



*Dr. Prof. Josef Eberhardsteiner
Institut für Mechanik der
Werkstoffe und Strukturen
Technische Universität Wien
Wien, Österreich*

Materialgesetze für Holz – Unerlässlich für die Bewertung und Prognose des Verhaltens von Holz und Holzkonstruktionen

**Materials laws for wood – essential for
evaluating and predicting the behavior
of wood and timber structures**



*Dr. Karin Hofstetter,
Institut für Mechanik der
Werkstoffe und Strukturen
Technische Universität Wien
Wien, Österreich*

**Leggi del materiale per il legno –
indispensabile per una valutazione e
una prognosi del comportamento del
legno e delle costruzioni in legno**

Dokument in Deutsch

Materialgesetze für Holz – Unerlässlich für die Bewertung und Prognose des Verhaltens von Holz und Holzkonstruktionen

1 Einleitung

Im modernen konstruktiven Holzbau kommen in zunehmendem Maße zweidimensionale (platten- oder schalenartige) Tragelemente zum Einsatz. Von Standardfällen abgesehen, sind zur Berechnung und Bewertung des Deformations- und Festigkeitsverhaltens derartiger Holzkonstruktionen keine universell einsetzbaren analytischen Berechnungsverfahren verfügbar. Aus diesem Grund erfordert die Durchführung realitätsnaher, zuverlässiger Traglastanalysen sowie die Ermittlung des räumlichen Deformationsverhaltens solcher zweiachsig gespannter Bauteile die Anwendung numerischer Berechnungsverfahren, wie z.B. der Finite-Elemente (FE)-Methode. Aber auch im traditionellen Holzbau mit seinen trägerrostartigen Strukturen treten im Bereich der Verbindungsmittel dreidimensionale Beanspruchungszustände auf, welche mit herkömmlichen Mitteln nur unzulänglich quantifiziert werden können. Zur Analyse der in diesem Zusammenhang resultierenden Spannungskonzentrationen bedarf es daher ebenfalls des Einsatzes numerischer Simulationen. Grundlage für die Anwendung numerischer Verfahren ist die Verfügbarkeit geeigneter Materialgesetze, welche das Steifigkeits- und Festigkeitsverhalten von mehrachsig, schräg zur Faser beanspruchtem Holz zuverlässig beschreiben. Solche Materialgesetze sind zurzeit lediglich in geringem Umfang vorhanden. Vielmehr bestehen beträchtliche Defizite an werkstoffmechanischem Grundlagenwissen im Hinblick auf das mechanische Verhalten von Holz bei allgemein dreidimensionaler Beanspruchung.

Dieser Missstand veranlasste bereits in den frühen 1990er-Jahren die Etablierung eines Forschungsschwerpunkts zum mechanischen Verhalten von Holz am Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen (IMWS) der TU Wien. Seither wird intensiv an einer Erweiterung und Verbesserung des Materialverständnisses und einer mathematischen Beschreibung des Materialverhaltens von Holz gearbeitet. Im vorliegenden Beitrag soll der eingeschlagene Weg zu einem mikromechanisch motivierten Materialgesetz skizziert und gleichzeitig ein Rückblick über mehr als ein Jahrzehnt Forschungsaktivität im Bereich Holz am IMWS gegeben werden.

Die Auseinandersetzung mit dem Werkstoff Holz am IMWS startete mit umfangreichen Versuchen an biaxial beanspruchtem Fichtenholz. Ziel war es, grundlegende Einblicke in das Materialverhalten und Daten für eine quantitative Beschreibung des Verformungs- und Festigkeitsverhaltens bei zweiachsiger Beanspruchung zu gewinnen. Eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse ist an den Beginn des vorliegenden Beitrags gestellt. Die mathematische Beschreibung des Deformationsverhaltens von Fichtenholz und dessen Versagenszustände erfolgten mittels eines Mehrflächenplastizitätsmodells, welches im zweiten Teil dieses Beitrags vorgestellt wird. Die Unzulänglichkeiten der rein phänomenologischen Formulierung dieses Modells sowie die eingeschränkte Prognosefähigkeit und die aufwändige Parameterermittlung regten die Anwendung mikromechanischer Methoden an. Den Ergebnissen dieses jüngsten Zweiges der Materialcharakterisierung von Holz am IMWS ist der dritte Teil gewidmet. Schließlich wird im vierten und letzten Teil die Anwendung der vorgestellten Modelle im praktischen Holzbau bei der numerischen Simulation von Holzkonstruktionen gezeigt.

2 Experimentelle Bestimmung biaxialer Festigkeiten

Die Zielsetzung der experimentellen Untersuchungen war die Bestimmung von Daten über das Steifigkeits- und Festigkeitsverhalten von biaxial, schräg zur Faserrichtung in der LR -Ebene beanspruchtem Fichtenholz ohne Beschränkung auf den Sonderfall der Koinzidenz einer Materialhaupttrichtung (z.B. Faserlängsrichtung L) mit einer schubspannungsfreien Richtung (Hauptnormalspannungsrichtung). Die dazu notwendige Versuchseinrichtung wurde eigens entwickelt [1]. Sie besteht zum einen aus einer biaxialen servohydraulischen Festigkeitsprüfmaschine zur schrittweisen Aufbringung von Verschiebungsinkrementen auf den Holzprobekörper bis zu dessen Bruch, und zum anderen aus einem berührungslos arbeitenden, laser-optischen Messsystem (Speckle-Interferometer) zur flächenhaften quantitativen Deformationsanalyse im 140×140 mm großen Messbereich der scheibenförmigen Holzprobekörper (siehe Abbildung 1). Dieses Messsystem dient darüber hinaus auch zur Überprüfung der für Werkstoffversuche unerlässlichen Homogenität der Verteilung der Deformationskomponenten im Prüfbereich.

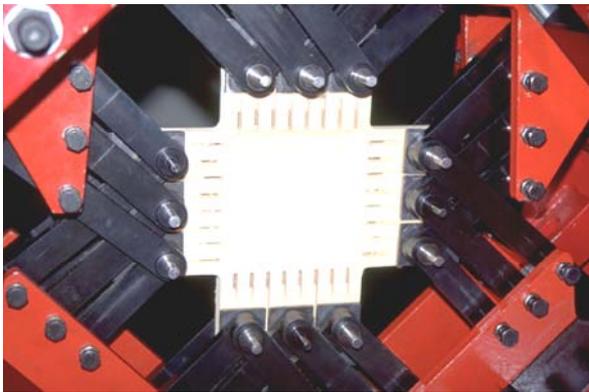


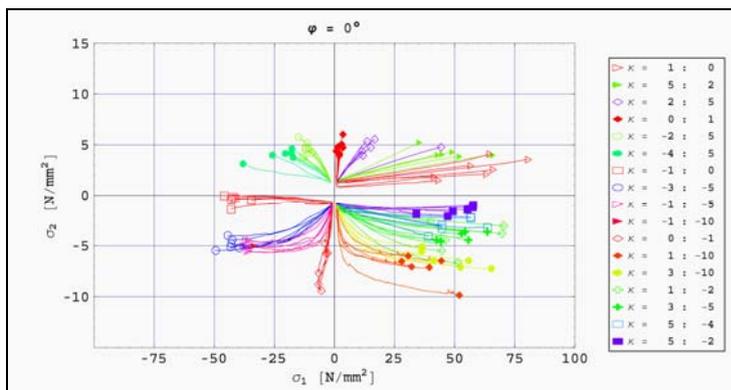
Abbildung 1: Kreuzförmiger Holzprobekörper in der biaxialen Belastungseinrichtung

