist das Bruchverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Gegenüber konkurrierenden Baustoffen wie Stahl oder Stahlbeton zeigt Holz ein sprödes Bruchverhalten (ausser bei Druck), Duktilität (Eigenschaft eines Werkstoffs, sich bei Überbelastung plastisch zu verformen) und Lastumlagerungen sind nur sehr beschränkt möglich. Das komplexe Materialverhalten von Holz, kombiniert mit den Streuungen der Materialeigenschaften und dem spröden Bruchverhalten, führt im Ingenieurwesen konsequenterweise zu einem vorsichtigen oder konservativen Umgang mit Holz in tragenden Bauteilen.

### Mit Verklebungs- und Verbindungstechnik zu effizienten Bauteilen und Tragwerken

Mit moderner Verklebungs- und Verbindungstechnik von Holz wurden verschiedenste Holzwerkstoffe entwickelt und der Holzbau konnte im Vergleich zur Vollholzanwendung in neue Möglichkeiten und Dimensionen vordringen. Holzwerkstoffe sind Produkte, welche durch Beleimen von Vollholzteilen, Brettern, Furnieren, Spänen und Fasern, Fügen und (Heiss-)Pressen mit Aushärtung des Klebstoffs entstehen.

Verklebte Bauteile wie Brettschichtholz und Brettspertholz haben gegenüber Bauteilen aus Vollholz mehrere Vorteile (Schickhofer et al., 2010). Dazu gehören eine geringere Streuung der mechanischen Eigenschaften, eine höhere Formstabilität und die freiere Wahl der Abmessungen. Durch diese Pluspunkte haben sich verklebte Bauteile zu den wichtigsten Produkten im Holzbau entwickelt. Trotz der grossen Anstrengungen in der Qualitätssicherung bei der Erstellung von verklebten Bauteilen gibt es noch ein enormes Optimierungspotenzial, um die Wirtschaftlichkeit der Produkte gegenüber konkurrierenden Bauteilen aus Stahl oder Stahlbeton zu erhöhen.

Verbindungen haben die Entwicklung des Holzbaus geprägt. Sie sind im konstruktiven Holzbau unerlässlich, bleiben aber bis heute ein limitierender Faktor des Holzbaus. Nägel, Schrauben, Stabdübel, Bolzen sowie eingeklebte profilierte Stäbe aus Stahl sind für den Ingenieurholzbau typische mechanische Verbindungsmittel, die sich je nach Anforderungen in vielfältigster Art und Weise einsetzen lassen (Herzog et al., 1991). Bei Versuchen an Bauteilen treten Brüche fast immer im Bereich von Verbindungen auf, wo Querschnittsverminderung und gestörter Kraftverlauf zu örtlich höheren Beanspruchungen führen. Der Gestaltung, Bemessung und Ausführung von Verbindungen wird somit grösste Aufmerksamkeit geschenkt. Der wirtschaftliche Einsatz des Holzes und der Holzwerkstoffe verlangt Verbindungen mit einer genügend hohen Belastbarkeit, um eine optimale Holznutzung zu erreichen (SAH, 2000). Trotz der grossen Anstrengungen in der Forschung und Entwicklung liegt in der Optimierung der Verbindungen noch ein grosses Verbesserungspotenzial.

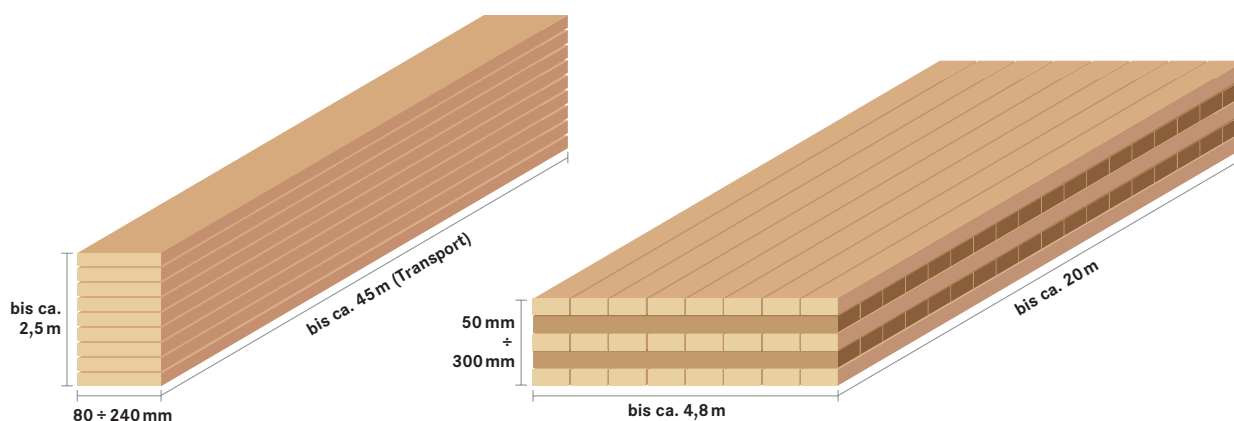


Abb. 1 Schematischer Aufbau von verklebten Holzbauteilen: Brettschichtholzträger (links) und flächige Brettspertholzplatten (rechts)

## Mit sicherem Brandschutz und gutem Schallschutz zu neuen Anwendungen

In den letzten Jahren steigt der Wunsch der Gesellschaft, den Baustoff Holz wieder vermehrt einzusetzen – insbesondere im Wohnungsbau. Eine wichtige Voraussetzung dafür ist die Sicherstellung einer ausreichenden Brandsicherheit. Die Gewissheit, in seiner Wohnung vor den Gefahren des Feuers sicher zu sein, trägt wesentlich zum Sicherheitsgefühl bei. Die Brennbarkeit der Baustoffe hat den baulichen Brandschutz stark beeinflusst. Daher wurden in traditionellen baulichen Brandschutzkonzepten die nicht brennbaren Materialien (Stahlbeton, Backstein) bevorzugt. Mit einer sorgfältigen Planung und Ausführung des Tragwerkes und der konstruktiven Details lassen sich heute aber auch mit Holz brandschutztechnisch gleichwertige Gebäude erstellen. Dem tragen die schweizerischen Brandschutzvorschriften der Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen Rechnung. Mit den Brandschutzvorschriften 2003 (VKF, 2003) wurde die Holzanwendung für die Nutzungen Wohnen, Schule, Büro für Bauten bis zu sechs Geschossen erlaubt. Die Brandschutzvorschriften 2015 (VKF, 2015) haben aufgrund der positiven Erfahrungen in den letzten zehn Jahren die noch bestehenden Einschränkungen für die Holzanwendung beseitigt. Holzbauteile können in der Schweiz in allen Gebäudekategorien und Nutzungen eingesetzt werden (Lignum, 2017). Die Anwendungsmöglichkeiten für Holz wurden damit deutlich erweitert.

In Bezug auf den Schallschutz gelten für den Holzbau dieselben Anforderungen und Bewertungsmethoden wie für den Massivbau (Stahlbeton, Backstein). Bekannt ist jedoch die für Leichtbaukonstruktionen spezielle Problematik von tieffrequenten Übertragungen – vor allem bei Trittschallgeräuschen (Bartlomé, 2013). Neben der direkten Schallübertragung der Trennelemente steht zudem die Schallübertragung über Flankenbauteile und Stossstellen im Vordergrund. Denn es ist nicht ungewöhnlich, dass in Leichtbaukonstruktionen die Flankenübertragung gegenüber der direkten Schallübertragung vorherrscht. Wie die direkte Schallübertragung hängt auch die Flankenübertragung stark vom Konstruktionsprinzip und von den konstruktiven Details ab.

## Mit Systembau zur besseren Wirtschaftlichkeit

Der moderne Holzbau ist durch eine genaue Planung, einen hohen und präzisen Vorfertigungsgrad

und eine schnelle Ausführungsphase charakterisiert (Kolb, 2010). Auch wenn die reinen Materialkosten von Holz und Holzwerkstoffen höher als jene des Baustoffes Stahlbeton sind, kann mit Holz kostengünstig gebaut werden, da wegen des Systembaus die wichtigen Entscheidungen früher gefällt werden müssen und kostspielige Änderungen während des Rohbaus und des Ausbaus wegfallen. Die kurze Bauzeit erlaubt es zudem, die Zinsen oder die Kosten für die Zinsen des Bankkredites zu senken und früher Mieteinnahmen zu generieren. Auch im Falle von Erweiterungen und Aufstockungen auf Gebäuden mit beschränkter Tragfähigkeit bietet der Holzbau vorteilhafte Lösungen. Die Kosten für die Fundationen fallen in der Regel geringer aus, weil der Holzbau eine geringere Eigenlast hat. Dies wirkt sich besonders bei einem Baugrund mit ungünstigen mechanischen Eigenschaften oder in Hanglage günstig aus. Durch die geringere Tragwerksmasse resultieren unter Erdbebeneinwirkungen geringere Trägheitskräfte, womit der Aufwand für die Aufnahme erdbebenbedingter Horizontalkräfte reduziert wird. Holzgebäude erreichen heute hohe Dämmwerte, die den Energieverbrauch senken und grosse Einsparungen bei den Betriebskosten erlauben. Zudem wird durch die Holzrahmenbauweise die Dämmung in die gleiche Ebene gelegt, was einen zusätzlichen Raumgewinn durch dünnere Wandaufbauten bringt. Bei Investitionsentscheidungen werden heute vermehrt Lebenszykluskosten anstelle der reinen Erstellungskosten berücksichtigt. Gemäss Glanzmann et al. (2012) macht die Erstellung oft nur rund die Hälfte der Kosten aus und Holzgebäude in Minergie-P-Eco weichen in Bezug auf die Lebenszykluskosten nur wenig von Massivbauten in Stahlbeton oder Backstein von gleicher Qualität ab. Das ist bei Investoren immer noch zu wenig bekannt. Bei Projektentwicklungen und Finanzierungsanfragen wird die Holzbauweise deshalb (immer noch) als Nachteil angesehen.

## Das Dialogfeld «Weiterentwicklung im Holzbau»: den Holzbau weiterbringen

Ziel des NFP 66 Ressource Holz war es, wissenschaftliche Grundlagen unter anderem für bestimmte Fragen des Holzbaus zu erarbeiten und diese sowohl bereits während der Forschungsphase (2012 bis 2016) als auch im Anschluss in enger Zusammenarbeit und im Dialog mit Praxispartnern zu neuartigen Lösungsansätzen zu entwickeln. Damit soll die Ressource Holz als wettbewerbsfähige Standardlösung in der Schweizer Bauwirtschaft etabliert werden. Sieben Projekte wurden dem Dialogfeld 1 «Weiterentwicklungen im Holzbau» zugeordnet. Die



Projekte untersuchten unterschiedliche Aspekte des konstruktiven Holzbaus und dessen Weiterentwicklung für künftige Anwendungen, sei es auf der Ebene des Materials (z.B. Laubholz) und entsprechender Strukturen, im Hinblick auf bauphysikalische Fragestellungen (z.B. Schallschutz) oder was die Fertigung betrifft. In diesem Sinne sind die Ergebnisse der sieben Forschungsprojekte ein wichtiger Beitrag zur Innovation im Hinblick auf die Etablierung des Holzbaus als Standard für verschiedenste Bauvorhaben in der Schweiz. Ihre Erkenntnisse und Ergebnisse stellen zum einen die zukunftsorientierte Stärkung der bereits geschaffenen Grundlage dar und ermöglichen es zum anderen, den Holzbau innerhalb der Schweizer Bauwirtschaft weiter voranzubringen – vorausgesetzt die Resultate und die damit verbundene Botschaft kommen bei den verantwortlichen Investoren und Entscheidungsträgern an.

Der nun vorliegende Synthesebericht zu den Weiterentwicklungen im Holzbau spricht ein heterogenes Publikum an: Dazu gehören Fachleute aus der Holzbranche und ebenso interessierte Personen aus Wirtschaft und Politik ohne fundiertes Wissen über den Holzbau. Die folgenden drei Kapitel sprechen ein breites Publikum an. Zunächst werden hier die aus den einzelnen Projekten entstandenen Innovationspotenziale, aber auch allfällige offene Fragen entlang des Bauprozesses (Planung, Produktion und Montage) diskutiert. Abschliessend und als Ausblick sind daraus abgeleitete Handlungsoptionen für Ausbildung, Forschung und Normierung im Sinne einer Synthese das Thema. Der Anhang ist den einzelnen Forschungsprojekten des Dialogfeldes 1 und deren Einbettung in den Kontext von Wissenschaft und Praxis gewidmet. Dieser Blick auf die Forschungsprojekte richtet sich eher an Fachleute.



**Abb. 2** Die 2014 eröffnete Jugendherberge Gstaad Saanenland vom Berner Büro Bürgi Schärer Architektur und Planung ist die moderne Interpretation des klassischen Saanenländer Chalets. Das Gebäude ist eine Hybridkonstruktion in Beton, Mauerwerk und Holz. Fassaden- und Dachkonstruktion bestehen aus vorfabrizierten und hochwärmedämmten Holzelementen. (Foto: BÜRGI SCHÄRER Architektur und Planung AG, Alexander Gempeler)

# INNOVATIONEN ENTLANG DES BAUPROZESSES

**Mit Blick auf den Bauprozess liegt der Schwerpunkt der Forschungserkenntnisse im Dialogfeld «Weiterentwicklung im Holzbau» im Bereich von Material, Planung und Fertigung. Gleichzeitig wurden im Rahmen der Projekte interessierte Wirtschaftspartner gewonnen und entsprechende Forschungserkenntnisse teilweise bereits in der Praxis umgesetzt. Gelingt es, hier Synergien zu nutzen und Prozesse zu verknüpfen, gewinnt der Holzbau als Ganzes.**

Betrachtet man den Bauprozess, liefern die Forschungsprojekte des Dialogfeldes 1 «Weiterentwicklungen im Holzbau» wichtige Erkenntnisse in einzelnen Bereichen. Die wesentlichen Forschungsansätze betreffen das Material und dessen Verbindung (Laubholz; Holz und Verklebung), die Planung (neue Bauteile, Schallschutz, Mehrgeschossigkeit/Decken) sowie die (robotikgestützte) Fertigung. Die vorhandenen Synergien zwischen den einzelnen Forschungsprojekten und die Vorteile, die sich aus den Forschungserkenntnissen für die Praxis ergeben können, waren unter anderem Gegenstand von drei Workshops, die im Rahmen des Dialogfeldes 1 zwischen Oktober 2015 und April 2016 stattgefunden haben (siehe Seite 16). Mit dem Start zur Synthesephase im April 2016 in Olten hat dieser Dialog zwischen Forschung und Praxis eine erste Fortsetzung gefunden. Ebenso ergaben sich in der Diskussion Anknüpfungspunkte zu weiteren Forschungsprojekten des NFP 66 der anderen Dialogfelder – so im Bereich der Ressourcengewinnung (Waldwirtschaft, Sägewerk), der anderweitigen Verarbeitung und Verwendung von Holz (wie Papier- und Kartonproduktion oder die Herstellung von Chemikalien) oder im Bereich des Recycling (Verarbeitung von Altholz zu Energieträgern). Gleichzeitig konnten auch erste Lücken oder Defizite der Forschungsprojekte identifiziert werden.

