

# Schlussbericht

## Professur für Holzbasierte Materialien an ETH & Empa

<b>Projekttitlel</b>	Leistungsvereinbarung Professur für Holzbasierte Materialien
<b>Vertragsnummer</b>	09.0063.PJ / K034-2230 / 7-11.01
<b>Laufzeit</b>	1.10.2011 – 30.09.2015
<b>Datum Bericht</b>	15.10.2015
<b>Berichtsautoren/innen</b>	Prof. Dr. Ingo Burgert
<b>Projektleitung</b>	Prof. Dr. Ingo Burgert

### 1 Kurzbeschreibung

Im geförderten Projekt wurden Modifikationen und Funktionalisierungen durchgeführt, um dem Werkstoff Holz verbesserte oder neue Eigenschaften zu verleihen und somit die Entwicklung innovativer Holzprodukte zu initiieren. Dabei wurden durch die Übertragung von Erkenntnissen aus der Polymerforschung und der Nanotechnologie neue Ansätze zur Entwicklung holzbasierter und bioinspirierter Materialien umgesetzt. Um Holz wasserabweisende Eigenschaften aber auch neue Funktionen zu verleihen, wurden verschiedene in-situ Polymerisationstechniken auf das Holz übertragen. Eine verbesserte Witterungsbeständigkeit und verminderte Brennbarkeit wurde durch die Kombination des Holzes mit anorganischen Phasen erreicht. Des Weiteren wurden Konzepte zur Aktuatorik von verformbaren Holzelementen entwickelt.

## 2 Ausgangslage, Ziele und Inhalte des Projektes

Im Hinblick auf die Absatzproblematik Schweizer Holzprodukte ist es dringend erforderlich neue Entwicklungs- und Wertschöpfungspotentiale in der Schweizer Forst- und Holzwirtschaft zu generieren. Hierzu werden innovative Holzprodukte benötigt, welche eine aussergewöhnliche Leistungsfähigkeit und/oder besondere Eigenschaften besitzen. Diese sollten zudem die Kaskadennutzung des Werkstoffs Holz und ein nachhaltiges Bauen befördern. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf den Laubhölzern und insbesondere der Buche.

Das übergeordnete Ziel der Professur Holz-basierte Materialien ist es, zum einen die Zuverlässigkeit des Werkstoffs durch eine Verbesserung der spezifischen Eigenschaften des Holzes zu erhöhen und zum anderen durch neuartige Materialkombinationen neue Anwendungsfelder erschliessen zu können. Dazu wurden im Förderzeitraum neue grundlegende Ansätze gesucht, die Herausforderungen der Holzforschung mit wissenschaftlichen Ansätzen der Biomimetik und Erkenntnissen aus der Polymerforschung und der Nanotechnologie in einem sehr interdisziplinären Rahmen verbinden. Dabei wurden die wissenschaftlichen Aktivitäten der Professur auf folgende Forschungsbereiche fokussiert.

### ***Zuverlässigkeit von Holz***

Hinsichtlich einer notwendigen Erhöhung der Zuverlässigkeit des Holzes in den bekannten Anwendungsgebieten wurden mit den Themen Dimensionsstabilität, Brandschutz und Oberflächenqualität drei Forschungsfelder von herausragender Bedeutung bearbeitet. Es wurden verschiedene neue Holzmodifikationsansätze entwickelt, die neben einer Vielzahl von Publikationen auch zu 4 Patentanmeldungen geführt haben.

### ***Modifizierung von Holz***

Zur Erhöhung der Zuverlässigkeit wurden grundlegende Forschungsarbeiten zur Modifizierung von Holzzellwänden und Holzoberflächen durchgeführt. Dies umfasst verschiedene in-situ Polymerisationen, welche die Dimensionsstabilität des Holzes erhöhen, zwei Ansätze zur Mineralisation des Holzes, welche es ermöglichen, Kalziumkarbonat tief in die Holzstruktur einzubringen, sowie Oberflächenmodifikationen, welche bei bestmöglicher Bewahrung der ästhetischen Oberflächen den UV-Schutz erhöhen und zu wasserabweisenden Eigenschaften führen.

### ***Neuartige holzbasierte Materialien***

Weitere Ansätze für Materialkombinationen wurden verfolgt, um neue Anwendungsfelder in den Bereichen holzbasierte Hybridmaterialien sowie hochwertige Funktionsmaterialien zu erschliessen. Zu nennen sind hierbei in-situ Polymerisationen zur Etablierung funktioneller Moleküle im Holz sowie aktiverbare Holzstrukturen, die aufgrund der Einlagerung von Eisenoxidpartikeln im Magnetfeld bewegt werden können bzw. Holzelemente, die sich durch Änderungen der relativen Luftfeuchte verformen.

Die mit den Eigenschaftsverbesserungen oder neuen Funktionen ausgestatteten Holzmaterialien wurden auf verschiedenen Längenskalen charakterisiert, um die Struktur-Eigenschafts-Beziehungen zu untersuchen und daraus wichtige Erkenntnisse zur weiteren Optimierung der Modifikationsansätze und für mögliche Anwendungen in der Praxis abzuleiten. Unter anderem wurden die Wechselwirkungen des Holzes mit den modifizierenden Substanzen und der Feuchte sowie das mechanische Verhalten untersucht. Im Hinblick auf das Upscaling der Funktionalisierungen zu grösseren Holzdimensionen wurden auch Aspekte der Verklebung der Materialien berücksichtigt.

### 3 Projektergebnisse

Die Darstellung der wichtigsten Projektergebnisse orientiert sich entlang der Holzmodifikationsaktivitäten zur Erhöhung der Zuverlässigkeit des Holzes (Dimensionsstabilität, Brandschutz und Oberflächenqualität) sowie den Arbeiten zur Entwicklung neuartiger holzbasierter Materialien.

#### 3.1 Dimensionsstabilität durch in-situ Polymerisation

Im Berichtszeitraum lag der Fokus vornehmlich auf der in-situ Polymerisation von hydrophoben Monomeren in der Zellwand, um diese wasserabweisend zu machen und die Dimensionsstabilität durch reduzierte Wasseraufnahme und vermindertes Quellen und Schwinden zu erhöhen. Dabei galt es, ein Füllen der Zelllumina zu vermeiden, da dies nur geringen Einfluss auf die Dimensionsstabilität des Holzes hat, aber gleichzeitig zu einer deutlichen Gewichtszunahme führt. Für eine genaue Lokalisierung der eingebrachten Polymere ist eine Charakterisierung der Modifikation auf Zellwandebene vorzunehmen. Hierfür wurden hochauflösende Imaging-Techniken verwendet, die zusätzlich zu Strukturinformationen (Elektronenmikroskopie), auch chemische Informationen (Raman Spektroskopie) liefern (Abb. 1 unten). So konnte mittels Raman Spektroskopie gezeigt werden, dass es mit den verschiedenen Polymerisationstechniken möglich ist, Polymere in die Zellwand einzubringen und dabei unterschiedliche Verteilungen der Polymere in der Zellwand zu erzielen.

