

Funktionelle holzbasierte Materialien für das Bauwesen

Ingo Burgert
Institut für Baustoffe/ETH Zürich
WoodTec-Group/Empa
Zürich, Schweiz



Funktionelle holzbasierte Materialien für das Bauwesen

1. Einleitung

Holz als nachwachsende und CO₂-speichernde Ressource wird mit Blick auf den Klimawandel und einer zunehmenden Verknappung endlicher Ressourcen weiter an Bedeutung gewinnen und kann eine massgebliche Rolle beim Transformationsprozess zu einer Bioökonomie einnehmen. Der Bausektor ist hierbei von zentraler Bedeutung, da die Errichtung und der Betrieb von Gebäuden einen Anteil von 35% am globalen Energieverbrauch und einen Anteil von 38% an den globalen Emissionen haben (Zahlen für 2019) [1]. Daher ist es dringend notwendig, den Bausektor von einem bedeutenden Verursacher von Emissionen zu einem klimaneutralen Sektor zu wandeln oder idealer Weise mit dem Gebäudebestand eine zusätzliche Kohlenstoffsенke zu generieren [2]. Folgerichtig gibt es derzeit eine sehr dynamische Entwicklung im Holzbau, welche insbesondere durch die weltweite Errichtung von Hochhäusern grosse Aufmerksamkeit erfährt [3]. Langlebige Holzgebäude sind ein wichtiger Ansatz, um langfristig CO₂ zu binden, allerdings ergeben sich aus einer deutlich zu steigenden Holzverwendung auch grundsätzliche Fragen, beispielsweise hinsichtlich des Zeithorizonts und der Ressourcenverfügbarkeit [4]. Voraussetzung ist, dass eine intensivere Nutzung der Ressource Holz im Einklang mit dem dauerhaften Erhalt gesunder Wälder und der Biodiversität unter sich schnell ändernden Klimabedingungen steht [5].

Neben der Errichtung von Gebäuden nimmt aber auch deren Betrieb eine Schlüsselrolle ein. Auch in diesem Bereich hat Holz viel Potential, in dem es durch Modifikation und Funktionalisierung nicht nur als passive Bausubstanz fungieren, sondern auch als «intelligentes Material» gedacht werden kann. In diesem Zusammenhang haben funktionelle holzbasierte Materialien in den vergangenen Jahren grosses wissenschaftliches Interesse hervorgerufen [6-10]. Holz hat den grossen Vorteil, dass es hohe Festigkeit und Steifigkeit mit einer hohen gerichteten Porosität in einer hierarchischen Struktur vereint. Dies geht auf die Optimierung der zentralen Funktionen des Holzes im lebenden Baum zurück. Mechanische Stabilität und effizienter Wassertransport im Holz ermöglichen es Bäumen in Höhen von über 100 m zu wachsen. Für die Festigungsfunktion wird ein starkes Biomaterial benötigt, was durch den natürlichen Faserverbund in den Zellwänden, bestehend aus Zellulosefibrillen, Hemizellulosen und Lignin übernommen wird. Hingegen erfordert der effiziente Wassertransport eine gerichtete Porosität im Holz, welches durch die leeren Zelllumina als Transportwege für das Wasser garantiert wird [11,12]. In diesem Sinne ist die Struktur des Holzes Ergebnis eines evolutiven Prozesses, welcher einen Kompromiss zweier divergierender Zielfunktionen darstellt. Diese Struktur ist die fundamentale Grundlage zur Nutzung des Holzes als funktionelles Material. Die hohe und gerichtete Porosität ermöglicht es, verschiedene Substanzen im Holz zu etablieren, und so hierarchische Hybrid-Materialien mit zusätzlichen Funktionen zu entwickeln, bei gleichzeitiger Gewährleistung der nötigen mechanischen Stabilität.

