

DISS. ETH NO. 29079

**WOOD MEMBRANES WITH TAILORED WATER TRANSPORT ABILITY
TOWARD ENERGY-EFFICIENT SMART BUILDING MATERIALS**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES
(Dr. Sc. ETH Zurich)

presented by
YONG DING

M.Sc. Materials Science, Tianjin University
born on *21.01.1993*

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Ingo Burgert, ETH Zürich, examiner

Dr. Tobias Keplinger, AgroBiogel GmbH, co-examiner

Prof. Dr. Orlando Rojas, University of British Columbia, co-examiner

Prof. Dr. Lars Berglund, KTH Royal Institute of Technology, co-examiner

2023

Abstract

Smart materials that can adapt and respond to environmental changes show great potential for addressing the challenges associated with the worldwide increasing living standards and consequent energy consumption. The demand, both in research and industry, for high-performance functional materials, such as membranes, based on renewable resources is constantly increasing. Regardless of the remarkable progress in the development of highly functional (“smart”) membranes, their large-scale application is still limited. On one hand, membrane substrates are mostly petroleum-based, thus unsustainable. On the other hand, sophisticated and resource-intensive bottom-up techniques are usually required to fabricate smart membranes with the desired porosity. Therefore, the development of smart membranes based on renewable resources that do not require complicated fabrication processes would positively contribute to sustainable development and a circular economy.

In this regard, wood may offer solutions with great potential. The unique characteristics of wood, a renewable, CO₂-storing, and mechanically robust material with a unique hierarchical structure, make it an ideal membrane substrate. Native wood and wood-based composites have been explored for a variety of applications, such as microreactors, seawater desalination, energy storage, etc. The aim of this thesis is to develop functional wood-based membranes with tailored water regulation ability and explore their potential application for energy-efficient and environmentally friendly buildings. The main concept here is to utilize the wood structure as a scaffold, in a top-down approach leading to functional wood-based membranes, by taking advantage of wood’s inherent directional porosity or by further modifying it.

The thesis features the development of a wood-based, mechanically robust Janus membrane allowing fast, spontaneous and directional transport of water, together with its proof-of-concept application in bilayer structures with excellent fog-capturing efficiency that could be implemented in future smart buildings. However, the need to use wood cross-sections, which are intrinsically limited in size, constitutes a major hindrance toward scalability. To address this limitation in scalability, a more favorable approach that allows using wood tangential sections as membranes was developed. By laser-drilling microscopic channels perpendicular to the wood fiber direction, an interconnected porous structure was developed. This interconnected wood scaffold was then used to host thermo-responsive hydrogel gates, resulting in smart gating membranes with reversible and stable pore opening or closing when subjected to heating or cooling.

Moreover, a “transpiring wood” with enhanced hygrothermal behavior was obtained by incorporating a hygroscopic salt into a laser-drilled wood scaffold. The resulting material displays improved water adsorption capacity and high moisture exchange rate, making it suitable to regulate humidity and temperature by the exchange of moisture with the surrounding air.

The strategies developed in this thesis provide a valuable contribution to the design of functional wood materials. The synergistic interplay of structure modification and chemical modification can be utilized to achieve desired functionalities, such as tailorable fluid transport. The wood-based smart membranes discussed in this thesis are able to collect and transport water, control its flow, and absorb/release moisture, allowing applications such as fog harvesting, thermo-responsive actuation, and indoor climate control, thus demonstrating their great potential for energy-efficient smart buildings.

Zusammenfassung

Intelligente Materialien, die sich an Umweltveränderungen anpassen und darauf reagieren können, bieten ein grosses Potenzial für die Bewältigung der Herausforderungen, die mit dem weltweit steigenden Lebensstandard und dem daraus resultierenden Energieverbrauch verbunden sind. Sowohl in der Forschung als auch in der Industrie steigt die Nachfrage nach hochleistungsfähigen Funktionsmaterialien, wie z. B. Membranen, die auf erneuerbaren Ressourcen basieren, stetig an. Ungeachtet der bemerkenswerten Fortschritte bei der Entwicklung hochfunktioneller ("intelligenter") Membranen ist deren grosstechnische Anwendung noch immer begrenzt. Einerseits sind die Membransubstrate meist erdölbasiert und damit nicht nachhaltig. Zum anderen sind in der Regel komplizierte und ressourcenintensive bottom-up-Techniken erforderlich, um intelligente Membranen mit der gewünschten Porosität herzustellen. Daher würde die Entwicklung intelligenter Membranen auf der Grundlage erneuerbarer Ressourcen, die keine komplizierten Herstellungsverfahren erfordern, einen positiven Beitrag zum Aufbau einer Kreislaufwirtschaft leisten.