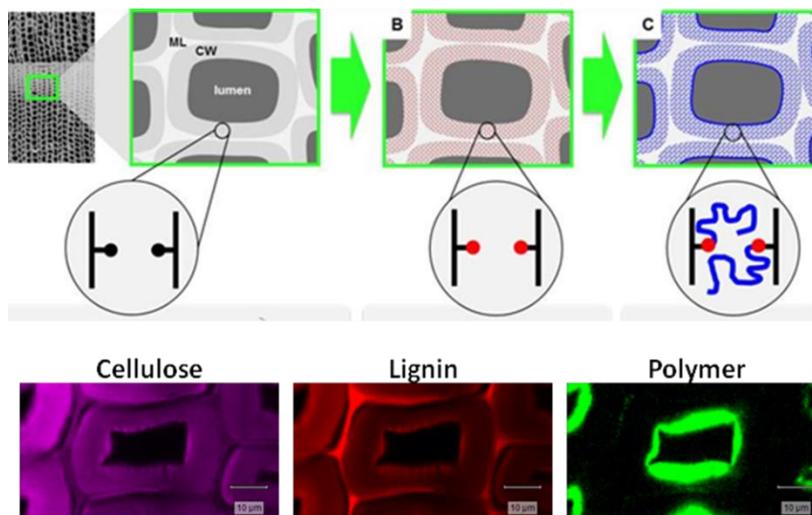


Abb. 1: Schematische Darstellung des Modifikationsansatzes (oben); Cellulose/Lignin/Polymer Verteilung in modifizierten Holzzellwänden mit Raman Imaging (unten)

Folgende Polymerisationsmethoden wurden erfolgreich auf das Holz übertragen:

#### *Radikalische Polymerisation mit einem Azo-Initiator*

Hierbei wird ein Azo-Radikalpolymerisationsinitiator an die Hydroxylgruppen der Holzzellwand kovalent gebunden und in weiterer Folge die Polymerisation eines eingebrachten Monomers von diesem Punkt aus gestartet. Durch diese kovalente Anbindung wird ein Auswaschen des Polymers verhindert.

#### *ATRP – Atomic Transfer Radical Polymerization*

ATRP bietet die Möglichkeit der sogenannten Controlled Free Radical Polymerization und kann ebenfalls verwendet werden, um Polymere in die Zellwand einzubringen. Der Vorteil von ATRP liegt insbesondere

darin, dass die Konzentration freier Radikale während der Polymerisation reduziert werden kann, wodurch der Polymerisationsprozess besser steuerbar wird.

### Co-Polymerisation von zellwandgebundenen Monomeren

Bei dieser Methode wird ein polymerisierbarer Precursor (bifunktionales Monomer) in die Zellwand eingebracht. Abhängig vom Precursor ist eine unterschiedliche Verteilung der polymerisierbaren Einheit (Methacryl-Gruppe) innerhalb der Zellwand möglich. Diese Methacryl-Gruppe dient als Anknüpfungspunkt für eine radikalische Co-polymerisation mit einem weiteren Monomer. In Folge der unterschiedlichen Verteilung der Methacrylgruppen ist die Anordnung des Polymers innerhalb der Zellwand ebenfalls kontrollierbar.

### ROP (Ringöffnende Polymerisation)

Mittels ringöffnender Polymerisation (ROP) ist es möglich, Caprolacton an die Zellwand zu binden und zu Polycaprolacton zu polymerisieren. Da es sich bei Polycaprolacton um einen biologisch abbaubaren Kunststoff handelt und die ringöffnende Polymerisation in einem Verfahrensschritt erfolgt, der sich prozesstechnisch vergleichsweise einfach umsetzen lässt, wurden die ersten Furniermodifikationen zum Upscalen mit diesem Modifikationsansatz vorgenommen.

Zur Charakterisierung des makroskopischen Verhaltens der modifizierten Proben wurden die Wasseraufnahme und die „anti-swelling-efficiency (ASE)“ sowie die Oberflächeneigenschaften mittels Kontaktwinkelmessungen bestimmt. Die Modifikationen führen zu deutlich hydrophoberen Holzoberflächen, einer stark reduzierten Wasseraufnahme sowie einer erhöhten Dimensionsstabilität, welches in Abb. 2 für die Co-Polymerisation von zellwandgebundenen Monomeren dargestellt ist.

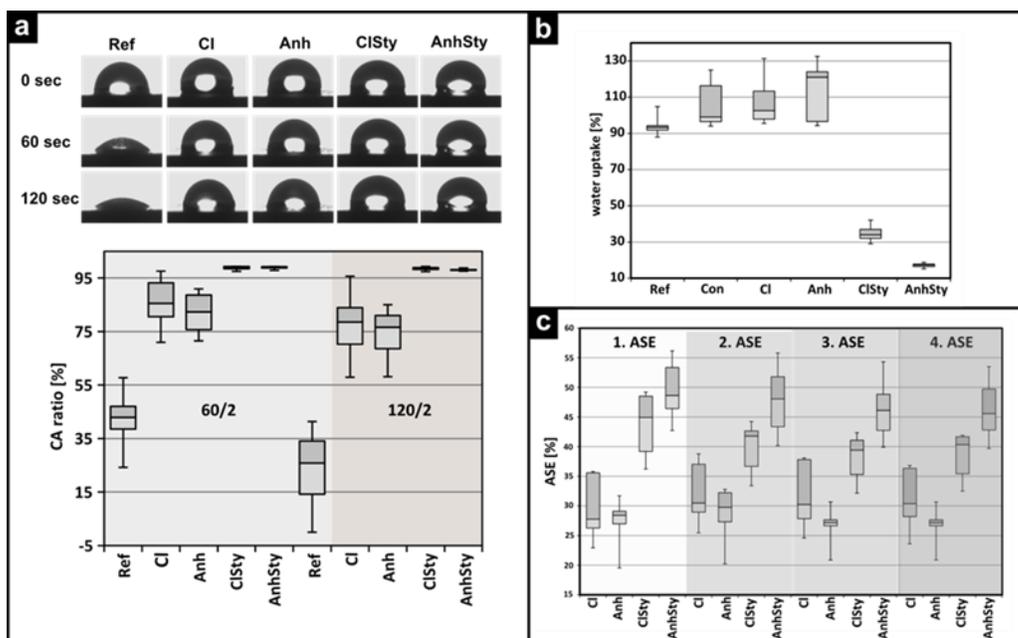


Abb. 2: Kontaktwinkelmessung (a), Wasseraufnahme (b) und Anti-swelling-efficiency (c) von mittels Co-Polymerisation von zellwandgebundenen Monomeren modifizierten Holzproben; Ref: Referenz; Con: Kontrolle; Cl: Methacryl-Chlorid; Anh: Methacryl-Anhydrid; ClSty, AnhSty: jeweilige Form nach in-situ Polymerisation von Styrol (Keplinger et al. (2015) Acta Biomaterialia)

Für das Upscaling vom Labormassstab zum Technikumsmassstab wurde ein erster Flachbettreaktor gefertigt, mit dem es möglich ist, Furniere mit einer Länge von 100 cm und einer Breite von 40 cm mit einer in-situ Polymerisation zu modifizieren. Basierend auf den gewonnenen Erfahrungen lassen wir zurzeit eine zweite Reaktorgeneration fertigen.

Die entwickelten Modifikationen führen zu einer deutlichen Verbesserung des Materialverhaltens. Deutliche Nachteile ergeben sich aus dem zurzeit noch notwendigen Einsatz synthetischer Polymere, welche den ökologischen Vorteil des Holzes schmälern. Die Verwendung organischer Lösungsmittel ist ein gewichtiges Hindernis für eine industrielle Umsetzung. Daher arbeiten wir zurzeit an wasserbasierten Alternativen, welche Einbussen in der Performance aber deutliche Vorteile beim Upscaling und bei der Implementierung erbringen sollen.

### 3.2 Brandschutz durch Mineralisation des Holzes

Durch die Mineralisation des Holzes besteht die Möglichkeit, Hybridmaterialien mit neuen Eigenschaftsprofilen zu entwickeln. Mittels Einbringung einer mineralischen Phase in die Nano- und Mikrostruktur können die exzellenten Eigenschaften des Holzes genutzt und gleichzeitig mit neuen Funktionen kombiniert werden.

