

Numerische Versagensanalyse von Holzkonstruktionen unter hygro-mechanischer Kurz- und Langzeitbelastung

Josef Stöcklein, Daniel Konopka, Marcel May, Diah Puspita Rahmi, Michael Kaliske

Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke, Technische Universität Dresden

Zusammenfassung: Aktuelle Entwicklungen der hygro-mechanischen Finite-Elemente-Analyse von Holzkonstruktionen unter Kurz- und Langzeitbelastung mit Berücksichtigung ihres Versagensverhaltens werden präsentiert. Dabei werden innovative und effiziente Bruchmodelle (anisotroper Eigenfracture-Ansatz) sowie die Anwendung von Kriech- und Mechanosorptionsmodellen auf die multiphysikalisch gekoppelte Analyse komplexer dreidimensionaler Strukturen vorgestellt.

1 Einleitung

Holz erfährt in den letzten Jahren als architektonisch ansprechender, gesunder und regenerativer Werkstoff eine Renaissance. Zwar wird es seit Jahrtausenden als Baumaterial genutzt – leichte Verarbeitbarkeit, gute Verfügbarkeit und Tragfähigkeit machen es attraktiv –, aber die Verwendung und Dimensionierung der Holzbauteile beruht vor allem auf praktischer, bzw. empirischer Erfahrung. Ein effizienter Tragwerksentwurf und möglichst umfassende Beurteilung der Dauerhaftigkeit der Tragstrukturen und die Verhinderung von irreversiblen Schäden erfordern eine detaillierte Prognose des Material- und Strukturverhaltens unter realistischen Einwirkungen. Für eine solche Analyse komplexer hölzerner Strukturen bieten sich numerische Methoden wie die Finite-Elemente-Methode (FEM) oder die Materialpunktmethod (MPM) in Verbindung mit geeigneten Materialmodellen an.

Um die dauerhafte Standsicherheit und Erhaltung von Holztragwerken zu gewährleisten, müssen multiphysikalische Beanspruchungen aus zeitlich veränderlichen mechanischen Kräften und Klimabedingungen berücksichtigt und beurteilt werden. Eine umfassende Materialmodellierung beinhaltet daher das mechanische Kurz- und Langzeitverhalten, sowie die hygro-mechanische Kopplung. In diesem Beitrag werden aktuelle Entwicklungen von Materialmodellen zur Analyse des Materialverhaltens und verschiedener Versagensmechanismen vorgestellt und Anwendungen präsentiert. Die Material- und FE-Modelle sowie die Analysen basieren auf

aktuellen Forschungsarbeiten des Instituts für Statik und Dynamik der Tragwerke (ISD) der TU Dresden. Ziel ist die Entwicklung eines allgemeinen Simulationswerkzeugs mit konsistenter und umfassender multiphysikalischer Modellierung des Material- und Strukturverhaltens, welches allgemein für beliebige Holzstrukturen und Bauwerke einsetzbar ist.

2 Materialmodellierung

Auf dem Gebiet der Materialmodellierung von Holz sind in den letzten Jahren am ISD umfangreiche Forschungsarbeiten entstanden, die zum Beispiel in [2] zusammengefasst sind. Hierbei werden die werkstoffspezifischen Charakteristiken von Holz realitätsnah modelliert. Das schließt das drei-dimensionale, anisotrope Materialverhalten, die unterschiedlichen Versagenszustände unter Druck (duktile) und Schub bzw. Zug (spröde), feuchte- und zeitabhängige Diffusions- bzw. Kriechprozesse im Langzeitbereich sowie die Berücksichtigung von Strukturinhomogenitäten (z.B. Äste) mit ein.

Für die Modellierung des spröden Versagens werden verschiedene bruchmechanische Ansätze verwendet (kohäsive Interface-Elemente, Extended Finite Element Method (XFEM), Phasenfeldmethode). Alle drei Ansätze wurden am ISD für anisotrope Werkstoffe und multiphysikalische Prozesse entwickelt. Besonders vielversprechend ist die neuartige Methode der Eigenerosion von Elementen, die beim Versagen erodieren und sich somit dem Lastabtrag entziehen.

