



INNOVATIVE HOLZBASIERTE MATERIALIEN

Nationales Forschungsprogramm NFP 66 **Ressource Holz**

Ingo Burgert und Oliver Klaffke



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 Einleitung
- 13 Modifikation von Holz und Holzoberflächen
- 23 Optimierung von Plattenwerkstoffen
- 29 Nanozellulose
- 35 Handlungsempfehlungen
- 37 Literatur
- 40 Das NFP 66 in Kürze

EDITORIAL



Ein Badezimmer mit einem Waschbecken aus wasserabweisendem Holz? Leichtere Autos dank crashsicherer Holzformteile in einzelnen Fahrzeugkomponenten? Holzbasierte Möbel oder ganze Holz-Hybridbauteile aus dem 3-D-Drucker? Erstklassige Kunst- und Schaumstoffe oder Textilien auf der Basis von Holzfasern? Solche und viele andere Verwendungen stehen dem nachwachsenden Rohstoff Holz künftig offen.

Bewusst hat unser NFP 66 einen seiner Schwerpunkte auf das Forschungsfeld «Innovative holzbasierte Materialien für neue Anwendungen» gelegt. Dies in der Überzeugung, dass eine nachhaltige Ressourcenpolitik auf weitere Fortschritte in der Ablösung erdölbasierter Materialien angewiesen ist. Und dabei Holz eine wichtige Rolle spielen kann, ja muss. Acht Forschungsteams haben sich im Rahmen des NFP 66 mit unterschiedlichen Fragestellungen rund um neue Holzanwendungen beschäftigt. Die Resultate sind ermutigend: Nanozellulose zum Beispiel hat grosses Potenzial als Verstärkungskomponente in allerlei Verbundstoffen. Gut sind auch die Aussichten, dass holzbasierte Schaum- und Klebstoffsysteme demnächst in die Produktion von Holzplattenwerkstoffen Eingang finden. Innovative Ansätze liegen ebenso in Bezug auf die Holzmodifikation und umweltverträgliche Holzoberflächenbehandlungen vor.

Um die Markttauglichkeit all dieser Innovationen ist es noch sehr unterschiedlich bestellt. Für viele bedarf es zur Industriereife noch grösserer Anstrengungen, um geeignete Prozesstechnologien zu entwickeln. Umso mehr freut mich das rege Interesse, das manche Unternehmenspartner auch ausserhalb der traditionellen Holzindustrie an unseren Forschungsprojekten und Dialogveranstaltungen gezeigt haben.

Wie kommen wir in der Schweiz in puncto holzbasierter Materialien weiter? Es braucht vieles: Die Forschung auf diesem Gebiet muss unbedingt weitergeführt werden. Die Industrie muss ihre F+E-Kooperationen vertiefen, um für einzelne Produkte kompetitive Herstellungs- und Verarbeitungsverfahren zu etablieren. Und die vielseitigen Kompetenzen sind auf einer gemeinsamen Plattform zu bündeln und interessierten Unternehmen zugänglich zu machen. Deshalb bringen wir zum Abschluss unseres NFP die Idee eines «Technikum Holzinnovationen Schweiz» ins Spiel.

Das NFP 66 ist also nur der Auftakt zu einer längeren Reise. Fahren wir gemeinsam weiter! Allen, die an den Forschungsarbeiten, den Dialogveranstaltungen und an diesem Synthesebereich mitgewirkt haben, sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Dr. Martin Riediker

Präsident Leitungsgruppe NFP 66 Ressource Holz

EINLEITUNG

Holz ist der Werkstoff der Zukunft und die Schweiz ist gut gerüstet, dessen wirtschaftliches Potenzial umzusetzen. Der vorliegende Synthesebericht für das Dialogfeld 3 «Innovative holzbasierte Materialien» des NFP 66 zeigt auf, wo die Stärken und Chancen liegen, und macht deutlich, welche Herausforderungen gemeistert werden müssen, um die Umsetzung zu realisieren.

Wesentlich dafür ist die Errichtung eines Technikums in der Schweiz. Dies ist notwendig, um zeitnah den wirtschaftlich erfolgreichen Transfer der Materialinnovationen in hochwertige holzbasierte Produkte zu erreichen.

Als nachwachsende und CO₂-bindende Ressource spielt Holz eine zentrale Rolle für die Entwicklung einer nachhaltigen Gesellschaft. Holz ist ein vom Baum gebildetes Material, das in grosser Vielfalt und mit hoher Variabilität seiner Eigenschaften vorkommt. Die Ressource Holz ist Ausgangspunkt für eine Vielzahl von innovativen Materialien, die durch grundlegende Forschung entwickelt und optimiert wurden und werden. Basierend auf diesen Arbeiten kann die heimische Holzindustrie hochwertige Produkte herstellen und neue Märkte erobern. Auf diese Weise wird eine neue Dynamik in einem der ältesten und verwurzelten Wirtschaftszweige der Schweiz angestossen. Die Aussichten, in der Holzwirtschaft zu neuen Ufern aufzubrechen, sind gut, wenn die Ergebnisse des NFP 66 umgesetzt werden.

Holz ist eine der wichtigsten natürlichen Ressourcen der Schweiz, dessen grösstes Potenzial noch brachliegt. Holz ist nachhaltig und lässt sich – veredelt und behandelt – vielseitig verwenden. Im NFP 66 beschäftigten sich die Forscherinnen und Forscher mit der Verbesserung der Eigenschaften von Holz und mit effizienten Prozesstechnologien. Dazu gehören Vollholz- und Furnierwerkstoffe, Holzwerkstoffplatten, aber auch Funktionsmaterialien aus Nanozellulose. Mit den Grundlagen, die das NFP 66 geschaffen hat, können Schweizer Holzunternehmen innovative Produkte entwickeln, die der Markt heute und in Zukunft nachfragt. Sie können etwa dem Holzbau dank hoher Zuverlässigkeit und Ästhetik zu einer weiteren Verbreitung verhelfen. Sie können dazu beitragen, dass sehr leichte Möbel entwickelt werden, auf die

der Onlinehandel zunehmend setzt. Darüber hinaus machen die innovativen Materialkonzepte wichtige Fortschritte möglich, die Zukunftsbranchen helfen, die auf Umweltschutz setzen oder in der Medizintechnik verankert sind.

Der Bericht fasst die wissenschaftlichen Forschungsarbeiten zusammen, die in den drei Themenfeldern Holzmodifikationen, Plattenwerkstoffe und Nanozellulose durchgeführt wurden. Um diese konzeptionell einzubetten, wird den einzelnen Projektberichten der Teilgebiete eine thematische Einleitung vorangestellt. Zum Abschluss jedes Themenblocks werden die wissenschaftliche und wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsprojekte bewertet. Der Synthesebericht schliesst mit einer Handlungsempfehlung zur Errichtung eines grossmassstäblichen Technikums in der Schweiz. Dies ist für die wirtschaftliche Umsetzung der Materialinnovationen in hochwertige holzbasierte Produkte zwingend notwendig.

Holz – das Material der Zukunft

Holz ist das Material der Zukunft, welches einen gewichtigen Beitrag für eine nachhaltige Gesellschaft und Wirtschaft leisten kann. Eine Nutzung der Ressource Holz, die die Wirtschaft prägt, ist von grosser Bedeutung, wenn wir Nachhaltigkeit in unserer Gesellschaft erreichen wollen. Am Beginn der nachhaltigen Wertschöpfungskette von holzbasierten Materialien profitieren wir von der Leistung der Bäume, die über den Photosyntheseprozess für die Produktion des Holzes CO₂ binden und Sauerstoff bilden und uns damit eine nachwachsende Ressource mit einer positiven Klimabilanz zur Verfügung stellen. Wenn das Holz genutzt wird, spielt die technologisch hochwertige Verarbeitung und Verwendung des Werkstoffs eine entscheidende Rolle. So können viele der energieintensiven und aus fossilen Ressourcen gefertigten Werkstoffe ersetzt werden. Hierzu ist ein gezieltes und strategisches Vorgehen von Wissenschaft und Wirtschaft erforderlich. Wenn dies gelingt, kann für das 21. Jahrhundert die Ära der biobasierten Werkstoffe eingeläutet werden.

Die natürliche Ressource Holz bietet für diesen Umbruch im Werkstoffbereich hervorragende

Grundvoraussetzungen. Holz ist ein Leichtbauwerkstoff mit sehr guten mechanischen Eigenschaften und einer einzigartigen natürlichen Ästhetik. Die Forschung muss noch mehr Fortschritte bei der Materialentwicklung machen, um die Eigenschaften des Holzes so zu verbessern, dass seine noch umfangreichere und technologisch hochwertigere Verwendung möglich wird. Hier setzte das NFP66 mit seinen geförderten Projekten an, welche darauf zielen, die Einsatzmöglichkeiten des Holzes in bestehenden Anwendungsfeldern zu erhöhen oder mit neuartigen Materialkombinationen neue Anwendungsfelder zu erschliessen.

Neben der Verbesserung der Eigenschaften des Holzes kommen der langjährigen Zuverlässigkeit der Produkte und einer möglichst einfachen und umweltfreundlichen technologischen Produktion wichtige Bedeutungen zu. Hier besteht grosses Potenzial bei einer Anknüpfung an die gegenwärtig umwälzenden Entwicklungen bei der Automatisierung der Fertigung, welche zur Prozessoptimierung im Holzbereich genutzt werden können. Dabei werden sich Holz-Hybridmaterialien durchsetzen, wie zum Beispiel in Kombinationen mit biobasierten Polymeren und geeigneten Mineralien, oder die Art der Materialverbindung ermöglicht eine

einfache Trennung der Komponenten am Ende der Nutzung. Diese Eigenschaften sind für eine Kaskadennutzung unverzichtbar, die eine zentrale Anforderung einer nachhaltigen Wirtschaft ist.

Den Rohstoff besser nutzen

Etwas verwenden und danach einfach wegwerfen. Das war in der Wirtschaft von gestern Standard. Nachhaltig lässt sich so allerdings nicht wirtschaften, denn wertvolle Ressourcen werden verschwendet. Recycling, Wiederverwerten, die Bestandteile immer wieder nutzen, ist uns bei Papier, Metall oder Glas bekannt, die gesammelt und deren Bestandteile dann wieder verwendet werden. Um Holz in der nachhaltigen Gesellschaft einsetzen zu können, arbeiten Forscherinnen und Forscher an Möglichkeiten, seine Kaskadennutzung zu verbessern.

Bei Holz bedeutet dies, dass seine Bestandteile zunächst möglichst lange und in verschiedenen Produkten verwendet werden. So könnten sie in verschiedenen Holzwerkstoffklassen eingesetzt werden. Erst als Vollholzprodukte, dann als Span- oder Faserplatten, und am Ende des Lebenszyklus können sie noch zur energetischen Verwertung verbrannt werden.

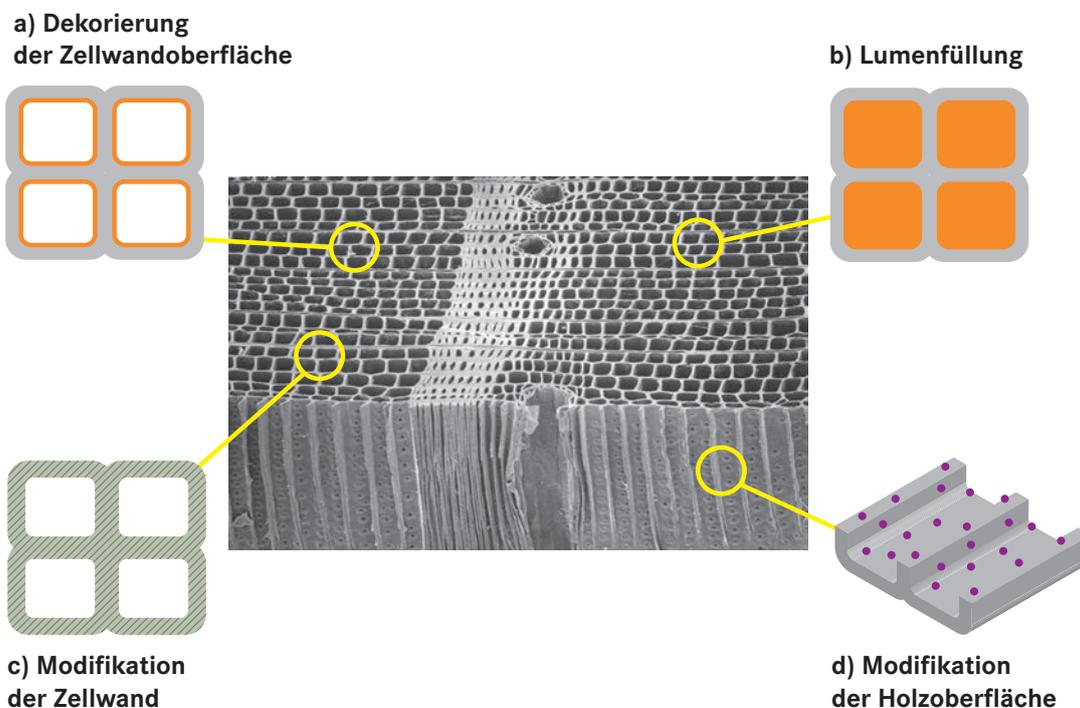


Abb. 1 Generelle Darstellung von Massnahmen zur Eigenschaftsverbesserung von Holz. Die Modifikationen können an unterschiedlichen Bereichen der hierarchischen Struktur ansetzen. a) Dekorierung der zum Lumen der Zellen weisenden Zellwandoberfläche, b) einfache Lumenfüllung, c) Modifikation der Zellwand und d) der Holzoberfläche (Dank an Etienne Cabane).

Für Vollholzprodukte und Furnierwerkstoffe ist der Holzbau im städtischen Raum Herausforderung und Chance zugleich. Mehrgeschossiger Wohnungsbau mit Holz ist im Trend und in vielen Städten sind Hochhäuser in Planung. Die derzeit wohl spektakulärste und visionärste Konzeptstudie zu einem Holzbauprojekt ist ein 300m hoher Wolkenkratzer mit 80 Stockwerken, der durch die Universität Cambridge für die City von London geplant wird. Mit diesem visionären Leuchtturmprojekt soll ein Paradigmenwechsel im städtischen Bauen hin zum Holzbau mit neuem Design und Konstruktionsmöglichkeiten eingeleitet werden. Damit sich der Holzbau im 21. Jahrhundert durchsetzen kann, muss die Forschung die Eigenschaften des Holzes weiter verbessern. Wenn es um Dimensionsstabilität, Dauerhaftigkeit, Brandverhalten oder auch UV-Schutz geht, muss man Holz ohne zusätzliche bauliche Schutzmassnahmen einsetzen können. Dies gilt besonders für den Brandschutz von mehrgeschossigen Wohnhäusern. Zurzeit werden Holzkonstruktionen etwa mit Gipsplatten ummantelt, wobei die besondere Ästhetik und Strahlkraft des Holzbaus verloren geht. Viele Massnahmen zum direkten Schutz des Holzes mit chemischen Substanzen werden zunehmend kritisch gesehen oder sind bereits verboten. Daher ist es bedeutsam, umweltfreundliche Lösungen, wie beispielsweise Holzmineralisationen mit Silikaten, Kalk oder anderen Mineralkombinationen, einsetzen zu können. Technologische Fortschritte in der Oberflächenbehandlung sind von entscheidender Be-

deutung, da sie dem Holzbau künftig auch in der Aussenansicht der Gebäude eine geschätzte und eindrucksvolle Wahrnehmung verschaffen. Dafür muss das Holz effektiv und langhaltend vor Witterungseinflüssen wie UV-Licht und Feuchtigkeit geschützt und gleichzeitig die Ästhetik der Oberfläche bewahrt werden. Die natürliche Verwitterung wird als störend und unansehnlich wahrgenommen und ist heute oft ein Grund, Holz nicht zu verwenden. Deshalb ist es wichtig, die rasanten technologischen Fortschritte in der Nanotechnologie und Materialforschung für gezielte Holzmodifikationen zu nutzen und so dem Holzbau im 21. Jahrhundert zum Durchbruch zu verhelfen.

Auch für den Innenbereich sind der Schutz vor Verfärbungen der Holzoberflächen sowie die Dimensionsstabilität wichtige Themen. Dies gilt sowohl für Möbel und Fussböden wie auch für dekorative Furnieroberflächen in Flugzeugen, Booten, in Tram- oder Eisenbahnwagen oder in Autos. In hochpreisigen Segmenten gibt es zudem ein grosses Interesse an Holzfunktionalisierungen, die ganz neue Eigenschaften besitzen, wie beispielsweise elektrische Leitfähigkeit, Magnetisierbarkeit oder Transparenz (Li et al. 2016; Merk et al. 2014; Trey et al. 2012; Wan et al. 2017; Zhu et al. 2016). Mit ihnen eröffnen sich neue Material- und Designkonzepte im Holzbereich, was zur umfänglichen Substitution von Kunststoffen und Metallen führen kann.

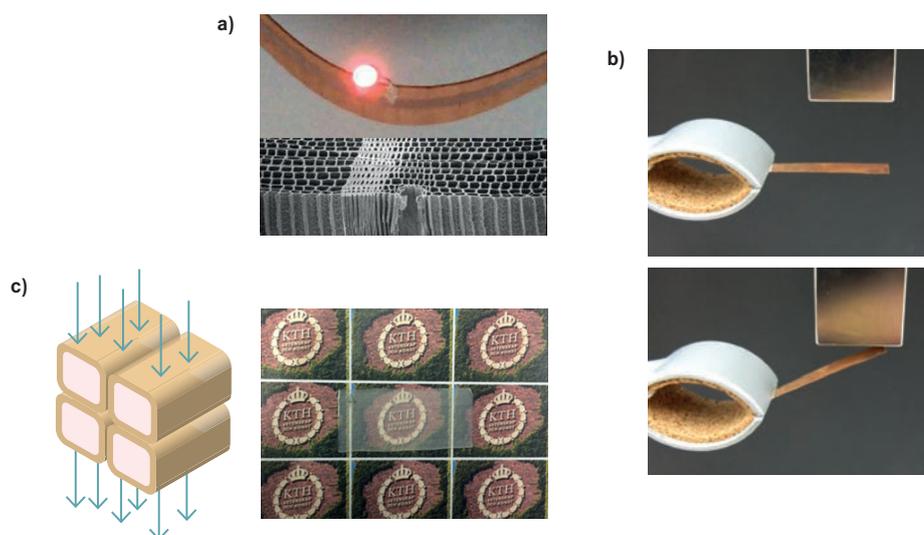


Abb. 2 Durch Holzfunktionalisierungen kann Holz mit neuen Eigenschaften ausgestattet werden, wie beispielsweise a) elektrische Leitfähigkeit (Dank an Huizhang Guo), b) magnetische Eigenschaften (Merk et al. 2014) oder c) optische Eigenschaften wie Transparenz (Li et al. 2016). Dadurch ergeben sich neue Anwendungsmöglichkeiten für die Ressource Holz.



