

DISS. ETH NO. 19503

**EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATIONS ON THE HEAT AND
WATER TRANSPORT IN WOOD AND WOOD-BASED MATERIALS**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

WALTER ULRICH SONDEREGGER

Dipl. Forsting. ETH (ETH Zurich)

born June 9, 1963

citizen of Grub/AR

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Ing. habil. Dr. h.c. P. Niemz, ETH Zurich, examiner

Prof. Dr. sc. techn. M. Fontana, ETH Zurich, co-examiner

Prof. Dr. nat. techn. Dr. h.c. A. Teischinger, Boku Vienna, co-examiner

2011

Summary

Heat and water transport in wood and wood-based materials play an important role in the contemporary ecological building technique but also for technological processes in the wood-processing industry. In recent years, the insulating properties of load-bearing materials have become increasingly important, in addition to common insulating materials. Therefore, accurate material-specific values are important for modelling and calculation in the field of building physics. But hitherto, the values originate in the majority of the cases from prior papers of the sixties and seventies of the last century. However, for numerous wood-based materials, material-specific values are lacking or incomplete so far. This dissertation contributes to filling this void.

The thesis is structured as a paper dissertation. The general introduction into the topic and an overview to the state of the art in brief are followed by five scientific papers, which build the core of the dissertation. Supplementary investigations, presented in separately, enhance the results introduced in the papers. The synthesis presents the main findings of the investigations and references to further potential research.

In the thesis, structural-physical properties and their mainly influencing factors basically were investigated for solid wood and wood-based materials. Thereby, also recently developed products of wood-based materials were integrated. Chiefly thermal conductivity, water vapour resistance and diffusion are determined. This leads to the five topics covered by the scientific papers:

- Thermal conductivity and water vapour transmission properties of wood-based materials (Paper I).
- Thermal and moisture flux in soft fibreboards (Paper II).
- Quantitative determination of bound water diffusion in multilayer boards by means of neutron imaging (Paper III).
- Thermal behaviour of Norway spruce and European beech in and between the principal anatomical directions (Paper IV).
- Combined bound water and water vapour diffusion of Norway spruce and European beech in and between the principal anatomical directions (Paper V).

The investigations and main results will be further illustrated in detail:

Paper I: Material-specific values of the thermal conductivity, the water vapour resistance factor and the diffusion coefficient were determined from 32 industrially fabricated board-

types of wood-based materials such as plywood, oriented strand board (OSB), melamine faced particle and fibre boards (MFB), particle board and fibre board. Thermal conductivity increases with rising temperature, moisture content (MC) and density and a clear decrease was found with decreasing particle size at the same density level, from solid wood over plywood and particle board to fibre board. The water vapour resistance factor increases and the diffusion coefficient decreases with rising density and both decrease with increasing MC.

Paper II: In addition to Paper I, the thermal conductivity, the water vapour resistance factor and the diffusion coefficient of 28 industrially fabricated types of soft fibreboard were determined. In addition, the sorption of the boards was tested. The thermal conductivity increases with increasing temperature at about 0.45% per Kelvin and with increasing MC at about $0.17 \cdot 10^{-2} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ per percent volumetric MC. It depends on the manufacture (dry or wet process) and is influenced by density. The water vapour resistance factor and the diffusion coefficient show the same influences on density and MC as the boards in Paper I and are additionally dependent on board thickness, composition and manufacturing. The sorption isotherm is similar to solid wood below about 80% relative humidity (RH) but strongly increases for boards with binding fibres and additives of ammonium phosphate or sodium borate and boric acid when above 80% RH.

Paper III: With a new non-destructive testing method, namely neutron imaging (NI), diffusion processes into multilayered samples of Norway spruce were determined and quantified. The samples were bonded with different adhesives: polyvinyl acetate (PVAc), urea formaldehyde resin (UF), epoxy resin (EP) and one-component polyurethane (1C PUR). Thereby, using Fick's second law, diffusion coefficients for radial and tangential water transport in spruce wood and in the adhesive joints were calculated depending on MC. It could be shown that NI is a sufficient method to detect time dependent diffusion processes within wooden samples. This is mainly attributed to the high sensitivity for hydrogen of this method. Further could be shown that the diffusion coefficient of spruce wood exponentially increases with increasing MC and that it is, at low MC, in the radial direction higher than in the tangential direction. The diffusion coefficients of 1C PUR and EP show only low dependency on MC and were up to three orders of magnitude lower than those of spruce wood. PVAc and UF had a smaller barrier effect compared to wood, which clearly depends on the MC.