Im Folgenden werden neue Entwicklungen im Bereich des multiphysikalisch, zeitlich gekoppelten Langzeitverhaltens und der Bruchversagensmodellierung vorgestellt.

2.1 Langzeitverhalten

Das Langzeitverhalten bezeichnet Prozesse im Material infolge einer andauernden Einwirkung. Dazu gehören die zeitliche Änderung von Deformationen aus statischer Ermüdung, z.B. viskoses Kriechen, transienten Feldgrößen (Feuchte- und Wärmetransport und physikalischer Alterung), genauso wie die chemische Alterung des Materials.

Als hygroskopischer Werkstoff reagiert Holz stark auf Änderungen klimatischer Umweltbedingungen. Eine realitätsnahe Beschreibung feuchteabhängiger Materialparameter und des Feuchtetransports ist entscheidend. Insbesondere bei großen Feuchtegradienten, die im anisotropen Holz signifikante Eigenspannungen aus behindertem Quellen und Schwinden bewirken, sind komplexere Modelle für die transiente Feldgröße der Materialfeuchte nötig. Der Feuchtetransport wird als zweiphasige Diffusion des gebundenen Wassers in der Zellwand und des Wasserdampfes in den Lumen mittels des FICK'schen Gesetzes modelliert. Die parallelen Potentiale werden mit einem hysteretischen Sorptionsansatz gekoppelt. Für die Holzfeuchte, und somit die Kopplung mit der Mechanik, ist das gebundene Wasser maßgebend. Der Ausgleich mit der Umgebungsluft wird über Wasserdampfemission durch eine Oberflächen-Grenzschicht gewährleistet. Die Wärmeausdehnung von Holz spielt eine untergeordnete Rolle. Zur vollständigen energetischen Betrachtung der Diffusion kann die Berücksichtigung des Wärmetransports nach FOURIER's Gesetz in Einzelfällen sinnvoll sein [5].

Zeitabhängige Kriechprozesse zeigen im Allgemeinen drei Phasen auf, die als viskoelastisch, viskoplastisch und Kriechversagen modelliert werden können. Schon die zweite Kriechphase ist irreversibel, führt also zu bleibenden Deformationen. Die verwendete rheologische Modellierung nach [3] sieht eine Kopplung eines Standard-Festkörper-Modells, bestehend aus elastischer Feder und eines KELVIN-Elements, mit einem BINGHAM-Element vor. Weiterhin finden die Abhängigkeit vom Beanspruchungsniveau und der Holzfeuchte Berücksichtigung. Die Mechano-Sorption, welche bei gleichzeitiger mechanischer Beanspruchung und Feuchtewechseln zu zusätzlichen bleibenden Deformationen führt, wird als Vergrößerung gleichsinniger viskoelastischer Deformationen modelliert.

2.1.1 Numerisches Beispiel Historisches Tafelbild

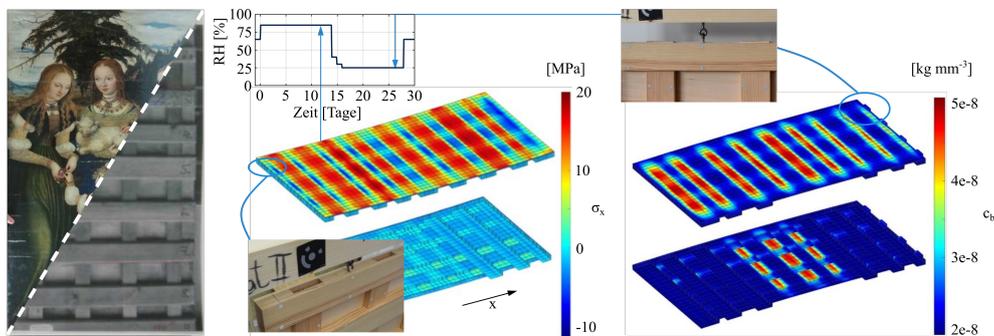


Abbildung 1: Holztafelbild mit historischer Parkettierung unter Feuchtebelastung, Auswertung der Spannungen in Tafellängsrichtung nach zweiwöchiger Befeuchtung, Konzentrationsverteilung des gebundenen Wassers nach anschließender zweiwöchiger Trocknung.