Der Schwerpunkt der Mineralisationsarbeiten lag im Berichtszeitraum auf der Beeinflussung des Brandverhaltens durch ein Ausfällen von Kalziumkarbonat in der Holzstruktur. Zwei Modifikationsansätze, die es erlauben, die Mineralien auf einfache Weise tief in das Holz einzubringen, wurden zum Patent angemeldet. Alternierende Imprägnierungszyklen mit hochkonzentrierten Lösungen von Kalziumchlorid in Alkohol sowie Natriumkarbonat in Wasser sorgen unter Nutzung der unterschiedlichen Löslichkeiten dafür, dass eine gute Eindringtiefe erreicht werden kann. Auf Basis dieses einfachen und kostengünstigen Modifikationsverfahrens können auch andere Mineralien ins Holz eingelagert werden. Des Weiteren kann Kalziumkarbonat durch Imprägnierung der Holzproben in einer wässrigen Lösung von Dimethylkarbonat (DMC) und Kalziumchlorid ausgefällt werden (Abb. 3).

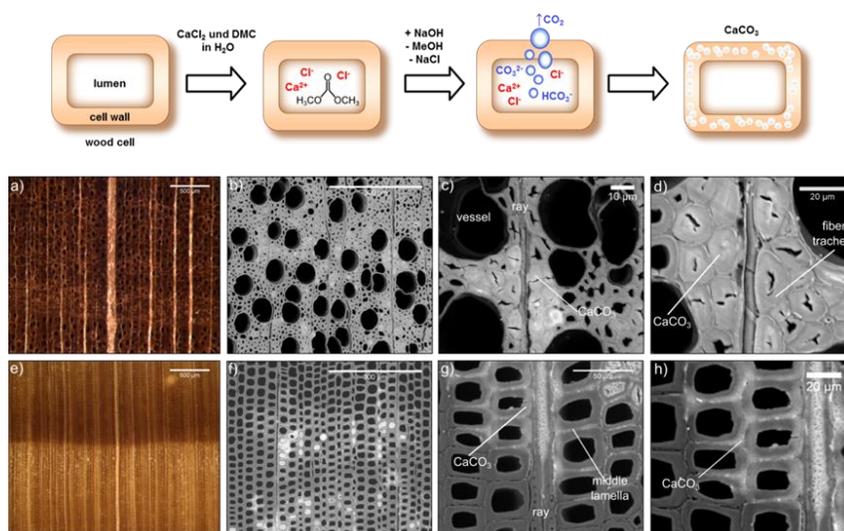


Abb. 3: Schema zur Mineralisation sowie licht- und elektronenmikroskopische Aufnahmen von Buche und Fichte: Freisetzung von Kohlendioxid im Holz in Gegenwart von Kalziumionen in der Holzstruktur (Merk et al. (2015) Green Chemistry, modifiziert)

Eine Erhöhung des pH-Werts bewirkt den Zerfall des Dimethylkarbonats zu Kohlendioxid und Methanol in der Holzstruktur. Hierbei bildet sich Kalziumkarbonat vorwiegend in den Zellwänden und Mikroporen des Holzes.

Die Entflammbarkeit von Holz stellt eine besondere Herausforderung im Bauwesen dar, daher wurde der Einfluss der eingebetteten Mineralien auf das Brandverhalten des Materials untersucht. Wie in Abbildung 4a dargestellt, wird mineralisiertes Holz, welches bei einer hohen Konzentration der Ausgangsstoffe behandelt wurde, im Vergleich zur unbehandelten Referenzprobe beim Erhitzen auf 250° C über längere Zeit wenig verändert. Die Hitzeentwicklung bei vollständiger Verbrennung sowie die maximale Geschwindigkeit der Hitzeentwicklung der mineralisierten Holzproben wurden zudem systematisch mittels Mikrokalorimetrie im Labormassstab bestimmt (Abb. 4b). Die Maximalgeschwindigkeit der Hitzeentwicklung ist unter anderem ein Mass dafür, wie leicht ein Werkstoff Gegenstände in der Umgebung zu entflammen vermag.

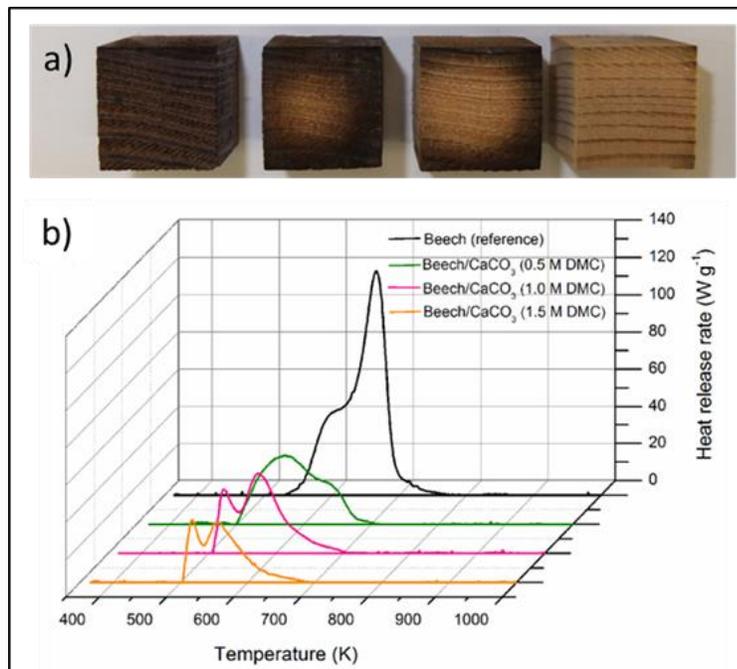


Abbildung 4.: (a) Foto eines unbehandelten Holzwürfels und mit aufsteigender Konzentration mineralisierte Holzwürfel, die ~250° C Hitze ausgesetzt wurden und (b) Mikrokalorimetrie-Messungen der Hitzeentwicklungsgeschwindigkeit unter kontrollierten Laborbedingungen (Merk et al. 2015, Green Chemistry, modifiziert)

Die Kalziumkarbonat/Holz-Komposite zeigen eine auf etwa ein Drittel reduzierte Gesamtverbrennungswärme und eine ebenfalls stark verminderte maximale Hitzeentwicklungsgeschwindigkeit im Vergleich zu unbehandeltem Holz.

Im Hinblick auf das Anwendungspotential dieser sehr umweltfreundlichen Mineralisierungstechnologien ist es von sehr grossem Vorteil, dass mit den beiden Ansätzen sehr unterschiedliche Einlagerungsmuster erzielt werden können. Wie in Abbildung 5 dargestellt, kann auf diese Weise die gesamte Holzwerkstoffproduktion adressiert werden. Vollholz, Vollholzwerkstoffe sowie Furnierlagenhölzer werden bevorzugt

mit dem alternierenden Ansatz behandelt, während beispielsweise die Faserwerkstoffbehandlung besonders von der 1 Topf Mineralisierung mit Dimethylkarbonat profitieren kann, da dort die Einlagerung vornehmlich in die Zellwand stattfindet.