## Holz und die Art der Verbindung

Der wirtschaftliche Einsatz des Holzes und der Holzwerkstoffe verlangt Verbindungen mit hohem Wirkungsgrad. Angestrebt wird die vollstän-

dige Ausnutzung des Holzquerschnittes, damit der Tragwiderstand der Verbindung derjenigen der angeschlossenen Teile entspricht. Diese idealen Bedingungen können einzig durch Klebverbindungen erreicht werden, wie bei der Keilzinkung für die Lamellen für Brettschichtholz. Für die Verbindung von Holzstäben, zum Beispiel in den Knoten von Fachwerken, hat sich hingegen die Verklebung nicht bewährt und mechanische Verbindungen sind dafür üblich. Die Klebverbindung ist steif und kann daher die Wirkung der unterschiedlichen Verformungen infolge Feuchtigkeitsänderungen kaum abbauen, wie dies beispielsweise bei einer mechanischen Verbindung der Fall ist. Hier setzt das Projekt *Vasilopoulos* (siehe Seite 26) an, in dem grundlegende Daten für die Entwicklung von neuen verklebten Holz-Holz-Verbindungen erarbeitet wurden. Acrylharz hat sich als Klebstoff mit dem grössten Potenzial für eine duktile (gut dehnbar, verformbar) Verbindung erwiesen. Hohe Duktilität ist entscheidend, um die Wirkung der unterschiedlichen Verformungen infolge Feuchtigkeitsänderungen abbauen zu können. Die Resultate der Zugversuche an verklebten Holz-Holz-Verbindungen mit Acrylharz bestätigten ein vielversprechendes duktileres Tragverhalten. In der Folge ist abzuklären, ob dies auch für Fachwerkknoten gilt. Klebverbindungen stellen zudem höchste Ansprüche an die Vorbereitung des Holzes und setzen deshalb entsprechende betriebliche Bedingungen mit Qualitätssicherung und -kontrolle voraus. Der Weg zu zuverlässigen und dauerhaften verklebten Holz-Holz-Verbindungen ist noch lang, aber der erste Schritt wurde erfolgreich gemacht.



Auch im Hinblick auf eine automatisierte Fertigung von Holzbauteilen mittels Robotik spielt die Art der Verbindung eine wesentliche Rolle: Denn die robotergestützte Herstellung von Tragwerken aus Holz stellt neue Anforderungen an die Holzverbindungen. Diese müssen entweder einfach und schnell ausführbar sein, können jedoch eine geringe Belastbarkeit besitzen, oder man setzt auf wenige, aufwendige Verbindungen mit einer hohen Belastbarkeit – ähnlich dem klassischen Ingenieurbau. Aus dem Projekt *Kohler* (siehe Seite 33) scheint klar hervorzugehen, dass unter den herkömmlichen Verbindungsarten für diese Anwendung kaum zufriedenstellende Lösungen bestehen. Darum wurde im Projekt ein möglicher neuer Ansatz verfolgt, und zwar der Einsatz von ultraschnellen injizierten Klebstoffen, um die Verbindungstechnologie im Rahmen der automatisierten Fertigung weiterzuentwickeln. Anlässlich des in Biel durchgeführten Workshops (siehe Seite 16) mit Vertretern von Forschung und Praxis wurde klar, dass mit der Frage der Klebverbindung von Holz zwar ein ambitioniertes Ziel verfolgt wird, dieses aber durchaus Potenzial zur Umsetzung hat. Die nächsten Herausforderungen bestehen darin, möglichst effiziente Montagelösungen zu entwickeln und die Wirtschaftlichkeit der Verbindung (Anzahl der Verbindungen, Kosten pro Verbindung etc.) zu optimieren.

## Hochwertige Produkte aus Laubholz

Der Anteil an Laubholz in Schweizer Wäldern hat in den letzten 25 Jahren um rund einen Fünftel zugenommen. Gründe dafür sind der naturnähere Waldbau und der Klimawandel. In der gleichen Zeitspanne sank der Nadelholzvorrat. Mit der veränderten Zusammensetzung der Wälder erhält die Buche nicht nur in der Schweiz eine bedeutende Rolle als forstlicher Rohstoff. Heute werden gut zwei Drittel des in der Schweiz geernteten Laubholzes energetisch genutzt, das heisst ohne vorgängige stoffliche Nutzung verbrannt (Krackler et al., 2010). Im heutigen Holzbau werden bevorzugt Nadelhölzer eingesetzt. Die Anwendung von Laubholz mit deutlich besseren mechanischen Materialeigenschaften im Vergleich zu herkömmlichem Nadelholz sollte zu neuen Anwendungsmöglichkeiten für den Holzbau führen, die heute vom Stahlbeton- und Stahlbau besetzt sind. Laubholz ist somit kein Ersatz von Nadelholz, sondern eine Ergänzung bzw. Erweiterung im Holzbau. Auch für Anschlüsse kann der Einsatz von Laubholz zu leistungsfähigeren Verbindungen führen. Die grösste Chance für eine vermehrte Laubholzverwendung liegt dabei aus marktwirtschaftlicher Sicht im Bereich der mehrgeschossigen Bauten (Mehrfamilienhäuser, weitere mehrgeschossige Gebäude) und der Hallenkonstruktionen. Denn der Praxistest zeigt: Vergleicht man beispielsweise hochfeste Stahlbetonstützen mit hochfesten Buchenstützen hinsichtlich Leistung und Preis, sind letztere durchaus konkurrenzfähig.



**Abb. 3**

Neugebäude an der ETH Zürich (House of Natural Resources), das mit Bauteilen aus Laubholz (Esche und Buche) gebaut wurde. (Foto: ETH Zürich / Marco Carocari)

Für die Anwendung von Laubholz im konstruktiven Holzbau sind zuverlässige Klebverklebungen unerlässlich. Die für Nadelholz etablierte Verklebungstechnologie ist nicht auf Laubholz übertragbar und erfordert ein vertieftes Verständnis der grundlegenden physikalischen Mechanismen in Verklebungen für Laubholz. Hier setzt das Projekt *Niemz* (siehe Seite 25) an, in dem die Grundlagen für eine zuverlässigere Modellierung und Optimierung von Klebverbindungen für Laubholz erarbeitet wurden. Das entwickelte Modell erlaubt zudem die Entwicklung und Optimierung von hybriden Holzbauteilen, so die Verklebung von Lamellen unterschiedlicher Holzarten, zum Beispiel von Fichte und Esche, wie sie im ETH House of Natural Resources (vgl. Abbildung 3) umgesetzt wurden. Niemz führt die Forschung mit mehreren Wirtschaftspartnern (zum Beispiel Collano AG, Henkel AG und Neue Holzbau AG) weiter. Parallel dazu laufen das vom BAFU finanzierte Projekt «Brettschichtholz aus Buche» (Leitung René Steiger, Empa, in Zusammenarbeit mit ETH Zürich und BFH) sowie die Initiative von Fagus Jura für den Bau eines Produktionscenters zur Herstellung von Buchenleimholz. Damit werden dem Holzbau erstmals hochwertige Produkte (Brettschichtholz, Brettsperrholz) aus Buche oder hybriden Querschnitten zur Verfügung stehen, die insbesondere den mehrgeschossigen Gebäudemarkt und die aktuelle Entwicklung zu Hochhäusern aus Holz fördern und die auch ins Ausland exportiert werden können (Frangi und Steiger, 2015).

Neu auf dem Markt ist Buchenfurnierschichtholz, das aus verklebten dünnen Furnieren besteht. Buchenfurnierschichtholz hat noch bessere mechanische Eigenschaften und einen höheren Homogenisierungseffekt im Vergleich zu Brettschichtholz aus Buche und besitzt somit eine hohe Zuverlässigkeit der mechanischen Eigenschaften. Durch die Anwendung von Querlagen verfügt es zudem über eine hohe Formstabilität. Im Rahmen des Projekts *Frangi* (siehe Seite 29) wurden neuartige Fachwerke mit Buchenfurnierschichtholz entwickelt. Experimentell abgesicherte Grundlagen erlauben die konstruktive Ausbildung und Bemessung von zuverlässigen und duktilen mechanischen Verbindungen der Fachwerkstäbe, welche die Robustheit der Fachwerke erhöhen. Die hohen mechanischen Eigenschaften von Buchenfurnierschichtholz ermöglichen es, weitgespannte Hallenkonstruktionen mit geringem Materialverbrauch zu entwerfen und zu realisieren.

Frangi arbeitet mit mehreren Wirtschaftspartnern (zum Beispiel Implenia Schweiz AG / Holzbau; WaltGalmarini AG) zusammen, welche die Forschungsergebnisse in der Praxis umsetzen können. Implenia hat beispielsweise 2016 das Tragwerk für seine neue Produktionshalle für den Bereich Holzbau in Rümlang mit Fachwerken aus Buchenfurnierschichtholz gebaut (vgl. Abbildung 4).



**Abb. 4**  
Bau der Produktionshalle für den Bereich Holzbau von Implenia in Rümlang mit Fachwerken aus Buchenfurnierschichtholz (Foto: Implenia Schweiz AG / Holzbau)



## Neue Bauteile und Bausysteme

Mehrere Forschungsprojekte des Dialogfelds 1 widmeten sich der Frage neuartiger Konstruktionen und damit verbundener statischer und bauphysikalischer Auswirkungen. Im Fokus von drei Projekten stand die Entwicklung von neuen Deckensystemen, die als Alternative der auf dem Markt dominierenden Stahlbetondecke dienen sollen. Decken sind nämlich Schlüsselemente des Tragwerkes. Sie sollen vielfältige Anforderungen an Statik, Schallschutz, Brandschutz, Kosten, Haustechnik usw. erfüllen und haben einen wichtigen Einfluss auf Kosten und Bauzeit des Rohbaus. Insbesondere bei mehrgeschossigen Bauten sind die Schallschutzanforderungen strenger als bei eingeschossigen Bauten oder Einfamilienhäusern. Um diese erfüllen zu können, müssen bislang die Holzdeckenkonstruktionen oft mehrschichtig und mit zusätzlicher Beschwerung ausgeführt werden. Solch komplexe und mehrschichtige Aufbauten führen zu relativ dicken Deckenkonstruktionen, die teurer und dadurch gegenüber einer konventionellen Stahlbetondecke nicht konkurrenzfähig sind. Problematisch bei Holzdeckenkonstruktionen sind häufig auch die ungenügenden Schalldämmeigenschaften im Tieftonbereich unterhalb 200 Hz, ausgelöst beispielsweise durch Gehen auf der Konstruktion, Springen, Dolby Surround,

Home Cinema usw. Die im Rahmen des Projekts *Krajči* (siehe Seite 30) entwickelte gedübelte Brettstapeldecke aus Buchenholz mit schwimmendem Unterlagsboden und untergehängter Decke hat gute Trittschalleigenschaften, auch im Tieftonbereich, und sie ist mit einer konventionellen Stahlbetondecke vergleichbar. Die Anwendung von korrekt dimensionierten elastischen Lagern reduziert zudem die Schallübertragung durch flankierende Bauteile und senkt gleichzeitig die Kosten für einen aufwendigen Trittschallschutz.

Dank dem Zusammenwirken von Holz und Beton weisen Holz-Beton-Verbunddecken gute Eigenschaften in Bezug auf Statik, Schall- und Brandschutz auf und lassen sich heutzutage als massive Decken für mehrgeschossige Bauten vielfältig einsetzen. Trotz der vielen Vorteile sind jedoch Holz-Beton-Verbunddecken wirtschaftlich noch nicht konkurrenzfähig zu Stahlbetondecken. Ein Grund dafür sind die höheren Kosten des Holzes im Vergleich zum Beton. Im Rahmen des Projekts *Frangi* wurde eine neuartige Holz-Beton-Verbunddecke entwickelt: Durch die Anwendung von dünnen Platten aus Buchenurnierschichtholz, die als Schalung und Bewehrung für den Beton dienen, lassen sich die Kosten des Holzes signifikant reduzieren. Die Gesamtkosten der entwickelten Holz-Beton-Verbunddecke mit Buchenplatten liegen in



**Abb. 5**  
Buchenurnierschichtholz-Platten als Schalung und Bewehrung für die Holz-Beton-Verbunddecke im ETH House of Natural Resources, Zürich Hönggerberg (Frangi, 2014)  
(Foto: ETH Zürich / IBK)

der gleichen Grössenordnung wie für Stahlbetondecken – aber mit dem ökologischen Vorteil, dass der Beton- und Stahlanteil im Vergleich zu Stahlbetondecken geringer ist. Die Holz-Beton-Verbunddecke mit Buchenplatten wurde im ETH House of Natural Resources erstmals umgesetzt (vgl. Abbildung 5) (Frangi, 2014). Um diese und weitere innovative Technologien auf den Markt zu bringen, wurde die ETH-Spin-off Swiss Timber Solutions AG lanciert. Neue Bauten sind hier schon in der Planung. Zudem wurde ein KTI-Projekt mit dem Bauunternehmer Implenia Schweiz AG / Holzbau und dem Ingenieurbüro WaltGalmarini AG gestartet. Dies mit dem Ziel, die Holz-Beton-Verbunddecke mit Buchenplatten weiter zu optimieren und sie in der Praxis als Alternative zu Stahlbetondecken systematisch anzubieten. Weiter wird 2017 das Holzbauingenieurbüro Pirmin Jung AG eine grosse Wohnüberbauung in Berlin mit der entwickelten Holz-Beton-Verbunddecke realisieren. Das grosse Interesse und die ersten positiven Erfahrungen aus der Praxis weisen auf das grosse Anwendungspotenzial der entwickelten Verbunddecke hin.

Im Rahmen des Projekts *Zwicky* (siehe Seite 28) wurden neue Rezepturen für Holz-Leichtbetone untersucht, ihre thermischen und mechanischen Eigenschaften charakterisiert und Bemessungsansätze erarbeitet. Die Ergebnisse zeigten, dass Holz-Leichtbetone grosse thermische Speicherkapazität aufweisen und ihre thermischen Isolations-

eigenschaften vergleichbar mit anderen Leichtbetonen sind. Das wichtigste Resultat ist ein neuer giessbarer, selbstverdichtender, leichter und wirtschaftlicher Holz-Leichtbeton, der ideal für Unterlagsböden verwendet werden kann. Der im Projekt involvierte Wirtschaftspartner Erne AG Holzbau wird diesen neuen Verbundstoff in die Praxis bringen – erste Anwendungen sind geplant.