Neben Anwendungen im Bauwesen können numerische Analysen von Holzstrukturen im Kulturgüterschutz genutzt werden, um das Schädigungspotential in der Tragstruktur und in ästhetischen Bestandteilen durch mögliche Einwirkungen abzuschätzen. Herausfordernd ist, dass oft Materialien mit unbekanntem Eigenschaften berücksichtigt werden müssen – neben Holz auch Leime und Beschichtungen, die Einfluss auf das Strukturverhalten haben. In mehreren Projekten am ISD wurden zu Validierungszwecken Repliken von Holztafelbildern angefertigt, deren Materialien verschiedenen Tests unterzogen wurden, um elastische, viskose, Bruch- und Diffusionseigenschaften als Eingangsgrößen numerischer Analysen klimatischer Belastungsszenarien zu ermitteln. Abb. 1 zeigt Ergebnisse der Simulation eines Holztafelbilds unter starker Änderung der Umgebungsluftfeuchte in einer Klimakammer. Dargestellt sind Spannungen in der Tafel und der Beschichtung in Tafellängsrichtung nach zweiwöchiger Befeuchtung sowie die Feuchteverteilung nach zweiwöchiger Trocknung, außerdem die Verformungen in beiden Lastfällen. Es wird deutlich, dass sich die klimatischen Einwirkungen auf den Spannungszustand auswirken und so Schädigung verursachen können. Abb. 2 zeigt die Entwicklung der Gesamtdehnungen und der (visko-) elastischen und mechanosorptiven Dehnungsanteile an einem Punkt auf der unbeschichteten Rückseite und an einem Punkt unter der Malschicht des Holztafelbilds. Ein hoher Anteil der von Quellen und Schwinden dominierten Gesamtdehnung entfällt auf irreversible mechano-sorptive Dehnung.

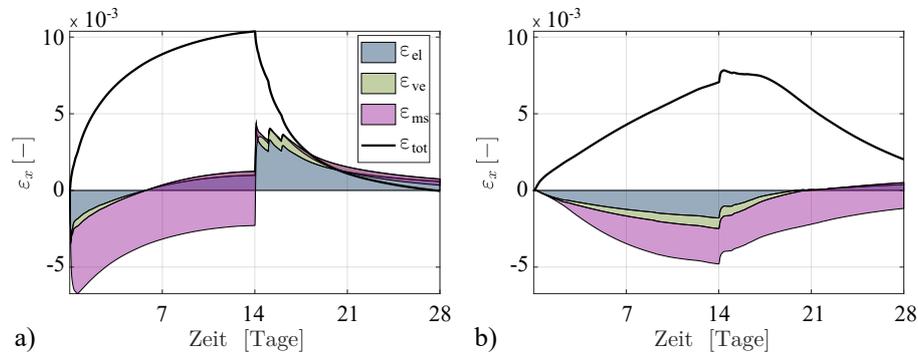


Abbildung 2: Zeitliche Entwicklung der Gesamtdehnungen und der elastischen, viskoelastischen und mechanosorptiven Anteile a) an der unbeschichteten Rückseite und b) unter der Malschicht des Holztafelbilds (s. Abb. 1).