2. Eingebettete Funktionalität

Die eingangs skizzierte Holzstruktur ermöglicht, eine spezifische Funktionalität im holzbasierten Material einzubetten. Biologische Vorbilder, die dieses Prinzip gut illustrieren sind beispielsweise Spinnen, die an Ihren Beinen, Vibrations- und Dehnungssensoren haben [13]. Somit kann das Material selbst zum Sensor und Aktuator werden und dadurch «autonom» reagieren [14]. Übertragen auf funktionelle Holzmaterialien ergibt sich daraus eine sehr gute Anschlussfähigkeit an Smart Building Konzepte. In diesem Fall bedarf es keiner Regelkreisläufe mit Kontrolle und Anpassungen des Ist-Wertes, sondern das holzbasierte Material reagiert selbstständig beispielsweise auf Änderungen der Luftfeuchte oder Temperatur. Mögliche Anwendungsfelder sind die Kontrolle des Innenraumklimas oder der Lichtsteuerung verbunden mit Sensorik und Energieeinsparung oder auch die Energiegewinnung.

Prominentes Beispiel für die Entwicklung funktioneller Holzmaterialien ist transparentes Holz, welches durch eine (teilweise) Delignifizierung und das Einbetten eines Polymers mit einem Brechungsindex, der annähernd dem der Zellulose entspricht, hergestellt [15-16] und mit zusätzlicher Funktionalität versehen, für die Lichtsteuerung genutzt werden kann [17]. Ein weiteres intensives Forschungsfeld in diesem Bereich ist die Funktionalisierung von Holz mit dem Ziel, Fussböden aus Holz mit Sensorik oder Möglichkeiten zur Energiegewinnung auszustatten. Hierzu werden Ansätze verfolgt, um durch gezielte Modifikation den piezoelektrischen Effekt im Holz zu verstärken oder Holzoberflächen so zu funktionalisieren, dass triboelektrische Eigenschaften genutzt werden können [18,19].

Holz könnte aufgrund seiner hygroskopischen Eigenschaften auch umfangreicher und gezielter zur Regulierung des Innenklimas von Gebäuden genutzt werden. Dafür bedarf es allerdings Funktionalisierungsansätzen, um die Abgabe und Aufnahme von Feuchtigkeit zu beschleunigen und zu vergrößern. Ding et al. konnten kürzlich zeigen, dass mit einem CO₂ Laser eine zusätzliche Porigkeit im Holz senkrecht zur Faserrichtung geschaffen werden kann, die den Austausch mit der Umgebungsluft beeinflusst [20]. Eine zusätzliche Behandlung mit einem hygroskopischen Salz kann zusätzlich die Feuchtaufnahme erhöhen. Gleichsam wie bei einer Funktionalisierung von Holz mit Phase Change Materials könnte auf diese Weise das Holz auch für eine Pufferung von Temperaturspitzen und damit zur Energieeinsparung genutzt werden, da die Aufnahme oder Abgabe von Feuchtigkeit mit einer Temperaturänderung verbunden ist.

Für eine effiziente Kombination mit Smart Home Applikationen ist es sinnvoll und zielführend, Holz mit elektrischer Leitfähigkeit auszustatten. Allerdings können aufgrund der Holzstruktur durch das Einbringen beispielsweise von leitfähigen Polymeren keine besonders hohen Leitfähigkeiten erzielt werden. Ein alternativer Ansatz ist eine Graphitisierung der Holzoberfläche. Da das ungeschützte Holz bei diesem Funktionalisierungsprozess leicht in Brand geraten kann, wurden in der Vergangenheit Brandschutzmittel verwendet oder es bedurfte einer Schutzgasatmosphäre oder des Einsatzes von gepulsten Lasern [21]. Kürzlich konnten Dreimol et al. zeigen, dass der Graphitisierungsprozess deutlich vereinfacht und effizienter gestaltet werden kann, wenn das Holz zunächst in einem Vorbehandlungsschritt mit einer umweltfreundlichen Eisen-Tannin-Tinte bestrichen wird. Dieses ermöglicht den Einsatz eines vergleichsweise einfachen CO₂-Lasers bei normaler Atmosphäre. Mit diesem skalierbaren Prozess können sehr gute elektrische Leitfähigkeiten von Holzelementen erzielt werden [22]. Abbildung 1 illustriert das generelle Vorgehen.

