

# Numerical simulation of wooden cultural heritage at hygro-mechanical loading

Numerische Simulation  
hygro-mechanisch beanspruchter  
historischer Kulturgüter aus Holz

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Dresden  
eingereichte

Dissertation

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Daniel Konopka**

Gutachter: **Prof. Dr.-Ing. habil. M. Kaliske, M.Sc.**  
Technische Universität Dresden

**Prof. dr. ir. A.S.J. Suiker**  
Eindhoven University of Technology

**Prof. em. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. P. Niemz**  
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Tag der Verteidigung: 19. September 2025

# Summary

The numerical analysis of wooden structures is, in contrast to other fields of civil and mechanical engineering, not state of the art, yet. This is mainly due to the present challenges for complex structures made of the naturally grown, hygroscopic and history-dependent material of wood. The potential of numerical analysis, however, is undeniable. Climate conditions and load cases at wooden cultural heritage objects can be simulated, which cannot be tested experimentally in non-destructive manner.

This thesis provides an important contribution towards a reliable numerical analysis of wooden structures at hygro-mechanical loading in general and in particular of historical wooden artwork close to reality by the finite element method.

For a simulation close to reality, the transient, hygro-mechanical, anisotropic material behaviour of wood at small deformations, multi-phase moisture transport models are used and coupled with the mechanics in a monolithic solution algorithm. All material models are formulated as dependent on the moisture content in this thesis. They enable the analysis beyond the elastic behaviour and relevant failure mechanisms of the continuum in short- and long-term range.

Efficient element and material models are developed for the accompanying structural components of bondlines and coatings, whose contribution to the hygro-mechanical structural behaviour is essential for wooden artwork. They are modelled as anisotropic and hygro-mechanically coupled in accordance to the constitutive material modelling of the governing material of wood. Their well defined position enables the use of interface or surface elements. The bondline model comprises the moisture transport and fracture mechanical issues of the joint composite in dependence of the current properties of all adjacent materials in one cohesive element. The coating, which may influence the structural behaviour significantly, comprises the decreasing mechanical stiffness and strength as well as increasing water vapour permeability.

The material model parameters for the hygro-mechanical modelling are identified for selected wood species common in artisan craftwork. For the diffusion coefficient, which can only be determined indirectly, an inverse analysis method by simulation of several experiments is introduced.

The developed methods and identified parameters are applied for the comprehensive experimental-numerical structural analysis of replicas of a clavichord musical instrument and an icon panel painting. The simulation enables an insight into the time-dependent processes of the complex global and local hygro-mechanical structural behaviour at climate changes until failure, with respect to the interaction of all structural parts and the influence of the material direction. By the long-term validation experiments, first, the simulation of the damage development at large structures and long time-frames is assessed with respect to the stability and reliability of the developed models and methods. Second, suitable validation parameters and non-invasive monitoring strategies for the valuable original artworks, whose hygro-mechanical characteristics are little-known, and requirements for the ability of calibration and forecasting of the numerical analysis in the framework of a Digital Twin are discussed.

# Zusammenfassung

Die numerische Tragwerksanalyse von Holzstrukturen ist, anders als in vielen ingenieurtechnischen Bereichen, derzeit noch nicht Standard. Das liegt vor allem an den großen Herausforderungen, die komplexe Strukturen aus dem natürlich gewachsenen, hygroskopischen und geschichtsabhängigen Material Holz im Allgemeinen vorweisen. Dabei hat ihr Einsatz das Potential klimatische Beanspruchungen und Lastfälle zu simulieren, die insbesondere bei historischen hölzernen Kulturgütern nicht zerstörungsfrei experimentell getestet werden können.

Diese Arbeit liefert einen wichtigen Beitrag zur zuverlässigen, realitätsnahen numerischen Strukturanalyse von Holzstrukturen unter hygro-mechanischen Beanspruchungen mithilfe der Finite Elemente Methode im Allgemeinen und von historischen hölzernen Kulturgütern im Besonderen.

Für eine realitätsnahe Simulation des transienten, hygromechanischen, anisotropen Materialverhaltens von Holz im Bereich kleiner Verzerrungen werden in dieser Arbeit mehrphasige Feuchttransportmodelle verwendet, mit der Mechanik monolithisch gekoppelt und sämtliche Materialmodelle feuchteabhängig formuliert. Über das elastische Verhalten hinaus werden relevante Versagensmechanismen des Kontinuums im Kurz- und Langzeitbereich berücksichtigt.

Effiziente Element- und Materialmodelle werden für die weiteren für das hygromechanische Strukturverhalten von Holzkunstwerken wesentlichen Bestandteile der Klebfugen und Beschichtungen entwickelt. Sie werden übereinstimmend mit der konstitutiven Materialmodellierung von Holz anisotrop und hygromechanisch gekoppelt formuliert. Ihre definierte Lage lässt die effiziente Verwendung flächiger Elemente zu. Das Klebfugenmodell umfasst alle Feuchttransport- und bruchmechanischen Versagensprozesse des Fugenkomposits in Abhängigkeit der aktuellen Eigenschaften aller angrenzenden Materialien in einem kohäsiven Element. Für die Beschichtung, welche maßgeblich das Strukturverhalten bestimmen kann, wird mit einem einfachen Schädigungsmodell die Abnahme der mechanischen Steifigkeit und Resttragfähigkeit sowie die Zunahme der Wasserdampfdurchlässigkeit berücksichtigt.

Für ausgewählte im Kunsthandwerk verbreitete Holzarten werden Materialmodellparameter für die hygromechanische Modellierung identifiziert. Für den nur indirekt bestimmbar Diffusionskoeffizienten wird eine inverse Analysemethode zur Optimierung auf Basis mehrerer Experimente mittels Simulationen vorgestellt.

Die entwickelten Methoden und ermittelten Parameter werden in umfangreichen experimentell-numerischen Strukturanalysen der Repliken eines Clavichord Musikinstruments und eines Ikonen Tafelbilds angewendet. Die Simulation ermöglicht den Einblick in die zeitabhängigen Prozesse des komplexen globalen und lokalen hygromechanischen Strukturverhaltens durch Klimaänderungen im Zusammenspiel aller Bauteile und Materialrichtungsabhängigkeiten bis zum Versagen. Anhand der Langzeit-Validierungsexperimente wird einerseits die Simulation der Schädigungsentwicklung großer Strukturen über lange Zeiträume hinsichtlich der Stabilität und Zuverlässigkeit der entwickelten Modelle und Methoden bewertet. Andererseits werden geeignete Validierungsparameter und zerstörungsfreie Monitoringkonzepte für die

wertvollen Originale, für die kaum hygromechanische Eigenschaften bekannt sind, und Voraussetzungen, die für die Kalibrierung und Prognosefähigkeit der numerischen Analyse im Rahmen eines Digitalen Zwillings erfüllt sein müssen, erörtert.