2.2 Phasenfeld

Ein umfassender anisotroper Phasenfeldansatz wurde entwickelt, der auch die Mixed-Mode-Versagensmechanismen berücksichtigt. Aufgrund der konstitutiven Komplexität im Zusammenhang mit den anisotropen elastischen und Rissausbreitungseigenschaften ist die Entwicklung eines aussagekräftigen und prädiktiven numerischen Modells für das Material Holz und Holzstrukturen sehr herausfordernd. Insbesondere für die Rissmodellierung ist die Struktur dieses natürlich gewachsenen Materials nicht nur durch einen anisotropen Bruchwiderstand, sondern auch durch eine modeabhängige Bruchzähigkeit bestimmt. Das anisotrope und modeabhängige Phasenfeld wurde mittels des Konzepts des Repräsentativen Riss-Elements (Representative Crack Element RCE) hergeleitet. Dieses garantiert eine physikalische und sinnvolle Risskinematik (Rissöffnung und -schließung, Schub und gemischte Deformationen). Auf Grundlage der RCE-Beschreibung ist eine explizite Unterscheidung zwischen dem Versagen Mode I und Mode II natürlicherweise erreicht. In Abb. 3 ist die Rissimulation in einem durchbrochenen Träger dargestellt. Die Ergebnisse entsprechen sehr gut dem experimentell beobachteten Verhalten. Anschließend wurde eine Erweiterung des Modells um eine zusätzliche Kopplung mit der Feuchte und um den Feuchtetransport auch in gerissenem Holz vorgenommen. Hierzu wurde ein hygro-mechanisches RCE entwickelt, um eine realistische Degradationsmodellierung während der feuchteinduzierten Rissbildung und Rissausbreitung zu gewährleisten. Dafür wurde das beschriebene Multi-FICK'sche Diffusionsmodell angewendet. Beispielhaft sind in Abb. 4 Rissinitiation und Ausbreitung durch trockenungsinduziertes Schwinden in einem Benchmark-Experiment dargestellt. Aufgrund der Anisotropie der Holzmaterialieigenschaften und der im Probekörper schräg liegenden Jahrringlage breitet sich der Riss von der Spannungs-konzentrationsstelle am Schlitzende radial in Richtung des geringsten Widerstands aus. Die präsentierten Entwicklungen und weitere Beispielsimulationen hinsichtlich des anisotropen Phasenfeldansatzes nach dem RCE-Konzept sind in [6] publiziert. Eine weitere Publikation zur Erweiterung des Ansatzes um die Feuchteabhängigkeit folgt.

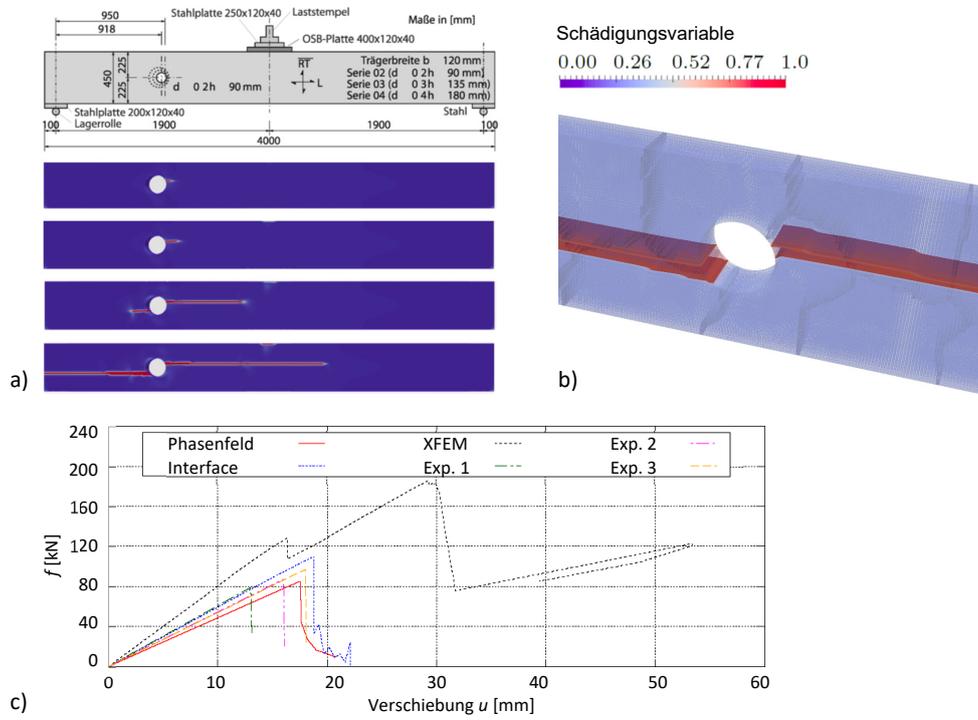


Abbildung 3: a) Probengeometrie und Rissbildung bei modeabhängiger Phasenfeldformulierung, b) Visualisierung der Isooberfläche $p_{0.95}$ des Phasenfeldrisses im dreidimensionalen Probekörper, c) Kraft-Verschiebungsdiagramme im Vergleich zu experimentellen Ergebnissen und weiteren numerischen Berechnungen.