Abb. 3 Ausgangsmaterialien wie Holzspäne oder Holzfasern können zu Holzwerkstoffplatten mit unterschiedlicher Struktur und unterschiedlichen Eigenschaften verarbeitet werden. Bilder links: OSB-Platte und zugehörige Späne; Bilder Mitte: herkömmliche Spanplatte und zugehörige Späne; Bilder rechts: MDF Platte und zugehörige Fasern (Dank an Heiko Thömen).

Bei Plattenwerkstoffen sind für die zukünftige Entwicklung eine Reduktion der Dichte und die Verklebung bedeutsam. Plattenwerkstoffe können dank verbesserter Prozesstechnologien mit deutlich reduziertem Gewicht hergestellt werden. Damit werden Material und Kosten gespart; die Entwicklung neuer Konzepte und Produkte wird möglich, z.B. im Möbelbau, bei der Verpackung und im Fahrzeugbau. Wichtig ist auch der Klebstoffeinsatz zum Binden der Holzwerkstoffplatten. Es ist damit zu rechnen, dass langfristig keine Holzwerkstoffe mehr eingesetzt werden, die mit formaldehydhaltigen Klebstoffen verklebt wurden, und dass auch weitere synthetische Klebstoffsysteme in Zukunft kritisch hinterfragt werden. Sie können durch biobasierte Klebstoffe ersetzt werden, die allerdings noch tiefgreifend charakterisiert und für den spezifischen Einsatz im Trocken- und Feuchtbereich optimiert werden müssen, um so den aktuellen Standards genügen zu können.

Aus Holz isolierte strukturelle und chemische Komponenten haben ein grosses Potenzial. Sie werden mit funktionsspezifischen Eigenschaften ausgestattet und in hochwertige Produkte umgesetzt. Bei der Verwendung von Holzkomponenten steht derzeit die Funktionalisierung von Nanozellulose eindeutig im Vordergrund. Dabei werden vergleichsweise einfache, teilweise wasserbasierte Modifizierungsansätze verfolgt (Oxidierung, Acetylierung, Silanisierung), da diese in der Industrie

sehr gut bekannt sind. Wichtige Fortschritte wurden im Bereich innovativer Isolations-, Modifikations- und Trocknungsansätze oder Kombinationen mit anderen Materialien erzielt, welche zu neuen Eigenschaftsprofilen und Materialkonzepten und damit neuen Anwendungsmöglichkeiten führen. Die notwendigen Upscaling-Prozesse profitieren von der rasanten Entwicklung des 3-D-Drucks, bei dem zunehmend auch aus dem Holz gewonnene Biopolymere eingesetzt werden. Ihr vermehrter Einsatz in diesen zukunftsweisenden Fertigungsverfahren wird zu gänzlich neuartigen holzbasierten Materialien führen.

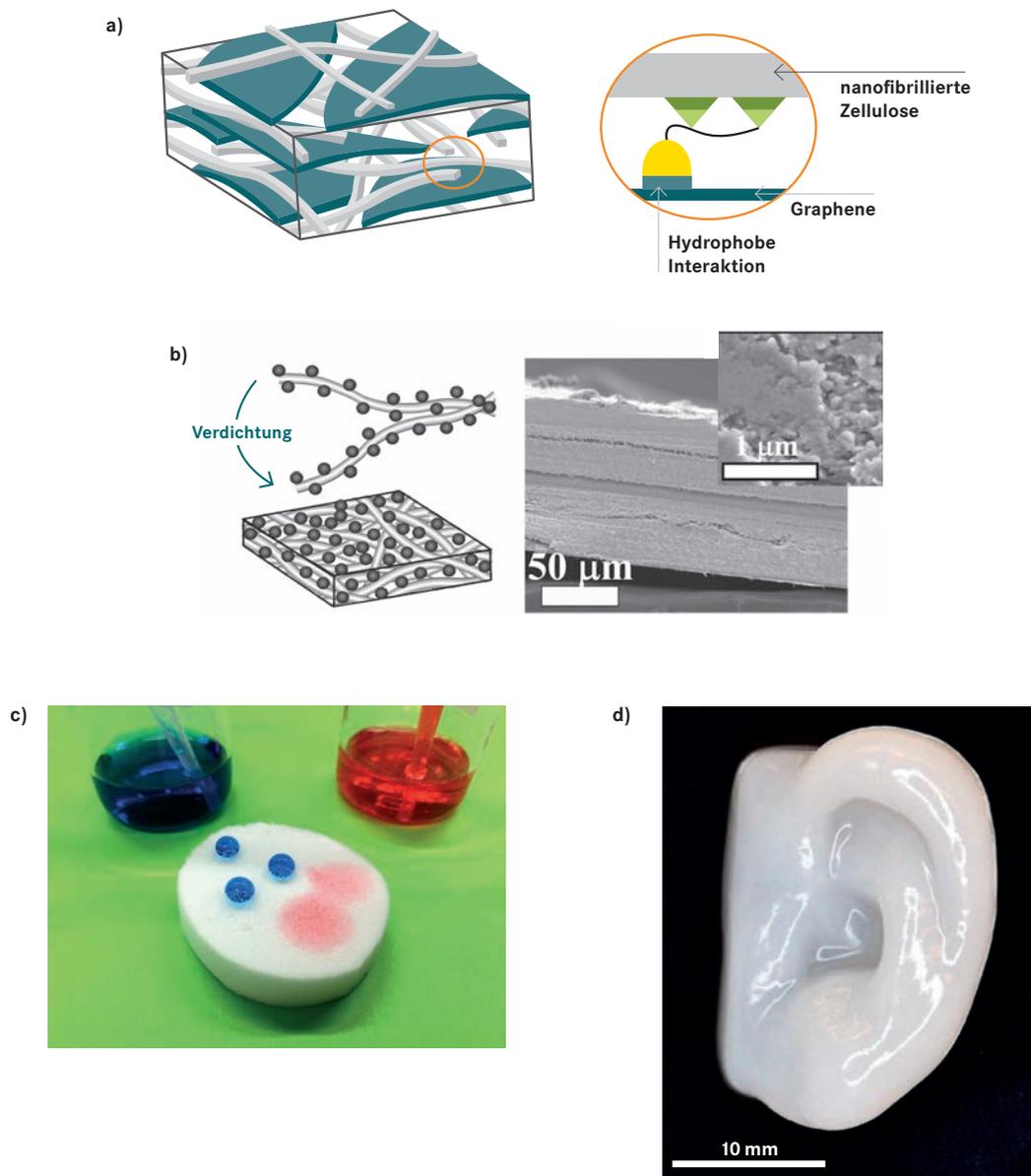


Abb. 4 Durch die Funktionalisierung bzw. den 3-D-Druck von Nanocellulose können neuartige Materialien und damit neue Anwendungsfelder generiert werden. Beispielhaft genannt sind a) Nanocellulose-Graphen-Hybride (nachgezeichnet nach Laaksonen et al. 2011), b) Magnetisches Nanopapier (Olsson et al. 2010), c) Ölabsorbierende und Wasser abweisende Schwämme (Dank an Tanja Zimmermann), d) Zellulosebasierte Strukturen für den biomedizinischen Bereich (Markstedt et al. 2015).

Aktuelle Situation und Herausforderungen der Holzforschung in der Schweiz

In der Schweiz findet die materialbezogene Forschung im Bereich Holz und holzbasierte Materialien an Hochschulen und in verschiedenen Unternehmen der Holzindustrie statt. Im akademischen Bereich wird an vielen Standorten geforscht, wobei die ETH Zürich, die Empa sowie die Fachhochschule in Biel die grössten Einheiten darstellen.

Bedeutsame Aktivitäten mit spezifischen Fragestellungen sind an der Universität Freiburg (Adolphe Merkle Institut), der EPFL und der Universität Basel vorhanden. Allein die Fachhochschule Biel bietet ein Studium auf dem Feld der Holztechnik an (Bachelor: Holztechnik; Master: Wood Technology). Es gibt keinen holzspezifischen Universitätsstudiengang in der Schweiz wie beispielsweise in Österreich oder Deutschland.

Durch die Bündelung der wissenschaftlichen Aktivitäten im Rahmen des NFP 66 wurde die internationale Sichtbarkeit der Schweizer Holzforschung erhöht und eine bessere internationale Vernetzung geschaffen. Diese kann nun genutzt werden, um die Sichtbarkeit des Wissenschaftsthemas weiter zu erhöhen; anderenfalls droht im globalen Wissenschaftsbetrieb eine Marginalisierung, da die Grösse der Wissenschaftscommunity zunehmend ein Faktor für den Publikationserfolg wird. Um das Interesse am Holz zu erhöhen, müssen deutlich mehr Kooperationen mit anderen Wissenschaftsdisziplinen entstehen und mehr Talente aus anderen Disziplinen für die Materialforschung am Holz begeistert werden. Zusätzlich ist es bedeutsam, das Thema Holz in grösseren Wissenschaftsfeldern wie der Chemie oder der Materialwissenschaft stärker zu verankern.

Für die Vernetzung zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Politik im Bereich Holz ist das von der KTI geförderte nationale thematische Netzwerk S-WIN eine sehr gute Plattform. Auf diese Weise gibt es kurze Wege bei neuen Materialentwicklungen, Innovationen sowie Problemstellungen. Durch S-WIN wird derzeit eine Roadmap 2030 erarbeitet, bei der die im NFP 66 gewonnenen Erkenntnisse direkt eingearbeitet werden. Sie ist die Grundlage für eine verbindliche Vereinbarung zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und öffentlicher Hand, um Holz den notwendigen Stellenwert in Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft zu verschaffen. Dies beginnt mit der universitären und betrieblichen Ausbildung und setzt sich in Forschung, Bil-

dung und wirtschaftlicher Umsetzung fort. Dabei spielen auch die Verbände, wie beispielsweise Lignum, Holzbau Schweiz oder Holzindustrie Schweiz, eine bedeutende Rolle, indem sie Möglichkeiten zur Vernetzung bieten, wichtige Informationen rund um das Thema Holz zur Verfügung stellen und als Anlaufstellen und Interessenvertretung für die holzbe- und -verarbeitenden Unternehmen fungieren. Der Bund und die Kantone sehen die holzwirtschaftlichen Erfordernisse neben einer Stärkung des Wirtschaftsstandorts auch im Hinblick auf die Zusammensetzung der Wälder und die nachhaltige und effiziente Nutzung der Ressource. Hierauf ist auch die Projektförderung seitens des Bundes ausgerichtet (z.B. BAFU: Aktionsplan Holz, Wald- und Holzforschungsfonds). Diese soll dazu führen, dass das nachwachsende Rohholzpotenzial ausgeschöpft und die stoffliche Verwertung gefördert wird. Dabei steht die Verwertung von Laubholz im Fokus. Dessen Anteil wird in den Schweizer Wäldern weiter zunehmen.

Der Wandel hin zum Laubholz stellt für Wirtschaft und Wissenschaft eine grosse Herausforderung dar, da das Laubholz aufgrund seiner Eigenschaften und der auf die Verarbeitung von Nadelholz optimierten Prozesse nicht ohne Weiteres in die gegenwärtige Wertschöpfungskette integriert werden kann.

Weil sich die Artenzusammensetzung der Schweizer Wälder ändert, ist vorausschauendes Handeln erforderlich. Insbesondere mit Blick auf die stoffliche Nutzung der Buche müssen Ansätze gewählt werden, die das Potenzial der Holzart voll nutzen.

Laubholz – der Wald ändert sich

Der Anteil des Laubholzes nimmt in Schweizer Wäldern immer mehr zu. Vor allem wachsen heute mehr Buchen als noch vor einigen Jahren. Experten rechnen damit, dass dieser Trend in den nächsten 60 Jahren anhalten wird, bevor durch die Klimaerwärmung der Buchenbestand dann wieder abnimmt. An die Stelle der Buchen treten dann andere Laubbaumarten, die den veränderten Umweltbedingungen besser angepasst sind, wie Eichen, Ahorn oder Pappel. (<http://www.wsl.ch/lud/portree/download.ehtml>)

Für die Holzwirtschaft ist die Zunahme der Laubholzarten eine Herausforderung, denn sie lassen sich zurzeit noch schlechter verarbeiten als Nadelhölzer. Für die nächsten Jahrzehnte müssen also wirtschaftlich tragfähige Lösungen gefunden werden, auch Laubhölzer sinnvoller nutzen zu können.

In ihrer Forschung konzentrieren sich die Schweizer Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen sowie Unternehmen auf spezifische Themenfelder, da es wenig Sinn macht, mit anderen Ländern in allen Bereichen der Holzforschung und Holznutzung zu konkurrieren. Diese Konzentration ist auch deshalb notwendig, da hierzulande hauptsächlich vergleichsweise kleine Firmen als Sägereien und im Holzbau tätig sind. Daneben gibt es wirtschaftliche Aktivitäten im Schäl furnier-, Faser- und Spanplattenbereich sowie bei der Herstellung von Holzfußböden. Ein in der Schweiz wirtschaftlich stark vertretener Sektor ist die Klebstoffentwicklung und -produktion sowie die Beschichtung, die insbesondere im Holzbau eng mit den Holzunternehmen verknüpft ist.

In jüngster Zeit sind einige gemeinsame Leuchtturmprojekte von Wissenschaft und Wirtschaft entstanden, in denen der materialeitige und der ökologische Vorteil des Holzes deutlich zu sehen sind. Hierbei sind das NEST Modul Vision Wood und das ETH House of Natural Resources beispielhaft zu nennen.

Damit die Unternehmen in die Fertigung von neuen holzbasierten Materialien investieren, muss das Marktpotenzial der Produkte gesichert sein. Für die Etablierung neuartiger, anspruchsvoller technologischer Prozesse in Holzunternehmen sind zudem umfangreiche Investitionen erforderlich, die nur getätigt werden, wenn vorab die industrielle Umsetzbarkeit sichergestellt werden kann. Dieser Nachweis kann in der Schweiz zurzeit nur

sehr bedingt geführt werden; dieses Manko ist das zentrale Problem beim wirtschaftlichen Transfer der Materialinnovationen. Hieraus ergibt sich die zentrale Handlungsempfehlung dieses Synthesenberichts zum Aufbau eines grossmasstäblichen Technikums in der Schweiz, die zum Abschluss des Dokuments ausgeführt wird.

Die Forschungsprojekte

Der Berichtsteil zu den Forschungsprojekten ist in drei grosse Themenblöcke unterteilt.

- Holzmodifikationen (Material und Oberfläche)
- Optimierung von Plattenwerkstoffen (Dichte und Klebstoffe)
- Nanozellulose (mikrofibrillierte Zellulose und nanokristalline Zellulose)

In den einzelnen Themenblöcken wurden jeweils eigene Forschungsschwerpunkte gesetzt.



Abb. 5 Zwei Leuchtturmprojekte in der ETH Domain, in denen Materialmodifikationen unter realen Bedingungen getestet werden können: Modulares Forschungs- und Demonstrationsgebäude NEST mit dem Modul Vision Wood an der Empa, Dübendorf (links), Forschungs- und Demonstrationsgebäude ETH House of Natural Resources am Campus Höggerberg (rechts).

MODIFIKATION VON HOLZ UND HOLZ-OBERFLÄCHEN

Durch physikalische, chemische oder biologische Verfahren die Materialeigenschaften von Holz gezielt zu verbessern und damit dessen Einsatzmöglichkeiten zu erweitern – das ist der Ansatz im breiten Forschungsfeld der Holzmodifikationen. Im Fokus stehen eine höhere Dimensionsstabilität und Dauerhaftigkeit sowie robustere Oberflächen von Holzprodukten.

Wissenschaftlicher Background und wirtschaftliche Aspekte

Holzmodifikationen zielen im Wesentlichen auf Veränderungen der Eigenschaften des Holzes ab, bei denen für eine intensivere Nutzung des Werkstoffes grundlegender Verbesserungsbedarf besteht. Dies umfasst im Besonderen das Quell- und Schwindverhalten, die Dauerhaftigkeit, die Brennbarkeit und die Oberflächeneigenschaften des Holzes hinsichtlich UV-Stabilität und flüssigkeitsabweisenden Verhaltens.

In den vergangenen Jahrzehnten wurde intensiv geforscht, um die Dimensionsstabilität des Holzes zu verbessern, und einige Verfahren konnten kommerziell etabliert werden. Darunter sind thermische Vergütungsverfahren sowie Verfahren zur chemischen Modifikation, von denen allererst die Acetylierung zu nennen ist (Fuchs 1928; Hill 2006; Kumar 1994; Militz 1991; Pfeffer et al. 2012; Rowell 2006; Tarkow 1949; Tarkow et al. 1946; Tjeerdma et al. 1998).