Die experimentelle Untersuchung wurde zunächst auf ausgewähltes, technologisch fehlerfreies und homogenes Fichtenholz beschränkt. Später wurde auch der Einfluss von Ästen auf das mechanische Verhalten von Fichtenholz experimentell untersucht. Durch Klimatisierung der Proben bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65% wurde die Holzfeuchtigkeit bei $u = 12\%$ konstant gehalten. Unter den angeführten Bedingungen werden die mechanischen Eigenschaften von fehlerfreiem Holz im Wesentlichen nur mehr von der Rohdichte beeinflusst. Im ersten Projektstadium wurde eine repräsentative Anzahl einaxialer Normzugversuche parallel und normal zur Faserlängsrichtung (insgesamt etwa 300 Versuche) durchgeführt. Als Ergebnis wurden die rohddichtebezogenen elastischen Werkstoffkennwerte (E_L , E_R und ν_{LR}) und einaxialen Zugfestigkeiten (f_{tL} und f_{tR}) jenes Holzes, aus dem die biaxialen Probekörper hergestellt wurden, erhalten.

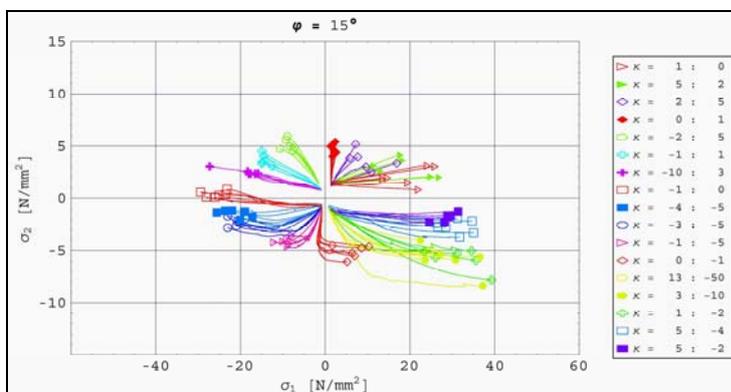
Die mechanischen Parameter der 439 durchgeführten biaxialen Bruchversuche waren einerseits der Winkel φ , den die Materialhauptachse L (Faserlängsrichtung) mit der Spannungshauptachse σ_1 einschließt, und andererseits das Verhältnis κ der auf den Probekörper aufgetragenen biaxialen Zug-/Zug-, Druck-/Druck- oder gemischten Zug-/Druckbeanspruchung [1]. Die Versuchsdurchführung erfolgte verschiebungsgesteuert durch punktweises Aufbringen von Verschiebungskomponenten sowohl normal als auch parallel zum Rand des Probekörpers. Im Rahmen eines Optimierungsverfahrens wurden mit Hilfe der FE-Methode für die untersuchten Faserneigungen φ jene Normal- und Tangentialkomponenten des Verformungszustandes in den Lasteinleitungspunkten bestimmt, bei denen die korrespondierenden Kräfte lediglich Komponenten aufweisen, die jeweils normal zum Probenrand gerichtet sind. Unter der Voraussetzung homogener Spannungs- und Verzerrungsverteilungen im Messbereich der Proben stellen in diesem Fall die Hauptachsen des Probekörpers die Hauptrichtungen des Spannungszustandes dar. Die Hauptnormalspannungen lassen sich dann auf einfache Weise aus den Lasteinleitungskräften bestimmen. Letztere werden mit Hilfe von in den 24 Belastungsachsen integrierten Kraftaufnehmern gemessen.

Im Zuge der beschriebenen Versuchsreihe wurden für verschiedene Winkel φ jeweils die biaxialen Bruchzustände im Hauptspannungsraum bestimmt. Zur Gewährleistung signifikanter experimenteller Resultate wurden für jede Versuchskonfiguration – gekennzeichnet durch die beiden Parameter φ und κ – in der Regel sechs Versuche durchgeführt. Durch Bestimmung der jeweils aktuellen Rohdichte und unter Zugrundelegung der zuvor in der einaxialen Studie ermittelten Zusammenhänge zwischen Rohdichte und einzelnen Festigkeitswerten konnten die nicht erklärbaren Ergebnisstreuungen soweit minimiert werden, dass statistisch eindeutige Aussagen über die gesuchten biaxialen Festigkeitseigenschaften von Fichtenholz getroffen werden können.

Als Ergebnis jedes Versuches wurden neben den biaxialen Festigkeiten Last-Verschiebungsdiagramme für die einzelnen Lasteinleitungspunkte des Probekörpers sowie die Verteilungen einzelner Deformationskomponenten im Messbereich der Probe erhalten (siehe Abbildung 2, [1]). Die im Rahmen von Werkstoffversuchen zu bestimmenden Spannungs-Dehnungsdiagramme wurden durch Summation der für die einzelnen Lastschritte im Wege von Mittelungsprozessen bestimmten Spannungs- und Verzerrungszinkremente erhalten. Je nach Art der Beanspruchung erfolgte das Versagen spröde oder duktil, wie in Abbildung 3 anhand von charakteristischen Spannungs-Dehnungskurven und Bruchbildern für drei Abschnitte der Versagensfläche gezeigt wird. Das nichtlineare Materialverhalten und die je nach Versagensform stark unterschiedlichen Spannungs-Dehnungszusammenhänge können mit den derzeit angewendeten Berechnungsverfahren nicht berücksichtigt werden. Vielmehr bedarf es der Formulierung von konstitutiven Modellen im Rahmen der orthotropen Elastizitäts- und Plastizitätstheorie. Auf Grundlage der gezeigten Versuchsergebnisse wurde ein solches biaxiales konstitutives Modell für Fichtenholz am IMWS entwickelt. Eine kurze Vorstellung des Modells folgt im nächsten Abschnitt.



(a) Faserwinkel $\varphi = 0^\circ$



(b) Faserwinkel $\varphi = 15^\circ$

Abbildung 2: Verlauf des Spannungsverhältnisses σ_2/σ_1 für zwei ausgewählte Faserwinkel