Mit den Brandschutzvorschriften 2015 ist die Ausführung der Treppenhäuser als vertikale Fluchtwege in Holzbauweise zugelassen (früher mussten sie in Stahlbetonbauweise ausgeführt werden). Damit wird im wichtigen Markt der mehrgeschossigen Bauten erwartet, dass in Zukunft eine zunehmende Anzahl an Wohn-, Büro und Schulbauten mittlerer Höhe (3 bis 8 Stockwerke) vollständig aus Holz gebaut werden. So lässt sich insbesondere der Bauprozess rationalisieren und beschleunigen und die Wirtschaftlichkeit der Holzbauten weiter verbessern. Der klassische Holzbau bedarf aber auch einer Weiterentwicklung, insbesondere was die für mehrgeschossige Tragwerke wichtigen horizontalen Aussteifungselemente und deren Bemessung für Erdbeben- und Windbeanspruchung betrifft. Hier setzt das Projekt *Steiger* (siehe Seite 32) an, in dem die Grundlagen für eine zuverlässigere Modellierung und Optimierung des Aussteifungstragwerkes für mehrgeschossige Bauten erarbeitet wurden. Die enge Zusammenarbeit mit dem Wirtschaftspartner Pirmin Jung AG hat erlaubt, Rüttelversuche an einem mehrgeschossigen Holzrahmenbau mit Holz-Beton-Verbunddecken



**Abb. 6**  
Installation des Schwingers für die Rüttelversuche an einem 3-geschossigen Holzrahmenbau (Foto: Empa, Abt. Ingenieur-Strukturen)



durchzuführen (vgl. Abbildung 6). Aufgrund der ermittelten Daten aus den experimentellen Untersuchungen an Verbindungen, Wandelementen und Gebäuden können Ingenieure in Zukunft Steifigkeit, Traglast und Verformungskapazität in der statischen Bemessung verlässlicher schätzen. Das entwickelte und optimierte Aussteifungstragwerk für mehrgeschossige Bauten leistet zusammen mit einer Standardisierung der Verbindungen und der Weiterentwicklung der Bemessungsmethoden einen wesentlichen Beitrag für die Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit des Holzbaues gegenüber den konkurrierenden Bauweisen. Neben der verbesserten Wirtschaftlichkeit werden zudem eine grössere Planungssicherheit und höhere Zuverlässigkeit erreicht. Nun geht es darum, die neuen Erkenntnisse in die entsprechenden Normen auf nationaler und internationaler Ebene einfließen zu lassen, damit die ganze Holzbaubranche davon profitieren kann.

## Digital planen und bauen

Durch die Einführung von computergesteuerten Maschinen seit den 1980er-Jahren hat der Holzbau an Bedeutung gewonnen. Mit dem Einsatz digitaler Technik ist es möglich, die Effizienz der Planung und Fertigung sowie die Qualität des Bauens zu erhöhen und beispielsweise auch Bauten mit architektonisch komplexen Formen zu realisieren. 2014 wurde der Nationale Forschungsschwerpunkt (NFS) Digitale Fabrikation initiiert. Dies mit dem Ziel, durch die Kombination von computergestütztem Design mit Robotertechnik innovative Bauprozesse in der Architektur zu entwickeln. Die im Rahmen des Projekts *Kohler* (siehe Seite 33) durchgeführten experimentellen und numerischen Untersuchungen liefern grundlegende Daten für den computergestützten Entwurf und die robotergestützte Assemblierung komplexer Holztragwerke. Diese Grundlagen sind für die ganze Holzbranche



**Abb. 7**

Das sequenzielle Dach, Zürich, 2010 bis 2016: Digital fabrizierte Holzdachkonstruktion für den Neubau des Arch\_Tec\_Lab des Instituts für Technologie in der Architektur (ITA) an der ETH Zürich, die von der Professur für Architektur und Digitale Fabrikation entwickelt und von der Firma Erne AG Holzbau realisiert wurde (TEC21, 2016a).  
(Foto: Andrea Diglas / ITA / Arch\_Tec\_Lab AG).

wesentlich, da sich damit neue Umsetzungsmöglichkeiten eröffnen. Sie betreffen nicht nur die erwähnten verklebten Holz-Holz-Verbindungen mit ultraschnellen injizierten Klebstoffen, sondern liefern auch neue Erkenntnisse in diesem Bereich. Das Potenzial der Verknüpfung von digitalen Planungs- und Fertigungstechniken mit Robotertechnik und nachhaltigen und lokal verfügbaren Baumaterialien wie Holz zeigt die neuartige Dachkonstruktion, die für den Neubau des Arch\_Tec\_Lab des Instituts für Technologie in der Architektur (ITA) an der ETH Zürich entwickelt wurde (TEC21, 2016a) (vgl. Abbildung 7). Die Dachkonstruktion besteht aus 168 einzelnen Fachwerkträgern, die insgesamt ein 2308 m<sup>2</sup> grosses, frei geformtes Holzdach bilden. Hier erlaubt die robotische Verarbeitung und Fügung der 48624 Holzelemente zu einzelnen Trägern eine effiziente Herstellung der frei geformten Dachgeometrie.

Diese Fragen waren unter anderem Gegenstand des dritten Workshops des Dialogfelds 1 (siehe Spalte rechts). Dabei ging es um das Zusammenspiel von Mensch, Baukultur, Technik und den entsprechenden Prozessen als Basis für den Erfolg. Im Fokus stehen dabei die industriellen Prozesse. Der Interessenkonflikt zwischen individueller Planung und Umsetzung jedes Bauprojekts einerseits sowie dem Streben nach standardisierten Bauprozessen andererseits darf dabei nicht als Widerspruch angesehen werden. Es gilt, die unproduktiven und nicht wertschöpfenden Tätigkeiten zu minimieren sowie innovative und nachhaltige Prozesse (weiter) zu entwickeln. Dazu braucht es sämtliche am Bau Beteiligten.

### **Synergien nutzen, auch dialogfeldübergreifend**

So weit der Innovationsbeitrag der Projekte des Dialogfeldes 1, gespiegelt auf dem Hintergrund der Bauprozesse und der damit verbundenen Anforderungen der Praxis. Vergleicht man die nun vorliegenden Resultate mit den fünf Zielen der Ressourcenpolitik Holz des Bundes (siehe Spalte rechts) und der formulierten Zielrichtung des Aktionsplans Holz für die Steigerung des Holzeinsatzes im Bauwesen (grossvolumiges Bauen, Bauen im Bestand, Bauen mit Laubholz, neue und optimierte Anwendungen und Prozesse) wird deutlich, dass die Forschungsprojekte im Dialogfeld 1 wesentliche Beiträge zur Zielerreichung und deren Weiterentwicklung erbringen. Vorausgesetzt es gelingt, die Synergien zwischen den einzelnen Projekten zu nutzen – auch dialogfeldübergreifend – und die Ergebnisse als konkrete Handlungsoptionen zu verankern.

## **Der Dialog mit der Praxis**

Im Rahmen des Wissens- und Technologietransfers haben im Dialogfeld 1 «Weiterentwicklungen im Holzbau» zwischen Oktober 2015 und April 2016 drei verschiedene Workshops mit Praxis- und Branchenvertretern zu folgenden Themen stattgefunden:

### **Workshop 1 zum Thema «Klebverbindungen» «Innovative Concepts for Glued Connections in Timber Constructions»**

Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau Biel/Bienne, 15. und 16. Oktober 2015

### **Workshop 2 zum Thema «Laubholz im Holzbau»** ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion IBK, 28. Januar 2016

### **Workshop 3 zum Thema «Industrielle Fertigung»** École polytechnique fédérale Lausanne (EPFL), 6. April 2016

Für Berichte und Dokumentationen zu den einzelnen Workshops siehe [www.nfp66.ch](http://www.nfp66.ch)

## **Ressourcenpolitik und Aktionsplan Holz**

### **5 Ziele**

1. Eine leistungsfähige Schweizer Waldwirtschaft schöpft das nachhaltig nutzbare Holzproduktionspotenzial des Schweizer Waldes aus.
2. Die Nachfrage nach stofflichen Holzprodukten nimmt in der Schweiz zu, unter besonderer Berücksichtigung von Holz aus Schweizer Wäldern.
3. Die Verwertung von Energieholz nimmt zu. Dies unter Berücksichtigung einer nachhaltigen Nutzung sowie einer effizienten und sauberen Verwertung.
4. Die Innovationskraft der Wertschöpfungskette Holz nimmt zu.
5. Durch eine optimale Abstimmung leistet die Ressourcenpolitik Holz einen wichtigen Beitrag zur Zielerreichung anderer Sektoralpolitiken.

(Quelle: Aktionsplan Holz, Praxis Workshop vom 16. März 2016, Präsentation von Rolf Manser, Abteilungschef Wald)





Abb. 8 Fünfgeschossiges Wohnhaus in La Tour (Wallis) aus dem Jahr 1958 (Foto: JHG Photography)

# EIN ERSTES FAZIT ALS BASIS FÜR KÜNFTIGE ENTWICKLUNGEN

**Es gibt im Holzbau zwei grosse Hebel für die Zukunft: die Industrialisierung und die Digitalisierung. Im Zusammenspiel von Material und Bauprozess liegt ein grosses, noch nicht ausgeschöpftes Potenzial. Dies betrifft Planung, Produktion und Montage gleichermaßen. Qualität, Präzision und Effizienz sind weitere Pluspunkte der nachhaltigen Holzbauweise, die für die digitale Revolution gute Voraussetzungen darstellen.**

## Technologischer Fortschritt

Die Resultate der Forschungsprojekte in den Bereichen **Verbindungstechnik und Verklebung** sind vielversprechend. Zum einen, was die verklebten Bauteile aus Laubholz betrifft. Diese sind die Grundlage für den vermehrten Einsatz von Laubholz als hochwertiges Baumaterial. Zum anderen in der Kombination mit der digitalen Fertigung: Gelingt hier der Schritt in die Praxis, sind ganz neue und andersartige Fertigungstechniken und formale Gestaltungsansätze mit Holz denkbar. Das Potenzial von **Laubholz** liegt hauptsächlich dort, wo heute noch kein Holz eingesetzt wird. Die Forschungsprojekte liefern hier interessante Ansätze, die noch weiter entwickelt werden müssen. Entsprechende Ideen sind gefragt. Die nun vorliegenden Forschungsergebnisse für Buche, zum Beispiel bei Verbunddecken, gelten zum Teil auch für die Fichte. Interessant sind auch Ansätze, den Materialeinsatz analog dem Flugzeugbau weiter zu optimieren.

Die Forschungsergebnisse im Bereich der **Deckenkonstruktionen** sind ebenfalls vielversprechend. Aktuell gibt es auf dem Markt ganz unterschiedliche Systeme, was gegenüber dem Stahlbetonbau einen Nachteil darstellt. Eine engere Auswahl von Deckensystemen als Standardlösung wäre ein ech-

ter Fortschritt. Die eigentliche Entwicklung von Standardlösungen ist jedoch nicht Aufgabe der Forschung, solche auf ihr Potenzial hin zu testen hingegen schon. Für eine entsprechende Entwicklung braucht es deshalb den vermehrten Austausch zwischen Forschung und Praxis.

Das speziell für Gebiete mit niedriger bis mittlerer Seismizität und moderater Beanspruchung durch Windeinwirkung optimierte **Holztragwerkssystem** ist ein weiterer Schritt Richtung Holzbau als Normalfall, gerade auch bei mehrgeschossigen Bauten und Grossprojekten.

## Synergien nutzen und Dialog verstärken

Die Projekte im Dialogfeld «Weiterentwicklungen im Holzbau» verfolgen im Bereich von Verbindungen, Bauteilen und Prozessen interessante Ansätze, die auch Synergien zulassen. Das Potenzial liegt nicht nur in einzelnen Fragestellungen und Lösungen (siehe Projekte 1 bis 7 im Anhang), sondern auch im Zusammenspiel von Material und Bauprozess.

Forschung und Praxis funktionieren im Holzbau nicht unabhängig voneinander. Das haben die Diskussionen in den drei begleitenden Workshops zum Dialogfeld 1 deutlich gezeigt: Entweder hat



die Praxis die Lösung schon im Kopf und die Forschung hilft, eine praktikable Umsetzung dafür zu finden. Oder es gibt Grundlagenprobleme, welche von der Forschung an die Unternehmer herangetragen werden. Oft entstehen so quasi als Nebenprodukt neue Lösungen oder es kommen neue Themen und Fragestellungen auf, die in den Fokus rücken.

### Die Lösung für Siedlungsentwicklung nach innen

Der Holzverbrauch für Mehrfamilienhäuser in der Schweiz ist von 2009 bis 2014 um 73 % angestiegen und in den letzten zwei Jahren entstanden je rund 500 neue Mehrfamilienhäuser in Holzbauweise, die meisten davon in grossen Städten und den Agglomerationen (TEC21, 2016b). Holz hat die Stadt erreicht, obwohl nur 6 % aller Mehrfamilienhäuser mit Holz gebaut wurden (vgl. Abbildung 9).

Durch die knappe Bodenressource ist das verdichtete Zusammenleben und Bauen in den Agglomerationen unvermeidbar. Bauen in den Städten stellt hohe Herausforderungen in Bezug auf die Logistik und den Bauprozess, der möglichst ohne Lärm- und Staubemissionen und ohne Betriebsstörung erfolgen sollte. Der hohe Grad an Vorfabrikation in Kombination mit den Vorteilen des nachhaltigen Bauens macht den Holzbau diesbezüglich mehr als konkurrenzfähig, und dies nicht nur für Neubauten, sondern vor allem für die Modernisierung bestehender Gebäude. Der Gebäudepark Schweiz

besteht zum grössten Teil aus Gebäude, welche vor den 1980er-Jahren erstellt wurden. Diese sind durch einen hohen Energiebedarf charakterisiert und erfüllen die steigenden Anforderungen an Wohnqualität nicht mehr. Die Modernisierungsrate (Gebäudehülle, Innenausbau usw.) der Gebäude ist allerdings sehr tief, was unter anderem daran liegt, dass die Besitzer von Liegenschaften die Energiekosten auf die Mieter übertragen. Aufstockungen erlauben, Immobilien aufzuwerten und zudem zusätzliche Mieteinnahmen zu generieren, die sich wiederum in die Modernisierung des Bestandes investieren lassen (vgl. Abbildung 10). Bauen im Bestand und Aufstockungen werden noch weiter zunehmen. Auch in diesen Fällen kann der Holzbau vorteilhafte Lösungen anbieten. Das muss bei Investoren noch stärker als Botschaft verankert werden – inklusive der relevanten gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und ökologischen Argumente. Vor allem auch, weil auf Investorenebene in den meisten Fällen der Entscheid für die Art der Bauweise gefällt wird. Die Forschungsprojekte des NFP 66 im Bereich «Weiterentwicklungen im Holzbau» bieten für Fragen des Materials, der Fertigung oder der Konstruktion interessante Lösungen, welche eine entsprechende Argumentation stützen können.