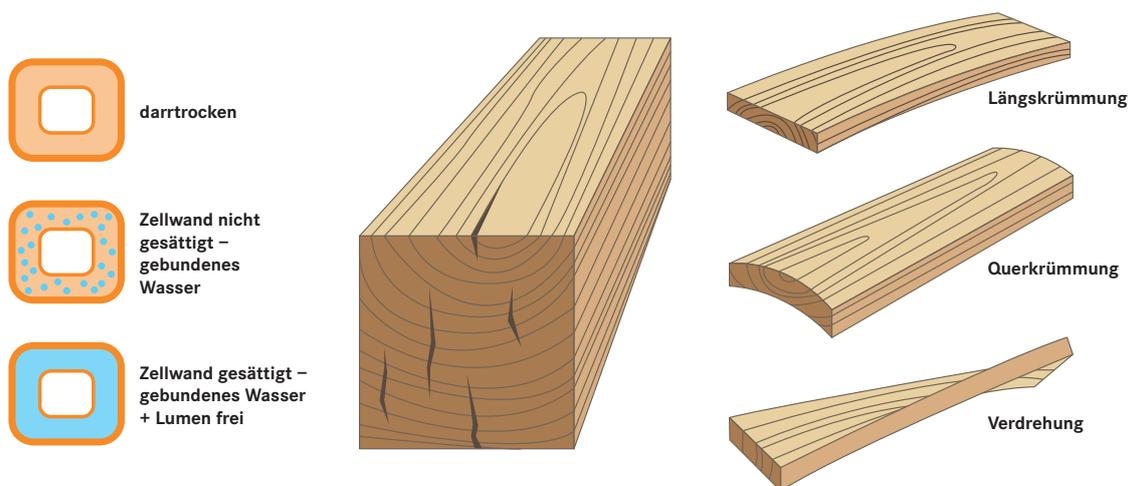


Abb. 6 Holz ist hygroskopisch und kann bei Wasseraufnahme in die Zellwand, bis der sogenannte Fasersättigungspunkt erreicht ist, quellen bzw. bei Wasserabgabe schwinden. Dabei strebt Holz eine Ausgleichsfeuchte an. Da Holz in seinen Raumrichtungen unterschiedlich stark quillt und schwindet (Anisotropie), kann es zu Verformungen und Rissbildungen kommen. Verformungen in der Abbildung rechts; nachgezeichnet (Original: Verlag Europa Lehrmittel).

Durch Acetylierung wird Holz dimensionsstabiler und dauerhafter

In einem verhältnismässig einfachen Prozess können die für Feuchteanlagerung und das Quellen und Schwinden verantwortlichen Hydroxylgruppen in der Holzzellwand blockiert werden. Accoya®-Holz wurde in langjähriger Forschungs- und Entwicklungsarbeit insbesondere für Aussenanwendungen entwickelt. Durch die Acetylierung unter optimierten technologischen Bedingungen entsteht ein hochwertiges Holzprodukt mit erhöhter Dimensionsstabilität und Dauerhaftigkeit.

<http://www.neueholzbau.ch/de/produkte/accoya/>

Materialseitige Verbesserungen der Dauerhaftigkeit können auch durch das Einbringen von Substanzen erreicht werden, die für Pilze und Insekten toxisch sind (Stirling and Temiz 2014). Dieser sogenannte chemische Holzschutz ist gut erforscht und kommerzialisiert, kommt aber aufgrund der Toxizität der Substanzen, verbunden mit der Entsorgungsproblematik, zunehmend unter Druck. In jüngster Zeit werden Holzschutzmassnahmen zunehmend mit Nano- und Mikropartikeln aus Kupfer, sogenannten Micronized Copper, durchgeführt (Civardi et al. 2016). Darüber hinaus gibt es vielversprechende Ansätze, um Pilzbefall durch den Einsatz von natürlichen Antagonisten zu verhindern und so auf klassische Holzschutzmassnahmen verzichten zu können (Ribera et al. 2017).

Der Schutz der Holzoberfläche vor UV-Strahlung und Bewitterung ist eines der drängendsten Pro-

bleme der Holzvergütung. Gesucht wird eine Beschichtung, die Farbveränderungen über einen langen Zeitraum wenn nicht verhindert, so doch merklich reduziert. Holzanstriche werden in der Regel mit organischen (HALS) oder anorganischen (ZnO-, TiO₂-Partikeln) UV-Absorbern kombiniert (Allen et al. 2002; Evans et al. 2013; Forsthuber and Grill 2010; Grüneberger et al. 2015; Salla et al. 2012). Im Bereich der Grundlagenforschung wurden in jüngster Zeit verschiedene Arbeiten veröffentlicht, in denen der UV-Schutz durch metall-oxidische Strukturen oder Beschichtungen direkt auf der Holzoberfläche bei weitgehendem Erhalt der optischen Eigenschaften des Holzes erzielt werden soll (Fu et al. 2015; Guo et al. 2016; Yao et al. 2016). Ein weiterer Ansatz besteht darin, das nicht UV-stabile Lignin vorab oberflächennah abzubauen. Dabei vergraut die Holzoberfläche, bleibt danach aber deutlich farbstabiler (Firma Schilliger Produkt biood®). Hierbei ist von weiterem Forschungsinteresse, ob die so ligninreduzierte Oberfläche mechanisch stabilisiert werden kann.

Das Interesse der Wirtschaft an neuen holzbasierten Materialien ist gross, denn der Holzbau im urbanen Bereich benötigt Holz mit hoher Zuverlässigkeit und exzellenter Performance. Zudem lässt sich der Einsatzbereich des Holzes erweitern, und neue Märkte, wie beispielsweise im Automobilbau oder bei der Innenausstattung von Flugzeugen, können erschlossen werden. Dies verspricht eine grössere Wertschöpfung im Holzbereich, als sie heute erzielt werden kann.

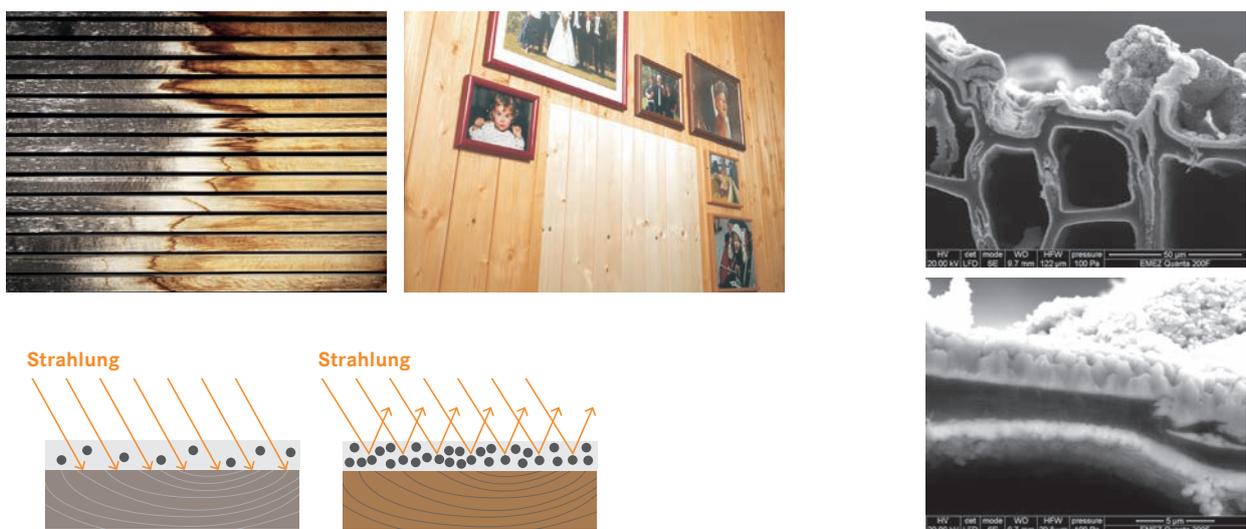


Abb. 7 Eine ungeschützte Holzoberfläche verfärbt sich durch sichtbares Licht oder UV-Einstrahlung. Dies betrifft sowohl den Innen- als auch den Aussenbereich, wobei durch den Einfluss des Wassers im Aussenbereich noch weitere Faktoren hinzukommen, welche die Ästhetik der Oberfläche beeinträchtigen. Oberflächenbehandlungen durch Anstriche, welche UV-Absorber enthalten, oder anorganische Dünnschichten aus UV-absorbierenden Metalloxiden können die Farbveränderung deutlich reduzieren (Dank an Wolfram Seiter, Bosshard + Co. AG; Bilder rechts: Guo et al. 2016).

Projekte zur Holzmodifikation

Nanotechnologie im Dienste der Holzkonservierung

Alke Fink (Adolphe Merkle Institut, Universität Freiburg),
Thomas Volkmer, Bernard Grobéty und Barbara Rothen-
Rutishauser

Ziel des von Alke Fink und ihrem Team durchgeführten Projekts war es, ein besseres Verständnis der grundlegenden Prinzipien der Nanopartikeleinlagerungen in die Holzstruktur zu erlangen. So sollten wichtige Erkenntnisse über den Einsatz von Nanopartikeln im Bereich des Holzschutzes gewonnen werden. Im Projekt wurden Modell-Nanopartikel zur Imprägnierung von Holz hergestellt. Anhand dieser Nanopartikel konnten Einlagerung und Verteilungsmuster in der Holzstruktur mit verschiedenen Charakterisierungsmethoden intensiv untersucht werden. Dabei lag ein Fokus der Untersuchungen auf den Eigenschaften der Nanopartikel und deren Interaktion mit der Holzstruktur. Basierend auf der genauen Kenntnis dieser Interaktion und der Prozesse, die bei der Holzimprägnierung eine Rolle spielen, sollten bessere Voraussetzungen geschaffen werden, um bestehende Systeme zu optimieren oder um neue Holzschutzmittel zu finden, die auf Nanopartikeln basieren.

Die Dauerhaftigkeit des Holzes kann durch das Einbringen von organischen oder anorganischen Bioziden erhöht werden, da diese den Abbau des Holzes durch Pilze oder Insekten erschweren oder bestenfalls gänzlich verhindern. Allerdings werden die chemischen Substanzen über die Jahre teilweise wieder freigesetzt, was zum einen ein gewichtiges Risiko für die Umwelt darstellt und zum anderen die Schutzwirkung des Holzschutzmittels reduziert.

Daher ist es ein Ziel der Forschung, gleichzeitig hocheffiziente und möglichst umweltverträgliche Holzschutzmittel zu entwickeln. Hierbei können Nanopartikel aufgrund ihrer spezifischen Oberflächeneigenschaften und Funktionalisierbarkeit eine bedeutende Rolle spielen. Bereits jetzt werden derartige Holzschutzmittel, wie das Micronized Copper, eingesetzt, die eine grosse Bandbreite an Partikelgrößen und einen hohen Anteil an Nanopartikeln enthalten. Bei der genauen Analyse von Micronized-Copper-Proben stellte sich heraus, dass die Partikel im Mikroskop nicht homogen verteilt sind und eine Charakterisierung der Partikelgrößenverteilung so nicht möglich ist. Die Analyse der Größenverteilung und der Form der Partikel konnte durch ein neu entwickeltes Verfahren mit Rinderalbumin erreicht werden. Diese Methode kann

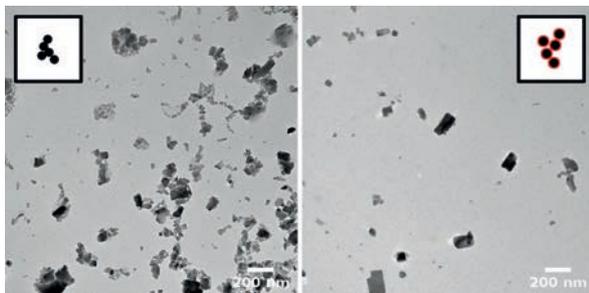


Abb. 8a Vergleich von transmissionselektronenmikroskopischen Aufnahmen von Partikeln mit und ohne Rinderalbumin zur vereinfachten Analyse der Nanopartikel.

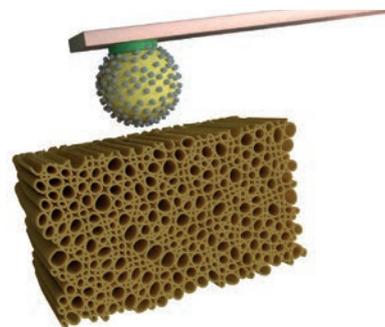


Abb. 8b Schematische Zeichnung einer Polystyrol-Kugel, beschichtet mit Siliziumdioxid-Nanopartikeln, die an einem spitzenlosen AFM-Cantilever befestigt ist. Das Schema zeigt das Prinzip der Messung der Oberflächeninteraktion von Nanopartikeln mit einer Holzprobe.



Abb. 8c Analyse der Verteilung von Nanopartikeln im Kiefernholz mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie. In den mit pinker Farbe gekennzeichneten Regionen befinden sich Siliziumdioxid-Nanopartikel

für die Analyse partikelbasierter Holzschutzmittel verwendet werden und findet grossen Anklang in der Nanopartikel-Forschungsgemeinschaft.

Zu Beginn des Projektes wurden verschiedene Modell-Nanopartikel hergestellt, die sich bezüglich ihrer Grösse und Oberflächenchemie deutlich unterscheiden. Holzproben wurden mit den Modell-Nanopartikeln imprägniert, um die Interaktion zwischen den Partikeln und der Holzstruktur zu untersuchen. Dafür wurden hochauflösende Charakterisierungsmethoden angewandt. Durch den Einsatz von oberflächenverstärkter Raman-Streuung konnte mit grosser Präzision die Einlagerung sehr geringer Mengen von Modell-Nanopartikeln sichtbar gemacht werden. Daher kann diese für die Holzcharakterisierung optimierte Methode genutzt werden, um die Imprägnierung des Holzes mit Holzschutzmitteln, welche metallische Nanopartikel wie etwa Kupfer enthalten, zu untersuchen. In einem zweiten Forschungsansatz wurde die Imprägnierung des Holzes mit Nanopartikeln unterschiedlicher Grösse vergleichend untersucht. Es wurde gezeigt, dass eine Partikelgrösse < 100 nm einen Einfluss auf die erzielte Eintragsmenge hat. Die Untersuchung führte zudem zur Bestimmung eines oberen Schwellenwertes für die Imprägnierung von Laub- und Nadelholz mit Nanopartikeln. In einer dritten Studie zum chemischen Holzschutz wurde die Interaktion verschiedener Nanopartikeloberflächen mit der Holzzellwand untersucht. Messungen mit Kraftspektroskopie erlaubten es, die Adhäsionskraft von Nanopartikeln an der Holzzellwand zu bestimmen und dadurch sehr zeitaufwendige, aber zurzeit gebräuchliche Auswaschungsexperimente zu ersetzen.

Basierend auf den Ergebnissen ist es nun möglich, schnell und präzise die potenziell für den Holzschutz benutzbaren Nanopartikel im Holz zu charakterisieren. Dabei kann die Imprägnierungstiefe bestimmt werden, und die Grösse, die Gröszenverteilung und die Oberflächeneigenschaften der Nanopartikel können konsequent adaptiert und optimiert werden. Dies erleichtert Forschenden und Unternehmen die grundlegende Untersuchung von nanopartikelbasierten Holzschutzmitteln sowie deren Interaktion mit der Holzstruktur.

Holz und Holzwerkstoffe mit verbesserten Eigenschaftsprofilen für den Holzbau

Ingo Burgert (ETHZ und Empa), Hans Jürgen Herrmann, Falk Wittel, Emanuela DelGado

Ziel des Projektes war die Entwicklung neuartiger Modifikations- und Funktionalisierungsansätze, um dem Holz verbesserte und neuartige Eigenschaften zu verleihen. Dieser Ansatz basiert auf dem Konzept, die wasserzugängigen Hydroxylgruppen des Holzes chemisch nicht abzusättigen, um Holz so möglichst «inert» zu machen, sondern diese chemischen Gruppen für eine gezielte Funktionalisierung des Holzes zu nutzen. Dabei sollten die Modifikationsansätze möglichst modular sein, das heisst, sie sollten durch einen zweistufigen In-situ-Polymerisationsprozess die Anbindung von Monomeren mit unterschiedlichen chemischen Eigenschaften erlauben und damit zu verschiedenartigen Eigenschaftsprofilen bei der Holzmodifizierung führen.

Im Projekt wurden Methoden zur modularen In-situ-Polymerisation in der Holzzelle und der Zellwand entwickelt. Hierbei wurden im ersten Schritt kovalente Bindungen zu den holzeigenen Hydroxylgruppen unter anderem mit einem Radikalpolymerisationsinitiator und mit den bifunktionalen Precursormolekülen Methacrylsäureanhydrid und Methacryloylchlorid etabliert. Anschliessend können dann hydrophobe Polymere, wie beispielsweise Styrol, aber auch «stimulus-responsive» Polymersysteme in der Zellwand verankert werden. Ein weiterer methodischer Schwerpunkt des Projekts lag auf der Charakterisierung des modifizierten Holzes zur Überprüfung des Modifikationserfolgs mit einer möglichst hohen Auflösung. Hierzu wurde die Raman-Mikroskopie intensiv genutzt, um die Einlagerung und Verteilung der chemischen Substanzen in der Zellwand aufzuzeigen. Dies wurde begleitet von Messungen der Veränderung der Holz-Wasser-Interaktion.

Durch die angewandten In-situ-Polymerisationen konnte die Wasseraufnahme des Holzes deutlich verringert und damit die Dimensionsstabilität erhöht werden. Die Modularität des Ansatzes erlaubte es auch, das Holz durch die Einlagerung eines «stimulus-responsiven» Polymers in Abhängigkeit von Temperaturänderungen schaltbar zu machen, d.h. seine Hygroskopizität gezielt zu ändern. Zudem ist es gelungen, die Verteilung der Polymere in der Zellwand durch unterschiedliche Reaktionskinetiken zu steuern, sodass eigenschafts- und anwendungsspezifische Verteilungsmuster möglich sind. Die experimentellen Arbeiten wurden durch Mo-

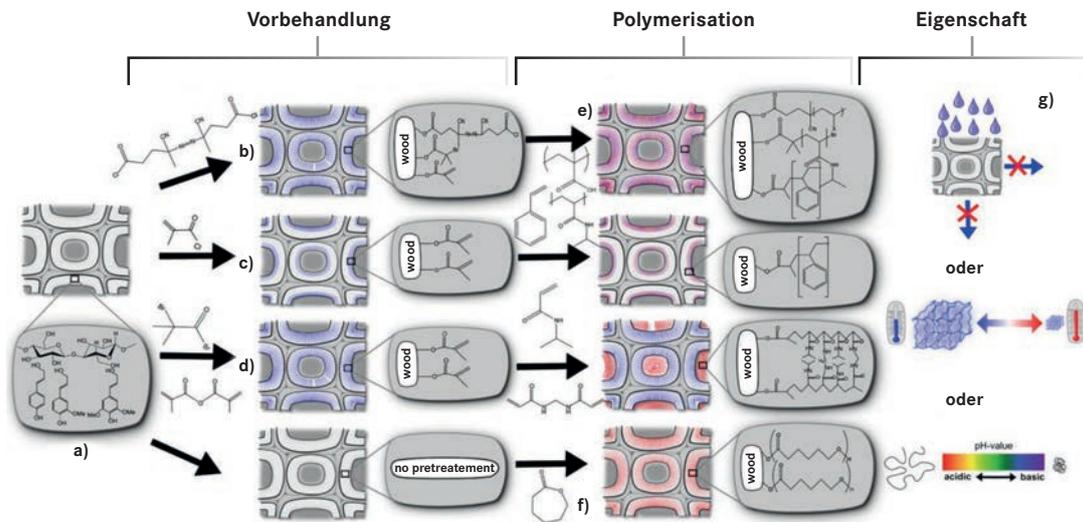


Abb. 9a Schema der modularen Modifikationsstrategien mittels Polymeren – a) holzeigene Hydroxylgruppen, b) Anbindung von Polymerisationsinitiatoren an die Hydroxylgruppen, c) Reaktion der Hydroxylgruppen mit Methacryloylchlorid, d) Reaktion der Hydroxylgruppen mit Methacrylsäureanhydrid, e) In-situ-Polymerisation von unterschiedlichen Monomeren, zum Beispiel Styrol, Methacrylsäure, N-Isopropylacrylamid, f) Ringöffnungspolymerisation von ϵ -Caprolacton, g) mögliche Eigenschaften des modifizierten Holzes, zum Beispiel erhöhte Dimensionsstabilität, temperatur- und pH-Wert-responsive Eigenschaften (Burgert et al. 2016).