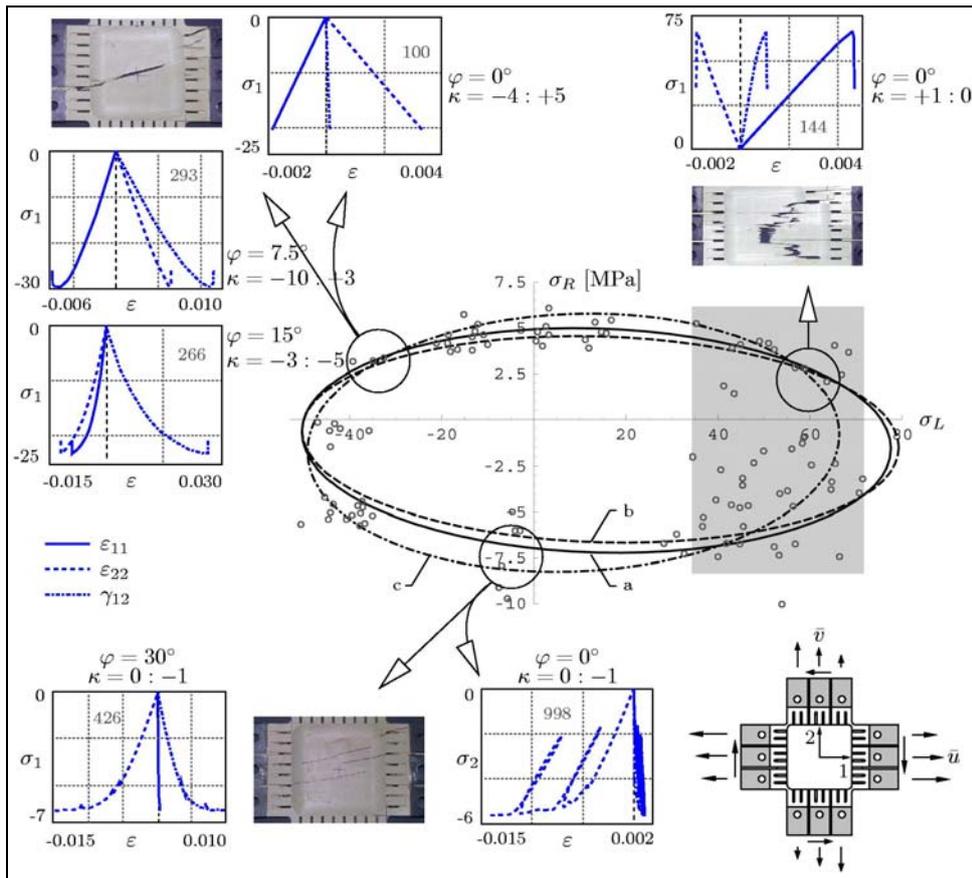


Abbildung 3: Charakteristische Spannungs-Verzerrungskurven und Bruchbilder für biaxiale Beanspruchungssituationen

3 Mehrflächenplastizitätsmodell

Um die Ergebnisse der biaxialen Versuche für Struktursimulationen nutzen zu können, ist eine mathematische Beschreibung des elastischen Werkstoffverhaltens und insbesondere des Bruchverhaltens von Holz notwendig. Dies erfolgt in Form von Versagensflächen, welche im initialen Zustand den Bereich linear elastischen Materialverhaltens im Spannungsraum begrenzen. Wird die Beanspruchung nach Erreichen des elastischen Grenzzustands weiter gesteigert, kann es zu einer Ver- oder Entfestigung des Materials und damit zu einer Veränderung der Versagensfläche im Spannungsraum kommen. Dies wird durch so genannte Evolutionsgesetze mathematisch beschrieben.

Die biaxialen Versuche liefern für das mathematische Modell sowohl eine quantitative Grundlage [Hauptspannungspaare (σ_1, σ_2) beim Versagenseintritt, Punkte in Abbildung 2] als auch eine qualitative Basis (Spannungs-Dehnungskurven, vgl. Abbildung 3). Eine Analyse der Spannungs-Dehnungskurven zeigt, dass je nach Beanspruchungsart unterschiedliche Versagensmechanismen auftreten, wie in Abbildung 3 ersichtlich ist. Diese lassen sich zu vier Grundtypen zusammenfassen [2]:

- (i) sprödes Zugversagen in Faserrichtung mit kaskadenartigem Splitterbruch,
- (ii) sprödes Versagen durch kombinierte Zug- und Schubbeanspruchung quer zur Faser mit glattem, dem Faserverlauf folgenden Bruch,
- (iii) duktiles Druckversagen quer zur Faser mit ausgeprägtem Verdichtungs- und Verfestigungsverhalten, und
- (iv) Druckversagen in Faserrichtung unter Ausbildung von lokalen bandartigen Schädigungszonen.

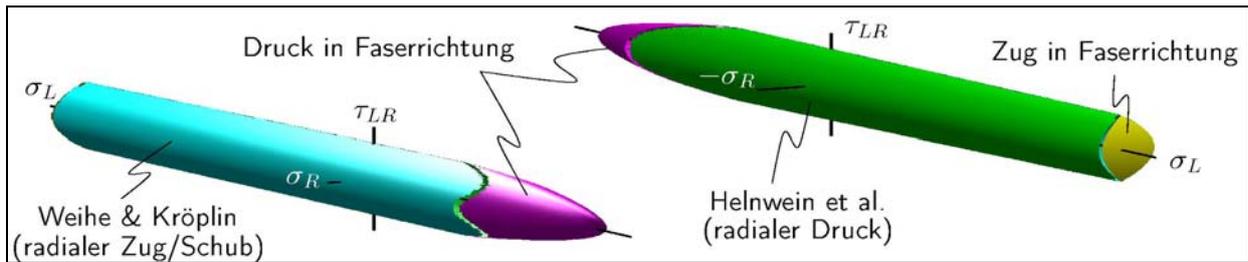
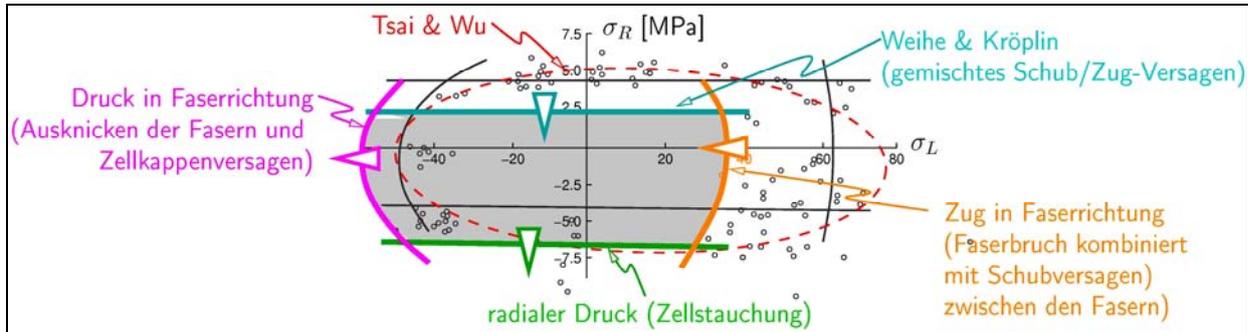
(a) Darstellung im σ_L - σ_R - τ_{LR} -Spannungsraum(b) Projektion in die σ_L - σ_R -Ebene

