



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Institut für Baustoffe (ETHZ)
Institut Werkstoffe und Holztechnologie (FH Biel)

ETH Zürich
Dr. Ing. Dipl. Wirt. Ing. Falk Wittel
Rechnergestützte Physik der Werkstoffe
HIF E28.1
Stefano-Francini Platz 3
8093 Zürich

Telefon +41 44 633 2871
fwittell@ethz.ch
www.comphys.ethz.ch

Berner Fachhochschule
Prof. i.R. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Peter Niemz
Solothurnstrasse 102
Postfach 6096
CH-2500 Biel 6

Telefon +41 32 3440264
Peter.niemz@bfh.ch

Bericht

Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung Projekt 2015-04

Feuchteinduzierte Spannungen und Delaminierungen in Brettschichtholz

Untersuchungen zur experimentellen und rechnerischen Erfassung von feuchteinduzierten Spannungen und Delaminierungen in Brettschichtholz aus Laubholz, insbesondere Esche

Datum	6. Juli 2017	
Version	2.0	
Autor(en)	Falk K. Wittel,	Peter Niemz

Zusatzinformationen

Versionsverwaltung

Version	Bemerkung	Datum	Verantwortlich	Status
0.0	Erster Entwurf	22.03.2016	FKW	abgeschlossen
1.0	Zwischenbericht	30.05.2016	FKW, PN	eingereicht
2.0	Endbericht	15.07.2017	FKW, PN	in Korrektur

Tabelle: Versionskontrolle

Zusammenfassung

Ein im Rahmen von NFP 66 an der ETH entwickeltes FE-Programm zur Simulation der Delamination von Buchenholz wird für die Optimierung des Aufbaus von Brettschichtholz aus Nadel- und Laubholz genutzt. Das Programm ermöglicht es, hygro-mechanische Simulationen mit elastischen, viskoelastischen, plastischen und mechano-sorptiven Komponenten durchzuführen. Es werden Simulationsrechnungen sowie ausgewählte Experimente zur Validierung der Berechnungen durchgeführt. Die wissenschaftlichen Ziele bestehen in der Demonstration der Machbarkeit von Optimierungen mit realistischen Mehrfeld-Materialmodellen für Holz, die auf Dauerhaftigkeit von BSH zur Verminderung von Rissbildung abzielt.

Im Fokus stehen zum einen Spannungsmoderation über behinderten Feuchteübergang durch Beschichtungen, zum anderen Spannungsreduktion durch die Aufbauten selbst. Experimentell wird Feuchtetransport durch unterschiedliche Beschichtungssysteme an Schalenversuchen und Fichte-BSH durchgeführt, um notwendige Transportparameter für die vergleichenden Feuchteprofile in Simulation und Experiment zu bestimmen. Mit diesen wird gezeigt, wie sich Beschichtungen abhängig vom Klimaprofil auf das Delaminationsrisiko auswirken. Der Einfluss 10 unterschiedlicher Aufbauten aus Fichte, Esche und in Kombination wird an Trägersegmenten der Abmasse 36x36x70cm untersucht, deren Schädigungsentwicklung in 4 unterschiedlichen Klimata ausgewertet wird. Begleitende Simulationen erklären die Schädigungsbildung anhand der auftretenden Feuchteprofile und induzierten Eigenspannungen. Die besonders schwierigen hybriden Fichte-Esche Träger werden daraufhin mit Optimierungsverfahren, basierend auf Ersatzmodellen exemplarisch optimiert und es wird gezeigt, dass bei identischer Biegesteifigkeit nur durch den Aufbau Delaminations-relevante Spannungen deutlich reduziert werden können. Vor diesem Hintergrund erfolgt eine Interpretation der im House of Natural Resources der ETH aufgetretenen massiven Rissbildung. Die Bearbeitung erfolgt in Kooperation BFH Biel; ETH Zürich und der Fa. neue Holzbau in Lungern, mit der bereits seit einigen Jahren an der Thematik der Laubholzverklebung gearbeitet wird.