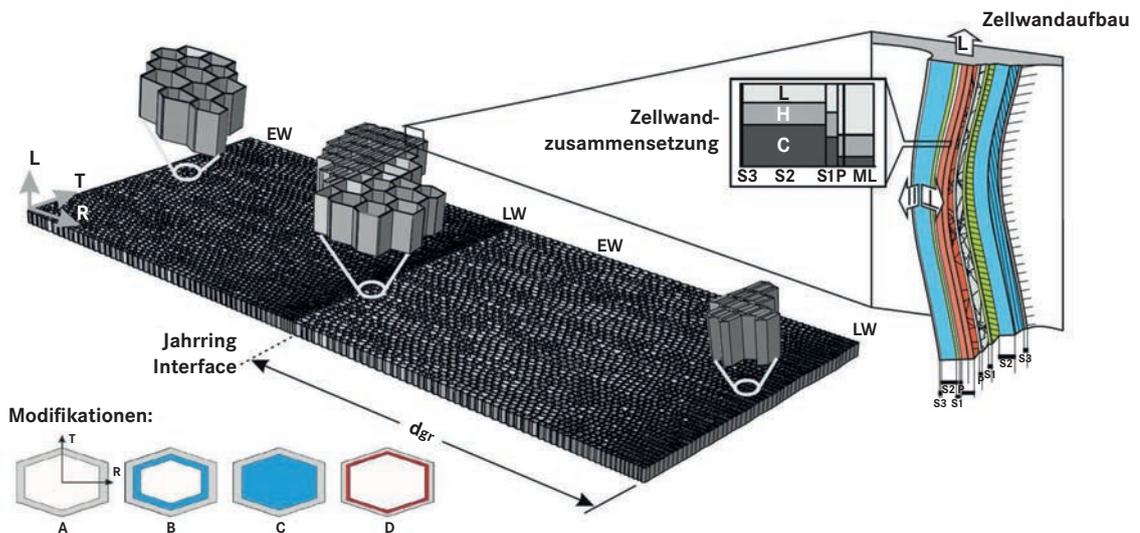


Abb. 9b Hierarchisches Holzmodell mit Früh- (EW) und Spätholz (LW), dem Zellwandaufbau mit Mittellamelle (ML), primären (P) und sekundären (S1-S3) Zellwänden, sowie deren chemische Zusammensetzung aus Lignin (L), Hemizellulose (H) und Zellulose (C). Betrachtet werden die drei generischen Modifikationen der Zellwandbeschichtung (B), Lumenfüllung (C) sowie Modifikation der S2-Schicht (D).

dellierung der Eigenschaften der modifizierten Materialien durch ein hierarchisches Mehrskalennmodell für Fichtenholz komplementiert. Mithilfe der Modellierung können die Effekte der Modifikationen auf die physikalischen Eigenschaften des Holzes auf verschiedenen Längenskalen simuliert werden. Die Analyse erfasst die Ebene der Jahrringe in Form von repräsentativen Volumenelementen (RVE). Mit diesem System können die Proben in Computerexperimenten Zug-, Druck-, Scher- und Quellungsexperimenten in Abhängigkeit vom Modifikationstyp unterzogen werden. Die deutlichsten Änderungen der mechanischen Eigenschaften zeigten sich in der Parameterstudie für die Schubkomponenten. Durch die Modellierung konnten die durch die Modifikation entstehenden Eigenschaftsveränderungen nachvollzogen und für grössere Probendimensionen simuliert werden. Dies ermöglicht ein zielgerechtes Upscaling der Modifikationen, welches für Furniere mit einem Versuchsreaktor realisiert wurde.

Aus den Forschungsarbeiten ergeben sich neue Möglichkeiten zur Entwicklung von holzbasierten Funktionsmaterialien. Für die Praxis sind gezielte Modifikationen von Furnieren zur Verbesserung des Eigenschaftsprofils von Interesse, die insbesondere einen Einsatz im dekorativen Bereich bei der Innenausstattung zum Beispiel von Autos, Yachten oder Flugzeugen ermöglichen. Die entwickelten Methoden benötigen zurzeit noch organische Lösungsmittel, was einer Implementierung in innovativen Holzprodukten entgegensteht. Um die Modifikationsverfahren in Zukunft umweltfreundlicher gestalten zu können, sind weiterführende Untersuchungen erforderlich.

Projekte zur Holzmodifikation

UV-Selbstschutz von Holzoberflächen durch Zellulosefasern

Thomas Volkmer (BFH), Martin Arnold, Francis W. M. R. Schwarze

Wenn Holz im Aussenbereich eingesetzt wird, verändert sich seine Farbe und die Beschaffenheit seiner Oberfläche. Lignin wird aufgrund der UV-Strahlung abgebaut und dann durch Regen ausgewaschen, wodurch die Oberfläche vergraut. Pilzbefall und Einlagerungen von Staub in der zurückbleibenden zellulosedominierten Schicht können in der Folge zu einer starken, oft sehr unregelmässigen Verdunkelung führen, sodass die Oberfläche zumindest nach den gängigen ästhetischen Vorstellungen unansehnlich wird. Ein Streichen mit Holzschutzlacken ist keine dauerhafte Lösung, da sich die Polymere nach einiger Zeit unter der UV-Strahlung zersetzen, der Anstrich blättert, wird abgebaut und muss erneuert werden. Dies macht den Unterhalt von Holzfassaden aufwendig und teuer. Die Idee von Thomas Volkmer und seinem Team besteht darin, eine holzeigene zellulosereiche Schicht auf Oberflächen aufzubauen, die das Holz vor einem weiteren photochemischen Abbau schützt, und somit auf den Einsatz von zusätzlichen UV-Schutzsystemen verzichtet werden kann. Mit dieser natürlichen Schutzschicht könnte die Verwitterung «eingefroren» werden. Im Rahmen ihres Projektes untersuchten die Forschenden, wie eine solche Schutzschicht langfristig auf der Oberfläche des Holzes stabilisiert werden kann. Ziel war es, auf diese Weise die ursprüngliche Farbe und die Homogenität der Oberfläche über einen Zeitraum von 20 bis 30 Jahren zu erhalten. Das könnte ein Ansatz sein, um Holz – was die Lebenszykluskosten betrifft – konkurrenzfähig gegenüber anderen Materialien werden zu lassen und die Verwendung von Fichte und Lärche als Fassadenelemente zu fördern.

Zunächst entwickelte das Team Verfahren, um die oberste Holzschicht zu delignifizieren. Dabei wird Lignin aus dem Holzgewebe entfernt – zurück bleibt eine zellulosereiche Faserschicht auf der Oberfläche, die das darunterliegende Holz gegenüber der UV-Strahlung abschirmt. Die Zellulosefasern reflektieren das Licht und schützen das tieferliegende Holz. Für die Delignifizierung der Oberfläche testeten die Forscher drei Methoden: a) Die Oberfläche wurde photochemisch abgebaut, während sie natürlich oder künstlich bewittert wurde; b) Das Lignin wurde chemisch abgebaut; und c) Pilze verursachten durch die

entsprechenden Enzymsysteme eine biologische Delignifizierung.

In Versuchsreihen wurden die Charakteristika der Delignifizierung und der Parameter für eine Prozessoptimierung erfasst. Die Bewertung der chemischen Veränderungen infolge des Ligninabbaus erfolgte durch FTIR-Messungen in bestimmten Zeitabständen und in verschiedenen Tiefen des Holzes. Der Verlust der mechanischen Festigkeit der oberflächennahen Schichten wurde durch mikromechanische Versuche bewertet. Die Oberflächenenergie und Rauigkeit wurden durch die Messung des Kontaktwinkels bzw. des Rauigkeitsprofils bestimmt. Die Analyse der ästhetischen Parameter, wie Farbe und Glanz, erfolgte mittels Kolorimeter zu verschiedenen Bewitterungszeiten.

In der zweiten Projektphase wurden mögliche Methoden zur mechanischen Stabilisierung der modifizierten Oberfläche untersucht. Eine derartige Stabilisierung ist notwendig, weil die delignifizierte Oberfläche einerseits die UV-Strahlung abschirmt, aber andererseits mechanisch instabil und sehr hy-

groskopisch ist, was den Pilzbefall befördert. Aus diesem Grund stellte der Schutz vor flüssigem Wasser einen Schwerpunkt bei der Stabilisierung der Oberfläche dar, welcher in erster Linie durch den Einsatz verschiedener Polymere erreicht werden sollte. Dabei wurden Acrylsysteme, natürliche und synthetische Öle sowie funktionalisierende Substanzen eingesetzt. Die Stabilisierung der Oberfläche kann sehr gut mit einer reinen Acrylatdispersion durchgeführt werden, wobei keine speziellen Additive für den UV-Schutz notwendig sind. Wenn es gelingen sollte, das Verfahren in einen industriellen Massstab zu überführen, wäre dies ein wichtiger Schritt, um der Anwendung von Holz im Aussenbereich zu einem Durchbruch zu verhelfen. Es würde die ästhetischen Nachteile beseitigen, die verwittertes Holz heute mit sich bringt, und seiner weiteren Verbreitung im Weg stehen. Momentan wird in einem industriellen Projekt dieser Ansatz weiterverfolgt und untersucht, wie sich die genannten Teilschritte (Delignifizierung, Stabilisierung) optimieren und in eine industrielle Anwendung überführen.

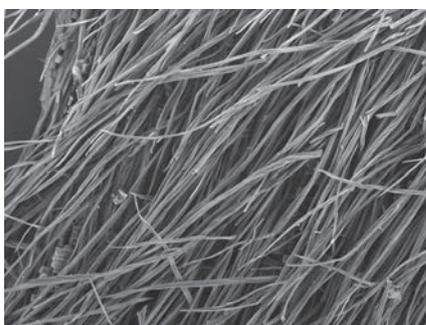
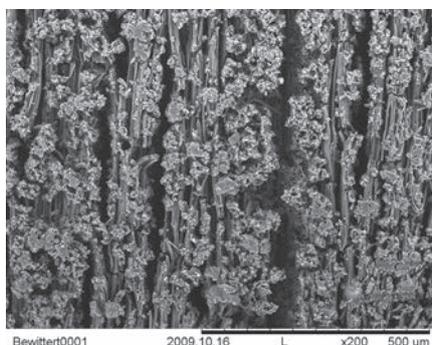


Abb. 10a Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer Robinienprobe nach mehrjähriger Bewitterung (Exposition West). Das Lignin der Mittellamellen ist komplett abgebaut und auf der Oberfläche haben sich Staubpartikel und Sporen abgelagert (links). Nach der Reinigung der Probe verbleibt eine zellulosereiche Faserschicht auf der Oberfläche (rechts).



Abb. 10b Das Bewitterungsverhalten von Fichteplatten im Verlauf eines Jahres bei einer Exposition Süd, 45° geneigt. Die Proben sind im unteren Teil gereinigt, was zu einer delignifizierten, homogenen Oberfläche führt.

Behandlung von Holzoberflächen mithilfe von Photoinitiatoren

Wood surface functionalisation using photoinitiators

Grütmacher Hansjörg (ETHZ), Tanja Zimmermann, Martin Arnold

Um Massivholz und Holzpartikel zu beschichten oder mit anderen Materialien zu verkleben, ist eine erhöhte chemische Reaktivität der beteiligten Oberflächen von grossem Vorteil. In diesem Projekt entwickelten die Forschenden neuartige Methoden zur Photoaktivierung der Holzoberflächen. Dazu verankerten die Forschenden an der Oberfläche des Holzes neuartige funktionelle Gruppen, welche diese photoreaktiv machen und der Oberfläche Eigenschaften verleihen, die eine einfachere Beschichtung oder den Verbund mit anderen Werkstoffen erlauben.

Die Forschungsarbeiten in diesem Projekt konzentrierten sich auf Oberflächenbehandlungen von zwei verschiedenen holzbasierten Materialien. Zum einen von Zellulose-Nanofasern (NFC) als faserartige, strukturelle Holzkomponente und zum anderen von Massivholzoberflächen im naturbelassenen Zustand. Die unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit sowie die verschiedenen Anwendungsgebiete der beiden Materialien ermöglichten es den Forschenden, verschiedene Modifizierungsstrategien zu verfolgen. Bei der Behandlung von NFC ging es darum, die Oberflächeneigenschaften besser aufeinander abzustimmen, um z.B. die Adhäsion zu verstärken oder um die NFC besser in Polymermatrizen von Verbundwerkstoffen einbetten zu können.

Es wurden erfolgreich zwei Ansätze zur photochemischen Herstellung von Kompositmaterialien aus Zellulosekomponenten und organischen Polymeren entwickelt. In dem einen wurden die Eigenschaften von Zellulose-Nanofibrillen durch Acryloyl verbessert. Durch eine nachfolgende Oxidation mit Wasserstoffperoxid entstanden photoaktive Gruppen auf der Oberfläche der Nanozellulose, die der Ausgangspunkt für die Polymerisation von Monomeren an der Oberfläche sind. In dem anderen Ansatz wurden photoaktive Polymere synthetisiert und anschliessend an Hydroxylgruppen auf der Oberfläche der Nanozellulose gebunden. Mit beiden Methoden konnte eine um 400 Gewichtsprozent gesteigerte Polymerisation von Methylmethacrylat (MMA) erreicht werden. Basierend auf diesen Ergebnissen können nun gezielt weitere Kompositmaterialien hergestellt und unter-

sucht werden. Sie ermöglichen es, die Reaktivität oder Funktionalität von Holzoberflächen massgeschneidert zu verändern. Solche Oberflächenmodifikationen haben ein hohes Innovationspotenzial und sind besonders wichtig für hochwertige Holz-anwendungen wie beschichtetes Holz im Aussenbereich, Holzwerkstoffe für den Holzbau oder für Holz-Kunststoff-Verbundmaterialien.

Synthese der Projekte: Folgerungen und Implementationspotenzial

Mit den im Themenblock Holz- und Holzoberflächenmodifikation durchgeführten Projekten wurden wichtige Schritte in Richtung einer hochwertigeren Verwendung der Ressource Holz unternommen. Da alle Projekte des Themenbereichs einen Fokus auf der Erarbeitung von Grundlagen hatten, ist noch weitere Forschung für eine technologische Umsetzung erforderlich, sodass überwiegend Readiness-Levels von 3 bis 4 zum Ende der Projektförderung erreicht wurden.

Die zukünftige wissenschaftliche und kommerzielle Entwicklung des Themenbereichs wird von weiteren Fortschritten in den Bereichen Nanotechnologie und Materialchemie stark geprägt werden. Diese werden weitere Verbesserungen des Eigenschaftsprofils des Holzes ermöglichen und das Upscaling erleichtern.

Zukünftige Nanopartikelsysteme müssen bezüglich Grösse, Grössenverteilung sowie Funktionalität noch besser kontrolliert und eingestellt werden können, um den Anforderungen des Holzschutzes präziser genügen zu können. Des Weiteren sind Umwelt, Recycling- und gesundheitliche Aspekte zu berücksichtigen, insbesondere wenn es um den Einsatz von Nanopartikeln geht. Hierzu wurden verschiedene Projekte im Rahmen des NFP 64 «Chancen und Risiken von Nanomaterialien» durchgeführt.

Die Zellwandmodifikationen werden das Einbringen unterschiedlicher Funktionalitäten erlauben und in Zukunft prozesstechnologisch so weiterentwickelt werden müssen, dass insbesondere der Einsatz organischer Lösungsmittel, die einem Upscaling entgegenstehen, vermieden werden kann. Hinsichtlich der Oberflächenmodifikation wird die weitere Grundlagenforschung zur Anbindung neuartiger funktionaler Polymere an die Holzoberfläche führen, welche die UV-Stabilität erhöhen oder auch die Interaktion der Oberfläche mit diversen Flüssigkeiten gezielt steuern lassen.

Wichtig wird hierbei sein, dass die Modifikationen chemisch und mechanisch robust genug sind, um den hohen Anforderungen im Holzeinsatz dauerhaft zu genügen.

Neben der weiteren Entwicklung in der Materialsynthese wird es zum anderen einschneidende Fortschritte beim Ausgangsmaterial Holz und seiner Charakterisierung geben. Holz wird in Zukunft noch besser durch Bioengineering sowohl durch genetische Veränderungen, z.B. in Form von leichter Delignifizierbarkeit, als auch den gezielten Einsatz von Pilzen oder Enzymsystemen für eine weitere Holzmodifikation vorbereitet werden können.

Bäume mit veränderten Eigenschaften

Durch gezielte Züchtung oder gentechnische Verfahren lässt sich das Holz schon im Wachstumsprozess massgeblich beeinflussen. Für lange Zeit stand dabei vor allem die Zuwachsleistung im Vordergrund. Heutzutage kann durch die rasante Entwicklung in der Gentechnologie gezielt die Struktur oder der Chemismus des Holzes verändert werden. Der Schwerpunkt liegt dabei zurzeit auf einer leichteren und spezifischeren Abbaubarkeit des Lignins, da dies für die Zellstoff- und Biokraftstoffproduktion von entscheidender Bedeutung ist. Die Möglichkeiten der Biotechnologie werden sich aber in Zukunft auch für die holzbasierte Materialentwicklung vermehrt nutzen lassen, um Bäume bereits im Vorhinein für eine optimierte Modifikation oder Funktionalisierung des Holzes gezielt wachsen zu lassen.