Abbildung 4: Versagensflächen im Spannungsraum

blick auf Versagenseintritt und Ver- bzw. Entfestigungsverhalten waren die Motivation für die Formulierung jeweils eigener Versagensflächen für die vier Grundversagensfälle, wie in Abbildung 4 dargestellt. Diese Abbildung zeigt die initialen Versagensflächen im durch die Spannungscomponenten σ_L , σ_R , τ_{LR} aufgespannten Spannungsraum sowie deren Projektion in die σ_L - σ_R -Ebene. Auf die mathematische Formulierung der einzelnen Flächen und die verwendeten Versagenskriterien wird in dieser Überblicksdarstellung nicht eingegangen, sie finden sich zum Beispiel in [2,3]. Offensichtlich dominieren die Flächen mit Bezug auf radiale Beanspruchungen (Druck oder Zug/Schub) das Materialverhalten. Zugversagen der Fasern ist nur in einem sehr engen Bereich von Spannungsverhältnissen relevant und tritt bei Faserwinkeln $\varphi > \pm 10^\circ$ praktisch nicht mehr auf. Zusätzlich ist in Abbildung 4(b) durch Pfeile angedeutet, wie sich die Versagensflächen nach Erreichen der elastischen Grenzlast gemäß den Evolutionsgesetzen verändern. Bei Druckbeanspruchung tritt stets eine Verfestigung auf, d.h. die Versagensfläche verschiebt sich im Spannungsraum vom Ursprung weg, womit ein weiterer Spannungszuwachs möglich wird. Bei Zugbeanspruchung kommt es hingegen zur Entfestigung des Materials, d.h. zu einer Verschiebung der Versagensfläche in Richtung des Ursprungs. Eine weitere Steigerung der Deformationen ist dann nur bei Reduktion der Beanspruchung und damit der Spannungen möglich. Für die mathematische Formulierung der Evolutionsgesetze wird wieder auf [2,3] verwiesen.

Dieses Modell ist auf Basis der thermodynamischen Grundgesetze für orthotropes Materialverhalten formuliert. Es enthält sowohl physikalische Parameter, wie einachsige Festigkeiten und Bruchenergien, als auch phänomenologische Parameter. Diese können für fehlerfreies Fichtenholz anhand der Ergebnisse aus den biaxialen Experimenten identifiziert werden.

Zum Vergleich ist in den Abbildungen 3 und 4(b) auch die elliptische Versagensfläche nach Tsai & Wu [4] eingetragen. Dieses Einflächenmodell ist für orthotrope Werkstoffe gut geeignet und wird daher in der Literatur häufig verwendet. Es ergibt eine gute Beschreibung der initialen Versagensfläche, erlaubt jedoch nur bedingt ein je nach Versagensform unterschiedliches Nachbruchverhalten (d.h. Verfestigung bzw. Entfestigung) zu berücksichtigen. Trotz dieser Einschränkung wurde das Einflächenmodell wegen seiner Einfachheit bei den im letzten Teil dieses Beitrags vorgestellten Struktursimulationen verwendet.

Das beschriebene Mehrflächenplastizitätsmodell ist für fehlerfreies Fichtenholz mit Beanspruchung in der LR -Ebene formuliert. Die Beschränkung auf in der LR -Ebene gespannte Holzelemente kann durch Einführung eines so genannten \overline{RT} -Äquivalents, das für eine beliebige Richtung in der transversalen Ebene (RT -Ebene) gilt, aufgehoben werden. Die Abkürzung \overline{RT} bezeichnet damit, wie im Holzbau üblich, die fasernormale Richtung. Diese Zusammenführung des mechanischen Verhaltens in R - bzw. in T -Richtung zu einem \overline{RT} -Äquivalent ist für die überwiegende Mehrzahl von Untersuchungen gerechtfertigt, da die Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften in R - und T -Richtung im Vergleich zur L -Richtung deutlich geringer und damit vernachlässigbar sind [5]. Das Werkstoffgesetz für die $L\overline{RT}$ -Ebene erhält man durch Ersetzen aller auf die R -Richtung bezogenen Größen durch entsprechende \overline{RT} -Werte. Die benötigten Materialparameter ergeben sich als gewichtete Mittelwerte aus den getrennt für die R - und die T -Richtung experimentell bestimmten Materialkennwerten. Die Gewichtung erfolgt gemäß der nach üblichen Schnittmustern in Fichtenholzbrettern auftretenden R - und T -Anteile [5].

Um die praktische Anwendbarkeit des Plastizitätsmodells zu erhöhen, wurde das Modell um die Berücksichtigung von Holzmerkmalen erweitert. Die Einbeziehung der globalen Schrägfasrigkeit von Brettern (Faserneigung) ist durch die Verwendung eines orthotropen Modellgesetzes ohne zusätzliche Maßnahmen möglich. Der Einfluss von Ästen und der damit verbundenen lokalen Faserabweichungen auf das mechanische Verhalten wird über einen dimensionslosen Astfaktor k_{sa} (*knotsumarea ratio*) definiert [5,6]. Dieser Faktor stellt die in Brett längsrichtung ausgewertete Summe der Astbreiten dar. Die stärkere Auswirkung eines Kantenastes wird mittels eines Erhöhungsfaktors für die Breite des angeschnittenen Astes berücksichtigt. Der Astfaktor kann durch Adaptierung der Software der derzeit in der Holzindustrie eingesetzten automatischen Sortieranlagen erfasst werden.

Der Einfluss von Ästen und der lokalen Faserabweichungen um die Äste auf die Steifigkeitseigenschaften, d. h. auf die elastischen Materialkennwerte, erfolgt lediglich entsprechend dem geringen Volumenanteil dieser in lokal sehr beschränkten Bereichen auftretenden Holzmerkmale und wird deshalb vernachlässigt. Die Auswirkung lokaler Störungen in Form von Ästen auf die Festigkeitseigenschaften ist dagegen beträchtlich. Sie wird durch Verändern (Schrumpfen) der initialen Fließfläche für fehlerfreies Fichtenholz über eine Abminderung der ins Modell eingehenden Extremwerte der Fließspannungen in Abhängigkeit vom Astparameter berücksichtigt [6].

4 Mikromechanisches Modell

Wie im vorherigen Abschnitt besprochen, hängt bei Holz die Art des Versagens sehr stark von der Beanspruchungsart ab. Es bestehen große Unterschiede in der Festigkeit bei Zug- und Druckbeanspruchung bzw. bei Belastung längs und quer zur Faser, welche aus dem äußerst inhomogenen Aufbau von Holz resultieren. Im Plastizitätsmodell wurde versucht, den unterschiedlichen Versagensmechanismen durch verschiedene, mikromechanisch motivierte Versagensflächen gerecht zu werden. Dies ermöglicht allerdings nur die Beschreibung der Auswirkungen der inhomogenen Mikrostruktur auf der Makroebene auf phänomenologische Weise und damit die Abschätzung des Materialverhaltens für nicht getestete Beanspruchungszustände. Eine Extrapolation auf das Verhalten von vorab nicht getesteten Holzproben ist jedoch nicht möglich, da die physikalischen Effekte und die Zusammenhänge zwischen der Mikrostruktur und dem mechanischen Verhalten des Materials keinen Eingang finden. Mit dem Plastizitätsmodell kann also die große Variationsbreite mechanischer Kennwerte unterschiedlicher Holzarten und -proben anhand deren unterschiedlicher mikrostruktureller (chemischen und morphologischen) Kennwerte nicht erklärt werden. Dies veranlasste die Anwendung von Homogenisierungsverfahren am IMWS zur Formulierung eines mikromechanischen Modells für das mechanische Verhalten von Holz.