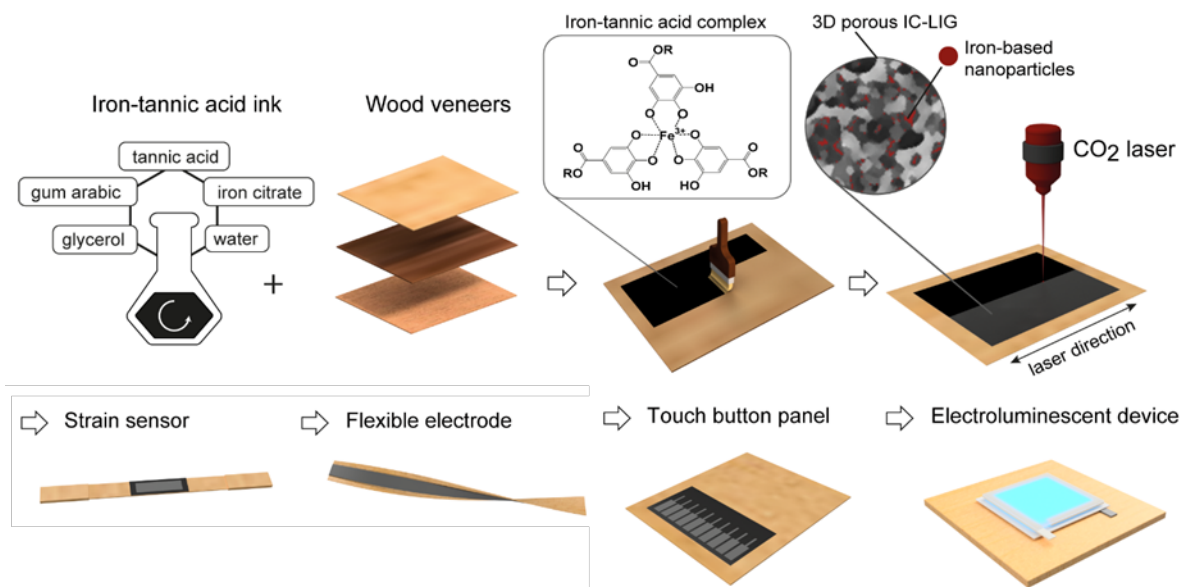


Abbildung 1: Illustration der laser-induzierten Graphitisierung von Holz nach einer Vorbehandlung durch das Auftragen einer Eisen-Tannin-Tinte. Copyright 2022, Springer [22], lizenziert unter CC BY 4.0

Die vorgestellten Ansätze zeigen exemplarisch das Potential der Entwicklung und Anwendung von funktionellen holzbasierten Materialien. Zurzeit sind die Arbeiten in diesem Forschungsfeld im Wesentlichen noch auf der Laborebene verortet. Der Einsatz von grüner Chemie zur Funktionalisierung und die Konzentration auf skalierbare Prozesstechnologien sollten aber eine zukünftige Nutzung derartiger Innovationen ermöglichen, um auf eine sehr effiziente Weise den Betrieb von Gebäuden klimafreundlicher zu machen und gleichzeitig mit der Ressource Holz den Wohnkomfort zu erhöhen.