Die wirtschaftliche Umsetzung der Projektergebnisse zu den Themen Vollholz, Furnier und Oberfläche hängt davon ab, ob es möglich sein wird, die bisher im Labormassstab erprobten Verfahren in industrielle Produktionsprozesse zu überführen. Das grosse Potenzial ist erkannt und soll genutzt werden, wie die Gründung von zwei Spin-offs in diesem Bereich zeigt. Der Spin-off Myco Solutions nutzt Antagonisten für einen umweltfreundlichen und verbesserten Holzschutz. Der Spin-off Swiss Wood Solutions beschäftigt sich mit der Entwicklung hochwertiger Furniere mit verbesserten Eigenschaften für den Innenausbau und mit dem Ersatz von Tropenholz beim Bau von Musikinstrumenten.

Spin-off MycoSolutions

MycoSolutions AG ist ein Spin-off des Labors für Angewandte Holzforschung der Empa in St. Gallen. Das Unternehmen fokussiert sich auf die Herstellung und Vermarktung von Produkten, die im Rahmen des integrierten Pflanzenschutzes eingesetzt werden können. Antagonistische Pilze können zum Beispiel das Holz von Telefonmasten im Bereich des Erdkontakts vor Zerstörung schützen.

Spin-off Swiss Wood Solutions

Im Herbst 2016 wurde unter Beteiligung verschiedener Mitarbeiter der ETH/Empa Professur Holz-basierte Materialien der Spin-off Swiss Wood Solutions AG gegründet. Die Firma baut auf drei Pfeiler: Veredelung von Furnieren für High-end-Anwendungen im Innenbereich, Verdichtung einheimischer Hölzer für den Instrumentenbau sowie Dienstleistungen für Unternehmen der Holzbearbeitung und -verarbeitung. Geplant ist eine Produktion in Zusammenarbeit mit verschiedenen Firmen u.a. der Schweizer Holzindustrie.

Empfehlungen

- Die Forschenden müssen die Analyse der Prozesse und Materialien vertiefen, um ein besseres Verständnis der grundlegenden Wirkmechanismen der Holzmodifikationen zu erarbeiten.
- Die Bedeutung von Holz und Zellulose als strukturenbende Komponenten basierend auf der Syntheseleistung der Bäume muss als grundlegendes und zukunftsweisendes Konzept wissenschaftlich besser herausgearbeitet und mit der Entwicklung von Hybridmaterialien mit neuen und verbesserten Eigenschaften verknüpft werden.
- Eine stärkere, Längenskalen überbrückende Vernetzung der materialeseitigen Forschung mit der Forschung im Holzbau ist notwendig. Mehrgeschossiges Bauen im urbanen Bereich erfordert vom Holz materialeseitig maximale Performance, was durch Modifikationen sowohl des Holzes als auch seiner Oberfläche unterstützt werden kann.
- Die meist kleinen holzwirtschaftlichen Unternehmen müssen in die Lage versetzt werden, die Materialentwicklungen industriell in innovative Produkte umzusetzen. Hierfür braucht es ein grossmasstäbliches Technikum in der Schweiz (siehe Handlungsempfehlung am Ende des Syntheseberichts).
- Unternehmen, die ausserhalb des Holzsektors tätig sind, aber von der nachwachsenden Ressource Holz wirtschaftlich profitieren können, müssen besser in die Entwicklungen auf dem Holzsektor einbezogen werden. Dies betrifft zum Beispiel die Bauwirtschaft und die chemische Industrie, aber auch Branchen wie die Uhrenindustrie oder Filtertechnologie. Hier sollte das Netzwerk S-WIN als Akteur auftreten und durch direkte Kontakte und Veranstaltungen Verbindungen knüpfen.

OPTIMIERUNG VON PLATTENWERKSTOFFEN

Plattenwerkstoffe aus Holz gehören zu den am häufigsten verwendeten Materialien im Innenausbau sowie in der Möbel- und Einrichtungsindustrie. Unter anderem die Kritik an den herkömmlichen Bindemitteln und der Ruf nach Gewichtsreduzierung und schonendem Ressourceneinsatz machen weitere Optimierungen im Bereich der bio- und holzbasierten Plattenwerkstoffe notwendig.

Wissenschaftlicher Background und wirtschaftliche Aspekte

Plattenwerkstoffe sind bereits seit Jahrzehnten Gegenstand intensiver Forschungsaktivitäten in Wissenschaft und Industrie und es wurde ein hohes Mass an Fertigungskontrolle erreicht. Dabei spielen insbesondere die materialeitige Zusammensetzung der Platten (Holzart, Rinde, Altholz, Bindemittel) sowie die Presstechnologie eine ge-

wichtige Rolle. Zur weiteren Optimierung von Plattenwerkstoffen gibt es das Bestreben, eine deutliche Gewichtsreduzierung und Materialersparnis bei Spanplattenprodukten zu erreichen, insbesondere für Möbel. Beispiele für die Entwicklung besonders leichter Spanplatten ist die sogenannte Kaurit-Light-Technologie (http://www.kaurit-light.com/cm/internet/Kaurit_Light/), bei der ein Teil der Späne für die Mittelschicht durch vorgeschäumte Polystyrolkugeln ersetzt wird (BASF)



Abb. 11 Die Forschung im Bereich Holzwerkstoffplatten (Span/Faser) zielt auf leichtere Platten mit porösen Schaumkernen in der Mittellage und auf die Etablierung biobasierter Klebstoffe (Dank an Heiko Thoemen).

oder das sogenannte Balance Board, welches auf einer Zugabe von Biomassegranulat auf Basis von Einjahrespflanzen beruht (Fa. Pfeleiderer) (https://www.pfleiderer.com/PM/Produkte_und_Anwendungen/BalanceBoard). Eine weitere Möglichkeit besteht darin, durch im Herstellungsprozess aufschäumende Polymere in der Mittelschicht eine deutliche Gewichtsersparnis zu erzielen (Patent: Leichtbau-Holzwerkstoffplatte EP 2117792 B1, Universität Hamburg). Dabei müssen die Ausgangskomponenten so eingestellt werden, dass sich die Erweichungstemperatur des Schaums und die Aushärtetemperatur des Deckschichtklebstoffs in etwa entsprechen. Diesen Prozess mit einem biobasierten Schaum-Präkursor umzusetzen, war Ziel eines der NFP 66-Projekte.

Eine weitere Herausforderung besteht beim Bindemittelseinsatz. Hier waren die wissenschaftlichen Anstrengungen lange darauf fokussiert, diesen, bei gleichzeitigem Erhalt der Plattenqualität, möglichst stark zu reduzieren. Mit Blick auf den politischen Diskurs und die derzeitigen Trends bei den Zulassungsbestimmungen ist es dringend erforderlich, Alternativen zu den bisher dominierenden formaldehydbasierten Klebstoffen zu finden (<http://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/chemische-stoffe/formaldehyd>) (Lavoue et al. 2005). Ein Ansatz ist eine generelle Abkehr von synthetischen Bindemitteln und die Nutzung baumeigener Stoffe, wie beispielsweise Tannine (Pizzi et al. 1997; Stashevski und Deppe 1973), für deren Anwendung im Industriemasstab aber noch Forschungsbedarf besteht.

Mit den Unternehmen Swiss Krono und Pavatex gibt es zwei grosse Hersteller von Plattenprodukten bzw. holzbasierten Dämmmaterialien in der Schweiz, die von den Erkenntnissen des NFP 66 profitieren können. International zählen insbesondere global agierende Plattenhersteller und Unternehmen der Möbelindustrie zu den grossen Treibern von Innovationen in der Holzwerkstoffbranche. Diese grossen Hersteller wollen ihre Produktion nachhaltiger gestalten und weniger Ressourcen verbrauchen. Eine Reduktion des Plattengewichts wird vor allem im Möbelhandel angestrebt. Veränderungen im Kundenverhalten machen dies erforderlich, denn der Onlinehandel gewinnt auch hier immer mehr an Bedeutung.

Projekte zur Optimierung von Plattenwerkstoffen

Ultraleichte biobasierte Holzwerkstoffplatte mit Schaumkern

Heiko Thoemen (BFH), Christopher Plummer (EPFL), Jan-Anders E. Månson (EPFL), Tanja Zimmermann (Empa)

Der Trend im Möbelbau geht hin zu leichteren Materialien, die für die Verarbeitung, den Transport und für die Kunden eine Reihe von Vorteilen bieten. Im Rahmen des NFP 66-Projektes wurden ultraleichte Spanplatten entwickelt, bei denen ein Schaumkern aus Biomaterialien für eine Gewichtseinsparung sorgt. Gleichzeitig bleiben die Festigkeitseigenschaften herkömmlicher Spanplatten erhalten.

Eine der Strategien zur Gewichtsreduzierung von Holzwerkstoffplatten ist die Verwendung eines Sandwichaufbaus: Die Platte besteht aus einer leichten Mittelschicht und zwei spanplattenähnlichen Deckschichten. Bisher werden diese Platten aus drei getrennt hergestellten Schichten zusammengesetzt, woraus sich relativ hohe Kosten und damit eine Beschränkung auf Nischenmärkte ergeben. Ziel des Projektes war die Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von ultraleichten Spanplatten (ultra light-weight particleboard, ULPB, Dichte $< 350 \text{ kg/m}^3$), die aus einem biobasierten Schaum in der Mittelschicht bestehen. Der kontinuierliche Herstellungsprozess beginnt mit einem Verdichtungs- und Aushärtungsschritt für die Deckschichten, gefolgt von einem Expansionsschritt für den Mittelschichtschaum. Eine wesentliche Herausforderung bestand in der Definition der Prozessparameter, die zur gleichen Zeit für die Mittel- wie die Deckschichten passen müssen. Insbesondere ging es darum, einen festen Schaum-Präkursor zu entwickeln, dessen Verarbeitungszeit und -temperatur zu den Anforderungen an die Klebstoffaushärtung in den Deckschichten passt.

In der ersten Projektphase lag der Fokus auf der parallelen Optimierung des Plattenherstellverfahrens einerseits und auf der Formulierung und Prozessführung eines biobasierten Schaum-Präkursors, der aus dem amorphen Poly-(D,L)-Laktid, PDLLA (i.e. einem amorphen Poly-Laktid, PLA) und Polymethylmethacrylat (PMMA), in Schmelze gemischt, besteht. Die Hinzugabe von PMMA zum PDLLA erlaubte eine exakte Einstellung der Glasübergangstemperatur im Bereich von 60°C bis über 80°C ohne Verlust der Kompatibilität mit dem physikalischen Treibmittel CO_2 . Zur Optimierung

des Imprägnierprozesses wurde ein Diffusionsmodell entwickelt. Auf diese Weise kann der CO₂-Gehalt im Schaum-Präkursor so eingestellt werden, dass ein Aufschäumen bei der für die Ausbildung der Deckschichten erforderlichen Temperaturen stattfindet.

Für die Deckschichten wurden verschiedene Klebstoffsysteme untersucht. Schliesslich wurde ein Harnstoff-Formaldehyd-Harz mit einem Ammoniumpersulfat-Härter ausgewählt, um eine Aushärtung unter 100 °C zu gewährleisten. Die so hergestellten Platten weisen eine Dichte von ca. 325 kg/m³ auf.

Der Umwelteinfluss der ULPB wurde mittels Life Cycle Analysis (LCA) mit jenem von Standardspanplatten und EPS-basierten Schaumkernplatten verglichen. Den grössten Einfluss auf die Umweltindikatoren haben die Rohstoffe einerseits und die Nutzung am Ende des Lebenszyklus. Die Substitution von Standardspanplatten durch ULPB mit einer PLA-basierten Mittelschicht führt zu einer um 25% verringerten Emission von Treibhausgasen. Allerdings weist die Platte mit Polylactide-Schaum (PLA) wegen der landwirtschaftlichen Prozesse, die mit der Herstellung des Schaums verbunden sind, einen ungünstigen Wert in der Ökotoxizität auf.

In der zweiten Projektphase wurde untersucht, welches Potenzial in der Zugabe von Holzfasern als Additive zum PLA-basierten Schaum-Präkursor liegt. Zusätzlich wurde auch die Möglichkeit eines Einsatzes von mikrokristalliner Zellulose (microcrystalline cellulose, MCC) getestet. Erste Ergebnisse zeigen, dass sich die Steifigkeit mit steigender Additivzugabe (1% bis 20% bezogen auf Masse PLA) deutlich erhöht. Bis zu einem Additivanteil von 10% bleibt die Diffusion von CO₂ im Material vergleichbar mit jener in reinem PLA. Restfeuchte, welche durch Holzfasern und MCC eingebracht wurde, führte allerdings zu einer Schwächung der Matrix während der Mischung. Zu untersuchen ist, ob dieser Nachteil durch die Wahl der chemischen Komponenten ausgeglichen werden kann.

Im Rahmen des Projektes konnte die Machbarkeit des kontinuierlichen Herstellprozesses von biobasierten ultraleichten Spanplatten nachgewiesen werden. Dies wurde durch genaues Abstimmen der Prozessfenster der einzelnen Schichten erreicht. Eine Anpassung an den Standard-Spanplattenprozess erscheint möglich und soll in weiteren Untersuchungen etabliert werden.

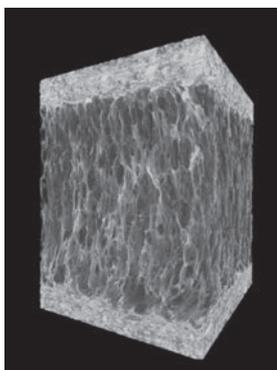
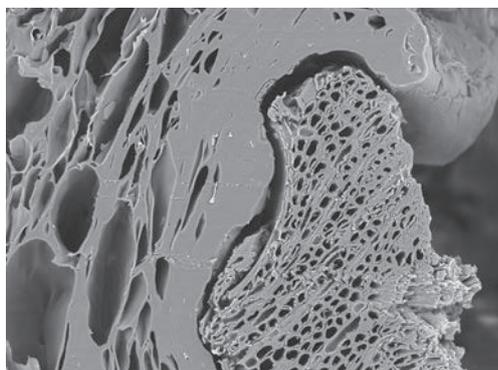


Abb. 12a Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Holzspans (rechte Bildhälfte) am Übergang zum Schaum (linke Bildhälfte) und mikrotomografische Aufnahme einer Spanplatte mit Schaumkern (rechtes Bild).



Abb. 12b Neu entwickelte Schaumkernplatte (links) im Vergleich zur konventionellen Spanplatte.

Extraktion von Tanninen aus Rinden heimischer Nadelhölzer

Frédéric Pichelin (BFH), Ingo Mayer, Ivana Krosiakova,
Hans Vettiger

Ein wichtiges Ziel des Projekts war es, einen Extraktionsprozess zu entwickeln, der zur Gewinnung von Tanninen aus heimischen Nadelholzrinden geeignet ist und in bestehende Prozesse von Sägewerken und der Holzverarbeitenden Industrie integriert werden kann. Zusätzlich wurde die Formulierung formaldehydfreier Klebstoffe auf Basis der gewonnenen Tannine untersucht und die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der daraus hergestellten Holzwerkstoffe wurden ermittelt.

Die aus heimischen Hölzern gewonnenen Tannine können als Komponente in Klebstoffsystemen verwendet werden, die z.B. bei der Herstellung von Holzwerkstoffplatten Verwendung finden. Bislang werden vor allem kommerziell gehandelte Tannine aus Holz oder Rinde tropischer oder subtropischer Holzarten, wie Quebracho oder Mimosa, im industriellen Massstab in wässrigen alkalischen Lösungen extrahiert und in Pulverform weltweit

vertrieben. Rinden europäischer Nadelhölzer werden bislang nicht zur kommerziellen Tanningewinnung eingesetzt, obwohl Versuche im Labormassstab bereits gezeigt haben, dass etwa Tannine aus Fichtenrinde (Tanningehalt ~10%) zur Herstellung von Klebstoffsystemen geeignet sind.

Um Tannine in Klebstoffverbindungen einsetzen zu können, wurden im Rahmen dieses Forschungsprojekts Extraktionsprozesse für kondensierte Tannine aus Rinden heimischer Nadelhölzer untersucht. Zunächst wurde die chemische Zusammensetzung der Heisswasserextrakte der Rinden von Tanne, Fichte, Kiefer, Lärche und Douglasie untersucht und die Struktur der extrahierten Tannine und Kohlenhydrate im Detail analysiert. Hauptbestandteile der Heisswasserextrakte waren Tannine, phenolische Monomere, Monosaccharide und Pektine, wobei der jeweilige Anteil erheblich zwischen den unterschiedlichen Baumarten schwankte. In allen Extrakten wurden Kohlenhydrate in relevantem Umfang gefunden. Verglichen mit kommerziell erhältlichen Mimosa- und Quebracho-Extrakten, weisen die Rindenextrakte heimischer Nadelhölzer eine niedrigere Extraktausbeute und höhere

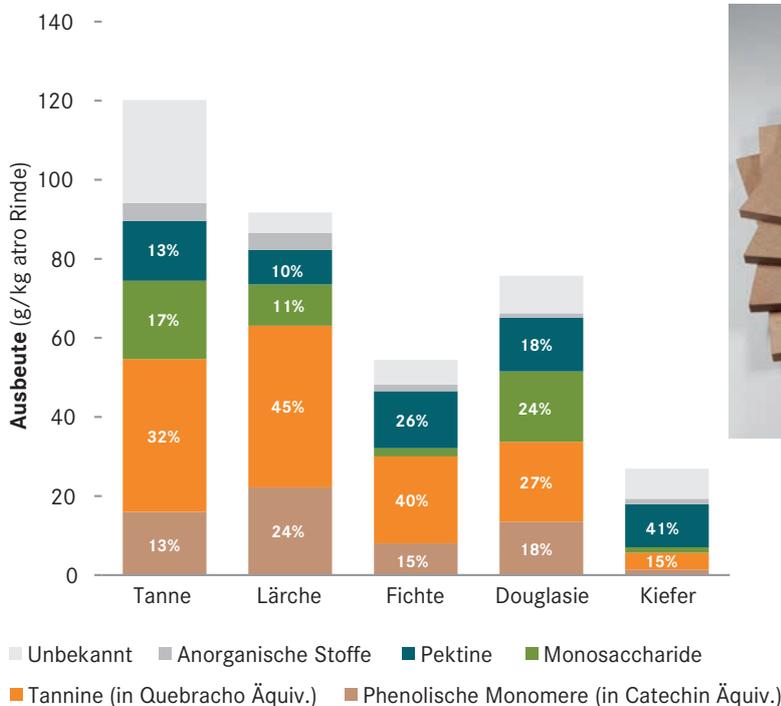


Abb. 13 Chemische Zusammensetzung von Rindenextrakten heimischer Nadelhölzer (links) und MDF aus der Produktion im Technikummassstab unter Einsatz von Bindemitteln basierend auf Fichtenrindentannin (rechts).