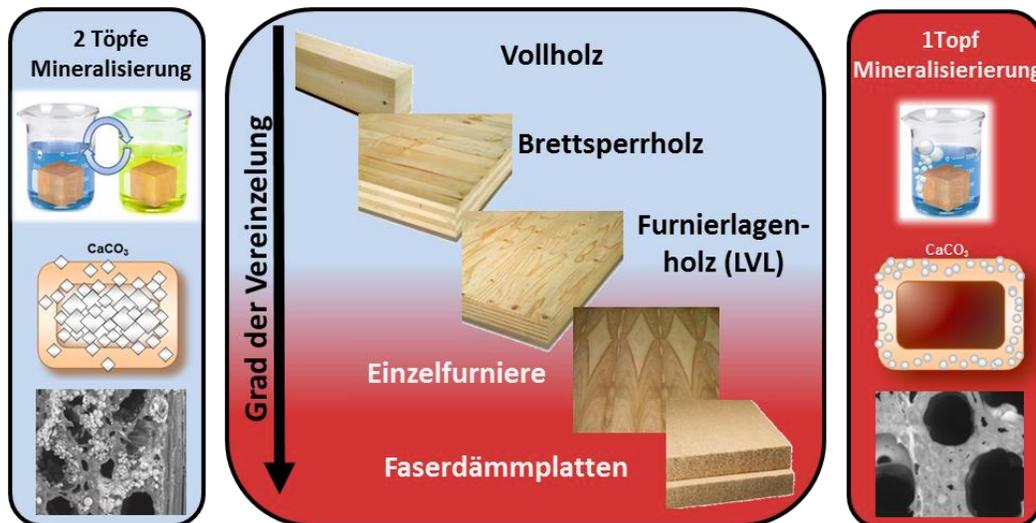


Abb. 5: Illustration des bevorzugten Einsatzes der jeweiligen Mineralisierungstechnologie entlang der Holz- und Holzwerkstoffkette

In der Mineralisierung des Holzes liegt grosses Potential, da es den ökologischen Charakter des Holzes unterstreicht und eine Vielzahl von Hybridmaterialkombinationen ermöglicht. Weiterer Forschungs- und Optimierungsbedarf besteht hinsichtlich der Stabilität der Einlagerung im Holz und den Einfluss auf das mechanische Verhalten, da Steifigkeit und Festigkeit negativ beeinflusst werden. Über die Anwendungen im Holzbereich hinaus, könnte die Methode auch die Modifikation von Zellulosegerüsten mit Kalziumphosphat ermöglichen und somit als Knochenersatzmaterial in der Medizin dienen.

### 3.3 Oberflächenbehandlungen zum Schutz der ästhetischen Eigenschaften

Holzoberflächen sind aufgrund der ästhetischen und haptischen Eigenschaften sehr gefragt. Allerdings ist das natürliche Holz nicht UV-stabil und witterungsbeständig, so dass es sowohl in Aussenanwendungen als auch in Innenanwendungen zu ungleichmässigen farblichen Veränderungen kommt. Insbesondere im dekorativen Innenausbau und Möbelbau ist zudem von Bedeutung, dass der Eintrag verschiedener Flüssigkeiten (Öle, Rotwein etc.) zu unerwünschten Farbveränderungen führen kann. Um die ästhetischen Eigenschaften zu bewahren und damit die Zuverlässigkeit des Holzes zu erhöhen, haben wir verschiedene Methoden zu Behandlung der inhomogenen und rauen Oberfläche weiterentwickelt.

Mit dem Fokus auf der Erhöhung der UV-Stabilität wurden Holzoberflächen mit dem sogenannten „layer-by-layer (LbL)“ Verfahren und mit der sogenannten „Chemical Bath Deposition (CBD)“ behandelt. Beide Verfahren haben gemein, dass dabei die UV-schützende Wirkung von Metalloxidpartikeln genutzt wird und diese zusätzlich mit Schichten mit wasserabweisenden Eigenschaften kombiniert werden können. Das LBL-Verfahren führt zu einer kaum sichtbaren Schutzschicht, ist allerdings nur bedingt witterungsstabil, so dass es sich vornehmlich für Innenanwendungen anbietet. Das CBD-Verfahren führt

zu einer leicht weisslichen/gelblichen Oberfläche, ist dafür aber deutlich robuster und witterungsbeständiger und daher für den Aussenbereich (z.B. Fassade) gedacht (Abb. 6).

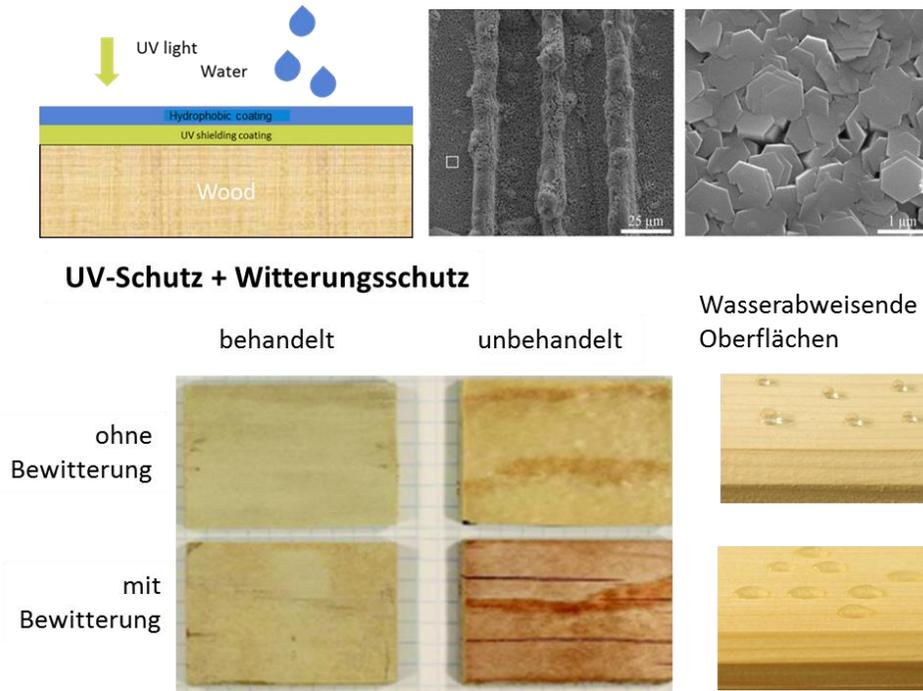


Abb. 6: Prinzip des modularen Aufbaus mit UV-Schutz und wasserabweisenden Eigenschaften. (oben, links); Partikelanordnung an der Holzoberfläche nach dem CBD-Verfahren (oben, rechts), CBD-Beschichtung und Referenzproben ohne und mit künstlicher Bewitterung (4 Wochen) sowie Illustration des wasserabweisenden Charakters einer Holzoberfläche.

Behandelte Fassadenelemente werden zur Zeit am ETH House of Natural Resources dem Praxistest unterzogen und die Farbänderungen verfolgt (Abb. 7).

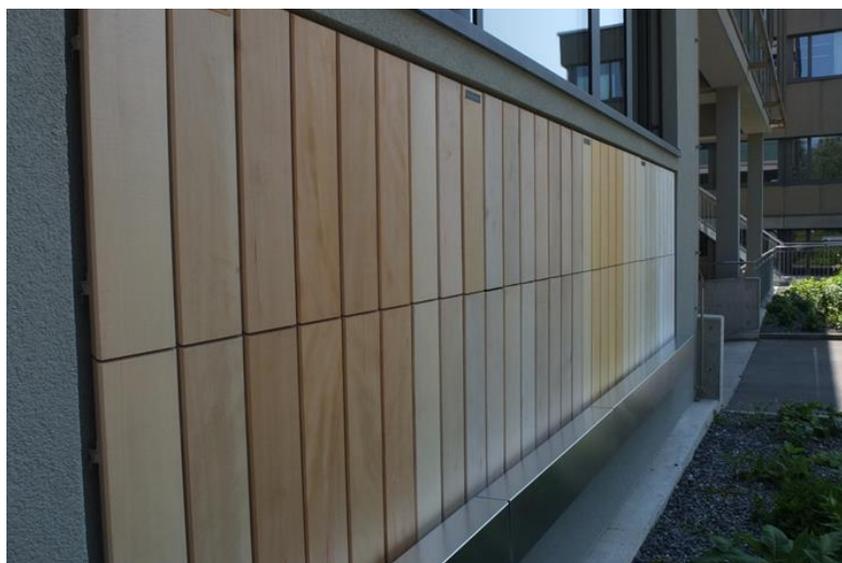


Abb. 7: Behandelte Fassadenelemente am ETH House of Natural Resources

Mit einem weiteren Verfahren können wir Holzoberflächen omniphobe Eigenschaften verleihen, so dass sie sowohl wasser- als auch ölabweisend wirken. Auch hierbei ist wichtig, dass die wertvolle Ästhetik der Oberflächen nur geringfügig beeinflusst wird (Abb. 8).