Inhaltsverzeichnis

Zusatzinformationen.....	ii
Versionsverwaltung.....	ii
Zusammenfassung	iii
Inhaltsverzeichnis	iv
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	vi
Tabellen	vi
Abbildungen	vii
1. Einleitung.....	13
1.1. Problembeschreibung	13
1.2. Ziele der geplanten Forschung.....	14
2. Material und Methoden	16
2.1. Experimenteller Ansatz: Untersuchung von Oberflächenbeschichtungen	16
2.1.1. Probenherstellung	16
2.1.2. Versuchsplan für BSH-Proben	17
2.1.3. Versuchsplan für Wasserdampfdurchlässigkeitsmessungen	17
2.2. Experimenteller Ansatz: Delamination in grossen Aufbauten	18
2.2.1. Probenherstellung	19
2.2.2. Versuchsplan für Delaminationsproben	20
2.3. Rechnerischer Ansatz: Ersatzmodell-gestützte Optimierung des Langzeitverhaltens ..	22
2.3.1. Konstitutive hygro-mechanische Modellierung für Holz	22
2.3.2. Hygro-mechanisches Verhalten der Adhäsive	34
2.3.3. Schädigungsentwicklung in Schichtholz.....	36
2.3.4. Materialmodell: Aufbau und Implementierung.....	36
2.3.5. Ersatzmodell-gestützte Optimierung	42
3. Resultate	49
3.1. Experimentelle Ergebnisse.....	49
3.1.1. Holzphysikalische Begleitversuche	49
3.1.2. Feuchtetransport durch Beschichtungssysteme in Schalenversuchen	50
3.1.3. Feuchteentwicklung in BSH	54
3.1.4. Querschnittsverformungen	58
3.1.5. Schädigungsentwicklung in BSH.....	59
3.2. Numerische Ergebnisse	63
3.2.1. Überprüfung des Holzmodells	63
3.2.2. Überprüfung des Modells für Klebstoffe	72
3.2.3. Bestimmung effektiver Filmkoeffizienten für beschichtete Proben.....	83
3.2.4. Berechnung des Einflusses der Beschichtung auf BSH.....	85
3.2.5. Einfluss der Holzart und des Aufbaus	97
3.2.6. Optimierung hybrider BSH-Träger.....	108

4. Diskussion.....	113
4.1. Materialmodellierung, Optimierung und Verifikation.....	113
4.2. Reduktion des Delaminationsrisikos durch Beschichtungssysteme.....	113
4.3. Dauerhafte BSH Aufbauten.....	114
5. Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Schädigungsbeobachtungen am House of Natural Resources Stand 7/2017	116
5.1. Visuelle Beurteilung des Zustands des BSH im HNR 7/2017	118
6. Schlussfolgerungen und Ausblick.....	123
7. Literaturverzeichnis	124
8. Anhänge.....	128
8.1. Materialparameter des rheologischen Modells.....	128
8.1.1. Holz	128
8.1.2. Klebstoffe	128
8.2. Trockenkammer	129
8.3. Werte aus der Überprüfung des Materialmodells.....	130
8.3.1. Buche	130
8.3.2. Esche	131
8.4. Daten zu den Optimierungen	132
8.4.1. Holzfeuchtemodellierung.....	132
8.4.2. Bilayer	133
8.4.3. Hybrides Brettschichtholz.....	134
8.4.4. Beschichtetes Brettschichtholz.....	135
8.5. Grosse Delaminationsproben.....	137
8.5.1. Messwerte der tiefenabhängigen Feuchte	137
8.5.2. Querschnitte und Delaminationen	141
8.5.3. Spannungsprofile der Delaminationsproben	146
8.5.4. Optimierungsergebnisse mit alternativer Zielfunktion	2