Kohlenhydrat-Anteile auf. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde daher ein zweistufiges Extraktionsverfahren entwickelt, um Extrakte mit höherem Tannin-Anteil zu gewinnen. Zudem unterscheiden sich die Tannine aus den heimischen Hölzern von denen aus tropischen Hölzern durch ihren chemischen Aufbau und ihre Reaktivität bei der Nutzung als Klebstoff.

Die Zusammensetzung der Heisswasserextrakte der Fichtenrinde änderte sich deutlich bei Verlängerung der Freiluft-Lagerdauer der Rinde vor der Extraktion, denn dadurch kam es zur Auswaschung der wasserlöslichen Stoffe. Eine vorgängige Kaltwasserextraktion wasserlöslicher Verbindungen verringerte den Einfluss der Lagerdauer auf die Zusammensetzung der Heisswasserextrakte. In nachfolgenden Heisswasserextraktionen konnten Extrakte mit höherem Tannin-Anteil gewonnen werden, allerdings stets mit relevantem Pektin-Gehalt, welcher sich auf Verklebungen negativ auswirkt.

Im weiteren Verlauf des Projekts wurden Formulierungen für Klebstoffe auf Basis von Fichtenrinden-Tanninen entwickelt und im kleinen Massstab zur Herstellung von Holzfaserverplatten verwendet. Klebstoffformulierungen mit Fichtenrinden-Extrakten zeigten leicht geringere Festigkeitseigenschaften verglichen mit typischen Tannin-Klebstoffformulierungen basierend auf Mimosa-Tanninen. Der Verdünnungseffekt durch die in den Extrakten vorliegenden Kohlenhydrate und die verringerte Quervernetzung aufgrund der sterischen Behinderung der komplexer aufgebauten Fichtenrinden-Tannine wurden als Hauptursachen identifiziert.

Von Bedeutung ist das stoffliche Potenzial der Rindenpartikel nach der Extraktion; es besitzt immer noch einen hohen Anteil an nicht extrahierbaren Bestandteilen. Die Eigenschaften der Klebstoffsysteme, die auf Fichtenrinden-Extrakten mit hohem Tannin/Kohlenhydrat-Verhältnis basieren, lassen es möglich erscheinen, schnellhärtende Klebstoffsysteme mit sehr geringer Additiv-Zugabe unter Verwendung heimischer Tannine zu entwickeln. Solche Klebstoffsysteme werden derzeit im Rahmen eines Folgeprojektes zum Thema Sperrholzherstellung untersucht (KTI Tannin Plywood). Weiterhin werden Formulierungen zur Verwendung von Tannin-Extrakt für die Produktion von 3D-Teilen weiterentwickelt (KTI 3-D-Druck von Formelementen aus Holz).

Synthese der Projekte: Folgerungen und Implementationspotenzial

Technologien, die zu Gewichtsreduktionen durch den Einsatz ölbasierter Polymere oder von Rohstoffen mit Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion führen, werden zukünftig immer stärker hinterfragt werden. Die Entwicklung wird daher auf den Einsatz fast ausschliesslich biobasierter Schaumsysteme für die Plattenmittelschichten hinauslaufen, die sich möglichst einfach in bestehende Verfahren zur Plattenherstellung integrieren lassen. Auch hinsichtlich der Bindemittel wird sich die Grundlagenforschung vertieft auf die Entwicklung möglichst rein biobasierter und emissionsunbedenklicher Klebstoffsysteme fokussieren. Dabei werden Extraktstoffe eine gewichtige Rolle spielen. Für die weitere wissenschaftliche Entwicklung des Themenbereichs zeigen die beiden im NFP66 geförderten Projekte die Richtung auf. Für die grosstechnische Umsetzung sind aber noch weitere Prozessoptimierungen erforderlich, was sich auch im Readiness Level von 4 widerspiegelt.

Mit den Untersuchungen zu Tanninen aus Nadelbaumrinde sind wichtige Schritte unternommen worden, um eine in der Schweiz bisher stofflich ungenutzte, nachwachsende Rohstoffquelle zu erschliessen. Die für die Extraktion von Tanninen aus europäischen Nadelhölzern erzielten Ergebnisse sind ein wichtiger Schritt, um die derzeitigen, problematischen Bindemittel bei der Herstellung von Holzwerkstoffen zu ersetzen. Viele der heutzutage grossindustriell hergestellten und verwendeten Klebstoffsysteme sind als bedenklich eingestuft und werden in der Zukunft in ihrer Nutzung stark eingeschränkt oder sogar verboten werden. Entscheidend wird sein, ob es gelingt, die Ausgangsmaterialien in effizienten Prozessen hinreichend zu fraktionieren und damit zu homogenisieren. Sollte es gelingen, hier wirtschaftlich tragfähige Prozesse zu entwickeln, könnten sich Schweizer Firmen auf dem Weltmarkt für Tannine in Stellung bringen.

Der Bedarf der Holzverarbeitenden Industrie und ihrer Zulieferer an Tanninen bzw. nach Klebstoffen, die auf der Basis von Tanninen aufgebaut sind, ist hoch. Derzeit wird er vor allem durch Lieferanten gedeckt, die Tannine aus Tropenhölzern gewinnen. Die Forschungsergebnisse in diesem Bereich haben jedoch gezeigt, dass die Ausbeute an Tanninen aus in der Schweiz wachsenden Hölzern in einem ähnlich hohen Mass möglich ist, sodass sie eine gute Rohstoffquelle für Tannine darstellen können. Wenn man in der Schweiz von einem Holz-

vorrat an Fichte und Tanne von 850 000 m³ ausgeht (ohne Brennholz), könnte man ca. 94 400 m³ Rinde verarbeiten. Mit einer Extraktionsausbeute von 5% würden damit 2125 Tonnen Tannin pro Jahr produziert werden können.

Auch die Arbeiten, um das Gewicht von Spanplatten zu senken, zeigen die Richtung auf, allerdings bedarf es für die Prozessharmonisierung zwischen dem Verpressen der Deckschichten und dem Aufschäumen der Mittellagen noch weiterer Optimierung. Die Kosten für die Herstellung von Spanplatten liegen nach dem neuen Verfahren derzeit noch über denen für konventionelle Platten und sie besitzen darüber hinaus auch keine überlegenen mechanischen oder funktionellen Eigenschaften, die sie zum «Produkt der Wahl» werden lassen. Daher muss der wirtschaftlichen Umsetzung der auf einer schaubildenden Mittelschicht beruhenden Verfahren noch eine intensive Phase der Prozessoptimierung vorausgehen.

Die Schweizer Holzwirtschaft ist bereits in der Vergangenheit unter starken Druck durch Anbieter in anderen Ländern geraten, die durch grössere Produktionsmengen und damit auch wesentlich geringere Stückkosten konkurrenzfähiger arbeiten können. Die Plattenindustrie in der Schweiz hat eine Chance, wenn hier das Know-how für technisch überlegene Produkte entsteht und die Intellectual-Property-Rechte (IP) gesichert werden. Mit extraleichten Spanplatten durch Schäume in der Mittelschicht können grosse Gewichtseinsparungen erzielt werden und dies bedingt ein riesiges wirtschaftliches Potenzial insbesondere bei Mitnahmemöbeln.

Empfehlungen

- Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sollten biobasierte Ausgangsmaterialien für die schaubildende Mittelschicht der Spanplatten erforschen und etablieren, bei denen keine Konkurrenzsituation mit der Nahrungskette besteht.
- Nach Abschluss der Optimierung der Prozessführung auf der Laborebene sollten Forschende und Unternehmen möglichst schnell eine Pilotanlage in eine bestehende Spanplattenfertigung integrieren, um die Implementierung in industriellen Fertigungsverfahren voranzutreiben.
- Bei der Nutzung der Tannine sollten in Zusammenarbeit von Forschenden und Unternehmen Klebstoffformulierungen entwickelt werden, welche ausschliesslich auf biobasierten Komponenten beruhen. Nur so entsteht eine starke Argumentationsgrundlage für die Substitution bestehender Systeme.
- In der Schweiz müssen durch die Forstwirtschaft, die holzbearbeitenden Unternehmen und die Klebstoffindustrie effiziente Logistikketten für Tannine von Rohstoffanfall, über die Klebstoffproduktion bis hin zur vielseitigen Verwertung aufgebaut werden, damit das Produkt wirtschaftlich konkurrenzfähig sein kann.

NANOZELLULOSE

Die Nanozellulose genießt in Wissenschaft und Wirtschaft immer mehr den Ruf eines biobasierten Spitzenmaterials der Zukunft. Von den Zellulosefibrillen und Nanokristallen verspricht man sich breiteste Anwendungsmöglichkeiten, von der Kunststoff- und Schaumstoffherzeugung über leistungsstarke Komposite bis hin zur Klebstoff-, Lasuren- und Textilherstellung sowie zur medizinischen Verwendung als Wundauflagen und Implantate.

Wissenschaftlicher Background und wirtschaftliche Aspekte

Die Forschung im Bereich der Nanozellulose hat insbesondere im vergangenen Jahrzehnt eine rasante Entwicklung genommen. Die durch den Aufschlussprozess entstehende grosse Oberfläche von Zellulosestrukturen bietet die Voraussetzung für eine Vielzahl von äusserst effizienten Funktionalisierungen.

Viele Forschungsaktivitäten sind in den führenden Holznationen, in Skandinavien, Japan und Nordamerika zu finden. In den anderen europäischen Ländern sind vornehmlich kleinere Forschungs-

gruppen aktiv, die sich auf spezifische Funktionalisierungen oder Anwendungen fokussieren, wie beispielsweise in Frankreich oder in Österreich.

Die dominierenden Forschungsfelder sind mit den beiden NFP 66-Projekten perfekt abgebildet. Mikro- und nanofibrillierte Zellulose enthält amorphe und kristalline Bereiche und zeichnet sich durch eine langgestreckte (fibrilläre) und unregelmässige Struktur aus, die sich zu netzartigen Strukturen assembliert und für verschiedene Eigenschaftsprofile und Anwendungen mit nanotechnologischen Methoden funktionalisiert werden kann. Aus dem grossen Feld der Forschungsaktivitäten sind stell-

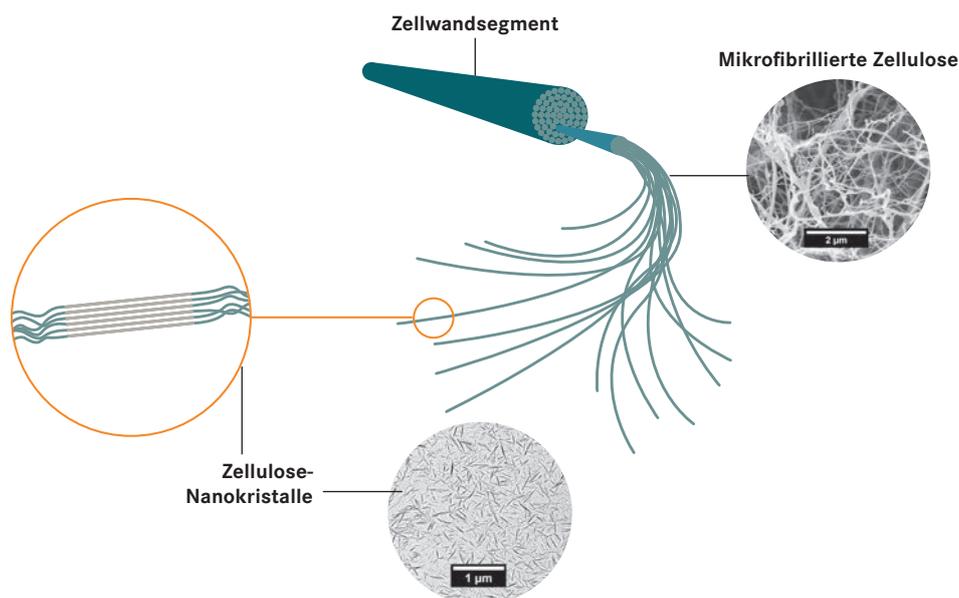


Abb. 14 Die Struktur von mikrofibrillierter Zellulose (MFC) und Zellulose-Nanokristallen (CNC) basierend auf ihrer Gewinnung aus der Zellwand von Zellstofffasern (Dank an Tanja Zimmermann und Christoph Weder).

vertretend die Entwicklung von magnetischem bzw. wasserresistentem Nanopapier (Olsson et al. 2010), von Zellulose-Graphen-Kompositen (Laaksonen et al. 2011) oder von superhydrophoben und öl-absorbierenden Nanozelluloseschwämmen zu nennen (Jin et al. 2011; Zhang et al. 2014).

Nanokristalline Zellulose ist kristallin und hat eine gedrungene, kompaktere Form mit deutlich weniger Potenzial zur physikalischen Verknüpfung im Vergleich zu NFC. Daher wird nanokristalline Zellulose in der Forschung vornehmlich als versteifernder Füller in Polymermatrizen eingesetzt (Pei et al. 2011), zunehmend aber auch, um besondere optische Effekte zu erzielen (Dumanli et al. 2014).

Anwendungsmöglichkeiten von Nanozellulose sind z.B. der Bau von biegsamen Displays, Composites für die Automobilindustrie, porösen Produkten, wie Membranen, Schwämmen oder Aerogelen, um Flüssigkeiten oder Gase zu binden bzw. zu separieren. Zudem gibt es biomedizinische und biomechanische Anwendungen, wie zum Beispiel bei der Behandlung von Verbrennungen oder bei künstlichen Blutgefässen. Die Absorptionseigenschaften von Nanozellulose versprechen zudem interessante Perspektiven beim Einsatz als Bandscheibenersatz, bei der Filtrierung von Schwermetallen und anderen Wasserverunreinigungen. Barrierepapiere, wie sie bei der Verpackung von Lebensmitteln verwendet werden, biomedizinische Materialien für Implantate, zelluloseverstärkte Polymere und auch Form- und Gedächtnismaterialien lassen sich mit Nanozellulose herstellen.

Der Themenbereich erfährt gegenwärtig einen neuen starken Impuls, der sich aus dem 3-D-Druck ergibt und die zukünftige Entwicklung stark prägen wird (Siqueira et al. 2017). Biobasierte Polymere, wie sie die Ressource Holz in grossen Mengen zur Verfügung stellt, werden neue Material- und Fertigungskonzepte sowie neue Produkte ermöglichen. So werden bereits nanozellulosebasierte Tinten für das 3-D-Drucken verwendet, um komplexe Strukturen zu fertigen.

Hinsichtlich der Anwendungsmöglichkeiten gibt es auch eine thematische Nähe zu den bereits beschriebenen Oberflächenbehandlungen des Holzes und einem Einsatz als mechanische Verstärkung in den schaubildenden Mittelschichten bei der Produktion von leichten Spanplatten. Dieses wurde durch Vernetzung der Forschenden innerhalb des NFP 66-Programms sehr sinnvoll genutzt, was unter anderem im folgenden Projektbeschrieb ersichtlich ist.

Projekte zur Nanozellulose

Nanofibrillierte Zellulose in Holzbeschichtungen

Tanja Zimmermann (Empa), Tina Künniger

Neben seiner vielseitigen Verwendung in neuen zellulosebasierten Materialien (z.B. CO₂ Capture, ölabsorbierende Schwämme) kann nanofibrillierte Zellulose (NFC) auch genutzt werden, um die Leistungsfähigkeit gängiger Holzbeschichtungssysteme zu optimieren. Dabei zielt dieses Projekt auf eine Steigerung der UV-Stabilität ab, in dem NFC als Additiv dafür sorgt, dass UV-absorbierende Substanzen besser verteilt und gebunden werden. Besonderer Fokus lag dabei auf der Erhöhung der Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit von Holzbeschichtungen im Aussenbereich, durch die Zugabe von NFC. Dazu war es erforderlich, das Potenzial von NFC als neuartiges, biologisches und erneuerbares Additiv und dessen Interaktion mit den Bindemitteln und den UV-Absorbern im Detail zu untersuchen.

Holz ist ein beliebtes Baumaterial für den Aussenbereich, doch seiner noch umfassenderen Verwendung steht oft eine zu geringe Zuverlässigkeit im Wege. UV-Strahlung, Regen und Feuchtigkeit sowie mechanische Einflüsse und Mikroorganismen können das natürliche optische Erscheinungsbild des Holzes nachteilig verändern oder langfristig zu Einschränkungen in der Gebrauchstauglichkeit führen. Daher werden Holzoberflächen in der Regel mit Beschichtungen geschützt. Dieser Schutz hat aber insbesondere bei möglichst transparenten Beschichtungen noch deutliches Optimierungspotenzial, woraus sich ein grosser Forschungsbedarf bezüglich der Komponenten und deren Zusammensetzung ergibt.

Die Untersuchungen wurden basierend auf Acryl- und/oder Alkyd-Bindemittelsystemen durchgeführt, welche mit 2.5 wt% NFC und dann zusätzlich mit anorganischen (ZnO-Nanopartikel) oder organischen UV-Absorbern versetzt wurden. Dabei zeigte bereits die unmodifizierte NFC eine gute Kompatibilität mit den wässrigen Acryl- und Alkyd-Bindemittelsystemen. Das ursprünglich Newton'sche Fliessverhalten der Bindemittel änderte sich durch die Zugabe von NFC in ein scherverdünnendes Fliessverhalten. Die Viskosität der modifizierten Bindemittel war signifikant von der NFC-Konzentration abhängig und kann daher für spezifische Ansprüche gezielt eingestellt werden. Dies ermöglicht es, unmodifizierte NFC als Verdickungsmittel in den Holzbeschichtungen zu verwenden. Zudem beeinflusste die NFC-Zugabe die

Filmbildung der Bindemittelsysteme, was in Folgeprojekten untersucht werden soll.