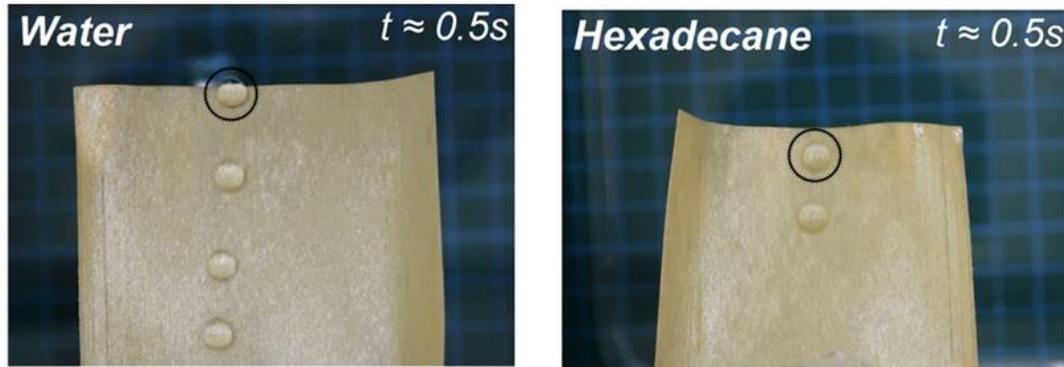


Abb. 8: Illustration der omniphoben Eigenschaften der modifizierten Holzoberflächen (polare und unpolare Flüssigkeiten können die Oberfläche nicht benetzen)

Die omniphoben Eigenschaften lassen sich darüber hinaus mit UV-Schutz kombinieren, so dass sehr inerte Holzoberflächen entstehen können. Für die CBD Technologie zum UV-Schutz als auch für die omniphoben Oberflächen wurden Patentanmeldungen eingereicht.

Mit der Weiterentwicklung und Patentanmeldung neuer Verfahren zum Oberflächenschutz ist ein wichtiger Schritt zur Erhöhung der Zuverlässigkeit des Holzes gelungen. Insbesondere da das Holz baulich immer stärker in den urbanen Raum drängt, ist ein Fassadenschutz, der die Ästhetik der Holzoberfläche bewahrt aber unkontrollierte und unregelmässige Farbänderungen verhindert, von grosser Bedeutung. Die Forschungsentwicklungen zu wasser- und ölabweisenden Oberflächen haben vor allem Potential im Bereich Möbel und Innenausstattung. In allen Bereichen der Holzoberflächenmodifikationen sind die Langzeitstabilität und die Robustheit (mechanisch, Putzmittel etc.) weiter zu untersuchen.

### 3.4 Neuartige holzbasierte Materialien

Neben der Erhöhung der Zuverlässigkeit des Holzes in den bekannten Anwendungen, sehen wir es auch als vordringlich an, dem Holz durch Materialkombinationen neuartige Eigenschaften zu verleihen und so neue Anwendungsfelder zu erschliessen. Diesbezüglich wurden weitere Arbeiten zur Funktionalisierung via in-situ Polymerisation, zur Magnetisierbarkeit sowie zur Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit des Holzes durchgeführt. Des Weiteren wurden Holzelemente gefertigt, die über die Änderung der Luftfeuchte und damit der Holzfeuchte aktuiert werden können.

Abgesehen von der Ringöffnenden Polymerisation zeichnen sich die entwickelten in-situ Polymerisationsansätze durch eine grosse Modularität in Bezug auf die verwendbaren Monomere/Polymere aus (je nach angestrebter Funktionalisierung können verschiedene Polymere eingebracht werden). Somit können diese Modifikationsansätze nicht nur genutzt werden, um das Holz dimensionsstabiler zu machen, sondern auch um Polymere mit anderen Eigenschaftsprofilen in das Holz

einzubringen und somit zusätzliche Funktionalitäten für neue Anwendungsfelder zu generieren. Derzeit arbeiten wir an der Einbringung von „stimulus-responsiven“ Polymeren in die Holzstruktur, um das Holz zu einem „smart material“ zu machen.

Durch die Abscheidung von Eisenoxid an der Zellwandgrenzfläche kann die immanente Anisotropie des Holzes genutzt werden, um Holz magnetisch zu schalten oder komplexe Bewegungen im Magnetfeld herbeizuführen (Abb. 9). Basierend auf dem Prinzip der Biomineralisierung können derartig schaltbare holzbasierte Komposite neue Perspektiven in der Materialforschung eröffnen.

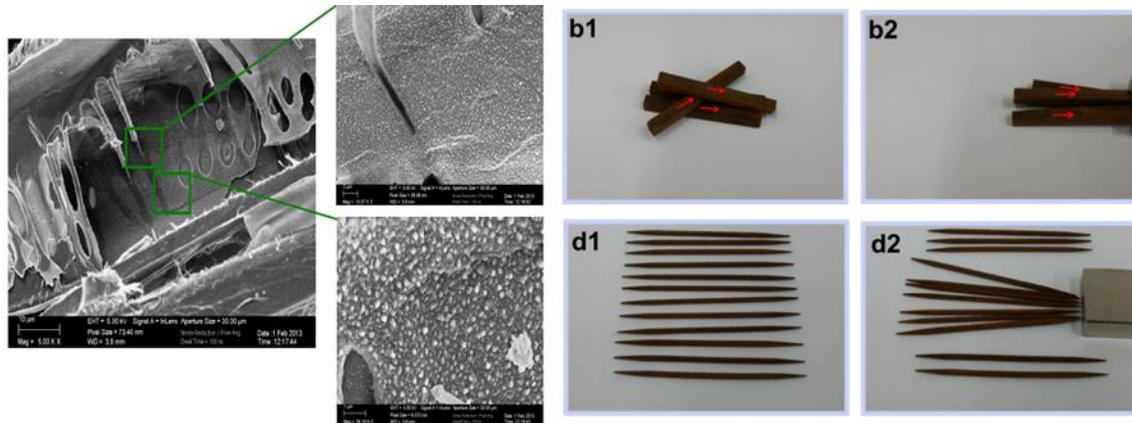


Abb. 9: Magnetisierbares Holz durch Ausfällen von Eisenoxidpartikeln an den lumenseitigen Zellwandoberflächen (Merk et al. 2014, ACS Applied Materials & Interfaces, modifiziert)

Zur Entwicklung beweglicher Elemente aus Holz für die Architektur wurde basierend auf Vorbildern in der Natur (Kiefernzapfen, Weizengrannen) bio-inspirierte Holzbilayer gefertigt, welche die Quellung und Schwindung des Holzes gezielt zur Formänderung nutzen. Dies ermöglicht wandelbare Konstruktionen in der Architektur, z.B. in Form von holzbasierten Steuerelementen in der Fassadengestaltung oder für den Antrieb von Solarpanelen, welche autonom und ohne zusätzliche Energieversorgung zur Sonne ausgerichtet werden können (Abb. 10).