**Abb. 9**  
Freilager-Überbauung in Zürich Albisrieden, eines der grössten 2016 eingeweihten Wohnbauprojekte auf dem Gebiet der Stadt Zürich (Foto: Lignum Michael Meuter, Zürich)



**Abb. 10**  
Supertanker: Umbau und Aufstockung (2007) in Holzbau von einem bestehendem Lagergebäude in Zürich Binz (Foto: Stücheli Architekten AG)



## Durch die digitale Revolution zum Normalfall

Wettbewerbsfähigkeit erreicht man auch, indem man Prozesse optimiert. Die digitale Revolution wird herkömmliche Strukturen und Prozesse auch im Bauwesen ablösen und die optimierte Planung, Ausführung und Bewirtschaftung von Gebäuden erlauben. Im Zentrum steht die digitale Gebäudedatenmodellierung (BIM Building Information Modeling). Dabei werden alle relevanten Informationen (zum Beispiel Bauteile, Räume, Materialien, Massen, Kosten, terminlichen Abfolgen, Arbeitsvorgänge, usw.) in einem 3D-Gebäudemodell digital modelliert, kombiniert und erfasst – wobei eine 3D-Visualisierung nicht der BIM-Methode gleichzusetzen ist. Erst durch die Verknüpfung, Mehrfachnutzung und Austauschbarkeit der Gebäudedaten lässt sich das Potenzial von BIM ausschöpfen. Dies insbesondere auch für die Modernisierung von bestehenden Gebäuden, indem die 3D-Geometriedatenerfassung vor Ort und die einfache Integration dieser Daten mit einer Vielzahl von Attributen in einem 3D-Gebäudemodell möglich wird.

Essenziell bei BIM ist die enge integrative Arbeitsweise, welche die Kommunikation zwischen allen Beteiligten verbessert und eine ganzheitliche und ständig aktuelle Arbeitsgrundlage schafft. Damit lassen sich die Schnittstellen besser regeln, die Koordination verbessern und damit potenzielle Probleme in der Planung und Ausführung frühzeitig entdecken und beseitigen. Dies steigert auch die Planungs- und Ausführungssicherheit in Bezug auf Termine und Kosten. Eine Herausforderung ist allerdings die Optimierung des Datenaustausches, um eine fachübergreifende und gewerküberschreitende 3D-Planung von Gebäuden zu ermöglichen. Die Holzwirtschaft ist mit 3D-CAD und CNC-Bearbeitung für die digitale Revolution gut gerüstet, wie viele Leuchtturmprojekte mit freien Formen (beispielsweise Yeoju Golf Resort in Südkorea, vgl. Abbildung 11) zeigen. Damit kann auch die Holzbaubranche eine führende Rolle in der Bauwirtschaft übernehmen und Bauen mit Holz als konkurrenzfähige Bauweise etabliert werden. Wichtig ist dabei, dass die ganze Holzbranche von der digitalen Revolution profitieren wird.



**Abb. 11** Yeoju Golf Resort, Südkorea, 2007, das vom Architekten Shigeru-Ban entworfen und von der Firma Blumer-Lehmann AG realisiert wurde. (Foto: Blumer-Lehmann AG)



# HANDLUNGSOPTIONEN FÜR AKTEURE AUS FORSCHUNG UND PRAXIS

**Sollen sich die gewonnenen Erkenntnisse in der Holzbaupraxis durchsetzen, braucht es besondere Anstrengungen und entsprechende Rahmenbedingungen – sei dies in der Aus- und Weiterbildung, in der Forschung und Entwicklung, im Normenwesen oder im wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Kontext. Abschliessend werden deshalb die wichtigsten Empfehlungen für die Akteure aus Forschung und Praxis nochmals stichwortartig zusammengefasst.**

## Aus- und Weiterbildung

Technische Disziplinen brauchen in der Architekturausbildung ausreichendes Gewicht. Holzbau muss auch in der Ausbildung – nicht nur an speziell dafür ausgerichteten Schulen – vom Sonder zum Normalfall werden. Hier ist zwar bereits viel passiert, aber es ist noch mehr möglich.

Aus der digitalen Revolution eröffnen sich neue Geschäfts- und Berufsfelder. Die Kompetenz im digitalen Planen und Bauen soll an den Hochschulen und Fachhochschulen weiter aufgebaut und die Unterrichtsformen entsprechend angepasst werden. Aber da das Wissen sehr volatil ist, ist die kontinuierliche Weiterbildung für die ganze Branche ebenso wichtig.

## Forschung und Entwicklung

Durch F+E-Aktivitäten lässt sich die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit des Holzbaus kontinuierlich verbessern und damit die führende Rolle des Schweizer Holzbaus weiter konsolidieren. Das grosse Wissen soll nicht nur in der Schweiz umgesetzt, sondern auch vermehrt international vermarktet werden. Und es soll die Entwicklung von neuen Geschäftsmodellen fördern. Forschungsschwerpunkte sollen auf die weitere Entwicklung

und Optimierung von hochwertigen, holzbasierten Materialien und Produkten, der Verklebung- und Verbindungstechnik und der entsprechenden Prozesse fokussieren. Dies auf dem Hintergrund der aktuellen digitalen Revolution und des strukturellen Wandels einer auf Wachstum aufbauenden Gesellschaft zu einer Gesellschaft, die auf der Verknappung der Ressourcen basiert. Dabei ist der Dialog zwischen Forschung und Praxis, den das NFP 66 initiiert hat, für eine positive künftige Entwicklung der ganzen Branche entscheidend und soll dementsprechend weitergeführt werden. In diesem Zusammenhang spielt das nationale thematische Netzwerk S-WIN (Swiss Wood Innovation Network) eine wesentliche Rolle.

## Normierung

Die Normierung kann ein positives Schlüsselement sein, um die Umsetzung von neuen Technologien in der Praxis zu beschleunigen. Damit lassen sich neue Technologien ohne spezielle Zustimmungen im Einzelfall verwenden. Auf der anderen Seite besteht das Risiko, dass eine zu strenge Normierung die Innovation bremst.

In der Schweiz werden für die Projektierung von Tragwerken vorwiegend die SIA-Tragwerksnormen verwendet, die im Milizsystem in Kommis-

sionen mit Mitgliedern aller am Normenprozess Beteiligten (Planer, Unternehmer, Bauherren, Behörden) erarbeitet werden und als praktische Hilfsmittel für gut ausgebildete Fachleute dienen. Die SIA-Tragwerksnormen sind schlank und anwenderfreundlich, bauen auf Eigenverantwortung und Ausbildung auf und fördern bzw. erlauben verantwortungsvolle Innovation.

In Zukunft besteht die Möglichkeit, dass die europäischen Tragwerksnormen (sog. Eurocodes), die zurzeit in Revision sind, auch in der Schweiz vermehrt eingesetzt werden. Der SIA hat deshalb das Projekt für ein verstärktes Engagement bei der Erarbeitung der Eurocodes der zweiten Generation lanciert (SIA, 2014). Ziel des Projektes ist es, bei der laufenden Überarbeitung der Eurocodes die Philosophie der konsistenten, praxistauglichen SIA-Tragwerksnormen einzubringen. Gelingt eine weitere Annäherung, könnten ab ca. 2020/2022 die SIA-Tragwerksnormen zugunsten der Eurocodes zurückgezogen werden. Andernfalls wäre im Bedarfsfall und im Einklang mit dem europäischen Recht und dem europäischen Normenwerk eine weitere Version der SIA-Tragwerksnormen zu erarbeiten. Auch im Normenwesen kann der Schweizer Holzbau eine führende Rolle übernehmen und grosses Wissen anbieten.

Neben den Tragwerksnormen ist die Bauwirtschaft mit einer zunehmenden Anzahl von Produktnormen

konfrontiert. Auch in diesem Fall ist es entscheidend, dass die Schweiz die Entwicklung der Produktnormen aktiv mitgestaltet, um die Wettbewerbsfähigkeit aller Beteiligten zu gewährleisten. Die Finanzierung von Normierungsarbeiten ist jedoch schwierig und sollte aus den dargelegten Gründen unterstützt werden.

## Wirtschaft und Gesellschaft

Bauen mit Holz erlaubt die Erfüllung architektonisch hoher Ansprüche – insbesondere für freie Formen bietet sich Holz geradezu an. Durch die digitale Revolution werden «BIM-fähige» Bauweisen bevorzugt: Mit 3D-CAD und CNC-Bearbeitung ist die Holzwirtschaft dafür gut gerüstet.

Holz hat eine emotional hohe Akzeptanz bei der Bevölkerung und ermöglicht ein angenehmes Raumklima über das ganze Jahr. Bei den vielfältigen Holzanwendungen – sei es an der Fassade, im Innenbereich oder als tragendes bzw. nicht tragendes Bauteil – besteht der Wunsch seitens Architektur und Gesellschaft, Holz sichtbar zu belassen. Mit den neuen Brandschutzvorschriften können in der Schweiz seit Anfang 2015 Bauteile aus Holz (ausser bei Fluchtwegen) für Gebäude bis 30 Meter Höhe sichtbar sein. Sind Fassaden aus Holz, stehen Fragen der Verwitterung und der Dauerhaftigkeit im Vordergrund. Hier leisten die Projekte vom Dialogfeld «Innovative holzbasierte Materialien»



Abb. 12

UBC Brock Commons, 18-geschossiges Studentenwohnheim der University of British Columbia in Vancouver, derzeitiger Rekordhalter im Bauen mit Holz. (Foto: KK Law)

einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Witterungsbeständigkeit und Dauerhaftigkeit von Holzfassaden (siehe Synthesebericht «Innovative holzbasierte Materialien»).

Bauen mit Holz hat mehrere Vorteile – leicht, schnell, präzise, digital usw. – und positive Auswirkungen zum Beispiel in Bezug auf den Energieverbrauch oder die langfristige Bindung von Kohlenstoff. Die neuen Brandschutzvorschriften lassen die Anwendung von Holz in allen Gebäudekategorien und Nutzungen zu. Selbst Holzhochhäuser mit Holzbauteilen sind neu möglich. Auch in anderen Ländern entstehen erste Hochhäuser aus Holz oder in Hybridbauweise. Der Rohbau des zurzeit weltweit höchsten Hochhauses wurde im September 2016 an der University of British Columbia (UBC) in Vancouver fertiggestellt. Das Hochhaus hat 18 Geschosse und ist 53 Meter hoch (vgl. Abbildung 12). Auf dem Areal Suurstoffi in Risch Rotkreuz wächst derzeit Stück um Stück ein neues Quartier, in dem Wohnen, Arbeiten und Freizeitaktivitäten miteinander verbunden sind. Auf diesem Areal entstehen die ersten zwei Holzhochhäuser der Schweiz (Lignum 2016). Das erste Holzhochhaus (Suurstoffi S22 der Badener Architekten Burkard Meyer, s. Abbildung 13) ist ein Bürogebäude mit 10 Geschossen über Terrain und einer Höhe von 36 Metern, das zweite Holzhochhaus (Suurstoffi BF1 – Haus A) ist ein Bürogebäude mit 16 Geschossen über Terrain und einer Höhe von 60 Metern.

Ein Hauptargument für die Wahl der Holzbauweise für diese Gebäude ist der enge Terminplan, der zu konsequenter Planung in höchster Präzision zwingt, wofür die Holzbauweise prädestiniert ist. Auch der weltweit aktuelle Trend zu Holzhochhäusern ist ein weiterer Hinweis zum grossen Potenzial der Holzbauweise für das zukunftsweisende nachhaltige Bauen.

Bei Investitionsentscheidungen werden heute vermehrt Lebenszykluskosten anstelle der reinen Erstellungskosten berücksichtigt. Diesbezüglich können Holzgebäude (insbesondere im Minergie-P-Eco-Standard) konkurrenzfähig gegenüber Massivbauten in Stahlbeton oder Backstein sein (Glanzmann et al. 2012). Das ist jedoch bei Investoren immer noch zu wenig bekannt. Bei Projektentwicklungen und Finanzierungsanfragen wird die Holzbauweise deshalb immer noch als Nachteil angesehen.



**Abb. 13**

Suurstoffi 22, Räumliche Wirkung der sichtbaren Holzstruktur. Burkard Meyer Architekten BSA, Baden. (Foto: Markus Bertschi, Zürich)



## Die wichtigsten Empfehlungen für Akteure aus Forschung und Praxis

### Material und Konstruktion

1. Weiterentwicklung der Verklebungs- und Verbindungstechnik als Basis für weitere positive Fortschritte der Holzbauweise.
2. Weiterentwicklung von hochwertigen neuen Bauprodukten bzw. Bauprozessen mit Laubholz als Alternative zur Bauweise mit Stahl und Stahlbeton. F+E-Aktivitäten sollen in enger Zusammenarbeit mit der Industrie erfolgen, um die Umsetzung in der Praxis sicherzustellen.
3. Weiterentwicklung von standardisierten Deckensystemen im Holzbau, die mit dem heutigen Einsatz von Stahlbetondecken vergleichbar sind.
4. Weiterentwicklung von optimierten Holztragwerksystemen als wirtschaftliche Gesamtlösungen für mehrgeschossige Bauten und Grossprojekte.
5. Weiterentwicklung der digitalen Fertigung: Hier sind künftig ganz neue und andersartige Fertigungstechniken und formale Gestaltungsansätze denkbar.

### Dialog, Bildung und Wissenstransfer

6. Entwicklung einer Strategie und Umsetzung von Massnahmen zur Weiterführung und Verstärkung des Dialogs zwischen Forschung und Praxis, zwischen den verschiedenen Akteuren in der Kette von der Rohstoffbeschaffung bis zum Bau. Der Dialog zwischen Forschung und Praxis ist für eine positive künftige Entwicklung der ganzen Branche entscheidend. Dadurch können sich Synergien und neue Entwicklungen ergeben. Das nationale thematische Netzwerk S-WIN (Swiss Wood Innovation Network) spielt dafür eine wesentliche Rolle.
7. Kompetenz im digitalen Planen und Bauen soll an den Hochschulen und Fachhochschulen weiter aufgebaut und die Unterrichtsformen entsprechend angepasst werden.
8. Das grosse Know-how bezüglich Holzbau in der Schweiz soll international vermarktet werden (Stichwort: Entwicklung von neuen Geschäftsmodellen).

### Normenwesen

9. Im Normenwesen kann der Holzbau eine führende Rolle übernehmen und grosses Wissen anbieten.
10. Die Schweiz soll die Entwicklung von europäischen Normen (Eurocodes und Produktnormen) aktiv mitgestalten, um die Interessen der Holzbauwirtschaft in der Schweiz und die Wettbewerbsfähigkeit aller Beteiligten zu gewährleisten.