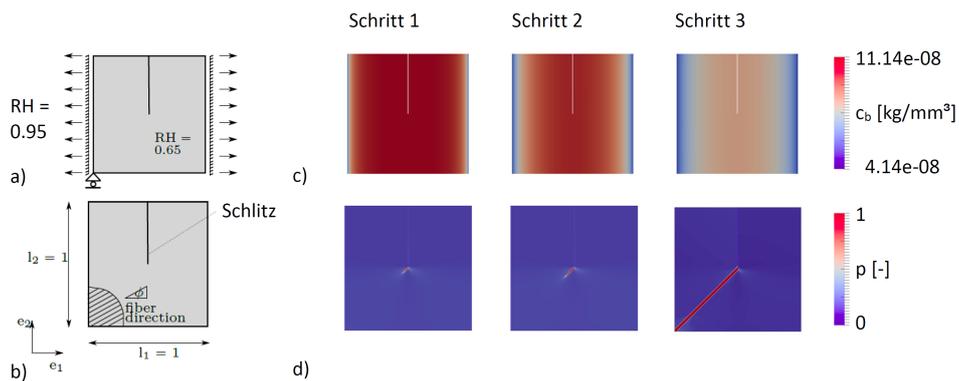


Abbildung 4: Simuliertes Trocknungsreißn einer eingespannten geschlitzten Probe zu drei ausgewählten Zeitschritten: a) mechanische und hygrische Randbedingungen, b) Geometrie, c) Konzentration des gebundenen Wassers und d) Schädigungs-Variable p .

2.3 Eigenfracture

Ein umfassender Eigenfracture-Ansatz, welcher sowohl die Anisotropie des Werkstoffs Holz in den elastischen Eigenschaften als auch in den bruchmechanischen Kenngrößen berücksichtigt, wurde entwickelt. Die materialspezifischen Risswiderstände werden dabei nicht losgelöst formuliert, sondern im Rahmen des Mixed-Mode Versagens betrachtet. Um physikalisch fehlerhafte Spannungszustände an der Risspitze zu vermeiden, wurde der Eigenfractureansatz in das Konzept des RCE eingebettet [4]. Durch die Verwendung des RCE auf der Mikroebene und anschließender Homogenisierung erfolgt eine explizite Unterscheidung zwischen den Versagensmechanismen Mode I und Mode II auf natürliche Weise. Das Mixed-Mode-Versagen wird anschließend mittels TSAI-WU-Kriterium geprüft. Beispielhaft ist in Abb. 5 das Versagen einer einseitig geschlitzten Holzscheibe durch eine am oberen Rand vorgeschriebene Verschiebung dargestellt. Die Ergebnisse bezüglich des Rissverlaufs und das Verschwinden der Zugspannungen entlang der Rissflanken entsprechen gut den experimentell gewonnenen Erkenntnissen. Im Vergleich zur Phasenfeld-Methode konnte der Rechenaufwand deutlich reduziert werden, da die Unbekannte zur Ermittlung der Risskinematik bereits auf Materialebene berechnet wird und nicht als globaler Freiheitsgrad eingeführt werden muss.