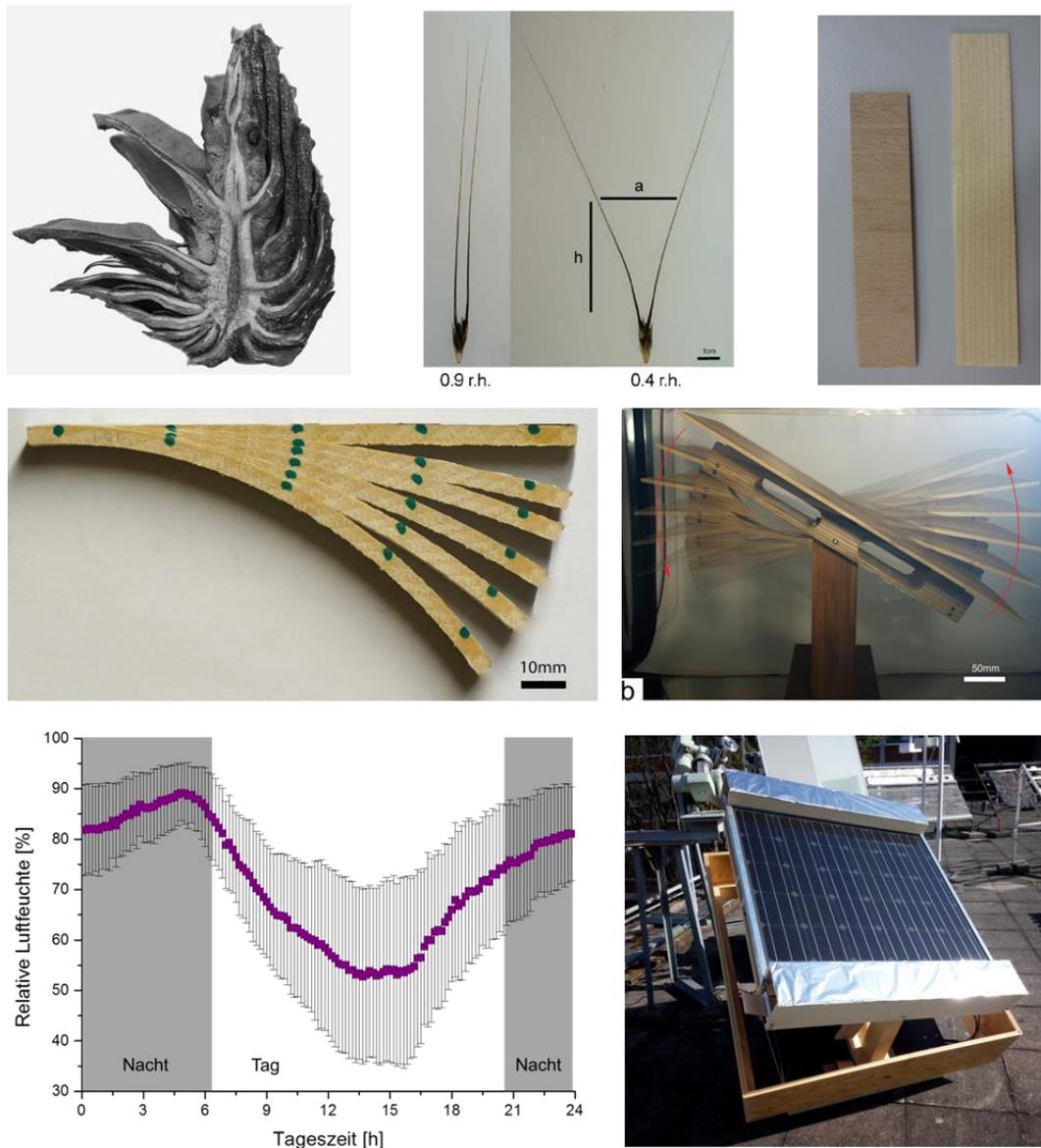


Abb. 10: Aktuation von Kiefernzapfen und Weizengrannen (Elbaum et al. 2007, Science) als Quellen der Bioinspiration zur Konstruktion von Bilayern aus Fichte und Buche (obere Reihe); optimierte Biegung von zwei Holzbilayern bei einer Änderung der relativen Luftfeuchte von 85% auf 35% ruft ein Kippen einer drehbar gelagerten Plattform von 50° innerhalb von 3 Stunden hervor (mittlere Reihe) (Rüggeberg & Burgert 2015, PloS One); mittlerer Tagesgang der relativen Luftfeuchte im August in Zürich; durch die Veränderung der relativen Luftfeuchte angetriebene Nachführung eines Solarmoduls auf einem Empa-Gebäude

Diese Aktuatoren wurden als Bilayer aus Buchen- und Fichtenholz gefertigt und optimiert, um reversible Biegebewegungen aufgrund von Feuchteänderungen erzielen zu können. Versuche zur Langzeitstabilität der Bewegung wurden in einem Feldversuch durchgeführt. Dabei wurde auch das Verhalten von Bilayern unter mechanischer Last analysiert. Mehrere Demonstratoren zur Aktuation von Solarmodulen wurden entwickelt, die den Tagesgang der relativen Luftfeuchte als Bewegungsantrieb nutzen. Die Biegung von zwei Bilayern im Tagesverlauf sorgt für ein Kippen des Solarmoduls und kann somit als automatische Nachführung zur Sonne eingesetzt werden. Durch das Verbiegen des Holz-Bilayer bewegt sich das Modul

bei einer geringen Luftfeuchte am Tag von einer Ostausrichtung zu einer Westausrichtung. In der Nacht, wenn die Luftfeuchte höher ist, findet die gegenläufige Bewegung statt. Das System wird zurzeit auf dem Dach eines Empa-Gebäudes getestet und seine Performance aufgezeichnet. Die luftfeuchtegesteuerten Holzbilayerelemente sollen als Nachführung von Solarnachführ- und/oder Beschattungssysteme im Fassadenbereich von Gebäuden Verwendung finden.

## 4 Kennzahlen

Im Förderzeitraum konnten eine Vielzahl von Publikationen in internationalen Zeitschriften mit Begutachtungsprozess und hohem Impact factor veröffentlicht werden. Mittels öffentlicher Vorträge an diversen Veranstaltungen, der Mitwirkung in S-WIN und der Kontaktaufnahme zu Firmen aus dem Holzverarbeitenden Gewerbe konnte zeitnah auf die in der Grundforschung erzielten Ergebnisse aufmerksam gemacht werden. In Folge der Vorstellung der Forschungsergebnisse und der Kontaktaufnahme zu Holzverarbeitenden Betrieben in der Schweiz wurden mehrere gemeinsam mit Industriepartnern ausgearbeitete Projektanträge durch die KTI genehmigt (siehe unten).