3. Literaturverzeichnis

- [1] Hamilton I, Rapf O (2020) 2020 Global status report for buildings and construction – Executive summary. United Nations
- [2] Churkina G, Organschi A, Reyer CPO, Ruff A, Vinke K, Liu Z, Reck BK, Graedel TE, Schellnhuber HJ (2020) Buildings as a global carbon sink. *Nat. Sustain.* 3: 269–276.
- [3] Svatos-Raznjevic H, Orozco L, Menges A (2022) Advanced timber construction industry: a review of 350 multi-storey timber projects from 2000–2021. *Buildings* 12: 1–42.
- [4] Pomponi F, Hart J, Arehart JH, D'Amico B (2022) Buildings as a global carbon sink? A reality check on feasibility limits. *One Earth* 3: 157–161.
- [5] Schubert M, Panzarasa G, Burgert I (2022) Sustainability in wood products: a new perspective for handling natural diversity. *Chem. Rev.*: doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00360
- [6] Berglund LA, Burgert I (2018) Bioinspired wood nanotechnology for functional materials. *Adv. Mater.* 30: 1704285. doi: 10.1002/adma.201704285.
- [7] Burgert I, Cabane E, Zollfrank C, Berglund L (2015) Bio-inspired functional wood-based materials-hybrids and replicates. *Int. Mater. Rev.* 60: 431–450. doi: 10.1179/1743280415y.0000000009.
- [8] Chen C, Kuang Y, Zhu S, Burgert I, Keplinger T, Gong A, Li T, Berglund L, Eichhorn SJ, Hu L (2020) Structure–property–function relationships of natural and engineered wood. *Nat. Rev. Mater.* 5: 642–666.
- [9] Zhu H, Luo W, Ciesielski PN, Fang Z, Zhu JY, Henriksson G, Himmel ME, Hu L (2016). Wood-derived materials for green electronics, biological devices, and energy applications. *Chem. Rev.* 116: 9305–9374.
- [10] Panzarasa G, Burgert I (2022) Designing functional wood materials for novel engineering applications. *Holzforschung* 76: 211–222.
- [11] Fengel D, Wegener G (1984) *Wood - chemistry, ultrastructure, reactions*; de Gruyter: Berlin, New-York.
- [12] Speck T, Burgert I (2011) Plant stems: functional design and mechanics. *Annu. Rev. Mater. Res.* 41: 169–193.
- [13] Barth FG (2004) Spider mechanoreceptors. *Current Opinion in Neurobiology* 14: 415–422.
- [14] Fratzl P, Barth FG (2009) Biomaterial systems for mechanosensing and actuation. *Nature* 462: 442–448.
- [15] Zhu M, Song J, Li T, Gong A, Wang Y, Dai J, Yao Y, Luo W, Henderson D, Hu L (2016) Highly anisotropic, highly transparent wood composites. *Adv. Mater.* 28: 5181–5187. doi: 10.1002/adma.201600427.
- [16] Li Y, Fu Q, Yu S, Yan M, Berglund L (2016) Optically transparent wood from a nanoporous cellulosic template: combining functional and structural performance. *Biomacromolecules* 17: 1358–1364. doi: 10.1021/acs.biomac.6b00145.
- [17] Lang AW, Li Y, De Keersmaecker M, Shen E, Österholm AM, Berglund L, Reynolds JR (2018). Transparent wood smart windows: Polymer electrochromic devices based on Poly (3,4-Ethylenedioxythiophene): Poly(styrene sulfonate) electrodes. *ChemSusChem* 11: 854–863. doi: 10.1002/cssc.201702026.
- [18] Sun J, Guo H, Ribera J, Wu C, Tu K, Binelli M, Panzarasa G, Schwarze FW, Wang ZL, Burgert I (2020) Sustainable and biodegradable wood sponge piezoelectric nanogenerator for sensing and energy harvesting applications. *ACS Nano* 14: 14665–14674.

- [19] Hao SF, Jiao JY, Chen YD, Wang ZL, Cao X (2020) Natural wood-based triboelectric nano-generator as self-powered sensing for smart homes and floors. *Nano Energy* 75: 104957.
- [20] Ding Y, Dreimol CH, Zboray R, Tu K, Stucki S, Keplinger T, Panzarasa G, Burgert I (2022) Passive climate regulation with transpiring wood for buildings with increased energy efficiency. *Materials Horizons* 10.1039/d2mh01016j
- [21] Le TSD, Park S, An J, Lee PS, Kim YJ (2019) Ultrafast laser pulses enable one-step graphene patterning on woods and leaves for green electronics. *Adv. Funct. Mater.* 29: doi.org/10.1002/adfm.201902771.
- [22] Dreimol CH, Guo H, Ritter M, Keplinger T, Ding Y Günther R, Poloni E. Burgert I, Panzarasa G (2022) Sustainable wood electronics by iron-catalyzed laser-induced graphitization for large-scale applications. *Nat. Commun.* 13: 3680.