Kern des zuletzt genannten Modells ist die Identifizierung universeller Grundbausteine und morphologischer Strukturen in Holz. Mit Lignin, Hemizellulose, Zellulose und Wasser finden sich auf der Nanometerskala solche von der Holzart unabhängige Grundbausteine mit universellen mechanischen Eigenschaften [7]. Die damit verbundene hierarchische Struktur von Holz ist in Abbildung 5 dargestellt: Lignin, Hemizellulose und Wasser bilden eine amorphe Polymermatrix, in welche die teils kristallinen, teils amorphen Zellulosefasern eingebettet sind. Dieses Zellwandmaterial ist von zylindrischen Poren durchdrungen, welche bei Nadelhölzern alle etwa gleiche Größenordnung aufweisen, bei Laubhölzern jedoch aufgrund des Vorhandenseins von Gefäßen mit wesentlich größeren Lumen eine zweiskalige Porosität erzeugen.

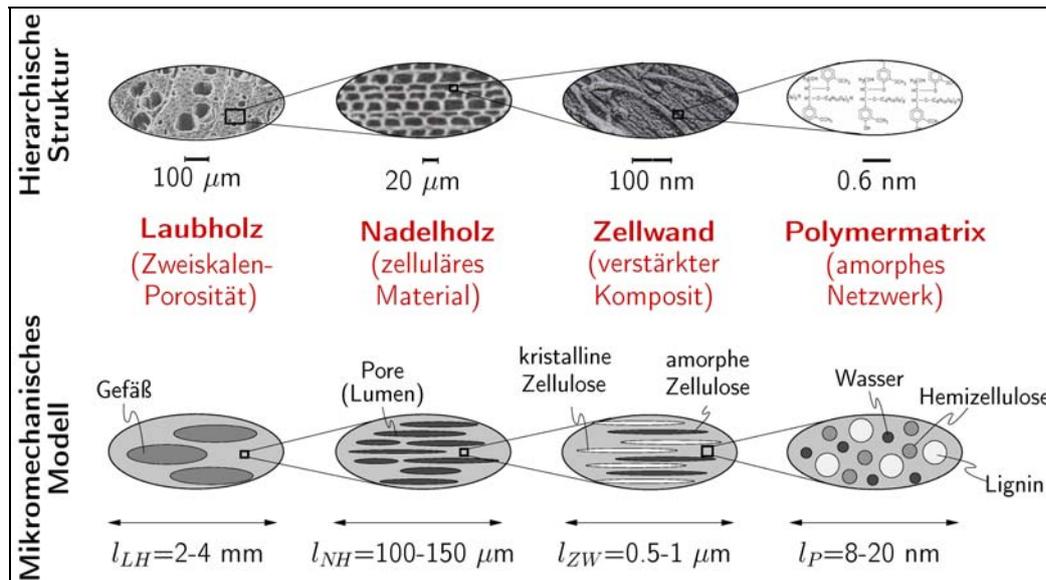


Abbildung 5: Hierarchische Struktur von Holz und deren Abbildung im mikromechanischen Modell

Die Repräsentierung dieser Mehrskalenstruktur im Rahmen der Methode der Kontinuums-mikromechanik ist ebenfalls in Abbildung 5 skizziert. Dieses Homogenisierungsverfahren ermöglicht es, auf semi-analytische Weise einen Zusammenhang zwischen den mechanischen Eigenschaften der Grundbausteine und den entsprechenden makroskopischen Steifigkeits- und Festigkeitskennwerten von Holz herzustellen. In jedem der vier Homogenisierungsschritte, die jeweils Skalenübergänge bilden, wird dabei für das (mikro-)heterogene Material ein äquivalentes homogenes Material mit effektiven mechanischen Materialkennwerten ermittelt, welches bei homogener Beanspruchung gleiches mechanisches Verhalten aufweist. Als Eingangsdaten werden lediglich die holzartenspezifische chemische Zusammensetzung sowie die Rohdichte und der Wassergehalt des betrachteten Holzstückes benötigt. Diese Daten sind leicht ermittelbar und ermöglichen so eine vielseitige Einsetzbarkeit dieses Modells. Derzeit lassen sich mit dem mikromechanischen Modell der Steifigkeitstensor von Holz, d.h. alle neun elastischen Konstanten des orthotropen Werkstoffs Holz, sowie elastische Grenzzustände bei beliebiger Beanspruchung des Materials vorhersagen [7,8]. Die semi-analytischen Gleichungen, welche für die Materialkennwerte erhalten werden, können mit FE-Simulationen von Holzkonstruktionen gekoppelt und dabei am Integrationspunkt für die lokal auftretenden mikrostrukturellen Parameter ausgewertet werden.

Der Nutzen des Modells liegt neben der Ermittlung von Materialkennwerten für Struktursimulationen insbesondere darin, Einblick in die Funktionsweise des Werkstoffs Holz zu gewinnen und die Untersuchung physikalischer Phänomene auf der Längenskala ihres Auftretens zu ermöglichen.

Das Modell wurde durch Vergleich von Simulationsergebnissen mit entsprechenden Messwerten für sehr umfangreiche Sätze von Steifigkeits- und Festigkeitsdaten validiert. Stellvertretend sind in Abbildung 6 Korrelationsplots für den Elastizitätsmodul und den Schubmodul in longitudinaler Richtung dargestellt. Der Mittelwert und die Standardabweichung der normierten Abweichungen zwischen numerischen und experimentellen Ergebnissen betragen $8.2 \pm 25.5\%$ für E_L und $1.3 \pm 27.4\%$ für $G_{LR\bar{T}}$. Die geringen Abweichungen beeindrucken insbesondere im Hinblick auf die Vielzahl der betrachteten Holzarten und Probestücken (118 Proben aus 16 Holzarten bei E_L und 73 Proben aus 14 verschiedenen Holzarten bei $G_{LR\bar{T}}$). Aufgrund der Unabhängigkeit der Eingangsdaten in das Modell und der zum Vergleich herangezogenen makroskopischen Messwerte mechanischer Kenngrößen konnte durch diesen Vergleich die Vorhersagefähigkeit des Modells bestätigt werden. Weitere Vergleiche von numerischen Schätzwerten und experimentellen Daten, insbesondere auch für die vorhin besprochenen biaxialen Versuche, finden sich in [7-9].

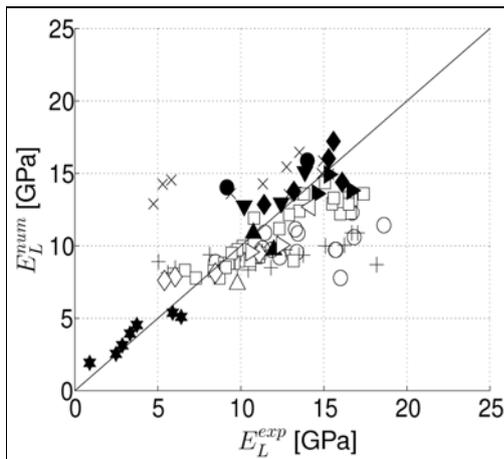
(a) Longitudinaler Elastizitätsmodul E_L (b) Longitudinaler Schubmodul $G_{LR\bar{T}}$

Abbildung 6: Validierung des mikromechanischen Modells durch Vergleich von numerischen und experimentellen Ergebnissen

5 Anwendungsbeispiele

Mit den vorgestellten Plastizitätsmodellen und dem kontinuumsmikromechanischen Modell stehen leistungsfähige Werkzeuge für die numerische Simulation von Holz und Holzwerkstoffen zur Verfügung. Mit ihnen lassen sich eine Vielzahl an holzbaupraktischen Aufgabenstellungen bewältigen. Aufwändige räumliche Schalenkonstruktionen können ebenso analysiert werden wie lokale Schwachstellen von Konstruktionen, sei es ein Durchbruch in einem Träger oder eine Ausklinkung. Weiters erlauben derartige Plastizitätsmodelle genaue Analysen von Verbindungsmitteln und der von ihnen hervorgerufenen lokalen Beanspruchungszustände in den Holzbauteilen. Über das physikalisch basierte mikromechanische Modell ist außerdem die Berücksichtigung von viskosen Effekten oder klimatischen Einflüssen auf das Materialverhalten auf direkte Weise möglich.