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Tabellen

Tabelle 1: Probenkatalog. S=Fladerschnitt; R=Riftschnitt; H=Halbrift, ** Genutete Bretter nach Abbildung 4.	18
Tabelle 2: Parameter zur Berechnung des Quellens und Schwindens nach Gleichung (1.2) für Fichte, Buche und Esche.	23
Tabelle 3: Mittelwerte der Rohdichte von Fichte, Buche und Esche nach den Literaturquellen von [Hassani 2015].	25
Tabelle 4: Koeffizienten zur Bestimmung der feuchteabhängigen Verfestigungsvariable für Buche nach [Hering 2012] und [Gatteln 2013].	27
Tabelle 5: Parameter zur Bestimmung der Festigkeiten von Fichte und Buche nach [Hassani 2015] erweitert um Werte für Esche.	30
Tabelle 6: Parameter zur Beschreibung des viskoelastischen Materialverhaltens für Fichte nach Gleichung (1.23) [Fortino u.a. 2009] und für Buche nach [Hering u. Niemz 2012].	32
Tabelle 7: Longitudinale und tangential Komponenten der mechano-sorptiven Nachgiebigkeitsmatrix (Gleichung (1.29)) für Fichte, Buche und Esche nach [Hassani 2015] gemäss [Fortino u.a. 2009].	34
Tabelle 8: Überblick und Einteilung gebräuchlicher Klebstoffe in der Holzindustrie ohne Anspruch auf Vollständigkeit, sowie maximale Feuchtegehalte nach [Wimmer u.a. 2013] und Ausdehnungskoeffizienten aus [Hassani 2015] von PUR, MUF und PRF.	34
Tabelle 9: Ergebnisse der Schalenversuche für Fichte und Beschichtung.	53
Tabelle 10: Ergebnisse der Schalenversuche nur die Beschichtung betreffend.	53
Tabelle 11: Elastizitätsmoduln und Festigkeiten der verschiedenen Klebstoffe ermittelt aus den Simulationen verglichen mit experimentellen Werten.	73
Tabelle 12: Zusammenfassung der Parameter x_i die bei der Optimierung des Bilayers verändert werden können.	75
Tabelle 13: Zusammenfassung der Parameter x_i , die bei der Optimierung des hybriden BSH verändert werden.	79
Tabelle 14: Parameter der Fits an Gl. (2.10) für die vier Schalenversuchstypen (dt, db, wb, wt).	84
Tabelle 15: Ermittelte Filmkoeffizienten für S1-S5 bei den verschiedenen Versuchen.	85
Tabelle 16: Vergleich der FE-Rechnung mit entsprechenden Messwerten.	88
Tabelle 17: Gemessene und berechnete Holzfeuchten zum Zeitpunkt $t=7248h$ der Versuchsreihen 1 und 3.	106
Tabelle 18: Veränderliche Parameter x_i für die Optimierung des hybriden BSH.	108
Tabelle 19: Zusammenfassung der Gewichtungsfaktoren a, b und c der Optimierungsläufe.	110
Tabelle 20: Zusammenfassung der optimierten Zielgrössen der verschiedenen Gewichtungen.	110
Tabelle 21: Herstellungsbedingungen und Arten.	116
Tabelle 22: Parameter zur Bestimmung der Diffusionskoeffizienten $D_i(\omega)$ für Fichte und Buche nach Gleichung (1.5).	128