### Wirtschaft und Gesellschaft

11. Erarbeitung von Grundlagen für Investoren und Entscheidungsträger mit den wesentlichen Argumenten/Fakten zu den Vorteilen der Holzbauweise (Stichworte: Logistik, hohe Vorfabrikation, kurze Bauzeit, Kosten), insbesondere für die innere Siedlungsentwicklung und für die Modernisierung des aktuellen Gebäudebestands hinsichtlich Reduktion des Energieverbrauchs.
12. Erarbeitung und Bereitstellung praxisgerechter und möglichst einfacher Abschätzung der positiven Umweltwirkung des Holzbaus.

# ANHANG

## DIE SIEBEN FORSCHUNGSPROJEKTE DES DIALOGFELDS 1 IM ÜBERBLICK

**Die sieben Projekte, welche dem Dialogfeld «Weiterentwicklungen im Holzbau» zugeordnet sind, reichen von reiner Grundlagenforschung bis zu Projekten mit bereits ausgereiften Realisierungen in der Praxis. Allen gemeinsam ist, dass sie den Holzbau wirtschaftlich stärken und die Basis legen für eine zukunftsfähige Weiterentwicklung.**

Folgend werden die sieben Forschungsprojekte des Dialogfeldes «Weiterentwicklungen im Holzbau» kurz vorgestellt. Anzumerken ist, dass die einzelnen Projekte hinsichtlich Anwendung in der Praxis unterschiedlich weit gehen: Während einige Projekte den Weg zu bereits ausgereiften Umsetzungen und neuen Produkten bearbeiten (Projekte Steiger und Frangi beispielsweise), liegt der Gegenstand anderer Projekte in einer früheren Entwicklungsphase und wird erst zu einem späteren Zeitpunkt anwendungsreif sein.

### Verklebung von Laubholz

Projekt «Adhesive bonding in structural elements made of hardwood» (Niemz Peter, ETH Zürich)

**Für die Anwendung von Laubholz im konstruktiven Holzbau sind zuverlässige Klebverbindungen unerlässlich. Die für Nadelholz etablierte Verklebungstechnologie ist nicht auf Laubholz übertragbar und erfordert ein vertieftes Verständnis der grundlegenden physikalischen Mechanismen in Verklebungen für Laubholz.**

Verklebte tragende Bauteile wie Brettschichtholzträger oder Brettsperrholzplatten sind die wichtigsten Produkte für den konstruktiven Holzbau. Die Verklebung beeinflusst die Tragsicherheit von tragenden Holzbauteilen massgeblich. Deshalb dürfen für den tragenden Holzleimbau nur zertifizierte Klebstoffe eingesetzt werden, die hohe Anforderungen gemäss den aktuellen europäischen

Normen erfüllen. Feuchtigkeitsänderungen über den Holzquerschnitt von Leimbauteilen beanspruchen die Klebverbindungen besonders stark.

Eine Reihe neuer Entwicklungen für Anwendungen im Holzbau setzt auf die höheren mechanischen Eigenschaften von Laubholz. Es werden Brettschichtholzträger aus Buche oder hybride Träger mit Buchenlamellen in den Decklagen eingesetzt. Da Buchenholz besonders stark quillt und schwindet und eine hohe Steifigkeit hat, treten in Klebverbindungen bei Verwendung von Buche bei unweigerlichen Feuchteschwankungen im Bauteil im Vergleich zum Nadelholz deutlich höhere Eigenspannungen auf. Der Nachweis der Klebfugengüte nach geltender Normung ist zudem schwierig. Dies liegt zum einen daran, dass die verfügbaren Klebstoffsysteme für Nadelhölzer entwickelt wurden und nicht auf die Eigenschaften von Laubhölzern abgestimmt sind. Zum anderen basiert die bestehende Normung auf Testverfahren für Nadelholz, dessen Übertragung auf Laubholz ohne grundsätzliche Kenntnis der Verklebungseigenschaften von Laubholz nicht möglich ist.

### Verbesserte Buchenholzverklebungen als Ziel

In Zusammenarbeit mit Schweizer Klebstoffherstellern wollte man im Rahmen der Forschung zu verbesserten Buchenholzverklebungen gelangen. Dies betraf Fragen der Herstellung, Ansätze für zuverlässige Nachweismethoden sowie die grundlegende Beschreibung der auftretenden Spannungen in der Klebefuge bei hygro-mechanischen Beanspruchungen. Die Forschenden bestimmten mittels bruchmechanischer Ansätze und

numerischer Nachweise das Delaminations- und Langzeitverhalten verklebter Brettschichtholzträger und entwickelten eine zuverlässige Nachweismethode für Klebeverbindungen von Laubholz bei definierten Feuchtigkeitsänderungen des Bauteils. Dafür wurden zunächst Feuchteabhängigkeiten bruchmechanischer Kennwerte geklärt. Die Forschenden erfassten in numerischen Simulationen, wie sich die geklebten Laubholzelemente bei jahreszeitlichen Klimaschwankungen verhalten, und verglichen diese mit Versuchen an Brettschichtholz aus Buche bei alternierender Luftfeuchte.

### Feuchte ist massgebend

Die experimentellen Tests zeigten, dass die Art der Kopplung unterschiedlicher Bruchmoden von der Feuchte abhängt. Deshalb entwickelte man ein feuchteabhängiges, nicht lineares Holz- und Klebstoffmodell, das erstmals sämtliche relevanten Verformungen und Belastungen erfasst (vgl. Abbildung 14). Dieses ermöglicht Anwendern, die Entwicklung von Spannungs- und Feuchteprofilen in

Bauteilen im Zeitraffer zu berechnen. Dabei zeigt sich, dass die Kopplung zwischen Feuchte und Belastung massgeblich für den beobachteten Spontanbruch in Bauteilen verantwortlich ist.

### Ein Modell zur Entwicklung hybrider Holzbauteile

Für eine wirtschaftliche Nutzung von Laubholzprodukten ist die Tragsicherheit der Klebeverbindungen unabdingbar. Mit dem entwickelten Modell lassen sich die Eigenschaftsänderungen unterschiedlicher Holzarten und Klebstoffe bei Klimaänderungen in der Anwendung erfassen. Gleichzeitig dient es als Grundlage zur Entwicklung hybrider Holzbauteile. Damit lassen sich die Lamellenzahlen, -dicken, -ausrichtungen und andere Prozessparameter wie Feuchteunterschiede zwischen den Lamellen optimieren. Aufgrund des sehr langsamen Feuchtetransports kann das Tragverhalten von Holzbauteilen nur mit dem numerischen Ansatz über mehrere Jahrzehnte prognostiziert werden.

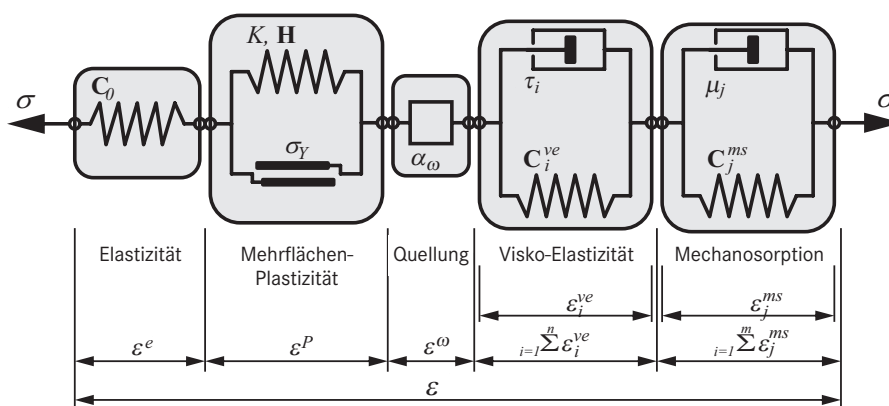


Abb. 14 Schematische Darstellung des rheologischen Holzmodells

### Neue verklebte Holz-Holz-Verbindungen

Projekt «Design tool for adhesively-bonded timber joints» (Vasilopoulos Anastasios, EPFL)

**Für die Entwicklung von neuen verklebten Holz-Holz-Verbindungen wurden grundlegende Daten erarbeitet, die ein vertieftes Verständnis des Tragverhaltens des Baumaterials Holz erlauben. Dies führt letztlich zu einer erhöhten Wettbewerbsfähigkeit des Holzbaus.**

Für die Verbindung von Holzstäben, zum Beispiel in den Knoten von Fachwerken, hat sich die Verklebung nicht bewährt und mechanische Verbindungen sind dafür üblich. Die Forschenden erarbeiteten grundlegende Daten für die Entwicklung und Bemessung von geklebten Holzverbindungen. Dabei betrachteten sie Materialkennwerte und Berechnungsansätze auf der Ebene der eingesetzten Materialien (Holz- und Klebstoffe), der Anschlüsse und der Gestaltung durch Praktiker.



## Mit Acrylharz verklebte Verbindungen zeigen hohe Duktilität

Mit den Resultaten der experimentellen Untersuchungen liessen sich Korrelationen zwischen E-Modul, Festigkeit und Bruchdehnung festlegen. Mit dem entwickelten stochastischen Modell konnten die experimentellen Untersuchungen gut nachgebildet werden. Zudem konnte man den Volumeneffekt (infolge der variablen Länge) für diese Eigenschaften beurteilen.

Neben den experimentellen Versuchen analysierte man das Tragverhalten von verklebten Holz-Holz-Verbindungen mit unterschiedlichen numerischen Untersuchungen, wobei der Fokus auf Steifigkeit, Tragfähigkeit und Duktilität lag. Einflussparameter waren die Geometrie der Verbindung (Überlappungslänge), die Holzart (Fichte und Buche) und der Klebstoff (vgl. Abbildung 15). Drei unterschiedliche Klebstoffarten (Epoxy, Polyurethane und Acrylharz) untersuchte man numerisch. Acrylharz erwies sich dabei als Klebstoff mit dem grössten Potenzial für eine duktile Verbindung. Er wurde deshalb weiter umfassend analysiert. Die Resultate der Zugversuche an verklebten Holz-Holz-Verbindungen mit Epoxy und Acrylharz, die von den numerischen Simulationen gut abgebildet wurden, zeigten die höhere Duktilität der mit Acrylharz verklebten Verbindung.

## Tragfähige Verbindungen machen Holzbau wettbewerbsfähig

Die durchgeführten experimentellen und numerischen Untersuchungen liefern grundlegende Daten für ein vertieftes Verständnis des komplexen Tragverhaltens von fehlerfreiem Holz und verklebten Holz-Holz-Verbindungen. Mit Acrylharz verklebte Holz-Holz-Verbindungen zeigen ein vielversprechendes duktileres Tragverhalten. Das entwickelte stochastische numerische Modell erlaubt die Modellierung des Tragverhaltens von Holz unter Berücksichtigung der räumlichen Variabilität der mechanischen Eigenschaften des Holzes. Damit lässt sich zum Beispiel das Tragverhalten von verklebten Holz-Holz-Verbindungen besser beschreiben. Entsprechende Verbindungen lassen sich weiterentwickeln und optimieren, was letztlich die Wettbewerbsfähigkeit des Holzbaus verbessert.

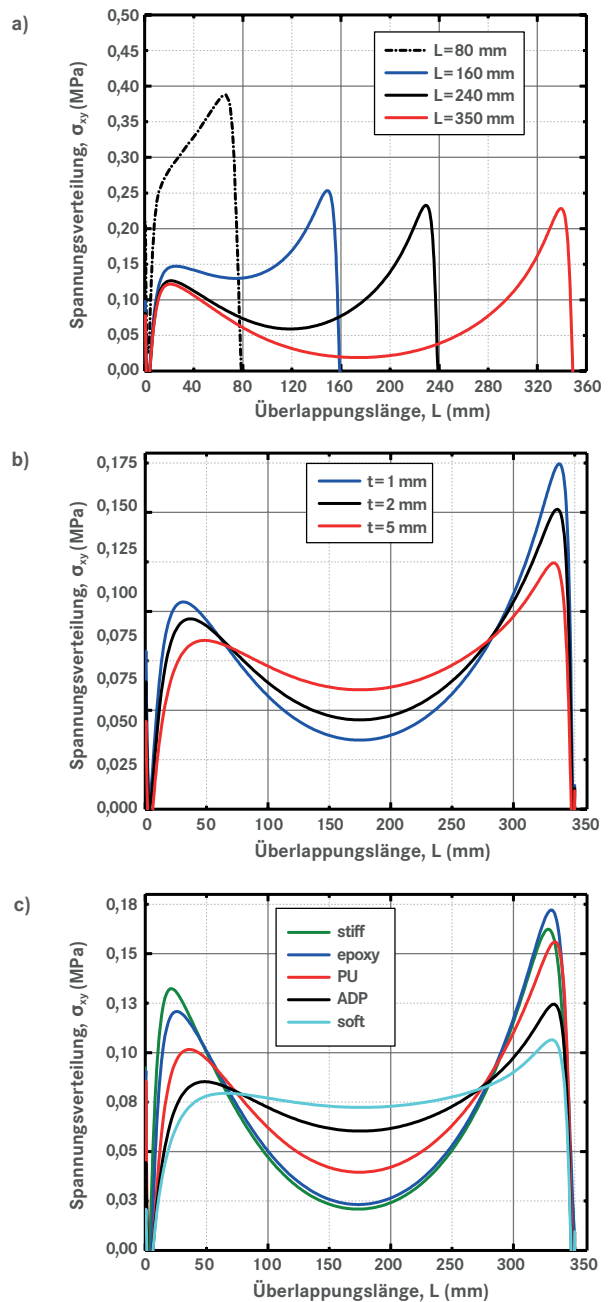


Abb. 15: Einfluss der Überlappungslänge (a), der Dicke der Klebefuge (b) und der unterschiedlichen Klebstoffarten (Epoxy, Polyurethane PU und Acrylharz ADP) (c) auf die Spannungsverteilung in einer Holz-Holz-Verbindung

## Tragelemente aus Holz-Leichtbeton

Projekt «Wood and wood-based concrete: The building material of the future?» (Zwicky Daia, HES-SO)

**Das Projekt befasst sich mit der Entwicklung neuer Grundlagen für Bauteile aus Holz und Holz-Leichtbeton. Neben der statischen Funktion tragen diese neuen Bauelemente zur akustischen und thermischen Isolation bei. Sie weisen damit wirtschaftliche und ökologische Vorteile auf.**

Zementgebundene Holzprodukte werden schon lange für nicht tragende Zwecke eingesetzt, beispielsweise als Schall- oder Brandschutzplatten. Prinzipiell wären Bauteile aus Holz-Leichtbeton auch für tragende Decken und Wände verwendbar und könnten damit neben statischen Anforderungen auch weitere Funktionen (Wärme-, Schall- und Brandschutz) übernehmen. Gegenwärtig sind jedoch die Kenntnisse für eine praktische Anwendung von Tragelementen aus Holz-Leichtbeton noch zu gering. Es stellen sich insbesondere folgende Fragen: Welche Zusammensetzung soll Holz-Leichtbeton für einen bestimmten Einsatzzweck aufweisen? Wie sollen die verwendeten Verbindungsmittel sein? Wie müssen ganze Decken- und Wandelemente wirtschaftlich konzipiert werden? Mit welchen Methoden können solche Bauteile bemessen werden?