Paper IV: For Norway spruce and European beech, thermal conductivity, thermal diffusivity and heat capacity were determined for the three anatomical directions (radial, tangential and longitudinal) depending on MC. Between the three principal directions, the thermal conductivity was determined in 15° steps. The results show an increase of the thermal conductivity with increasing MC with the highest increase in the tangential and the lowest in the longitudinal direction. Thermal conductivity is higher for beech due to the higher density than for spruce in all anatomical directions and the conductivity for both species is more than twice as high in the longitudinal direction than perpendicular to the grain. The highest thermal conductivity is found for beech at a grain angle of about 15°. The lowest thermal conductivity shows spruce at an angle of about 60° between the tangential and the radial direction. Thermal diffusivity is similar for both species and decreases with increasing MC. Its differences with regard to the anatomical directions correlate with those of the thermal conductivity values. Heat capacity is lower for beech than for spruce and shows a clear increase with increasing MC.

Paper V: In addition to Paper IV, the combined bound water and water vapour diffusion (steady-state and unsteady-state determined) and the water vapour resistance factor of Norway spruce and European beech were investigated for the principal anatomical directions (radial, tangential and longitudinal) and in 15° steps between these directions. The values were determined with the cup method as basic principle. The unsteady-state-determined diffusion coefficient is, independent of the direction, about half that of the steady-state-determined diffusion coefficient. Both diffusion coefficients are about 2 to 3 times higher for spruce than for beech. They are up to 12 times higher in the longitudinal direction than perpendicular to the grain for spruce, and even up to 15 times higher for beech. With increasing moisture content, the diffusion coefficients exponentially increase. The water vapour resistance factor shows converse values to the diffusion coefficients.

The results of the papers are well supported with supplementary examinations. Sorption and swelling were investigated on the wood-based materials in Paper I. Here, clearly lower sorption isotherms were measured compared with solid wood, which can be attributed to the applied adhesives and the production technology. The in plane swelling increased from plywood and OSB to fibreboard and further to particle board whereas twice to threefold higher values were shown for the thickness swelling of OSB, particle board and fibreboard compared with plywood due to the spring-back effect of the former materials.

In addition to Paper V, the water absorption coefficient was measured for spruce and beech in the principal anatomical directions. The values were clearly higher for beech than for spruce, and lowest for both species in the tangential direction and highest in the longitudinal direction.

Zusammenfassung

Der Wärme- und Feuchtetransport in Holz und Holzwerkstoffen spielt eine bedeutende Rolle für ein zeitgemässes und ökologisches Bauen aber auch für technologische Prozesse in der Holzverarbeitung. In den letzten Jahren erhielten, zusätzlich zu den allgemein gebräuchlichen Dämmstoffen, besonders die Dämmeigenschaften tragender Bauelemente erhöhte Bedeutung. Eine genaue Kenntnis dieser Baumaterialien bezüglich ihrer bauphysikalischen Eigenschaften ist deshalb wichtig, sowohl für die Berechnung als auch Modellierung auf diesem Gebiet. Bisher wird meist auf ältere Arbeiten aus den 60er oder 70er Jahren des letzten Jahrhunderts zurückgegriffen. Für zahlreiche Holzwerkstoffe fehlen bisher jedoch typspezifische Kenngrößen oder diese stehen nur unvollständig zur Verfügung. In dieser Arbeit soll ein Beitrag zur Schliessung dieser Lücke geleistet werden.

Die Arbeit ist als kumulative Dissertation aufgebaut. Nach einer allgemeinen Einführung ins Thema und einem kurzen Überblick über den Stand des Wissens, folgen die fünf wissenschaftlichen Artikel, welche den Hauptteil der Dissertation bilden. Zusätzliche Untersuchungen runden die Ergebnisse aus den Artikeln ab. In der Synthese werden die Hauptideen der Forschungsergebnisse präsentiert und Empfehlungen für weitergehende Forschungsarbeiten gegeben.