Tabelle 23: Parameter zur Bestimmung von Elastizitätsmoduln, Schubmoduln und Querdehnzahlen für Fichte nach [Neuhaus 1981], Buche nach [Hering 2011] und Esche gemittelt in [Niemz u.a. 2014].	128
Tabelle 24: Parameter zur Bestimmung der feuchteabhängigen Diffusionskoeffizienten von PUR, MUF und PRF aus [Hassani 2015] nach [Wimmer u.a. 2013].	128
Tabelle 25: Parameter zur Bestimmung der feuchteabhängigen Elastizitätsmoduls von PUR, MUF und PRF aus [Hassani 2015] nach [Kläusler 2014].	128
Tabelle 26: Parameter zur Bestimmung der feuchteabhängigen Festigkeit und der Verfestigungsvariable nach Gleichung (1.31) von PUR aus [Hassani 2015] nach [Kläusler 2014].	128
Tabelle 27: Parameter zur Bestimmung der Einträge J_i der viskoelastischen Nachgiebigkeitsmatrix für die einzelnen <i>Kelvin</i> -Körper aus [Hassani 2015] nach [Touati u. Cederbaum 1997] für PUR und [Touati u. Cederbaum 1998] für MUF.	129
Tabelle 28: Gegenüberstellung von Simulationsergebnissen und experimentellen Werten: Elastizitätsmoduli von Buchenholz in verschiedenen Richtungen bei variierenden Holzfeuchten.	130
Tabelle 29: Gegenüberstellung von Simulationsergebnissen und experimentellen Werten: Querdehnzahlen von Buchenholz in verschiedenen Richtungen bei variierenden Holzfeuchte.	131
Tabelle 30: Gegenüberstellung von Simulationsergebnissen und experimentellen Werten: Elastizitätsmoduln von Eschenholz in verschiedenen Richtungen bei variierenden Holzfeuchte.	131
Tabelle 31: Gegenüberstellung von Simulationsergebnissen und experimentellen Werten: Querdehnzahlen von Eschenholz in verschiedenen Richtungen bei variierenden Holzfeuchte.	132
Tabelle 32: Feuchtegehalt ω in % (näherungsweise) in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit für die realitätsnahe Modellierung der Optimierungsprobleme in den Abschnitten 3.2.2.1 und 3.2.2.2}}.	132
Tabelle 33: Zusammenstellung aller Ergebnisse und Einstellungen von den verschiedenen Optimierungen des Bilayers aus Buche und Fichte.	133
Tabelle 34: Zusammenstellung ausgewählter Ergebnisse für die Optimierungsläufe von hybriden BSH-Elementen.	134
Tabelle 35: Stammkoordinaten der Lamellen der BSH-Proben, wobei die Lamellen von unten nach oben mit 0 - 4 nummeriert sind.	135
Tabelle 36: Liste mit den durchgeführten Simulationen	135
Tabelle 37: Extremale Spannungen in x- (S11) und y-Richtung (S22) nach einem Jahr unter konstantem Klima (Satz 1: 90 % R.H., Satz 2: 25 % R.H.) in [MPa]), die kleinsten Spannungen wurden jeweils fett geschrieben.	135
Tabelle 38: Extremwerte, Phasenwinkel und -differenz zu den Amplituden in den Tiefen 10, 20, 40, 60 mm der Proben S0-S5 unter veränderlichem Klima.	136
Tabelle 39: Gesamtmasse in g der Proben.	137
Tabelle 40: Tiefenabhängige Feuchte in allen Delaminationsproben.	138
Tabelle 41: Maximale und minimale Spannungen der Proben der Versuchsreihe 1 und 3.	1
Tabelle 42: Zusammenfassung der Gewichtungsfaktoren und Ergebnisse der Optimierungen mit der maximalen Spannung als Zielgrösse.	2