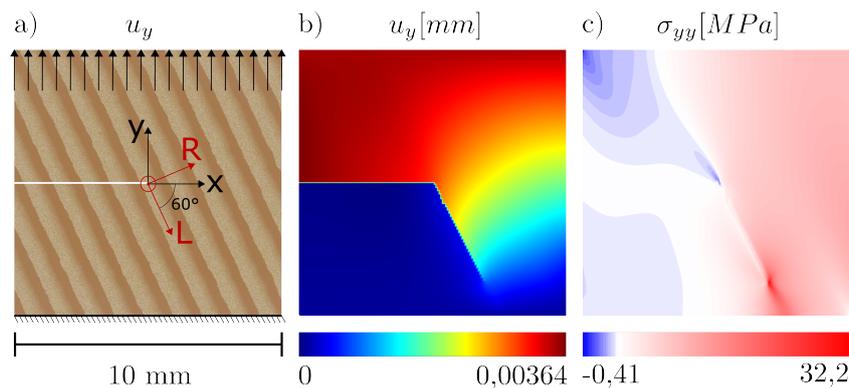


Abbildung 5: Quadratische, einseitig geschlitzte Scheibe ($t = 5$ mm) mit a) DIRICHLET Randbedingung u_y und Faserrichtung (L=Longitudinal; R=Radial), b) resultierendes Verschiebungsfeld u_y und c) Spannungen σ_{yy} .

3 Materialpunktmethode für Durchdringungsprobleme in Holz

Bei Fragestellungen mit starken Elementverzerrungen kann die FEM an Grenzen stoßen. Beispiele sind Durchdringungsprobleme wie das Nageln oder Schrauben in Holz. Hier bietet sich die Materialpunktmethode (MPM) an: eine hybride Methode, die netzbasierte und netzfreie Methoden kombiniert. Die MPM verwendet ein Hintergrundnetz, sodass Materialmodelle problemlos von der FEM übernommen werden sowie MPM und FEM gekoppelt werden können. Abb. 6 zeigt Ergebnisse der FEM-Simulation des Einschlags von Nägeln in Fichtenholz mit

sehr starken Elementverzerrungen im Kontaktbereich, die zum Abbruch der FEM-Simulation führen. Nachteile der MPM sind eine im Vergleich zur FEM höhere Rechenzeit und eine geringere Effektivität der Modellverfeinerung durch Erhöhung der Gitterdichte oder durch Hinzufügen von mehr Materialpunkten in jedem Gitter im Vergleich zur Verwendung von Elementen höherer Ordnung in der FEM. Herausfordernd ist zudem die Definition von Verschiebungsrandbedingungen in der MPM. Als Lösung bietet sich die Kombination von MPM- und FEM-Modellen durch ein Bindungselement [1] mit Verschiebungsrandbedingungen für Knoten des FE-Modells an. Abb. 7 zeigt ein Validierungsexperiment mit Druckbelastung von Fichtenholz. Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten zeigt für die Simulationen mittels FEM und MPM übereinstimmende Ergebnisse für den elastischen und plastischen Bereich. Ein gekoppelter MPM-FEM-Ansatz scheint vielversprechend für die Simulation von Nagel- und Schraubvorgängen, wobei die Holzkontaktzone als MP und der Verbinder und das Holz fernab der Kontaktzone als FE modelliert werden. Zukünftige Arbeiten erfordern die Implementierung einer geeigneten Reibungskontaktarstellung für das Eindringproblem und die Berücksichtigung thermo-hygro-mechanischer Eigenschaften in der MPM.

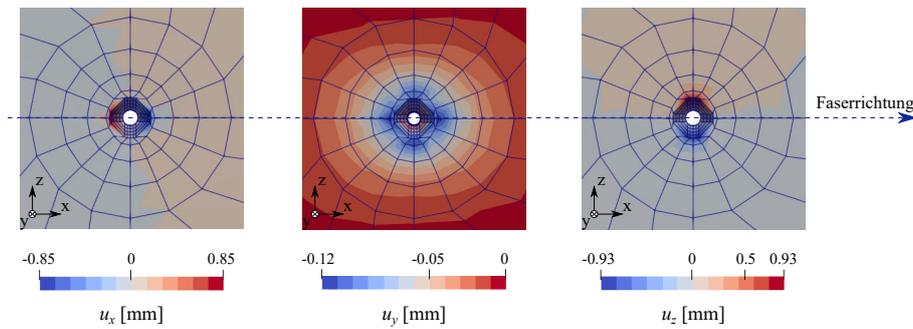


Abbildung 6: Verschiebung in die drei Raumrichtungen im Zustand vor dem Versagen basierend auf der FEM-Simulation des Einschlagens von Nägeln in Fichtenholz.