Im Folgenden wird der Einsatz der beschriebenen Plastizitätsmodelle in numerischen Simulationen anhand von zwei ausgewählten baupraktischen Aufgabenstellungen – einer komplexen dreidimensionalen Struktur („Tonnenschale“) und einem Knoten mit vorwiegend eindimensionalen Holzelementen („Dreibock“) – näher erläutert.

5.1 Tonnenschale mit Öffnung

Das erste Beispiel zeigt die Ermittlung der Spannungsverteilung in einem Tonnendach mit einer quadratischen Öffnung im Firstbereich. Die numerische Simulation erfolgt mittels der Methode der Finiten Elemente unter Einsatz des Einflächenplastizitätsmodells.

Die Tonnenschale weist eine Länge von 10 m in der Axialrichtung und eine Breite von 8 m auf (vgl. Abbildung 7). Sie ist an beiden geraden Rändern gelenkig gelagert, an den kreisförmigen Rändern ist die Verschiebung in vertikaler Richtung verhindert. Die Schale besteht aus drei Lagen Fichtenholz Brettern mit Dicken von jeweils 16 mm. In den äußeren Schichten sind die Bretter in einem Winkel von $\varphi = +30^\circ$ zur vertikalen xy -Ebene angeordnet, während in der mittleren Lage die Anordnung in einem Winkel von $\varphi = -30^\circ$ erfolgt. Die äußeren Ränder sind durch eine zusätzliche, 30 cm breite Schicht von parallel zu den Rändern verlaufenden Brettern verstärkt.

Im Zentrum der Tonnenschale befindet sich eine Öffnung mit einer Größe von 2.50×1.50 m. Die Ränder der Öffnung sind durch einen Brettschichtholzträger mit den Abmessungen 150×240 mm ausgesteift (siehe Schnitt A-A in Abbildung 7). Dieser besteht aus der Schalenstruktur in der Mitte und 12 Verstärkungsbrettern mit je 16 mm Dicke, jeweils sechs auf der Ober- und der Unterseite der Schale. Es wird angenommen, dass bei allen Brettern die Faserrichtung (L -Richtung) mit der Orientierung φ übereinstimmt. Die Materialparameter sind in [10] angegeben.

Auf die Schale wirkt ein konstantes Eigengewicht von 0.216 kN/m^2 und eine Nutzlast von 225 kN , welche gleichmäßig entlang des Versteifungsbalkens um die Öffnung verteilt ist.

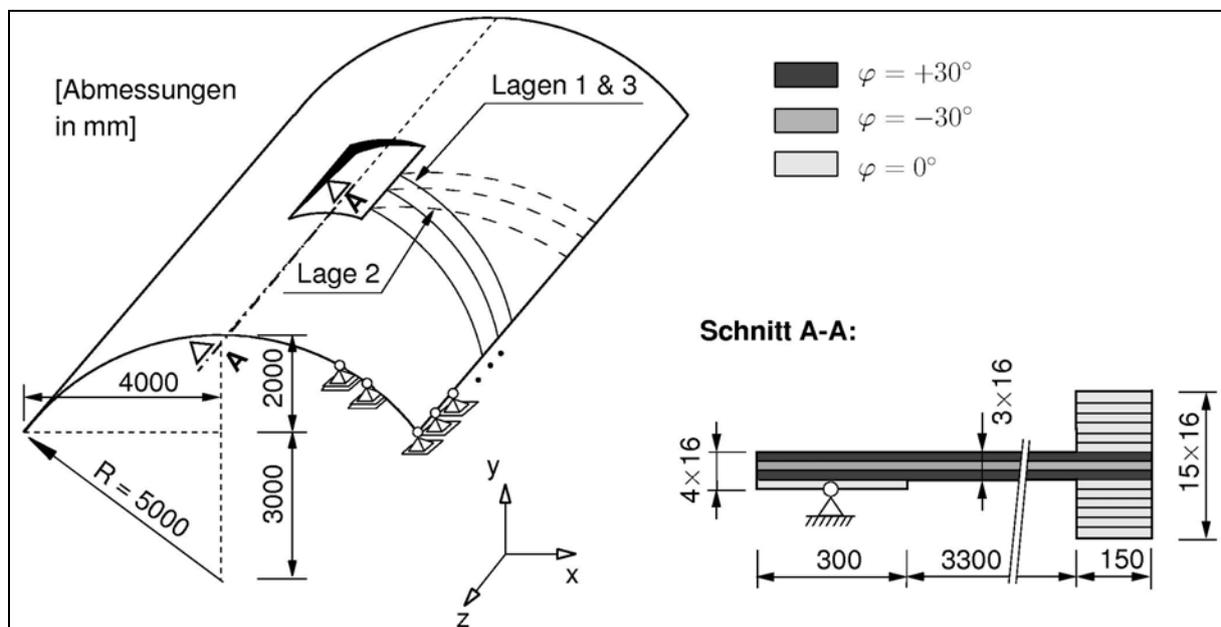
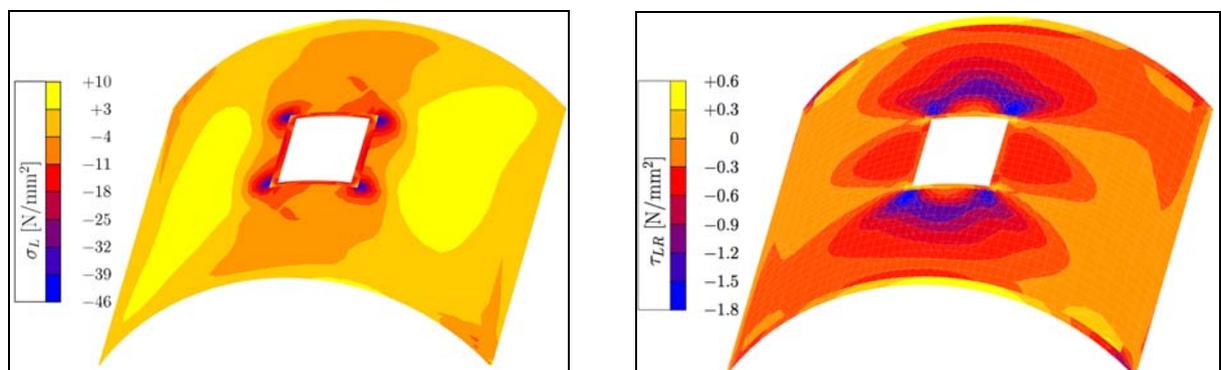