In der Dissertation wurden bauphysikalische Kennwerte für Vollholz und Holzwerkstoffe und deren wichtigste Einflussfaktoren grundlegend untersucht. Bei Holzwerkstoffen wurden dabei auch neuentwickelte Produkte mit integriert. Es wurden hauptsächlich die Wärmeleitfähigkeit, der Wasserdampfdiffusionswiderstand und die Diffusion bestimmt. Dies führte zu folgenden Themen für die fünf wissenschaftlichen Artikel:

- Wärmeleitfähigkeit und Wasserdampfdiffusion von Holzwerkstoffen (Artikel I).
- Wärme- und Feuchteverhalten poröser Holzfaserplatten (Artikel II).
- Quantitative Bestimmung der Diffusion von gebundenem Wasser in mehrlagigen Brettlamellen mittels Neutronenradiographie (Artikel III).
- Wärmeverhalten von Fichte und Buche in und zwischen den anatomischen Hauptrichtungen (Artikel IV).
- Kombinierte Diffusion von Wasserdampf und gebundenem Wasser bei Fichte und Buche in und zwischen den anatomischen Hauptrichtungen (Artikel V).

Die Untersuchungen sowie deren wichtigste Ergebnisse werden im Folgenden näher erläutert:

Artikel I: Die Kennwerte der Wärmeleitfähigkeit, des Wasserdampfdiffusionswiderstandes sowie der Diffusion wurden an 32 industriell hergestellten Holzwerkstoffen (Buchensperrholz, OSB (oriented strand board), melaminbeschichteten Span- und Faserplatten (MFB), Span- und Faserplatten) untersucht. Dabei nahm die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Temperatur, Feuchte und Dichte zu. Ebenfalls konnte, bei gleicher Dichte, eine deutliche Abnahme der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmendem Aufschlussgrad der Holzwerkstoffe von Vollholz über Sperrholz zu den Span- und Faserwerkstoffen festgestellt werden. Auch stieg mit zunehmender Dichte der Wasserdampfdiffusionswiderstand, während der Diffusionskoeffizient abnahm. Beide Kennwerte sanken jedoch mit zunehmendem Feuchtegehalt.

Artikel II: Zusätzlich zu den in Artikel I geprüften Holzwerkstoffen wurden an weiteren 28 industriell hergestellten Plattenwerkstoffen (verschiedene Typen poröser Holzfasernplatten) die Wärmeleitfähigkeit, der Wasserdampfdiffusionswiderstand sowie die Diffusion untersucht. Zusätzlich wurde auch die Sorption der Platten ermittelt. Die Wärmeleitfähigkeit stieg mit zunehmender Temperatur um ca. 0.45% pro Kelvin an und mit zunehmendem Feuchtegehalt um ca. $0.17 \cdot 10^{-2} \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ pro Volumenprozent Feuchte. Ferner war die Wärmeleitfähigkeit von der Dichte und dem Herstellungsprozess (Nass- oder Trockenverfahren) abhängig. Bezüglich des Wasserdampfdiffusionswiderstandes und des Diffusionskoeffizienten wiesen die Platten dieselben Tendenzen auf wie die Platten in Artikel I, jedoch konnte zusätzlich auch eine Abhängigkeit von der Plattendicke, der Zusammensetzung der Platten sowie vom Herstellungsprozess aufgezeigt werden. Unterhalb von 80% relativer Luftfeuchte wiesen die Platten ähnliche Sorptionsisothermen auf wie Vollholz. Oberhalb dieser Luftfeuchte stieg die Sorptionsisotherme jedoch bei den Dämmplatten mit Bindefasern sowie Zusätzen von Ammoniumphosphat oder Borsäure und Borax deutlich steiler an.

Artikel III: Mittels einer neuen, zerstörungsfreien Prüfmethode, der Neutronenradiographie (NI), wurde der Diffusionsprozess in mehrschichtiges Fichtenholz untersucht und quantifiziert. Die Proben wurden mit verschiedenen Klebstoffen verklebt: Polyvinylacetat (PVAc), Harnstoffharz (UF), Epoxidharz (EP) und Einkomponenten-Polyurethan (1K-PUR). Dabei wurden, unter Anwendung des 2. Fick'schen Gesetzes, die Diffusionskoeffizienten für die Klebstoffe und das Fichtenholz in radialer und tangentialer Richtung in Abhängigkeit von der Holzfeuchte bestimmt. Es konnte gezeigt werden, dass NI eine gut geeignete Methode zur zeitabhängigen Bestimmung des Diffusionsprozesses in Schichtholz darstellt. Dies ist

hauptsächlich auf die hohe Empfindlichkeit dieser Methode gegenüber Wasserstoff zurückzuführen. Es konnte weiter gezeigt werden, dass der Diffusionskoeffizient von Fichte mit zunehmender Holzfeuchte exponentiell ansteigt, und dass er für niedrige Holzfeuchten in radialer Richtung höhere Werte als in tangentialer Richtung aufwies. Die Diffusionskoeffizienten der Klebstoffe 1K-PUR und EP zeigten nur eine geringe Abhängigkeit von der Holzfeuchte und waren bis zu drei Zehnerpotenzen niedriger als diejenigen von Fichte. Im Gegensatz dazu konnte bei den Klebstoffen PVAc und UF nur eine geringe Sperrwirkung gegenüber Fichtenholz festgestellt werden und die Diffusionskoeffizienten wiesen eine deutliche Abhängigkeit von der Holzfeuchte auf.