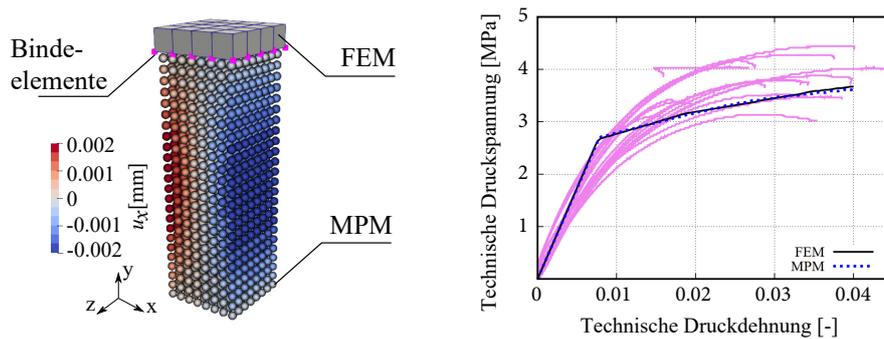


Abbildung 7: Fichtenholz unter verschiebungsgesteuerter Druckbelastung senkrecht zur Faserrichtung und Simulation mittels gekoppelter FEM-MPM.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In einer Übersicht aktueller Forschungsarbeiten zur Analyse des Tragverhaltens von Holzstrukturen wurde die transiente Simulation von Holz beschrieben und Ansätze zur Modellierung des Schädigungs- und Bruchverhaltens präsentiert. Die grundlegenden numerischen Methoden und Materialmodelle wurden vorgestellt. Aktuelle Forschungsarbeiten sind der Erweiterung von Modellen zur Versagenssimulation, für Klebfugen, zur Darstellung von Materialinhomogenitäten aus natürlicher Variation, und von Langzeitphänomenen, wie Kriechen, und deren Anwendung in der Simulation von komplexen Holzstrukturen, z.B. im Kulturgüterschutz, gewidmet. In der Entwicklung befinden sich weiterhin Modelle für unscharfe Daten zu Lasten oder Materialeigenschaften, Schädigung, große Deformationen oder dynamische Prozesse und Methoden zur effizienten Simulation komplexer Strukturen in langen Beanspruchungszeiträumen. Generell werden weitere Experimente für die Parameteridentifikation und zur Validierung der Modelle und Methoden benötigt. Mit den bisher geleisteten Entwicklungsschritten ist ein wichtiger Beitrag zur Weiterentwicklung objektiver, allgemeiner Simulationsmethoden für Holztragwerke unter Berücksichtigung der multiphysikalischen Natur des Holzes und seiner vielseitigen Versagenscharakteristiken geleistet worden.

Literatur

- [1] CHIHADDEH, A. : *A Coupled Implicit Material Point Method - Finite Element Method for Fracture Simulation by the Eigenersion Approach*, Technische Universität Dresden, Dissertationsschrift, 2023
- [2] KONOPKA, D. ; GEBHARDT, C. ; KALISKE, M. : Numerical modelling of wooden structures. In: *Journal of Cultural Heritage* 27S (2017), S. 93–102
- [3] REICHEL, S. : *Modellierung und Simulation hygro-mechanisch beanspruchter Strukturen aus Holz im Kurz- und Langzeitbereich*, Technische Universität Dresden, Dissertationsschrift, 2015
- [4] STORM, J. ; QINAMI, A. ; KALISKE, M. : The concept of representative crack elements applied to eigenfracture. In: *Mechanics Research Communications* 116 (2021), S. 103747
- [5] STÖCKLEIN, J. ; KALISKE, M. : Thermo-hygro-mechanically coupled modelling of wood including two-phase moisture diffusion for transient simulation of wooden structures at mechanical and climatic loads. 59 (2023), S. 67–79
- [6] SUPRIATNA, D. ; YIN, B. ; KONOPKA, D. ; KALISKE, M. : An anisotropic phase-field approach accounting for mixed fracture modes in wood structures within the Representative Crack Element framework. In: *Engineering Fracture Mechanics* 269 (2022), S. 108514