### Grundlagen für die Entwicklung neuer Bauteile aus Holz-Leichtbeton

Die Forschenden entwickelten verschiedene Mischrezepturen für Holz-Leichtbeton und beurteilten diese als tragenden Baustoff (vgl. Abbildung 16). In Kombination mit der Prüfung verschiedener Verbindungsmittel entwarfen sie Decken- und Wandelemente aus Holz-Leichtbeton und untersuchten sie in grossmassstäblichen Belastungsversuchen. Neben dem Trag- und Bruchverhalten wurde auch das Langzeitverhalten experimentell und analytisch evaluiert. Daraus liessen sich praxisnahe Bemessungsansätze ableiten. Das Tragverhalten erlaubt den Einsatz solcher Deckenelemente im Wohn-, Büro- und Schulbau. Neben der statischen Funktion beurteilte man auch die Wärmeisolation und -speicherung, den Brand- und Schallschutz, die Nachhaltigkeit sowie die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit der Decken- und Wandelemente aus Holz-Leichtbeton.

### Neue Rezeptur für Holz-Leichtbeton

Rezepturen für Holz-Leichtbetone (HLB) liessen sich so definieren, dass ein neuer giessbarer, selbstverdichtender, leichter und wirtschaftlicher

Baustoff zur Verfügung steht. Die Untersuchungen zeigten, dass HLB grosse thermische Speicherkapazität aufweisen. Ihre thermischen Isolationseigenschaften sind vergleichbar mit anderen Leichtbetonen.

Die mechanischen Eigenschaften (z.B. Elastizitätsmodul oder Druckfestigkeit) von HLB sind jedoch gering und verhindern ihren Einsatz als Substitutionsmaterial für üblichen Leichtbeton. Bei Verwendung in Bauteilen müssen HLB deshalb mit anderen Komponenten im Verbund wirken können. Langzeitverformungen von HLB sind beachtlich und müssen im Tragwerksentwurf und -nachweis berücksichtigt werden.

HLB lassen sich als Unterlagsboden oder für den Brandschutz einsetzen, z.B. als Ummantelung von Holzteilen. Dennoch können HLB dank des beachtlichen Heizwerts in der (Kehricht-)Verbrennung recycelt werden. Besondere Rauchgasbehandlung oder Feuerwehrausrüstung ist beim Verbrennen von HLB nicht erforderlich. Wegen der hohen Verbrennungsrückstände sollten HLB zusammen mit anderen Brennstoffen verbrannt und die weitere Nutzung der Aschen untersucht werden.

### Bauen mit Holz-Leichtbeton ist effizient und ökologisch

Tragende Bauteile mit Holz-Leichtbeton sind leichter als traditionelle Holz-Beton-Verbundbauteile. Sie bieten integrierten Schall-, Wärme- und Brandschutz und sind Wärmespeicher. Dank des hohen Holzanteils basieren die neuartigen Bauteile weitgehend auf erneuerbaren Ressourcen. Sie können nach ihrem Abbruch in der Energiegewinnung verbrannt werden und weisen damit gegenüber anderen Baustoffen ökologische Vorteile auf. Die entwickelten Bemessungsansätze erlauben das Bauen mit Holz-Leichtbeton und tragen so dazu bei, die Nutzung des in der Schweiz verfügbaren Holzvorrats wettbewerbsfähiger zu machen.

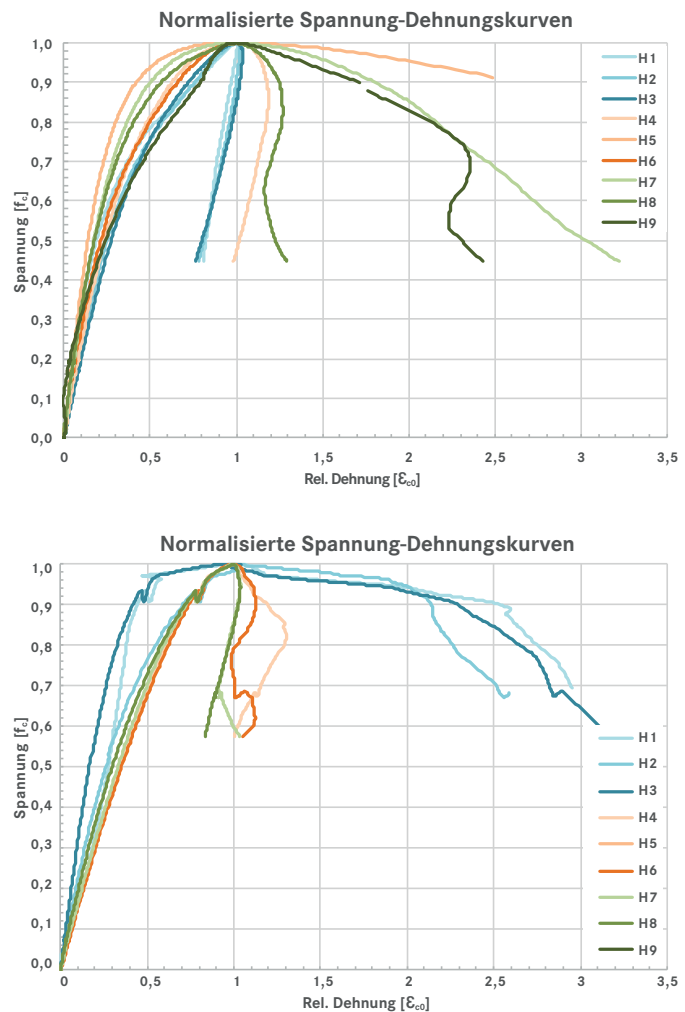
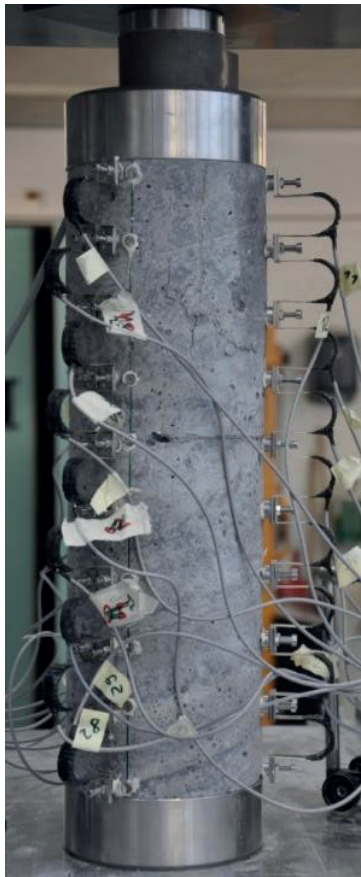


Abb. 16 Druckversuche an Holz-Leichtbetonen mit zwei verschiedenen Rezepturen

## Buchenfurnierschichtholz für Tragwerke

Projekt «Innovative and reliable structures made of beech wood» (Frangi Andrea, ETH Zürich)

**Buchenholz wird bisher vor allem als Energieholz genutzt. Mit der Entwicklung neuartiger, hochwertiger und zuverlässiger Tragwerke aus Buchenfurnierschichtholz lässt sich Buche als starker, zuverlässiger und nachhaltiger Baustoff in der Praxis einsetzen.**

Langfristig muss man mit einem erhöhten Aufkommen an Laubholz und einem Rückgang an Nadelholz rechnen. Damit erhält Buchenholz eine bedeutende Rolle als forstlicher Rohstoff, der zudem

über sehr gute mechanische Materialeigenschaften verfügt. Wird Buche bisher primär als Energieholz genutzt, ist es künftig sinnvoll, vermehrt mit Buchenholz zu bauen. Dazu braucht es innovative Ideen und neuartige Anwendungen für Buchenholz. Im Vordergrund des Projektes stand die Entwicklung von Fachwerken sowie Holz-Beton-Verbunddecken aus Buchenfurnierschichtholz. Dieses hat sehr gute mechanische Eigenschaften und weist einen höheren Homogenisierungseffekt im Vergleich zu Vollholz und Brettschichtholz auf und besitzt somit eine höhere Zuverlässigkeit der mechanischen Eigenschaften. Durch die Anwendung von Querlagen verfügt es zudem über eine hohe Formstabilität.

### Neuartige Fachwerke und Holz-Beton-Verbunddecken aus Buchenfurnierschichtholz

Die entwickelte Verbunddecke besteht aus 40 bis 60 mm dicken Furnierschichtholzplatten aus Buche und einer 120 mm dicken Betonschicht. Die Buchenplatten dienen zunächst als Schalung, dann als Tragelement im Verbund mit dem Beton und schliesslich bilden sie eine Deckenuntersicht. Den Verbund zwischen Beton und Holz gewährleisten 15 mm dicke, ins Holz gefräste Kerben, welche eine mechanische Verzahnung in Form von Betonnocken entstehen lassen. Die umfassenden analytischen und experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass durch eine optimale Auslegung der Verbunddecke ein zuverlässiges und duktileres Tragverhalten im Bruchzustand sichergestellt wird (vgl. Abbildung 17). Für die Fachwerke aus Buchenfurnierschichtholz wurden Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen mit innen liegenden Stahlplatten oder Bolzenverbindungen mit aussen liegenden Stahlplatten untersucht. Die Versuche an Verbindungen und Fachwerken zeigten, dass die Verwendung von Buchenfurnierschichtholz mit Querlagen das Aufspalten des Holzes verhindert, und dadurch lässt sich ein duktileres Bruchverhalten erreichen. Die entwickelten duktilen Verbindungen erlauben grosse Verformungen, ohne dass sie kollabieren

oder ihrer Traglast nachgeben. Mit einer duktilen Bauweise lässt sich die Robustheit von Tragwerken beträchtlich steigern. Die entwickelten Tragwerke aus Buchenfurnierschichtholz leisten damit einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung von Zuverlässigkeit, Duktilität und Robustheit von Tragwerken im Ingenieurholzbau.

### Bereit für die Praxis

Die Projektergebnisse zeigen das grosse Potenzial und das günstige Tragverhalten der Holz-Beton-Verbunddecke und der Fachwerke aus Buchenfurnierschichtholz. Mit der Anwendung von Buchenfurnierschichtholz können die Verbindungen optimiert und sehr hohe Tragfähigkeiten erreicht werden. Zudem lassen sich ein günstiges nicht lineares Tragverhalten im Bruchzustand und ein duktileres Versagen erzielen. Die entwickelten Bemessungsgrundlagen erlauben eine experimentell abgesicherte und wirtschaftliche Anwendung von Buchenholz im Ingenieurholzbau und steigern dadurch den Absatz und die Wertschöpfung von Buchenholz. Die entwickelte Holz-Beton-Verbunddecke aus Buchenholz wurde erstmals im ETH House of Natural Resources (Zürich, Höggerberg) umgesetzt (vgl. Abbildung 3).

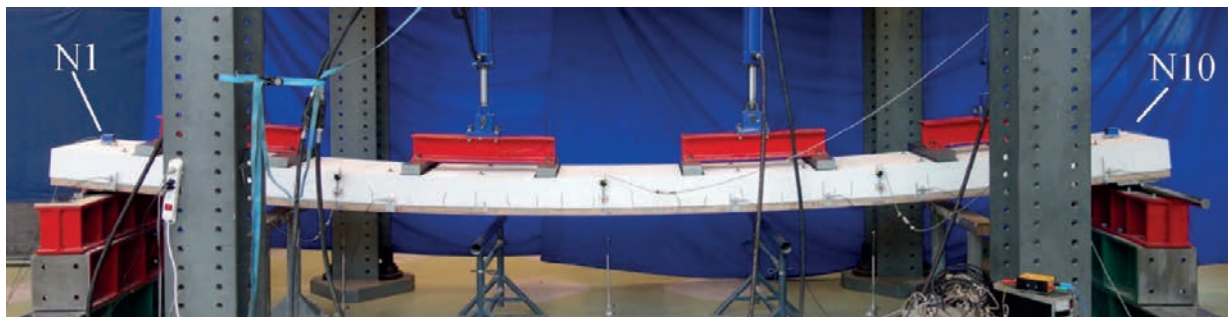


Abb. 17 Duktileres Tragverhalten der entwickelten Holz-Beton-Verbunddecke mit Furnierschichtholzplatten aus Buche

### Holzdecke mit verbessertem Schallschutz im Tieftonbereich

Projekt «Acoustically optimised floor system made of hardwood» (Krajči Lubos, K+I Ingenieurbüro für Akustik und Bauphysik GmbH)

**Zur vermehrten Anwendung von Holztragwerken sind zuverlässige Angaben zum Schallschutz unerlässlich. Ziel war die Entwicklung einer neuen Holzdeckenkonstruktion mit verbesser-**

**ten Schallschutzeigenschaften im Tieftonbereich, die bei mehrgeschossigen Wohn- und Bürobauten einsetzbar ist.**

Insbesondere bei mehrgeschossigen Bauten sind die Schallschutzanforderungen strenger als bei eingeschossigen Bauten oder Einfamilienhäusern. Um die Anforderungen erfüllen zu können, müssen die Holzdeckenkonstruktionen oft mehrschichtig und mit zusätzlicher Beschwerung ausgeführt



werden. Solche komplexen und mehrschichtigen Aufbauten führen zu relativ dicken Deckenkonstruktionen, die teurer und dadurch gegenüber einer konventionellen Stahlbetondecke nicht konkurrenzfähig sind. Zudem können Holzdeckenkonstruktionen, welche die Schallschutzanforderungen erfüllen, trotzdem subjektiv nicht zufriedenstellend wirken. Dieses Problem wird durch die ungenügenden Schalldämmeigenschaften im Tieftonbereich unterhalb 200 Hz (z. B. Gehen auf der Konstruktion, Springen, Dolby Surround, Home Cinema usw.) verursacht. Diese tiefen Frequenzen sind in der Schallschutznorm nicht berücksichtigt und werden rein rechtlich als unproblematisch angeschaut.

### Decke für Mehrfamilienhäuser und Büros

Die Forschenden entwickelten einen Prototyp einer multifunktionalen, gedübelten Brettstapeldecke aus Buchenholz mit verbesserten Trittschalleigenschaften im Tieftonbereich. Im Vordergrund des Projektes stand die Anwendung der Holzdeckenkonstruktion in Mehrfamilienhäusern und in mehrgeschossigen Bürobauten. Das Verhalten der entwickelten Holzdeckenkonstruktion in Bezug auf Schallschutz untersuchte man mit umfassenden experimentellen Untersuchungen und numerischen Simulationen, wobei man auch den Einfluss der Holzdübelverbindung auf die Schallübertragung analysierte. Weiter untersuchten die Forschenden auch die Schallübertragungen durch die Stossstellen beim Auflager, sogenannte Flankenwegübertragungen. Zudem evaluierte man verschiedene Entkoppelungselemente.