Im Hinblick auf die an der Holzoberfläche getrockneten Beschichtungen wurde die Änderung der Oberflächenstruktur durch die NFC-Zugabe beobachtet. Während sich Farbe und Transparenz nur wenig änderten, wurde der Glanz der ausgehärteten Oberflächen deutlich verringert.

Der Effekt von NFC beim UV-Schutz von Holzoberflächen wurde anhand des Zusammenwirkens mit UV-absorbierenden Nanopartikeln und organischen Absorbieren im Bindemittel untersucht. Dabei zeigte sich, dass NFC gleichzeitig als Träger-substanz und Dispergiermittel für ZnO-Nanopartikel fungiert und dabei zu einer gleichmässigeren Verteilung der Partikel in der Beschichtung führt und die Sedimentation während der Filmbildung verhindert. Auch für die organischen UV-Absorber konnte NFC als Trägersubstanz genutzt werden.

Durch die Zugabe der NFC konnten auch die mechanischen Eigenschaften der Beschichtungsfilme verändert werden, wobei der Effekt von Alterungsprozessen der Bindemittel deutlich gravierender

war. Ein sehr positiver Effekt konnte bei spröden Bindemittelsystemen festgestellt werden, da die Präsenz von NFC die Rissbildung während der Aushärtung als auch während der Bewitterung deutlich reduzierte. Prüfungen bei künstlicher Bewitterung zeigten, dass nicht modifizierte NFC die Farbstabilität von Holzoberflächen nicht verbesserte. Die angestrebte Erhöhung der UV-Stabilität der Holzoberflächen durch die Funktionalisierung der NFC mit den UV-absorbierenden Substanzen fiel geringer aus als erwartet, da die bisher erzielten UV-Absorber-Konzentrationen an den Nanofibrillen zu gering waren und noch erhöht werden müssen. Sollte dies in weiteren Untersuchungen gelingen und die Oberflächenbeschichtungen nicht nur in künstlichen Bewitterungsversuchen, sondern auch im Langzeit-Praxistest bestehen, könnte dieser Modifikationsansatz einen effektiveren UV-Schutz basierend auf bestehenden Bindersystemen erbringen. Für eine erste praxisnahe Anwendung wurden die Holzfassaden des «Vision Wood»-Moduls im modularen Forschungs- und Demonstrationsgebäude NEST (www.empa.ch/nest) mit den NFC-modifizierten Anstrichen beschichtet und stehen damit für ein Langzeitmonitoring zur Verfügung.

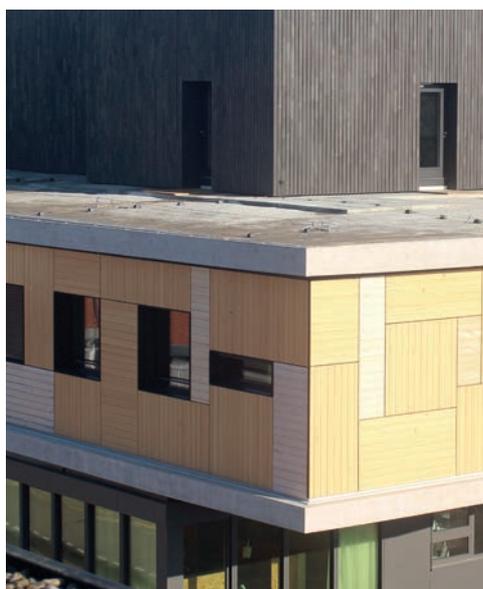


Abb. 15a Langzeitmonitoring der NFC-haltigen Oberflächenbeschichtungen am Modul «Vision Wood» im modularen Forschungs- und Demonstrationsgebäude NEST der Empa Dübendorf.

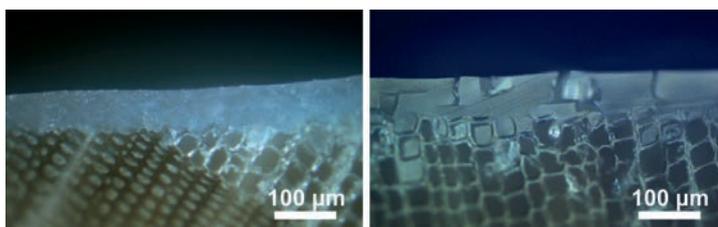


Abb. 15b Reduzierung der Rissbildung in der Beschichtung mit NFC (links) im Vergleich zu einer Beschichtung ohne NFC (rechts); mikroskopische Aufnahme eines Querschnitts einer beschichteten Holzoberfläche.

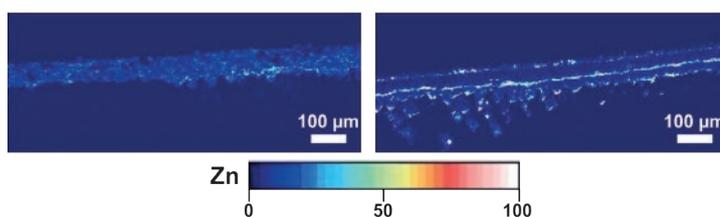


Abb. 15c NFC als Trägersubstanz und Dispergiermittel für UV-absorbierende ZnO-Nanopartikel: homogene Verteilung der ZnO-Partikel in der Beschichtung mit NFC (links) und Sedimentation der ZnO-Partikel ohne NFC (rechts).

Neue Verarbeitungsmethoden für Zellulose-Nanokomposite

Christoph Weder (Universität Freiburg)

Zellulose-Nanokristalle können mit vergleichsweise einfachen Verfahren durch die Hydrolyse mit Säuren aus Biomasse isoliert werden und sind als Werkstoff von grossem Interesse. Sie besitzen Eigenschaften, die in dieser Form bislang hauptsächlich von synthetisch hergestellten Werkstoffen bekannt waren, und übertreffen sie teilweise sogar. Attraktive mechanische Eigenschaften wie hohe Steifigkeit und Zugfestigkeit machen sie für den Einsatz in einer grossen Zahl von Anwendungen interessant. Zellulose-Nanokristalle können heute schon im Labormassstab in Verbund mit Kunststoffen eingesetzt werden. Was allerdings fehlt, sind Verfahren, mit denen diese Prozesse zur Herstellung solcher Materialien in einer industriell relevanten Grössenordnung stattfinden können. Das Forschungsprojekt verfolgte das Ziel, neue skalierbare und robuste Produktionsverfahren für Nanokomposite aus technologisch relevanten Kunststoffen und Zellulose-Nanokristallen (cellulose nanocrystals, CNCs) aus Holz zu entwickeln. Damit soll der Schweizer Holzwirtschaft der Weg zur industriellen Produktion von Werkstoffen aus Zellulose-Nanokristallen geebnet werden.

Besonderes Augenmerk lag im Rahmen dieses Forschungsprojektes auf der Entwicklung von Verbundwerkstoffen, da es der Einsatz von Nanofüllstoffen möglich macht, die mechanischen Ei-

genschaften von Polymeren und Kunststoffen signifikant zu verbessern. Dazu eignet sich Nanozellulose besonders, da sie herausragende mechanische Eigenschaften aufweist.

In der Vergangenheit wurde bereits eine breite Palette an Nanokompositen aus verschiedenen Kunststoffen und CNC hergestellt. Die Herstellungsprozesse dieser Materialien im Labormassstab können jedoch nicht einfach auf einen kommerziellen Massstab übertragen werden. Daher sind sie technologisch bisher von geringer Bedeutung und haben noch nicht zu bedeutenden industriellen Anwendungen geführt.

Im Forschungsprojekt wurde die wissenschaftliche Basis erarbeitet, um robuste, universelle und einfach skalierbare Prozesse für die Herstellung von Nanokompositen aus CNC und technologisch relevanten Kunststoffen zu entwickeln. In einem ersten Schritt untersuchten die Forschenden verschiedene Verfahren, die es erlauben, homogene Mischungen der beiden Komponenten mit möglichst guten mechanischen Eigenschaften herzustellen.

In einem zweiten Schritt ging es darum, zu untersuchen, wie sich die thermische oder mechanische Beschädigung der Nanozellulose vermeiden lässt, die in konventionellen Schmelzverfahren durch hohe Temperaturen und hohe Scherkräfte verursacht wird. In einem dritten Schritt wurde die Beschichtung der Nanozellulose mit



Abb. 16a Schalen mit den für die Herstellung der Nanokomposite verwendeten Ausgangsmaterialien: CNC (links im Bild, zusammen mit einem mit CNC hergestellten Prüfkörper) und Polyvinylalkohol (PVA, rechts im Bild, zusammen mit einem Prüfkörper aus reinem PVA).

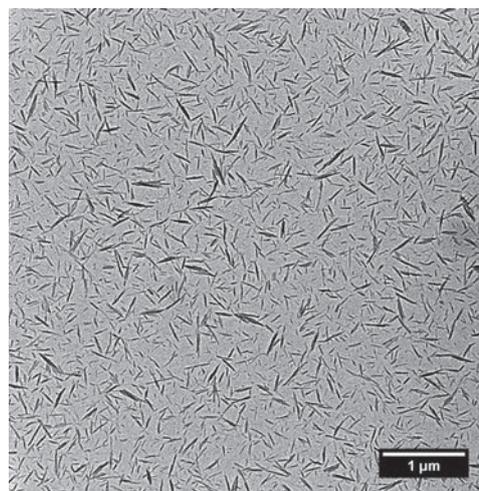


Abb. 16b Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme von Zellulose-Nanokristallen.

einem universellen Phasenvermittler verfolgt, der das Mischen mit verschiedenen Kunststoffen erleichtern soll.

Die Forschenden haben die Effekte typischer Mischverfahren auf die Morphologie und die mechanischen Eigenschaften von CNCs in den resultierenden Materialien näher studiert, indem sie Nanokomposite aus Polyvinylacetat (PVAc) und Zellulose-Nanokristallen (CNC) als Testmaterial verwendeten. Die Untersuchung dieser Verbundwerkstoffe diente als Basis, um die Frage zu beantworten, wie die unterschiedlichen Mischmethoden die Morphologie der Komposite und die damit verbundenen Materialeigenschaften beeinflussen.

Die Ergebnisse zeigen einen Zusammenhang zwischen Scherkräften, der CNC-Degradierung und den mechanischen Eigenschaften der Materialien. Bei einer Mischung mit geringer Scherung hatten die Materialien maximale mechanische Eigenschaften, da die gut dispergierten CNCs nicht degradiert wurden und ihre ursprüngliche Morphologie beibehielten. Die Ergebnisse dieser Studie wurden erfolgreich angewendet, um Nanokomposite aus CNCs und Polyethylen (LDPE), Polyamid und verschiedenen Polyurethanen zu fertigen. Damit wurde demonstriert, dass es möglich ist, eine signifikante mechanische Verstärkung durch den Einsatz hochskalierbarer Mischprozesse mit niedriger Scherung zu erzielen.

Die Erkenntnisse aus dem Projekt haben zu einem besseren Verständnis der Zusammenhänge zwischen Verarbeitungsprozess, Struktur und Eigenschaft von Zellulose-Nanokompositen geführt. Dies könnte in einem künftigen Forschungsvorhaben ermöglichen, neue Herstellungsverfahren für die hier untersuchten, aber auch weitere Materialkonzepte zu entwickeln. Signifikante Fortschritte sind bei allen Prozessschritten erzielt worden, sodass man der industriellen Herstellung von Kompositwerkstoffen mit Nanozellulose deutlich näher gekommen ist.

Synthese der Projekte und Implementationspotenzial

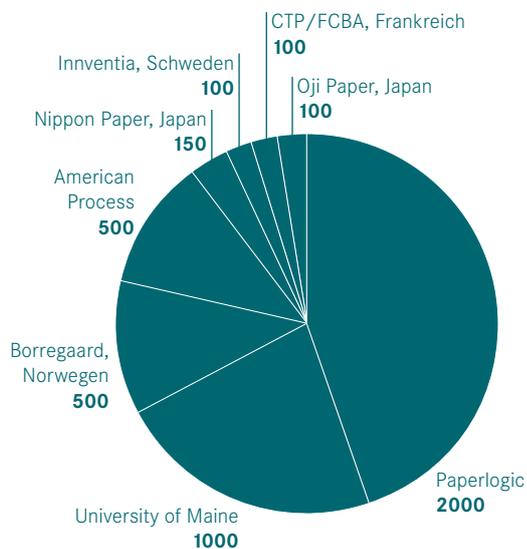
Im Bereich der Nanozellulose sind in den NFP 66-Projekten grundlegende Erkenntnisse zur Herstellung, den Eigenschaften und der Funktionalisierung gewonnen worden, woraus sich neue Chancen für die Holzbranche in der Schweiz ergeben. In den Projekten, welche Readiness Levels von 4 bis 5 erreichten, konnte beispielhaft gezeigt

werden, dass Nanozellulose genutzt werden kann, um die Eigenschaften von Holzbeschichtungen und Kompositwerkstoffen zu verbessern. Die weitere wissenschaftliche Entwicklung im Bereich der Nanozellulose wird von einer Spezialisierung auf bestimmte Anwendungsbereiche geprägt sein. Hier liegt auch das Potenzial für die verhältnismässig kleinen Forschergruppen in der Schweiz, die dieses Momentum bereits in exzellenter Weise aufgegriffen haben. Dabei ist forschungsseitig insbesondere der deutliche und frühzeitige Bezug zur technologischen Umsetzung zu betonen, welcher im internationalen Umfeld heraussticht. Diesen wissenschaftlichen Vorsprung in einigen Anwendungsbereichen (z.B. ölabsorbierende Schwämme) gilt es für die wirtschaftliche Umsetzung zu nutzen. In der Vergangenheit war die Verfügbarkeit der Nanozellulose eine Hürde für die weitere wirtschaftliche Entwicklung des Bereichs. Heute werden verschiedene Formen der Zellulose auf dem Markt angeboten, wie etwa mikrofibrillierte, bakterielle oder kristalline Zellulose, und von der Angebotsseite her ist es kein Problem, die notwendigen Mengen zur Verfügung zu stellen. Vor allem in Skandinavien hat sich die Zellstoff- und Papierindustrie intensiv mit der Produktion und Verwendung von Nanozellulose beschäftigt, um dort einen Ersatz für den Umsatzrückgang im Geschäft mit klassischem Papier zu entwickeln.

Nach wie vor stehen aber die vergleichsweise hohen Kosten bei der Herstellung einem Durchbruch der Nanozellulose im Wege. Personalkosten, Energie, Logistik, Effizienz des Herstellungsprozesses, Kosten zur Erfüllung von Qualitätsstandards sowie die Rahmenbedingungen des Standortes sind dabei entscheidende Elemente. Die Entwicklung von Produktionsverfahren, welche die Gestehungskosten radikal senken können, werden entscheidend sein. Hier werden aber zurzeit grosse Fortschritte gemacht. So wurden neue Verfahren (z.B. durch VTT, Finnland) entwickelt, um die Energiekosten massiv zu senken und so die Nanozellulose wirtschaftlich zu einer Alternative zu den herkömmlichen ölbasierten Werkstoffen werden zu lassen.

In der Schweiz treibt vor allem die Unternehmensgruppe Weidmann in Rapperswil (SG) die Herstellung und Verwendung der Nanozellulose voran und ist damit ein visionärer Wegbereiter, um die Nanozellulose als Material in der Industrie zu implementieren. Zurzeit entsteht eine Anlage für eine eigene Nanozelluloseproduktion, um bei der Rohstoffbeschaffung unabhängig zu sein.

Für das Jahr 2015 gemeldete Produktion von nanofibrillierter Zellulose (NFC) in kg pro Tag



Für das Jahr 2015 gemeldete Produktion von Zellulose-Nanokristallen (CNC) in kg pro Tag

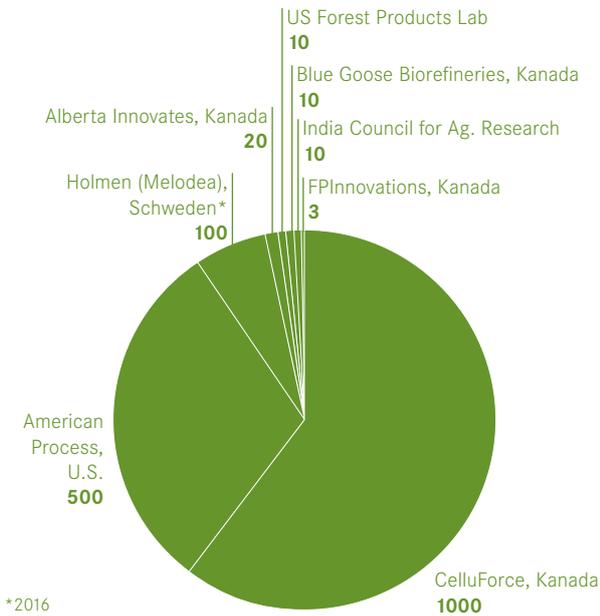


Abb. 17 Übersicht zur kommerziellen Produktion von Nanozellulose weltweit (Quelle: <http://www.tappinano.org/media/1114/cellulose-nanomaterials-production-state-of-the-industry-dec-2015.pdf>).

Produktion in der Wicor Gruppe

Die Wicor (Weidmann International Corporation) Gruppe mit Hauptsitz in Rapperswil (SG) verarbeitet schon seit 1877 Naturfasern zu Produkten für die Elektroindustrie. Neben den beiden bestehenden Unternehmensbereichen, Weidmann Electrical Technology und Weidmann Medical Technology, entwickelt sich am Standort Rapperswil seit 2016 der Bereich Weidmann Fiber Technology. Dieser verfolgt das Ziel, mikrofibrillierte Zellulose (MFC), welche spezifisch für die jeweilige Anwendung konzipiert wird, in industriell relevanten Mengen zu produzieren. Die erste Ausbaustufe des neuen Naturfaserwerks wird mit einer Kapazität von 150 t/a Ende 2017 in Betrieb gehen.