In dieser Hinsicht könnte Holz Lösungen mit grossem Potenzial bieten. Die einzigartigen Eigenschaften von Holz, einem erneuerbaren, CO₂-speichernden und mechanisch robusten Material mit einer einzigartigen hierarchischen Struktur, machen es zu einem idealen Membransubstrat. Einheimisches Holz und holzbasierte Verbundwerkstoffe wurden für eine Vielzahl von Anwendungen wie Mikroreaktoren, Meerwasserentsalzung, Energiespeicherung usw. erforscht. Ziel dieser Arbeit ist es, funktionelle Membranen auf Holzbasis mit massgeschneiderten Wasserregulierungsfähigkeiten zu entwickeln und ihre potenzielle Anwendung für energieeffiziente und umweltfreundliche Gebäude zu untersuchen. Das Hauptkonzept besteht darin, die Holzstruktur als Gerüst zu nutzen und in einem Top-Down-Ansatz funktionale holzbasierte Membranen zu entwickeln, indem die dem Holz innewohnende gerichtete Porosität genutzt oder weiter modifiziert wird.

In der Arbeit wird die Entwicklung einer mechanisch robusten Janus-Membran auf Holzbasis vorgestellt, die einen schnellen, spontanen und gerichteten Wassertransport ermöglicht, sowie ihr Proof-of-Concept für zweischichtige Strukturen mit hervorragender Nebelfangeffizienz, die in zukünftigen intelligenten Gebäuden eingesetzt werden könnten. Ein grosses Hindernis für die Skalierbarkeit ist jedoch die Notwendigkeit, Holzquerschnitte zu verwenden, die von Natur aus in ihrer Grösse begrenzt sind. Um dieser Einschränkung zu begegnen, wurde, ein weiterer Ansatz entwickelt, der die Verwendung von Holz-Tangentialschnitten als Membranen ermöglicht. Durch Laserbohren von mikroskopischen Kanälen senkrecht zur Holzfaserrichtung wurde eine zusammenhängende

poröse Struktur entwickelt. Dieses Holzgerüst mit 3D-Porosität wurde dann als Träger für thermoreaktive Hydrogel-Gates verwendet, was zu intelligenten Gating-Membranen führte, deren Poren sich bei Erwärmung oder Abkühlung reversibel und stabil öffnen oder schliessen liessen. Darüber hinaus, wurde ein "transpirierendes Holz" mit verbessertem hygrothermischen Verhalten entwickelt, indem ein hygroskopisches Salz in das lasergebohrte Holzgerüst imprägniert wurde. Das resultierende Material weist eine verbesserte Wasseradsorptionskapazität und eine hohe Feuchtigkeitsaustauschrate auf und eignet sich daher zur Regulierung von Feuchtigkeit und Temperatur durch den Austausch von Feuchtigkeit mit der Umgebungsluft.

Die in dieser Arbeit entwickelten Strategien können einen wertvollen Beitrag zur Entwicklung von funktionalen Holzwerkstoffen leisten. Das synergistische Zusammenspiel von Strukturmodifikation und chemischer Modifikation kann genutzt werden, um gewünschte Funktionalitäten, wie z.B. einen massgeschneiderten Flüssigkeitstransport, zu erreichen. Die in dieser Arbeit diskutierten intelligenten Membranen auf Holzbasis sind in der Lage, Wasser zu sammeln und zu transportieren, den Wasserfluss zu steuern und Feuchtigkeit zu absorbieren bzw. freizugeben, was Anwendungen wie Nebelfänger, thermoreaktive Steuerung und Raumklimakontrolle ermöglicht und somit ihr grosses Potenzial für energieeffiziente intelligente Gebäude aufzeigt.