### Wesentliche Verbesserung

Während der Untersuchungen mass man wichtige dynamische Holzeigenschaften sowohl der einzelnen Holzteile als auch vom gesamten Deckensystem. Diese Daten dienen der detaillierten Modellierung der Schallübertragung durch gedübelte Brettstapeldecken aus Buchenholz. Die modalen Transferfunktionen – als Resultat der experimentellen Modalanalyse – wurden mit dem numerischen Modell verglichen. Dies erlaubte die Optimierung und Validierung des Modells. Mit dem numerischen Modell war es möglich, die Schallabstrahlung des Deckensystems in den angrenzenden Raum zu ermitteln. Letztlich mass und optimierte man die gesamte Konstruktion in einem Akustik-Labor. Die Optimierung erfolgte durch den Einbau eines schwimmenden Unterlagsbodens und einer frei gespannten Unterdecke aus Brettstapeln. Diese montierte man bei den Auflagepunkten körperschallentkoppelt, sodass sich die Schallübertragungen durch die flankierenden

Bauteile minimieren liessen. Die Messungen im Akustik-Labor haben gezeigt, dass sich die geplante Verbesserung der Trittschalldämmung um 10 dB unterhalb 200 Hz erreichen liess (vgl. Abbildung 18). Die erhöhten Anforderungen nach der Norm SIA 181:2006 für Stockwerkeigentum konnte man problemlos einhalten.

### Wirtschaftlicher und guter Schallschutz im Tieftonbereich

Die entwickelte Deckenkonstruktion hat gute Trittschalleigenschaften, auch im Tieftonbereich. Sie ist mit einer konventionellen Stahlbetondecke vergleichbar. Die Anwendung von korrekt dimensionierten, elastischen Lagern reduziert zudem die Schallübertragung durch flankierende Bauteile und reduziert gleichzeitig die Kosten für einen aufwendigen Trittschallschutz.



Abb. 18 Messung der Trittschalldämmung nach der Optimierung des Deckensystems

## Optimiertes Tragwerk für mehrgeschossige Holzbauten

Projekt «Earthquake-resistant wood structures for multi-storey buildings» (Steiger René, Empa)

**Für Gebiete mit niedriger bis mittlerer Seismizität und moderater Beanspruchung durch Wind- einwirkung wurden umfassende Experimente an Verbindungen, Wandelementen und Gebäuden durchgeführt. Diese waren die Basis für die Entwicklung eines optimierten Holztragwerkssystems, einer verformungsbasierten Bemessungsmethode nach den Grundsätzen der Kapazitätsbemessung und eines Belastungsprotokolls für quasi-statische, zyklische Versuche.**

Künftig werden eine zunehmende Anzahl an Wohn-, Büro und Schulbauten mittlerer Höhe (3 bis 8 Stockwerke) vollständig aus Holz gebaut werden. Der klassische Holzbau bedarf daher einer Weiterentwicklung, insbesondere was die für mehrgeschossige Tragwerke wichtigen horizontalen Aussteifungselemente und deren Bemessung für Erdbeben- und starke Windbeanspruchung betrifft. Dabei müssen sämtliche weiteren Randbedingungen, z. B. Gebrauchstauglichkeit, Brandschutz, Schallschutz und Ressourcenverbrauch, beachtet werden.

### Tragwerksteile mit entsprechender Bemessungsmethode

Die Forschenden entwickelten speziell für horizontale Beanspruchungen (Wind, Erdbeben) optimierte Tragwerksteile für mehrgeschossige Holzbauten. Der Fokus lag dabei auf Gebieten mit niedriger bis mittlerer Seismizität und moderater Beanspruchung durch Windeinwirkung. Die Forschenden verwendeten dabei die verformungsbasierte Bemessungsmethode, die auf den Grundsätzen der Kapazitätstheorie aufbaut: Es werden Zonen im Tragwerk definiert, welche sich bei einem Extremereignis inelastisch verformen oder aber elastisch bleiben. Das Projekt wurde in drei Module unterteilt: Im Modul 1 wurde das Verhalten von Verbindungen unter monotoner und zyklischer Beanspruchung untersucht. Im Modul 2 stand das Verhalten von Wandelementen (vgl. Abbildung 19) und von relevanten angrenzenden Tragwerksteilen im Fokus und im Modul 3 untersuchte man das Verhalten des Gesamttragwerks. Letztlich wurden Vorschläge für ein optimiertes Tragwerk gemacht und geeignete Methoden zu dessen Bemessung entwickelt.

### Angepasstes Modell

Die Resultate aus den Versuchen an Verbindungen zeigten, dass die Bemessungsregeln gemäss Euro-

code 5 für genagelte und geklammerte Verbindungen zwischen OSB-Platten und Holz bezüglich Einfluss des Kraft-Faserwinkels, der Rand- und Zwischenabstände der Verbindungsmittel und der Berechnung der Traglast überprüft werden sollten. Rüttelversuche an einem mehrgeschossigen Holzrahmenbau mit Holz-Beton-Verbunddecken haben beachtliche Unterschiede in der Tragwerksteifigkeit zwischen Experiment und Bemessungsmodell gezeigt. Der Grund dafür war, dass die Steifigkeit der aussteifenden Wände und der als nicht tragend betrachteten Komponenten unterschätzt wurde. Ausserdem wurde im Modell die Reibung nicht berücksichtigt. Diese gängige Annahme in der Bemessungspraxis ist in der Forschung ungeeignet, wenn man Experiment und numerisches Modell korrekt abgleichen will. Es wurden daher Reibungsversuche an Teilen der Tragwände gemacht, um anhand der ermittelten statischen und kinetischen Reibungskoeffizienten das numerische Modell zu verbessern. Man entwickelte angepasste Belastungsprotokolle für zyklische Versuche an Verbindungen und Wandelementen. Diese führen im Vergleich zu Protokollen für Gebiete mit hoher Seismizität zu einer geringeren Anzahl an Lastzyklen und geringeren Anforderungen bezüglich Schadensakkumulation. Dadurch werden für Gebiete mit niedriger bis mittlerer Seismizität wirtschaftlichere Lösungen möglich. Mithilfe einer Parameterstudie an Systemen mit einem Freiheitsgrad konnten zudem erste Beziehungen zwischen Verhaltensbeiwert und Duktilität gemacht werden. Diese Beziehungen erlauben die Anwendung der im Stahlbetonbau verwendeten Bemessungsmethode (N2-Methode gemäss Eurocode 8) auch auf Holztragwerke.

### Wettbewerbsfähig, planungssicher und zuverlässig

Die speziell für die Einwirkungen Starkwind und Erdbeben – in Grössenordnungen, wie sie in der Schweiz auftreten – entwickelten und optimierte Tragwerksteile für mehrgeschossige Holzbauten leisten zusammen mit einer Standardisierung der Verbindungen und der Weiterentwicklung der Bemessungs- und Prüfmethode einen wesentlichen Beitrag für die Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit des Holzbaus gegenüber den konkurrierenden Bauweisen. Neben der verbesserten Wirtschaftlichkeit werden zudem grössere Planungssicherheit und höhere Zuverlässigkeit erreicht. Aufgrund der ermittelten Daten aus experimentellen Versuchen an Verbindungen, Wandelementen und Gebäuden können Ingenieure Steifigkeit, Traglast und Verformungskapazität in der statischen Bemessung verlässlicher schätzen.



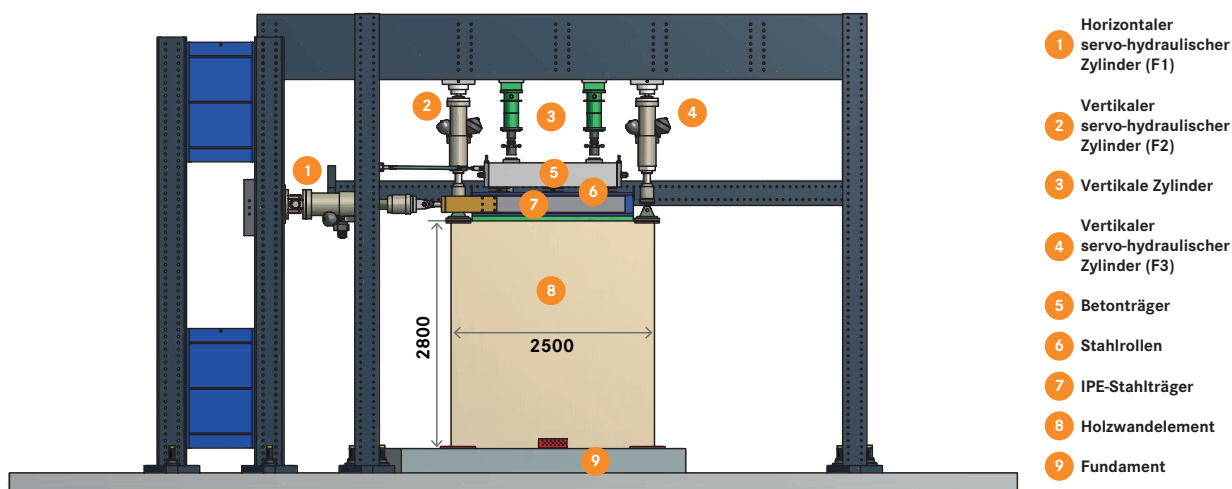


Abb. 19 Versuchseinrichtung an der Empa für quasi-statische, zyklische Versuche an Wänden

## Prototypen für robotergestützte Fertigung des konstruktiven Holzbaus

Projekt «Robot-assisted assembly of complex timber structures» (Kohler Matthias, ETH Zürich)

**Mithilfe von Robotern lassen sich komplexe Holztragwerke aus einfachen Grundelementen präzise und ressourcenschonend zusammensetzen. Während fünf Jahren untersucht eine Forschungsgruppe anhand mehrerer 1:1-Prototypen, wie sich digitale Entwurfs- und Fabrikationsprozesse auf den konstruktiven Holzbau der Zukunft auswirken.**

Angesichts der weltweiten Verknappung von Ressourcen wird deren effizientere Nutzung immer wichtiger. Einen Ansatz dafür stellt die robotergestützte Assemblierung komplexer Holztragwerke dar. Im Gegensatz zu den herkömmlichen Techniken erlaubt diese Methode, geometrisch unterschiedliche Tragwerksformen präzise und effizient – ohne Materialverschnitt – herzustellen. Zugleich können mithilfe der robotergestützten Assemblierung alternative Konstruktionstechniken entwickelt werden, die auch für einfaches Konstruktionsvollholz geeignet sind. Weitere Vorteile dieses Verfahrens liegen in der Möglichkeit, gestalterische und fabrikationstechnische Eigenschaften (z.B. geometrisch differenzierte Strukturen bei

gleichbleibender Qualität der Holzverbindungen) zu integrieren. So lässt sich die Herstellung komplexer Holzbauteile nachhaltig gestalten.

## Prototypen als Demonstrator für neue Entwurfs- und Fabrikationsprozesse

Die Forschenden entwickelten neuartige Konstruktionsstrategien in Kombination mit geeigneten Verbindungsmethoden für den computergestützten Entwurf und die robotergestützte Assemblierung komplexer Holztragwerke. Dabei legte man den Fokus auf die Verwendung von einfachen und kurzen Elementen aus Konstruktionsvollholz. Diese stehen in grosser Menge zur Verfügung und lassen sich mithilfe von Industrierobotern effizient und präzise zu räumlich-komplexen Tragwerkstrukturen fügen. Auf der Grundlage eines Kriterienkataloges entwickelten die Forschenden ein digitales Entwurfs- und Fabrikationsverfahren. Dieses diente der Erforschung neuartiger Konstruktionstechniken. Darauf aufbauend wurden die gewonnenen Resultate auf grössere Massstäbe übertragen, die zum Bau mehrerer 1:1-Prototypen als Demonstrator führten (vgl. Abbildung 20). Diese lieferten die analytische Grundlage, um neue, roboterbasierte Fabrikationsprozesse genau zu charakterisieren und in der Industrie effizient umzusetzen.

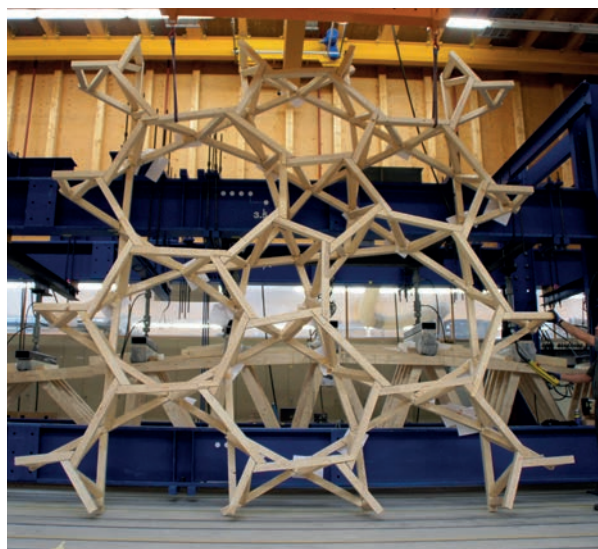
## Verklebungstechnologie als Basis

Eine zentrale Erkenntnis der Forschung ist, dass für sequenzielle, robotische Aufbauprozesse von Tragwerkstrukturen aus kleinteiligen Grundelementen insbesondere geometrisch einfache Stossverbindungen geeignet sind. Hierzu wurde eine neuartige Verklebungstechnologie für Stumpf-Stossverbindungen entwickelt. Diese kann nicht nur weitgehend automatisiert werden, sondern erlaubt eine höhere geometrische Variation der Verbindung selbst. Um die Tragfähigkeit der verklebten Verbindung zu erhöhen, können die Verbindungsflächen mechanisch behandelt werden, z. B. durch kegelförmige Einfräsungen. Auf dieser Verbindungstechnik basierend wurden entsprechende Tragwerktypologien und -ansätze entwickelt. Den Entwurf solcher Tragstrukturen erforschte man mit speziellen computergestützten Modellierungswerkzeugen. Diese wiederum lassen sich in einen nahtlosen digitalen Workflow für die Auswertung der Tragfähigkeit der Struktur integrieren. Der damit verbundene additive Fabrikationsprozess, der massgeblich auf die Genauigkeit der Elementpositionierung und der jeweiligen Elementgeometrie angewiesen ist, wurde im Projekt durch ein spezielles Scanverfahren erweitert: Die einzelnen

Holzelemente werden vorgängig vermessen, um die notwendige bauliche Präzision zu erreichen. Dieser prototypische Entwurfs- und Fabrikationsprozess wurde im Realmasstab anhand mehrerer 1:1-Prototypen demonstriert und validiert.