Empfehlungen

- Die Wissenschaft muss die Verbindung zu Herstellungsprozessen wie dem 3-D-Druck weiter intensivieren, um Upscalingprozesse besser zu steuern und holzbasierte Komponenten in neuen Fertigungstechniken zu etablieren.
- Die Forschung zu mikrofibrillierter Zellulose und Nanozellulosekompositen sollte auf eine weitere Diversifizierung der Anwendungsfelder zielen und dabei Chemieindustrie, Biomedizin, Kunststoffindustrie, Umwelt, Verpackungs- oder Papierindustrie einbinden.
- Produzenten sollten mehr in die Prozesskontrolle, Charakterisierung und Standardisierung der Endprodukte investieren, um gewährleisten zu können, dass immer die gleiche Qualität geliefert wird. Hierzu ist es notwendig, die Qualitätsstandards von MFC präziser zu definieren. Wichtige Faktoren sind dabei u.a. Viskosität, spezifische Oberfläche, Homogenität, DP.
- Die Nanozelluloseproduktion muss förderungspolitisch unterstützt werden, denn nur so kann es in der Schweiz eine wirtschaftliche Perspektive für Nanozelluloseprodukte geben.
- In der gegenwärtigen Situation sollte eine zweigleisige Strategie zur Markteroberung verfolgt werden, die sowohl auf Massen Anwendungen etwa im Papierbereich, als auch auf verschiedene Nischenanwendungen mit speziell funktionalisierter Nanozellulose zielt. Letztere können beispielsweise bei biomedizinischen Anwendungen zu einer hohen Wertschöpfung führen.

HANDLUNGSEMPFEHLUNG

Angesichts der globalen Klimaänderung und des Ressourcenverbrauchs muss es Ziel der Schweiz sein, in der notwendigen Entwicklung zu einer nachhaltigen Gesellschaft eine Führungsrolle zu übernehmen. Dies wird ohne eine intensive und planvolle Nutzung der nachwachsenden und CO₂ speichernden Ressource Holz nicht möglich sein. Das Nationale Forschungsprogramm NFP66 hat als «Enabler» Grundlagen für eine umfassendere materialseitige Verwendung der Ressource Holz gelegt. Diese guten Voraussetzungen für einen nachhaltigen Schub in Holzforschung und Holzwirtschaft in der Schweiz müssen nun rasch genutzt werden, um die wichtige Rolle des Holzes in der Bioeconomy systematisch auszubauen.

Um den erzielten Forschungsergebnissen die nötige Schubkraft zu geben und Holz den notwendigen wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Stellenwert zu verschaffen, bedarf es einer intensiven und koordinierten Zusammenarbeit von Forschung, Wirtschaft und Politik. Dazu müssen für die oft kleinen Unternehmen bessere Möglichkeiten bestehen, die in der Forschung entwickelten Materialien zur Produktreife zu führen. Die werksseitige Etablierung von neuen Modifikationstechnologien ist im Holzbereich äusserst komplex; die Entwicklungsprozesse sind mit hohen Kosten und vielen Risiken behaftet und benötigen oft deutlich länger als die üblichen Förderzeiträume.

Um die wissenschaftlichen Ergebnisse schnell umsetzen zu können und die investitionsseitigen Hürden zu senken, benötigt die Schweiz ein grossmasstäbliches Technikum im Holzbereich. Im belgischen Gent wurde mit einer vergleichbaren Strategie die Bio Base Europe Pilot Plant aufgebaut (<http://www.bbeu.org/pilotplant/#primary>). In den grossmasstäblichen Anlagen werden Prozessentwicklung und Upscaling zur Umsetzung von Biomasse in Biochemikalien, Biomaterialien oder Biotreibstoffe durchgeführt, um so die Produktentwicklung für biobasierte Innovationen zu beschleunigen. Was in diesem Konzept nicht integriert ist und in der Schweiz mit einem Alleinstellungsmerkmal betrieben werden könnte, ist der Strukturerthalt der natürlichen Ressource Holz

sowie die strukturelle Assemblierung von Holzkomponenten durch «Additives Manufacturing», wie beispielsweise 3-D-Druck, zu biobasierten Funktionsmaterialien.

Das Technikum Holzinnovationen Schweiz kann in idealer Weise beide Upscaling-Optionen unter einem Dach vereinen. Mit der grossmasstäblichen Prozessentwicklung für Modifikationen und Funktionalisierungen von Vollholz und Furnieren und ihrer Oberflächen in einem Top-down-Prozess können hochwertige Holzprodukte insbesondere für den innovativen Holzbau, aber auch für neue Anwendungsfelder schneller und kostengünstiger zur Marktreife geführt werden. Für die Materialentwicklung basierend auf Holzkomponenten wie Nanozellulose oder Lignin in einem Bottom-up-Prozess kann das Technikum Assemblierungsverfahren wie den 3-D-Druck in grossmasstäblicher Dimensionierung zur Verfügung stellen. Dieses Konzept kann über die Schwerpunkte im NFP66 hinaus für eine Vielzahl von Forschungs- und Umsetzungsinitiativen (siehe z.B. «Additive Manufacturing») als markanter Beschleuniger für die Entwicklung und Markteinführung von Holzprodukten und biobasierten Materialien dienen.

Mit dem Technikum können vorgängig Stärken, Erfordernisse und Optimierungspotenziale von neuen Technologien entlang der ganzen Wertschöpfungskette des Holzes erfasst werden, sodass Unternehmen wichtige Erkenntnisse zum Upscaling-Prozess gewinnen, bevor sie grosse Investitionen in Produktionsanlagen für ein neuartiges Holzprodukt tätigen. Auf diese Weise werden das Risiko verringert, Interessen gebündelt sowie Barrieren für die erfolgreiche Markteinführung gesenkt. Zudem können die Technologien in der Schweiz schneller entwickelt und diesbezügliche Patentrechte gesichert werden.

Ein weiterer positiver Effekt des Technikums ist die deutliche Erhöhung der Sichtbarkeit für Venture Capital. Für die fast ausschliesslich aus KMUs bestehende Schweizer Holzwirtschaft ist der Kapitalbedarf für Produktionsanlagen und die Markteinführung von neuen Holzprodukten sehr hoch und damit eine grosse Herausforderung.

rung. Der vorgängige und sichtbare Nachweis der grossmassstäblichen Umsetzbarkeit von Technologien wird die Kontaktaufnahme mit Investoren deutlich erleichtern.

Im Rahmen einer konzertierten Aktion sollten folgende Schritte zugunsten des Technikums *Holzinnovationen Schweiz* erfolgen:

- Die Unternehmen und Verbände der Holzwirtschaft müssen ein klares Bekenntnis zur Beteiligung und Mitwirkung an einem Technikum mit den Schwerpunkten Holzmodifikationen/-funktionalisierungen und biobasierte Assemblierungsverfahren (u.a. 3-D-Druck) abgeben und dies durch eigene Bedarfsabklärungen und Potenzialanalysen untermauern.
- Die Forschungsinstitutionen (insbesondere bestehende Kompetenzzentren u.a. an ETH, Empa und Berner Fachhochschule) müssen in der grundlegenden und angewandten Forschung Schwerpunkte im Bereich Holzinnovationen setzen und in Zusammenarbeit mit der Industrie die wichtigsten Forschungslücken und Implementierungshindernisse eruieren.
- Das Bundesamt für Umwelt BAFU sollte im Rahmen der nachhaltigen Ressourcennutzung die Entwicklung innovativer Materialien aus Holz stärker fördern und die Ressortforschungsaktivitäten und Aktionsprogramme entsprechend ausrichten.
- Die öffentliche Hand sollte Instrumente der Standortförderung (zum Beispiel kantonale/regionale Wirtschaftsförderung oder Mittel der Neuen Regionalpolitik NRP) und Forschungsförderung gezielt zugunsten des zu errichtenden Technikums nutzen.
- Alle genannten Akteure müssen in einen partizipativen Prozess einen Vorgehensplan erarbeiten, der sich auf folgende Säulen stützt:
 - Festlegung von wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Zielen
 - Konzept/Leistungsauftrag und Businessplan für das Technikum
 - Festlegung von Organisation, Standort, Betrieb und Finanzierung inkl. anschliessendem Umsetzungsplan

LITERATUR

- Allen NS, Edge M, Ortega A, Liauw CM, Stratton J, McIntyre RB (2002) Behaviour of nanoparticle (ultra-fine) titanium dioxide pigments and stabilisers on the photooxidative stability of water based acrylic and isocyanate based acrylic coatings. *Polym. Degrad. Stabil.* 78: 467–478
- Burgert I, Merk V, Keplinger T (2016) Holzbasierte Materialien – Forschungsansätze für die erweiterte Nutzung des Werkstoffs, *Holztechnologie* 57: 38–43
- Civardi C, Van den Bulcke J, Schubert M, Michel E, Butron MI, Boone MN, Dierick M, Van Acker J, Wick P, Schwarze F (2016) Penetration and Effectiveness of Micronized Copper in Refractory Wood Species. *PLoS One* 11
- Dumanli AG, van der Kooij HM, Kamita G, Reisner E, Baumberg JJ, Steiner U, Vignolini S (2014) Digital Color in Cellulose Nanocrystal Films. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 6: 12302–12306
- Evans PD, Gibson SK, Cullis I, Liu CL, Sebe G (2013) Photostabilization of wood using low molecular weight phenol formaldehyde resin and hindered amine light stabilizer. *Polym. Degrad. Stabil.* 98: 158–168
- Forsthuber B, Grüll G (2010) The effects of HALS in the prevention of photo-degradation of acrylic clear topcoats and wooden surfaces. *Polym. Degrad. Stabil.* 95: 746–755
- Fu YC, Fu WS, Liu YZ, Zhang GZ, Liu YX, Yu HP (2015) Comparison of ZnO nanorod array coatings on wood and their UV prevention effects obtained by microwave-assisted hydrothermal and conventional hydrothermal synthesis. *Holzfor-schung* 69: 1009–1014
- Fuchs W (1928) Information on genuine lignine, I the acetylation of fir wood. *Berichte Der Deutschen Chemischen Gesellschaft* 61: 948–951
- Grüneberger F, Kunniger T, Huch A, Zimmermann T, Arnold M (2015) Nanofibrillated cellulose in wood coatings: Dispersion and stabilization of ZnO as UV absorber. *Prog. Org. Coat.* 87: 112–121
- Guo HZ, Fuchs P, Cabane E, Michen B, Hagendorfer H, Romanyuk YE, Burgert I (2016) UV-protection of wood surfaces by controlled morphology fine-tuning of ZnO nanostructures. *Holzfor-schung* 70: 699–708
- Hill CAS (2006) *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other processes.* John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex
- Jin H, Kettunen M, Laiho A, Pynnonen H, Paltakari J, Marmur A, Ikkala O, Ras RHA (2011) Superhydrophobic and Superoleophobic Nanocellulose Aerogel Membranes as Bioinspired Cargo Carriers on Water and Oil. *Langmuir* 27: 1930–1934
- Kumar S (1994) CHEMICAL MODIFICATION OF WOOD. *Wood Fiber Sci.* 26: 270–280
- Laaksonen P, Walther A, Malho JM, Kainlahti M, Ikkala O, Linder MB (2011) Genetic Engineering of Biomimetic Nanocomposites: Diblock Proteins, Graphene, and Nanofibrillated Cellulose. *Angew. Chem.-Int. Edit.* 50: 8688–8691
- Lavoue J, Beaudry C, Goyer N, Per-rault G, Gerin M (2005) Investigation of determinants of past and current exposures to formaldehyde in the reconstituted wood panel industry in Quebec. *Ann. Occup. Hyg.* 49: 587–602
- Li YY, Fu QL, Yu S, Yan M, Berglund L (2016) Optically Transparent Wood from a Nanoporous Cellulosic Template: Combining Functional and Structural Performance. *Biomacromolecules* 17: 1358–1364
- Markstedt K, Mantas A, Tournier I, Martínez Ávila H, Hägg D, Gatenholm P (2015) 3D Bioprinting Human Chondrocytes with Nanocellulose–Alginate Bioink for Cartilage Tissue Engineering Applications. *Biomacromolecules* 16 (5): 1489–1496
- Merk V, Chanana M, Gierlinger N, Hirt AM, Burgert I (2014) Hybrid Wood Materials with Magnetic Anisotropy Dictated by the Hierarchical Cell Structure. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 6: 9760–9767
- Militz H (1991) The improvement of dimensional stability and durability of wood through treatment with non-catalyzed acetic-acid anhydride. *Holz Als Roh- und Werkst.* 49: 147–152

- Olsson RT, Samir M, Salazar-Alvarez G, Belova L, Strom V, Berglund LA, Ikkala O, Noguez J, Gedde UW (2010) Making Flexible Magnetic Aerogels and Stiff Magnetic Nanopaper Using Cellulose Nanofibrils as Templates. *Nat. Nanotechnol.* 5: 584–588
- Pei AH, Malho JM, Ruokolainen J, Zhou Q, Berglund LA (2011) Strong Nanocomposite Reinforcement Effects in Polyurethane Elastomer with Low Volume Fraction of Cellulose Nanocrystals. *Macromolecules* 44: 4422–4427
- Pfeffer A, Mai C, Militz H (2012) Weathering characteristics of wood treated with water glass, siloxane or DMDHEU. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 70: 165–176
- Pizzi A, Stracke P, Trosa A (1997) Industrial tannin/hexamine low-emission exterior particleboards. *Holz als Roh- und Werkst.* 55: 168–168
- Ribera J, Gandia M, Marcos JF, delCarmen Bas M, Fink S, Schwarze FWMR (2017) Effect of Trichoderma-enriched organic charcoal in the integrated wood protection strategy. *PlosOne* 12: e0183004
- Rowell RM (2006) Acetylation of wood – Journey from analytical technique to commercial reality. *Forest Products Journal* 56: 4–12
- Salla J, Pandey KK, Srinivas K (2012) Improvement of UV resistance of wood surfaces by using ZnO nanoparticles. *Polym. Degrad. Stabil.* 97: 592–596
- Siqueira G, Kokkinis D, Libanori R, Hausmann MK, Gladman AS, Neels A, Tingaut P, Zimmermann T, Lewis JA, Studart AR (2017) Cellulose Nanocrystal Inks for 3D Printing of Textured Cellular Architects. *Advanced Functional Materials*, 27: 1604619.
- Stashevski AM, Deppe HJ (1973) Application of tannin resins as adhesives for wood particle board. *Holz als Roh- und Werkst.* 31: 417–419
- Stirling R, Temiz A (2014) Fungicides and Insecticides Used in Wood Preservation. In: Schultz TP, Goodell B, Nicholas DD (eds) *Deterioration and Protection of Sustainable Biomaterials*. Amer Chemical Soc, Washington, pp 185–201
- Tarkow H (1949) The swelling and shrinking of wood, paper and cotton textiles and their control. *Tappi* 32: 203–211
- Tarkow H, Stamm AJ, Erickson ECO (1946) Acetylated wood. Report. United States Forest Products Laboratory: 15 pp.
- Tjeerdsma BF, Boonstra M, Pizzi A, Tekely P, Militz H (1998) Characterization of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. *Holz als Roh- und Werkst.* 56: 149–153
- Trey S, Jafarzadeh S, Johansson M (2012) In situ Polymerization of Polyaniline in Wood Veneers. *Applied Materials and Interfaces* 4: 1760–1769
- Wan J, Song J, Yang Z, Kirsch D, Jia C, Xu R, Dai J, Zhu M, Xu L, Chen C, Wang Y, Wang Y, Hitz E, Lacey SD, Li Y, Yang B, Hu L (2017) Highly Anisotropic Conductors, *Advanced Materials*, DOI: 10.1002/adma.201703331
- Yao QF, Wang C, Fan BT, Wang HW, Sun QF, Jin CD, Zhang H (2016) One-step solvothermal deposition of ZnO nanorod arrays on a wood surface for robust superamphiphobic performance and superior ultraviolet resistance. *Sci Rep* 6
- Zhang Z, Sebe G, Rentsch D, Zimmermann T, Tingaut P (2014) Ultralightweight and Flexible Silylated Nanocellulose Sponges for the Selective Removal of Oil from Water. *Chem. Mat.* 26: 2659–2668
- Zhu MW, Song JW, Li T, Gong A, Wang YB, Dai JQ, Yao YG, Luo W, Henderson D, Hu LB (2016) Highly Anisotropic, Highly Transparent Wood Composites. *Adv. Mater.* 28: 5181–5187

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).

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



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

Krajčiči 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

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 mithilfe von Photoinitiatoren
Grützmaker Hansjörg, ETH Zürich

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

Ultraleichte biobasierte Holzwerkstoffplatte mit Schaumkern
Thoemen Heiko, Berner Fachhochschule, Biel

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

Neue Verarbeitungsmethoden für Zellulose-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. Ingo Burgert, ETH Zürich
Oliver Klaffke, Really fine ideas GmbH

Empfohlene Zitierweise:

Ingo Burgert, Oliver Klaffke (2017): Innovative holzbasierte Materialien, 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 Thalman, Lehrstuhl für Städte- und Umweltökonomie, EPF Lausanne.

Koordinator der Synthese und des Dialogfeldes «Innovative holzbasierte Materialien»:

Thomas Bernhard, IC Infraconsult, Bern

Begleitgruppe und Sounding Board dieser Teilsynthese:

Frédéric Pichelin (BFH), Tanja Zimmermann (Empa), Achim Schaffer (BAFU), Ernest Schilliger (Schilliger Holz AG), Tobias Wolfinger (Wicor), Wolfram Selter (Bosshard +Co. AG), Philipp Hunziker (Omya).

Delegierte der Abteilung IV des Nationalen Forschungsrats:

Prof. Nina Buchmann, ETHZ (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: François Gribi (Titelbild); Forschende NFP 66

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 nachwachsende Rohstoff Holz wird in der Ablösung erdölbasierter Produkte eine wichtige Rolle spielen müssen. Dieser Synthesebericht des NFP 66 Ressource Holz vermittelt ein Bild davon, wo die Forschung in der Schweiz bei der Entwicklung neuartiger holzbasierter Materialien steht und welches Potenzial in diesen für verschiedenste Verwendungszwecke steckt. An geeigneten Fertigungsprozessen wird noch weitergearbeitet werden müssen, damit sich die entsprechenden Produkte am Markt behaupten können. Forschung und Wirtschaft sind dabei gleichermassen gefordert.