### 4.1 Publikationen in Zeitschriften mit Begutachtungsprozess

- [Z18] Burgert I, Cabane E, Zollfrank C, Berglund L (2015) Bio-inspired Functional Wood-based Materials – Hybrids and replicates. IMR reviews, accepted
- [Z17] Rüggeberg M, Burgert I (2015) Bio-inspired wooden actuators for large scale applications. PLoS One, accepted.
- [Z16] Malho JM, Ouellet-Plamondon C, Rüggeberg M, Laaksonen P, Ikkala O, Burgert I, Linder MB (2015) Enhanced plastic deformations of nanofibrillated cellulose film by adsorbed moisture and protein-mediated interactions. *Biomacromolecules* 16: 311-318.
- [Z15] Merk V, Chanana M, Keplinger T, Gaan S, Burgert I (2015) Hybrid wood materials with improved fire retardance by bio-inspired mineralisation on the nano- and submicron level. *Green Chemistry* DOI: 10.1039/c4gc01862a
- [Z14] Keplinger T, Cabane E, Chanana M, Hass P, Merk V, Gierlinger N, Burgert I (2015) A versatile strategy for grafting polymers to wood cell walls. *Acta Biomaterialia*, 11: 256-263
- [Z13] Wang X, Keplinger T, Gierlinger N, Burgert I (2014) Plant material features responsible for bamboo's excellent mechanical performance: a comparison of tensile properties of bamboo and spruce at the tissue, fibre and cell wall levels. *Annals of Botany* 114: 1627-1635.
- [Z12] Saxe F, Eder M, Benecke G, Aichmayer B, Fratzl P, Burgert I, Rüggeberg M (2014) Measuring the distribution of cellulose microfibril angles in primary cell walls by small angle X-ray scattering. *Plant Methods* 10 DOI: 10.1186/1746-4811-10-25
- [Z11] Merk V, Chanana M, Gierlinger N, Hirt AM, Burgert I (2014) Hybrid wood materials with magnetic anisotropy dictated by the hierarchical cell structure. *ACS Applied Materials & Interfaces* 6: 9760–9767
- [Z10] Razghandi K, Bertinetti L, Guiducci L, Dunlop JWC, Fratzl P, Neinhuis C, Burgert I (2014) Hydro-actuation of ice plant seed capsules powered by water uptake. *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials*, 3: 169–182
- [Z09] Gierlinger N (2014) Revealing changes in molecular composition of plant cell walls on the micron-level by Raman mapping and vertex component analysis (VCA). *Frontiers in Plant Science* 5: 306
- [Z08] Ermeydan MA, Cabane E, Hass P, Koetz J, Burgert I (2014) Fully biodegradable modification of wood for improvement of dimensional stability and water absorption properties by poly( $\epsilon$ -caprolactone) grafting into the cell walls. *Green Chem.* 16: 3313 - 3321

- [Z07] Cabane E, Keplinger T, Merk V, Hass P, Burgert I (2014) Renewable and functional wood materials by grafting polymerization within cell walls. *ChemSusChem* DOI: 10.1002/cssc.201301107
- [Z06] Ermeydan MA, Cabane E, Gierlinger N, Koetz J, Burgert I (2014) Improvement of wood material properties via in-situ polymerization of styrene into tosylated cell walls. *RSC Adv.* 4: 12981–12988
- [Z05] Lörcher S, Winkler T, Makyła K, Ouellet-Plamondon C, Burgert I, Bruns N (2014) Mechanical unfolding of a fluorescent protein enables self-reporting of damage in carbon-fibre reinforced composites. *J. Mater. Chem. A.* 2: 6231–6237
- [Z04] Keplinger T, Konnerth J, Aguié-Béghin J, Rüggeberg M, Gierlinger N, Burgert I (2014) A zoom into the nanoscale texture of secondary cell walls. *Plant Methods* 10:1-7
- [Z03] Burgert I, Keplinger T (2013) Plant micro- and nanomechanics: experimental techniques for plant cell-wall analysis. *Journal Experimental Botany*, doi: 10.1093/jxb/ert255
- [Z02] Rüggeberg M, Metzger T, Sundberg B, Fratzl P, Burgert I (2013) Enhanced cellulose orientation analysis in complex model plant tissues. *Journal of Structural Biology* 183: 419-428
- [Z01] Ermeydan MA, Cabane E, Masic A, Koetz J, Burgert I (2012) Flavonoid insertion into cell walls improves wood properties. *ACS Applied Materials & Interfaces* 4: 5782-5789

#### 4.2 Vorträge im Förderzeitraum

- [T40] Burgert I: Bio-inspired Wood Materials Science. Kolloquium Aalto University, Espoo Finland 24. September 2015
- [T39] Burgert I, Thybring EE: Holz und Ernährung. Stiftung molecuisine, Weiterbildungsstudiengang 2015, Vertiefungsmodul 2. 21. September 2015
- [T38] Burgert I: Neue Materialien für den Holzbau - Was wird Holz in Zukunft können? Faszination Holzbau, St. Gallen, 17./18. September 2015
- [T37] Burgert I: Functionalization of wood materials. Kolloquiumsvortrag Adolph Merkle Institut, Freiburg, 14. Juli 2015
- [T36] Burgert I: Bio-inspired wood materials. SFB 986 - Materials Science Colloquium TU Hamburg-Harburg, Germany 10 June 2015
- [T35] Burgert I: Functional Wood Materials. EUROMECH Colloquium 556, Dresden, Germany, 27-29 May 2015
- [T34] Burgert I: Bio-inspired functionalization of wood. HYBER Symposium, Aalto University, Finland, 12-13 May 2015
- [T33] Burgert I: Bio-inspirierte Materialien in der Holzforschung 5. Innovationsworkshop Holzwerkstoffe 2015, Messe Köln, 4 May 2015,
- [T32] Burgert I: Functionalization of the wood cell wall for advanced biomaterials. OIST Mini Symposium - Unraveling the mysteries of cellulose: From biosynthesis & biological diversity to biomaterials. Okinawa, Japan, 21-22 June 2015
- [T31] Burgert I: Funktionalisierung von Holz für gebräuchliche und neuartige Anwendungen. Kolloquium: Aktuelle Fragen der Holzforschung - von den Grundlagen zur industriellen Umsetzung zum Anlass der Verabschiedung von Peter Niemz, ETH Zürich 19-20 Januar 2015
- [T30] Burgert I: Bioinspired wood materials. Biomimetics: From nature to applications, Cambridge, UK, 9 January 2015

- [T29] Burgert I: Holzbasierte Materialien - Forschungsansätze für die Zukunft. Festkolloquium 40 Jahre akademische Holzforschung an der Universität für Bodenkultur. Tulln Österreich, 17. Oktober 2014
- [T28] Burgert I: Bio-inspired wood materials science. 2nd Biomimicry Europe Innovation and Finance Summit. Zurich, Switzerland, 4-5 September 2014
- [T27] Burgert I, Rueggeberg M, Razghandi K: Bio-inspired wooden elements for autonomous movements. 7th World Congress of Biomechanics. Session Title: Force generation and sensing in organisms, Boston, USA, 6-11 July 2014
- [T26] Burgert I: Bio-inspirierte Materialien aus Holz. 6. Wädenswiler Chemietag: Neue Materialien aus Holz –nahe oder ferne Zukunft? Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW), Swiss Wood Innovation Network (S-WIN) & SNF Nationale Forschungsprogramm NFP 66 «Ressource Holz» Wädenswil, 26.6.14
- [T25] Burgert I: Wood Biomechanics & Biomimetics. Compo 2014, Weizmann Institute, Rehovot, Israel, 28 April -01 May 2014
- [T24] Burgert I: Bio-inspired Wood Materials Science. COST FP 1105 WG III Task Group Meeting Rome, Italy, 27-28 January 2014
- [T23] Burgert I: Bio-inspired Wood Materials Science. Workshop on Bio-inspired technologies towards H2020, Cambridge, UK, 21-22 January 2014
- [T22] Burgert I: Bio-inspirierte Materialien in der Holzforschung 10. Holzwerkstoffkolloquium Innovationen Binden - Wert statt Wachstum, IHD Dresden, Germany, 12-13 December 2013
- [T21] Burgert I: Biomaterial Holz. Treffpunkt Science City „Materialien – dem perfekten Werkstoff auf der Spur“ 24 November 2013
- [T20] Burgert I: Wood functionalization. 10. Werkstoffkongress – Next generation of materials and devices from bioinspiration, Leoben, Austria, 6-7 November 2013
- [T19] Burgert I, Cabane E, Gierlinger N, Chanana M, Rüggeberg M, Keplinger T, Merk V, Ermeydan M, Razghandi K: Bio-inspired wood material improvement - modification treatments and deformable structures. 5th International Conference on Mechanics of Biomaterials & Tissues, Sitges, Spain, 8-12 December 2013
- [T18] Burgert I: Bio-inspired wood materials. Conference on Intelligent Materials – DGM, Kiel, Germany, 25-27 September 2013
- [T17] Burgert I: Bio-inspired functionalization of wood and wood cell walls. Conf. Engineering Life: Bio-molecular principles for novel methods and materials, Dresden, 17-18 September 2013
- [T16] Burgert I: Holzbasierte Materialien, Industry-Day ETH Zürich, 12 September 2013
- [T15] Burgert I: Plant actuation and stress generation. INdAM Meeting "The Mathematics of Cells and Tissues" Cortona, Italy, 2-6 September 2013
- [T14] Burgert I: Plant structure and function - from biological to bio-inspired materials. Kolloquium MIT Boston, USA, 23 May 2013
- [T13] Burgert I, Eder M, Gierlinger N, Fratzl P: The nanostructural and micromechanical design of plant cell walls. Conference on Cellulose synthesis, structure, matrix interactions and technology. Penn State University, University Park, USA, 16-18 May 2013
- [T12] Burgert I: From plant structure and function to bio-inspired materials. COST Action FP1105, Napier University, Edinburgh, UK, 14 May 2013
- [T11] Burgert I: Biomaterial Wood. Kolloquium University of Basel, 10 April 2013