## Vielfältige Möglichkeiten in der Fertigung

Das Projekt liefert grundlegende Daten für den computergestützten Entwurf und die robotergestützte Assemblierung komplexer Holztragwerke. Diese Grundlagen sind für die ganze Holzbranche wesentlich, da sich damit neue Umsetzungsmöglichkeiten eröffnen. Ferner kann die innovative Anwendung und Verknüpfung verschiedener digitaler und rechnergestützter Werkzeuge als Wegweiser für die Entwicklung der digitalen Fabrikation im Bauwesen dienen. Zum einen werden marktübliche Softwares miteinander verknüpft und ein programmierbares Entwurfsmodell erstellt, in dem alle Daten logisch gekoppelt sind. Zum anderen werden die bisherigen aufeinanderfolgenden und zeitlich getrennten Planungs- und Fertigungsschritte infrage gestellt und stattdessen neue Strategien erprobt, in denen die Vorgänge simultan verlaufen.



**Abb. 20** Vollmassstäbliche Prototypen als Demonstration und Validierung der entwickelten computergestützten Entwurfs- und robotergestützten Fabrikationsprozesse für die Assemblierung komplexer Holztragwerke.

# LITERATUR

**Bartlomé O.**, 2013. Subjektive Wahrnehmung von Schall, Tagungsband, Holzbau Forum, 4. HolzbauSpezial «Akustik & Brandschutz», Bad Wörishofen.

**Frangi A.**, 2014. Decken- und Rahmensysteme aus Laubholz – ETH House of Natural Resources, Tagungsband, 20. Internationales Holzbau-Forum IHF, Garmisch-Partenkirchen.

**Frangi A., Steiger R.**, 2015. Mit Laubholz zu höheren Leistungen, Tagungsband, 47. Fortbildungskurs «Moderner Massivbau aus Holz – vom Einfamilienhaus bis zum Hochhaus», Swiss Wood Innovation Network S-WIN, Weinfelden.

**Glanzmann J., Hegglin R., Humm O., Knüsel P., Sidler C.**, 2012. Holzbau – mehrgeschossig, Schriftenreihe Nachhaltigkeit, Faktor Verlag, Zürich, 152 Seiten.

**Heeren N., Jakob M., Martius G., Gross N., Wallbaum H.**, 2013. A component based bottom-up building stock model for comprehensive environmental impact assessment and target control, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2013; 20: 45–56.

**Herzog T., Natterer J., Schweitzer R., Volz M., Winter W.**, 1991, Holzbau Atlas, 2. neu bearb. Auflage, Detail, München.

**Kolb J.**, 2010, Holzbau mit System, 3. Auflage, Birkhäuser, Basel, 320 Seiten.

**Krackler V., Keunecke D., Niemz P.**, 2010. Verarbeitung und Verwendungsmöglichkeiten von Laubholz und Laubholzresten, ETH Zürich, Institut für Baustoffe IfB, IfB-Projektstudie.

**Lignum**, 2012. Klimaschonend und energieeffizient Bauen mit Holz – Lignatec Nr. 25 (Grundlagen) und Nr. 26 (Umsetzung).

**Lignum**, 2016. Erstes Holz-Hochhaus der Schweiz in Risch Rotkreuz, Lignum Pressemitteilung, 6.9.2016.

**Lignum**, 2017. Bauten in Holz – Brandschutzanforderungen, Lignum-Dokumentation Brandschutz 1.1.

**Niemz P., Sonderegger W.**, 2017. Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 400 Seiten.

**SAH**, 2000, Verbindungstechnik im Holzbau, Tagungsband, 32. Fortbildungskurs, Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung, Weinfelden.

**Schickhofer G. et al.**, 2010, BSPhandbuch: Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz, Technische Universität Graz & holz.bau forschung gmbh, Graz.

**SIA**, 2014. Verstärktes Engagement bei der Erarbeitung der Eurocodes 2nd Generation (EC2G) – Projektbeschreibung 2015–2020.

**Steurer A.**, 2006. Entwicklung im Ingenieurholzbau - Der Schweizer Beitrag, Birkhäuser, Basel, 336 Seiten.

**TEC21**, 2016a. Arch\_Tec\_Lab, ETH Zürich, Schweizerische Bauzeitung, Sonderpublikation, Beilage zu TEC21 38–39.

**TEC21**, 2016b. Stadt aus Holz II, Schweizerische Bauzeitung, Sonderpublikation, Beilage zu TEC21 Nr. 47.

**VKF**, 2003. Brandschutzvorschriften 2003, Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen (VKF).

**VKF**, 2015. Brandschutzvorschriften 2015, Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen (VKF).

# DAS NFP 66 IN KÜRZE

Die Nationalen Forschungsprogramme (NFP) leisten wissenschaftlich fundierte Beiträge zur Lösung dringender Probleme von nationaler Bedeutung. Sie erfolgen im Auftrag des Bundesrates und werden vom Schweizerischen Nationalfonds durchgeführt. Die NFP sind in der Abteilung IV «Programme» angesiedelt ([www.snf.ch](http://www.snf.ch)).

## Nationales Forschungsprogramm «Ressource Holz»

Im Dialog mit der Wirtschaft und den Behörden liess das Nationale Forschungsprogramm «Ressource Holz» (NFP 66) wissenschaftliche Grundlagen und Lösungsansätze erarbeiten, um die Verfügbarkeit und Nutzung von Holz in der Schweiz zu optimieren. Das mit der Kommission für Technologie und Innovation (KTI) koordinierte Programm hatte einen Finanzrahmen von 18 Millionen Schweizer Franken, die Forschung dauerte von 2012 bis Ende 2016. Beteiligt waren 30 Forschungsteams aus der Schweiz.

Die **30 Forschungsprojekte** des NFP 66 widerspiegeln das breite Spektrum neuer Ansätze der Holznutzung und zeigen Lösungswege für eine bessere Ressourcenverfügbarkeit und ein nachhaltiges Management des Stoffkreislaufs. Ende 2013 definierte die Leitungsgruppe vier thematische Dialogfelder. Diese decken die wesentlichen Bereiche der Wald-Holz-Wertschöpfungskette ab und wurden im Austausch mit Wirtschaft, Verbänden und Behörden im Rahmen der Dialogplattformen weiterentwickelt. Die Ergebnisse aus Forschung und Dialog münden in die vier vorliegenden Teilsynthesen.

Weitere Informationen: [www.nfp66.ch](http://www.nfp66.ch)



### Dialogfeld und Synthese 1: Weiterentwicklungen im Holzbau

#### Neuartige, zuverlässige Tragwerke aus Buchenholz

Frangi Andrea, ETH Zürich

#### Robotergestützte Assemblierung komplexer Holztragwerke

Kohler Matthias, ETH Zürich

#### Akustisch optimierte Deckenkonstruktion aus Hartholz

Krajčič Lubos, Soundtherm GmbH

#### Kleberverbindungen in Tragwerkselementen aus Laubholz

Niemz Peter, ETH Zürich

#### Erdbebengerechtes Holztragwerk für mehrgeschossige Bauwerke

Steiger René, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa)

#### Bemessung geklebter Verbindungen im Holzbau

Vasilopoulos Anastasios, EPF Lausanne

#### Holz und Holz-Leichtbeton als Baustoffe der Zukunft?

Zwicky Daia, Hochschule für Technik und Architektur, Freiburg





### Dialogfeld und Synthese 2: Neue Wege zur holzbasierten Bioraffinerie

**Heissgasreinigung macht die Umwandlung von Holz in Gas wirtschaftlicher**  
Biollaz Serge, Paul Scherrer Institut (PSI)

**Aufspaltung von Lignin zur Herstellung aromatischer Verbindungen**  
Corvini Philippe, Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttenz

**Simultane Umwandlung von Holz in chemische Grundprodukte**  
Dyson Paul, EPF Lausanne

**Wood2Chem: Eine Informatikplattform für die Entwicklung der Bioraffinerie**  
Maréchal François, EPF Lausanne

**Herstellung von hochreinem Wasserstoff aus Holz**  
Müller Christoph, ETH Zürich

**Optimierte Rostfeuerungen für Holzbrennstoffe**  
Nussbaumer Thomas, Hochschule Luzern

**Kombinierte Herstellung von Treibstoffen und Chemikalien aus Holz**  
Rudolf von Rohr Philipp, ETH Zürich

**Prozessoptimierung für synthetisches Erdgas aus Holz**  
Schildhauer Tilman, Paul Scherrer Institut (PSI)

**Entwicklung künstlicher Proteine für eine bessere chemische Nutzung von Holz**  
Seebeck Florian, Universität Basel

**Ethanol als Benzinersatz: Wie Treibstoff effizient aus Holz gewonnen werden kann**  
Studer Michael, Berner Fachhochschule, Zollikofen

**Freie Radikale im Lignin als Schlüssel zur Herstellung «grüner» Chemikalien**  
Vogel Frédéric, Paul Scherrer Institut (PSI)



### Dialogfeld und Synthese 3: Innovative holzbasierte Materialien

**Holz und Holzwerkstoffe mit verbesserten Eigenschaftsprofilen für den Holzbau**  
Burgert Ingo, ETH Zürich

**Nanotechnologie im Dienste der Holzkonservierung**  
Fink-Petri Alke Susanne, Universität Freiburg

**Behandlung von Holzoberflächen mit Hilfe von Photoinitiatoren**  
Grützmaker Hansjörg, ETH Zürich

**Extraktion von Tanninen aus Rinden heimischer Nadelhölzer**  
Pichelin Frédéric, Berner Fachhochschule, Biel

**Ultraleichte bio-basierte Holzwerkstoffplatte mit Schaumkern**  
Thoemen Heiko, Berner Fachhochschule, Biel

**UV-Selbstschutz von Holzoberflächen durch Cellulosefasern**  
Volkmer Thomas, Berner Fachhochschule, Biel

**Neue Verarbeitungsmethoden für Cellulose-Nanokomposite**  
Weder Christoph, Universität Freiburg

**Nanofibrillierte Zellulose (NFC) in Holzbeschichtungen**  
Zimmermann Tanja, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa)



### Dialogfeld und Synthese 4: Holzbeschaffung und nachhaltige Holznutzung

**MOBSTRAT: Strategien zur Holzmobilisierung aus Schweizer Wäldern**  
Brang Peter, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)

**Ökologische Nutzung der Holzressourcen in der Schweiz**  
Hellweg Stefanie, ETH Zürich

**Ökonomische Analyse Schweizer Holzmärkte**  
Olschewski Roland, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)

**Den Holzmarkt verstehen: zwischen Versorgung und Multifunktionalität**  
Zarin-Nejadan Milad, Universität Neuenburg

# IMPRESSUM

## **Autorenteam:**

Prof. Andrea Frangi, ETH Zürich  
Jutta Glanzmann, Zürich

## **Empfohlene Zitierweise:**

Andrea Frangi, Jutta Glanzmann (2017): Weiterentwicklung im Holzbau, Thematische Synthese im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 66 «Ressource Holz», Schweizerischer Nationalfonds, Bern.

Erarbeitet und publiziert mit Unterstützung des Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 66 «Ressource Holz».



**Ressource Holz**  
Nationales Forschungsprogramm NFP 66



**SCHWEIZERISCHER NATIONALFONDS**  
ZUR FÖRDERUNG DER WISSENSCHAFTLICHEN FORSCHUNG

## **Leitungsgruppe:**

Dr. Martin Riediker (Präsident); Prof. Charlotte Bengtsson, Skogforsk (the Forestry Research Institute of Sweden), Uppsala, Schweden; Prof. Alain Dufresne, École d'ingénieurs en sciences du papier, de la communication imprimée et des biomatériaux, PAGORA, Institut Polytechnique de Grenoble, Frankreich; Prof. Birgit Kamm, Forschungsinstitut Bioaktive Polymersysteme, Teltow, Deutschland; Prof. Jakob Rhyner, Universität der Vereinten Nationen (UNU), Bonn, Deutschland; Prof. Liselotte Schebek, Institut IWAR, Technische Universität Darmstadt, Deutschland; Prof. Alfred Teischinger, Institut für Holzforschung, Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Österreich; Prof. Philippe Thalmann, Lehrstuhl für Städte- und Umweltökonomie, EPF Lausanne.

## **Koordinator der Synthese und des Dialogfeldes**

### **«Weiterentwicklung im Holzbau»:**

Daniel Studer, IC Infraconsult, Bern

### **Begleitgruppe und Sounding Board dieser Teilsynthese:**

Andrea Bernasconi (HEIG-VD); Christophe Sigrist (BFH); Werner Riegger (BAFU); Christoph Starck (LIGNUM); Thomas Wehrle (ERNE); Katharina Lehmann (Blumer-Lehmann)

## **Delegierte der Abteilung IV des Nationalen**

### **Forschungsrats:**

Prof. Nina Buchmann, ETH Zürich (bis Ende 2015);  
Prof. Claudia Binder, EPF Lausanne (ab 2016)

### **Bundesvertreter:**

Rolf Manser, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern

### **Programmkordinatorin:**

Dr. Barbara Flückiger Schwarzenbach, Schweizerischer Nationalfonds (SNF), Bern

### **Leiter Wissens- und Technologietransfer:**

Thomas Bernhard, IC Infraconsult, Bern; Dr. Krisztina Beer-Toth, IC Infraconsult, Bern (Mai 2015 bis Februar 2017)

### **Layout und Grafik:**

cR Kommunikation, Zürich;  
Alber Visuelle Kommunikation, Zürich

### **Übersetzung:** Trad8, Delémont

**Bilder:** Häring & Co. AG (Titelbild: Saldome in Riburg); Bürgi Schärer Architektur und Planung AG, Alexander Gempeler; ETHZ Zürich, Marco Carocari; Implenia Schweiz AG; Empa; Andrea Diglas/ITA/Arch\_Tec\_Lab AG; JHG Photography; Lignum, Michael Meuter; Stücheli Architekten AG; Blumer-Lehmann AG; KK Law; Burkard Meyer Architekten BSA, Baden, Markus Bertschi.

Für die erwähnten Forschungsergebnisse sind die jeweiligen Forschungsteams verantwortlich, für die Synthesen und die Empfehlungen die Autorenteam, deren Auffassung nicht notwendigerweise mit derjenigen des Schweizerischen Nationalfonds, der Mitglieder der Leitungsgruppe oder der Begleitgruppen übereinstimmen muss.



Der Holzbau ist im Vormarsch: vom Land Richtung Stadt, vom Pavillon zum Hochhaus, vom Neubau zum Bauen im Bestand. Im Interesse einer nachhaltigen Ressourcenpolitik braucht es aber noch mehr. Dabei gibt es zwei grosse Hebel: die Industrialisierung und die Digitalisierung. Im Zusammenspiel von Material und Bauprozess liegt ein grosses, noch nicht ausgeschöpftes Potenzial. Worauf es dabei ankommt, zeigen die Forschungsprojekte im Dialogfeld «Weiterentwicklungen im Holzbau» des NFP 66.