Abbildung 7: Abmessungen und Aufbau der Tonnenschale



(a) Normalspannung in Faserrichtung, σ_L , in der obersten Schicht

(b) Schubspannung τ_{LR} in der Ebene der Mittelschicht

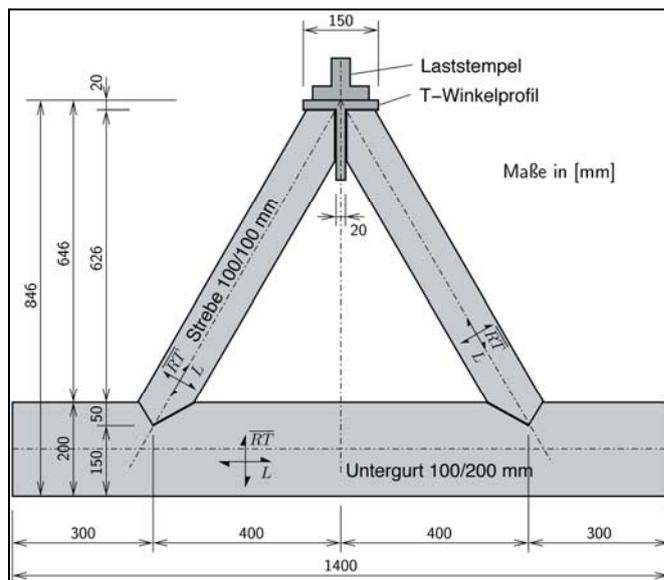
Abbildung 8: Spannungsverteilung in der Schale

Die FE-Simulation wurde mit dem Programm MSC.marc durchgeführt. Das FE-Modell besteht aus 1484 vierseitigen Schalenelementen mit 11 Integrationspunkten über die Dicke. In der Schale treten sowohl Membran- als auch Biegedeformationen auf. Letztere sind in der Nähe der Öffnung dominant und rufen dort signifikante Spannungskonzentrationen hervor (Abbildung 8). Die Extremwerte der Normalspannung in den Fasern, σ_L , [siehe Abbildung 8(a)] treten in der Schale am Übergang zum Versteifungsträgers um die Öffnung im Eckbereich auf und bleiben unter der Druckfestigkeit in L -Richtung. Die maximalen Schubspannungen in der Schalenebene, τ_{LR} , [siehe Abbildung 8(b)] erreichen jedoch beinahe die Größe der Anrissspannungen.

Neben der auftretenden Spannungsverteilung liefert das Plastizitätsmodell auch Information über die aktiven Versagensmechanismen und das Ausmaß inelastischer Deformationen. Diese bleiben im vorliegenden Beispiel auf die unmittelbare Nähe der Öffnung beschränkt und werden vor allem durch Zellstauchung infolge von Druck normal zur Faserrichtung und durch Rissbildung unter Schubbeanspruchung hervorgerufen. Die Ergebnisse der Simulation, insbesondere die Identifizierung kritischer Bereiche in der Schale, bilden eine hervorragende Basis für eine strukturelle Optimierung der Konstruktion mit dem Ziel der Erhöhung von Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit. Mit herkömmlichen, in der Regel eindimensionalen, Materialmodellen für Holz wären solche Betrachtungen unmöglich.

5.2 Dreibock

Das zweite Beispiel – ein Dreibock – soll verdeutlichen, dass keineswegs nur aufwändige Strukturen wie die Tonnenschale die Anwendung dreidimensionaler Materialmodelle erfordern. Vielmehr treten auch bei den Pfostenkonstruktionen des klassischen Holzbaus im Bereich der Verbindungen Versagen verursachende räumliche Beanspruchungen auf, welche die Anwendung von häufig eingesetzten eindimensionalen Betrachtungsweisen für die Analyse und Bemessung solcher Konstruktionsdetails einschränken oder gar ausschließen. Weitere Anforderungen an das Materialmodell ergeben sich im vorliegenden Beispiel aus dem ausgesprochen duktilen Versagensmechanismus der Dreibockkonstruktion. Die Bestimmung der Traglast bedarf einer korrekten Beschreibung der plastischen Deformationen in der vorwiegend auf Querdruck beanspruchten Struktur durch das Materialmodell. Das Einflächenplastizitätsmodell erfüllt die beschriebenen Anforderungen und wird für die im Folgenden beschriebenen numerischen Simulationen verwendet.



(a) Abmessungen der Konstruktion



(b) Versuchsaufbau

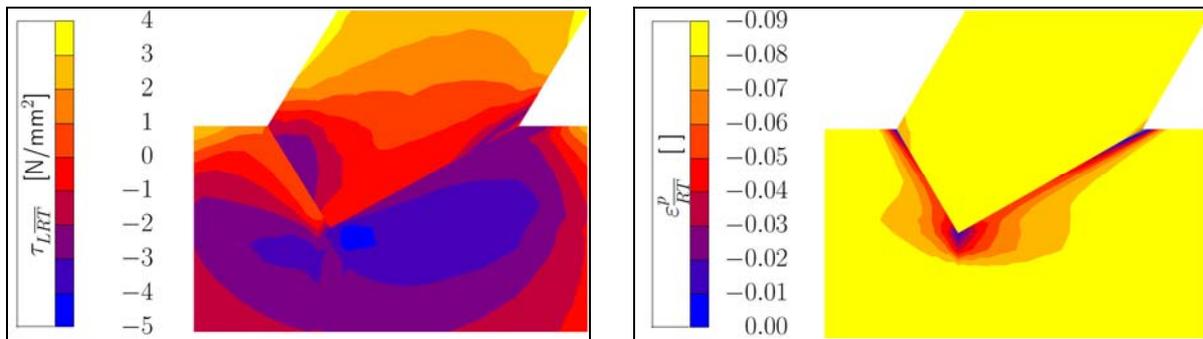
Abbildung 9: Dreibock

Der Dreibock ist aus einem Untergurt der Dimension 100/200 mm und zwei Streben der Dimension 100/100 mm aufgebaut. Die genauen Abmessungen sind Abbildung 9(a) zu entnehmen, die Materialparameter sind in [6] angegeben.

Aufgrund der Symmetrie von Belastung und Struktur wird nur eine Hälfte der Konfiguration im FE-Modell berücksichtigt. Die FE-Simulationen wurden wieder mit MSC.marc durchgeführt. Die Beanspruchung der FE-Struktur erfolgte durch Vorgabe vertikaler Verschiebungen in jenen Knotenpunkten des T-förmigen Stahlwinkels, die mit dem Laststempel in Kontakt sind.

Die FE-Simulation gibt Aufschluss über die Spannungsverteilung im Versatzbereich. Die hohe Querdruckbeanspruchung des Untergurts [Abbildung 10(a)] führt zur Ausbildung ausgeprägter Zonen mit plastischen Deformationen [Abbildung 10(b)]. Bis zum Erreichen der Traglast infolge Druckversagen in \overline{RT} -Richtung können deutliche plastische Tragreserven aktiviert werden. Das duktile Verhalten der Konstruktion zeigt sich auch am ausgeprägt nicht-linearen Verlauf des Last-Verschiebungsdiagramms (Abbildung 11), in welchem die Summe der vertikalen Reaktionskräfte in den korrespondierenden Knoten der Lasteinleitung in Abhängigkeit von der Absenkung aufgetragen sind.