Artikel IV: Für Fichte und Buche wurden in den drei anatomischen Richtungen (längs, radial, und tangential) die Wärmeleitfähigkeit, die Temperaturleitfähigkeit und die Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Holzfeuchte untersucht. Die Wärmeleitfähigkeit wurde zusätzlich auch zwischen diesen Hauptrichtungen in 15° Schritten bestimmt. Die Resultate zeigten eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Holzfeuchte, wobei der höchste Anstieg in tangentialer Richtung und der geringste Anstieg in Längsrichtung erfolgte. Die Wärmeleitfähigkeit von Buche war, bedingt durch die höhere Rohdichte, in allen anatomischen Richtungen höher als bei Fichte. Für beide Holzarten war sie in Längsrichtung mehr als doppelt so hoch als in den Richtungen quer zur Faser. Die höchste Wärmeleitfähigkeit wurde bei Buche bei einem Faserwinkel von 15° bestimmt. Die niedrigste Wärmeleitfähigkeit wies Fichte bei einem 60° Winkel zwischen der tangentialen und radialen Richtung auf. Bei beiden Holzarten wurde eine ähnliche Temperaturleitfähigkeit gemessen. Diese nahm mit zunehmender Holzfeuchte ab. Es zeigten sich ähnliche Unterschiede auf Grund der anatomischen Richtung wie bei der Wärmeleitfähigkeit. Die Wärmekapazität war bei Buche niedriger als bei Fichte und nahm mit zunehmender Holzfeuchte deutlich zu.

Artikel V: In Ergänzung zu Artikel IV wurden bei Fichte und Buche zusätzlich die Diffusion (eine Kombination aus gebundenem Wasser und Wasserdampf) im stationären und instationären Bereich sowie der Wasserdampfdiffusionswiderstand ermittelt. Die Untersuchungen erfolgten wie in Artikel IV in den drei anatomischen Hauptrichtungen sowie in 15° Schritten zwischen diesen. Die Werte wurden im Grundprinzip mit der sogenannten ‚cup‘-Methode bestimmt. Der unter instationären Bedingungen ermittelte Diffusionskoeffizient war unabhängig von der Richtung ungefähr halb so hoch wie der unter stationären Bedingungen ermittelte Diffusionskoeffizient. Beide Diffusionskoeffizienten

waren bei Fichte zwei- bis dreimal höher als bei Buche. Bei Fichte waren sie in Längsrichtung bis zu zwölfmal höher als in den Richtungen quer zur Faser, bei Buche bis zu fünfzehnmal. Mit zunehmender Holzfeuchte erhöhte sich der Diffusionskoeffizient exponentiell. Der Wasserdampfdiffusionswiderstand zeigte ein gegenteiliges Verhalten.

Zusätzliche Arbeiten rundeten die Ergebnisse der Artikel ab. So wurden an den in Artikel I untersuchten Holzwerkstoffen ergänzend Sorptions- und Quellungsmessungen durchgeführt. Dabei wurden deutlich niedrigere Sorptionsisothermen als bei Vollholz gemessen, was einerseits auf die verwendeten Klebstoffe und andererseits auf die Herstellungstechnologie zurückgeführt werden kann. Das Quellverhalten in Plattenebene erhöhte sich ausgehend von Sperrholz und OSB zu den Faser- und Spanplatten hin. Dagegen zeigten sich bei der Dickenquellung zwei- bis dreifach höhere Werte bei den Span- und Faserplatten sowie OSB verglichen mit Sperrholz, was auf den Spring-back Effekt ersterer Materialien zurückzuführen ist.

In Ergänzung zu Artikel V wurde der Wasseraufnahmekoeffizient bei Fichte und Buche in den anatomischen Hauptrichtungen gemessen. Für Buche ergaben sich deutlich höhere Werte als für Fichte und beide Holzarten wiesen in tangentialer Richtung die niedrigsten und in longitudinaler Richtung die höchsten Werte auf.