- [T10] Burgert I: Holz und Holzwerkstoffe mit verbesserten Eigenschaften für den Holzbau. 18. Internationales Holzbau-Forum (IHF) Garmisch, Germany, 5-7 Dezember 2012
- [T09] Burgert I: Bio-inspirierte Materialien in der Holzforschung. 2. Dresdner Holzanatomisches Kolloquium, Dresden, Deutschland, 18-19 Oktober 2012
- [T08] Burgert I: Plant micromechanics. Plant Biomechanics Conference, Clermont-Ferrand, France, 20-24 August 2012
- [T07] Burgert I: Approaching plant cell walls from a materials science perspective. Kolloquium Universität Freiburg, Deutschland, 05 Juni 2012
- [T06] Burgert I, Harrington MJ, Razghandi K, Eder M, Dunlop JWC, Fratzl P: Hydro-actuated plant organs as prototypes for convertible devices. The 4th International Conference "Smart Materials, Structures and Systems", Montecatini Terme, Italy, 10-14 June 2012
- [T05] Burgert I: Forschungsschwerpunkte Holzwirtschaft - NFP66 & Wood Materials Science Lab. Holzbau Schweiz, Partner Tagung Markt, Bazenheid, 31 Mai 2012
- [T04] Burgert I: Holzforschung trifft Biomimetik. Festveranstaltung Empa, 75 Jahre Holzabteilung, 5 März 2012
- [T03] Burgert I: Wood materials science for improved wood performance, Seminarvortrag Berner Fachhochschule, Biel, 21 Februar 2012
- [T02] Burgert I: Innovative Konzepte für das Biomaterial Holz. Montagskolloquien für die Praxis - Aktuelle Fragen zur Holzforschung am Institut für Baustoffe, ETH Zürich, 23 Januar 2012
- [T01] Burgert I, Harrington MJ, Razghandi K, Dunlop JWC, Neinhuis C, Fratzl P: The hydration-based movement of ice plant seed capsules. 4th International Conference on the Mechanics of Biomaterials and Tissues, Waikoloa, Hawaii, USA, 11-15 Dezember 2011

*Vorträge durch weitere Mitglieder der Forschungsgruppe (Vortrag jeweils durch erstgenannte Person)*

- Segmehl J, Keplinger T, Krasnobaev A, Burgert I: Chemical Delignification to Tailor Wood-Derived Bio-Scaffolds for Multifunctional Materials. MaP Graduate Symposium, Zürich, 3 June 2015
- Cabane E, Keplinger T, Burgert I: Grafting polymers in the wood structure: towards functional lignocellulosic materials. Polymer Reaction Engineering IX, Cancun, Mexico, 10-15 May 2015
- Cabane E, Ermeydan M, Keplinger T, Merk V, Burgert I: New functional materials from wood: grafting polymerization in the wood structure. ISGC 2015, La Rochelle, France, 3-7 May 2015
- Segmehl J, Keplinger T, Burgert I: Wood derived bio-scaffolds for multifunctional materials tailored through chemical delignification. EuroBioMAT, Weimar, Germany, 21-22 April 2015
- Rüggeberg M, Vailati C, Hassani MM, Wittel F, Herrmann HJ, Burgert I: Smart wooden actuators, 79. Jahrestagung der DPG, Berlin, Deutschland, 15-20 March 2015
- Merk V, Chanana M, Gaan S, Burgert I: Bioinspired Mineralization of Wood on Nano- and Submicron Level for Green Fire Retardancy. IAWPS 2015, Tokyo, Japan, 15-17 March 2015
- Keplinger T, Cabane E, Burgert I: Versatile strategies for grafting polymers to wood cell walls. International Symposium on Wood Science and Technology 2015, Tokyo, Japan, 15-17 March 2015
- Cabane E, Keplinger T, Burgert I: Functionalization of lignocellulosic materials. 3F-Talks 2015, Aachen, Germany, 5-6 March 2015
- Merk V, Burgert I: Wood Cell Wall Mineralization. COST FP1105 Meeting: WoodCellNet workshop, Thessaloniki, Greece, 11-12 November 2014

Merk V, Chanana M, Gaan S, Burgert I: Wood cell wall calcification for the design of biocomposites with improved macroscopic performance. NICE 2014, Nice, France, 15-17 October 2014

Thybring EE: Water interactions with wood and biomaterials, Lectures in “Natural Fibre Material Science”, Aalto University, Espoo, Finland, 27-29 October 2014

Chanana M, Merk M, Hirt A, Burgert I: Magnetic Wood: From biomineralization to functional hybrid materials. NICE 2014, Nice, France, 15-17 October 2014

Cabane E, Keplinger T, Merk V, Burgert I: New Materials from Wood: Atom Transfer Radical Polymerization in the Wood Structure. NICE2014, Nice, France, 15-17 October 2014

Cabane E, Keplinger T, Merk V, Hass P, Burgert I: Novel functionalities in wood materials: modification via cell wall initiated radical polymerization. Materials Science and Engineering Congress 2014, Darmstadt, Germany, 23-25 September 2014

Rüggeberg M, Burgert I: Convertible wooden elements for architecture and construction, DGM Bio-inspired Materials, Potsdam, Deutschland, 18-21 March 2014

Thybring EE: Introduction to moisture relationships in biobased materials, COST FP1303 Workshop 1, Paris, 27-28 January 2014

### **4.3 Drittmittelprojekte**

Insgesamt wurden im Berichtszeitraum Drittmittelprojektanträge von folgenden Förderorganisationen genehmigt bzw. Drittmittelprojekte durchgeführt:

#### ***National***

- 5 SNF Projekte, einschliesslich NFP66, NFP70, R'Equip
- 4 KTI Projekte
- 1 DFG Projekt SPP1420
- 2 ETH Foundation Seed Projects, Partnership Council “Sustainable Construction”

#### ***International***

- 3 Marie Curie Cofund Stipendien
- 1 EU FP7 Collaborative Project (large-scale integrating project targeting to SMEs)
- 2 Climate KIC Building Technology Accelerator Projects

### **4.4 Patentanmeldungen**

- Patentanmeldung PCT/CH2014/000004: Wood Modification
- Patentanmeldung EP 14001462.2: Mineralized wood materials and methods providing mineralized wood materials
- Patentanmeldung EP15183867.9: UV-stable and super-hydrophobic wood surface
- Patentanmeldung EP15183874.5: Multi-repellent wood veneer and paper surface coating