Die Validierung des FE-Modells erfolgte durch Versuche im Bautechnikzentrum der TU Graz [siehe Abbildung 9(b) für den Versuchsaufbau]. Die Belastung wurde verschiebungsgesteuert mit einer Deformationsgeschwindigkeit von 0.7 mm/min vorgenommen.



(a) Transversale Normalspannung $\sigma_{\overline{RT}}$

(b) Plastische Verzerrung $\epsilon_{\overline{RT}}^p$

Abbildung 10: Versatzbereich im Traglastzustand

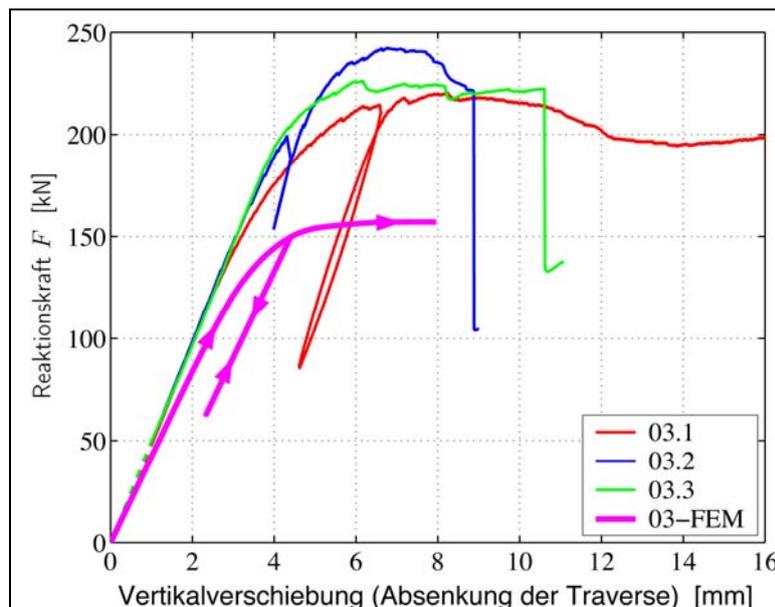


Abbildung 11: Last-Verschiebungsdiagramm – numerische und experimentelle Ergebnisse

Der Verlauf der resultierenden Kräfte der Prüfmaschine in Abhängigkeit von der Absenkung der Traverse ist in Abbildung 11 im Vergleich mit dem Last-Verschiebungsdiagramm aus der numerischen Simulation dargestellt. Qualitativ stimmt der deutlich nichtlineare Verlauf der Last-Verschiebungs-Kurve der FE-Berechnung bis zum Erreichen der Traglast gut mit den Versuchsergebnissen überein.

Die Größe der Traglast der FE-Simulation liegt jedoch deutlich unter den in den Versuchen erreichten Traglasten. Zusätzlich zu den üblichen Streuungen der Materialkennwerte im Holzbau ist die Beschränkung auf kleine Verzerrungen im Simulationsmodell ein möglicher Grund für die zu gering berechnete Traglast. Für den dominierenden Versagensmechanismus "Druckbeanspruchung in *RT*-Richtung" kommt es bei großen Verzerrungen zu einer Verfestigung, welche im Werkstoffmodell nicht berücksichtigt ist. Dies kann auf Strukturebene zu höheren Traglasten führen. Weiters wurde die Bestimmung der initialen Fließspannung für Druckbeanspruchung in *RT*-Richtung anhand einer geringen Anzahl von Experimenten durchgeführt. Zur Absicherung dieses Materialparameters sind für diesen Beanspruchungsfall weitere Werkstoffversuche erforderlich.

In beiden Anwendungsbeispielen könnten mit den herkömmlichen, in der Regel eindimensionalen Materialbetrachtungen für Holz keine oder nur unrealistische Ergebnisse erhalten werden. Erst der Einsatz leistungsfähiger Materialmodelle, die das orthotrope Verhalten von Holz in einer dreidimensionalen Formulierung berücksichtigen und auch eine Beschreibung des inelastischen Verhaltens bieten, ermöglicht Einblicke in das Material- und Strukturverhalten. Die Ergebnisse eröffnen neue Wege in der Bauteilbemessung und -optimierung.

In der Weiterentwicklung der mikromechanischen Modelle steckt enormes Potential. Sie stellen eine ideale Ergänzung zu den bereits ausgereiften Plastizitätsmodellen dar, indem sie die Ermittlung von Eingabedaten für diese Modelle in Abhängigkeit von mikrostrukturellen Kenngrößen ermöglichen. Ganz wesentlich ist die durchgängige Begleitung der Entwicklung numerischer Modelle mit Experimenten. Sie geben Einblick in das Materialverhalten, erlauben die Identifikation von Materialparametern, sowie letztendlich die Validierung bestehender Modelle.

6 Literaturverzeichnis

- [1] J. Eberhardsteiner. *Mechanisches Verhalten von Fichtenholz – Experimentelle Bestimmung der biaxialen Festigkeitseigenschaften*. Springer Verlag, Wien New York, 2002.
- [2] P. Mackenzie-Helnwein, J. Eberhardsteiner, H.A. Mang. A multi-surface plasticity model for clear wood and its application to the finite element analysis. *Computational Mechanics* 31: 204-218, 2003.
- [3] P. Mackenzie-Helnwein, J. Eberhardsteiner, H.A. Mang. Multi-surface plasticity of clear spruce wood. In: E. Oñate, D.R.J. Owen, Proceedings of the VII International Conference on Computational Plasticity, COMPLAS 2003, CIMNE, Barcelona, 2003.
- [4] S.W. Tsai, E.M. Wu. A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of Composite Materials* 5: 58-80, 1971.
- [5] M. Fleischmann. *Numerische Berechnung von Holzkonstruktionen unter Verwendung eines realitätsnahen orthotropen elasto-plastischen Werkstoffmodells*. Dissertation, TU Wien, 2005.
- [6] M. Fleischmann, H. Krenn, J. Eberhardsteiner, G. Schickhofer. Numerische Berechnung von Holzkonstruktionen unter Verwendung eines orthotropen elasto-plastischen Werkstoffmodells. *Holz als Roh- und Werkstoff*, zur Publikation eingereicht.
- [7] K. Hofstetter, Ch. Hellmich, J. Eberhardsteiner. Development and experimental validation of a continuum micromechanics model for the elasticity of wood. *European Journal of Mechanics A-Solids* 24: 1030-1053, 2005.
- [8] K. Hofstetter, Ch. Hellmich, J. Eberhardsteiner. Wood strength properties predicted from microstructure and composition: a continuum micromechanics approach. *European Journal of Mechanics A-Solids*, zur Publikation eingereicht.
- [9] K. Hofstetter, Ch. Hellmich, J. Eberhardsteiner. Estimation of anisotropic macroscopic wood strength from local failure of lignin and microstructural characteristics. In: *Pre-Proceedings of the International Conference on 'Integrated Approach to Wood Structure, Behaviour and Applications'*, Florenz, S. 103-108, 2006.
- [10] P. Mackenzie-Helnwein, H.W. Müllner, J. Eberhardsteiner, H.A. Mang. Analysis of layered wooden shells using an orthotropic elasto-plastic model for multiaxial loading of clear spruce wood. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 194: 2661-2685, 2004.