Abbildungen

Abbildung 1: Ablaufdiagramm zur Untersuchung der Oberflächenbeschichtungssysteme.	16
Abbildung 2: Ablaufdiagramm zur Untersuchung der Oberflächenbeschichtungssysteme mittels Dry/Wet-Cup.	18
Abbildung 3: (a) Feuchtesensor mit 20mm Messtiefe und (b) Einbausituation.	18
Abbildung 4: Konfigurationen der 5mm breiten Nuten in hybriden Proben. Die Aussenlamellen werden dabei nur an der Innenseite genutzt.	19
Abbildung 5: Ablaufdiagramm zur Untersuchung der Delamination.	20
Abbildung 6: Prinzipskizze der bestückten Trockenkammer.	21
Abbildung 7: Proben auf den Bewitterungsprüfständen.	21
Abbildung 8: Ablaufdiagramm zur numerischen Untersuchung.	22
Abbildung 9: (links) Sorptionsisothermen von Buchen- und Fichtenholz aus [Hassani 2015] nach [Hansen 1986] und (rechts) von PRF, MUF, PUR, sowie weiteren Klebstoffen aus [Wimmer u. a. 2013].	23
Abbildung 10: Spannungs-Dehnungs-Diagramme für Druck radial (l) und Druck longitudinal (r) aus [Schmidt u. Kaliske 2006].	26
Abbildung 11: 3D-Veranschaulichung der Fließflächen von Fichte und Buche in den Hauptachsen bei $q_i=0$ und $\omega=12\%$ aus [Hassani 2015].	29
Abbildung 12: Prinzipieller zeitlicher Verlauf der Kriechverformungen.	31
Abbildung 13: Veranschaulichung des Mechano-sorptiven Effektes mit Längenänderungen aus Zugbeanspruchung ΔL_{Me} , Quellen ΔL_{ω} und kombinierter Belastung ΔL_{MS} modifiziert aus [Hassani 2015].	33
Abbildung 14: Schematische Darstellung des konstitutiven Materialmodells aus [Hassani u.a. 2014].	37
Abbildung 15: Schematische Darstellung des Konzeptes mit elastischer Vorhersage (<i>engl.: predictor</i>) und plastischer Korrektur (<i>engl.: corrector</i>) im Zusammenhang mit dem Iterationsprozess zum Finden des nächstgelegenen Punktes aus [Hassani u.a. 2014] nach [Simo u. Hughes 2002].	39
Abbildung 16: Darstellung des implementierten Struktur wobei die MATSuMoTo in Matlab zur Optimierung genutzt wird (hellgrau) und für die Simulation Abaqus (dunkelgrau); Schnittstellen und Ergebnisse werden in Dateien (weiss) abgelegt.	47
Abbildung 17: Verteilung der Rohdichten (65%RH/20°C) der Eschen- und Fichtenlamellen.	49
Abbildung 18: Verteilung der Anfangsfeuchten der Lamellen vor der Verklebung.	50
Abbildung 19: Beschichtungssysteme auf Probekörpern mit Referenzprobe (unten rechts).	51
Abbildung 20: Schalenproben mit Aluminium Referenzprobe.	51
Abbildung 21: Dünnschnitte zur Bestimmung der Beschichtungsdicke.	52
Abbildung 22: Relative Luftfeuchte in der Klimakammer mit 95%RH (oben) Aussenlager (mittig) und 10% RH (unten) Sollwert.	55
Abbildung 23: Feuchtentwicklung (oben) in 10 mm Tiefe der BSH-Proben S0-S5 im 95 % und 10 % Klima, sowie (unten) in unterschiedlichen Tiefen für Probensatz S0 und S5.	56
Abbildung 24: Massenentwicklung der Proben mit 40mm Lamellen.	57
Abbildung 25: Entwicklung der Holzfeuchte in den homogenen Esche und Fichteproben der Serien 1 und 3.	58
Abbildung 26: Entwicklung der Holzfeuchte in den hybriden Proben der Serien 1 und 3.	59

Abbildung 27: Delamination der Aufdopplung der Hybriden Proben HYEF1 und 2 im überdachten Aussenlager (Serie 2).	60
Abbildung 28: Beobachtete Schäden der Segmente im gewitterten Aussenlager.....	60
Abbildung 29: Abwicklungen der Proben HF/HE/HYEF2-40 mit eingezeichneten Schäden.	61
Abbildung 30: Quantifizierung der Trocknungsschäden in den BSH Aufbauten.....	62
Abbildung 31: Visualisierung des FE-Modells für Holzprüfkörper für Druck- und Zugversuche, wobei der grüne Teil das simulierte Teilsystem markiert unter Ausnutzung der angegebenen Symmetrieebenen. Mit MB ist der Messbereich deklariert.....	64
Abbildung 32: Elastizitätsmodul in verschiedenen Richtungen von Buchenholz aus [Hering 2011] und [Osžhyar 2013] verglichen mit den Simulationen und der Implementierung in der Subroutine. ..	65
Abbildung 33: Querdehnnzahlen von Buchenholz aus [Hering 2011] und [Osžhyar 2013] verglichen mit den Simulationen und der Implementierung in der Subroutine.	66
Abbildung 34: Elastizitätsmodul in verschiedenen Richtungen von Eschenholz aus [Niemz u.a. 2014] verglichen mit den Simulationen und der Implementierung in der Subroutine.....	67
Abbildung 35: Querdehnnzahlen von Eschenholz aus [Niemz u.a. 2014] verglichen mit den Simulationen und der Implementierung in der Subroutine.	67
Abbildung 36: Plastisches Verhalten der Buche (l) radial und (r) tangential im Vergleich von Simulation (blau), Ergebnissen von [Hering u.a. 2012] (rot) und Matlab-Code (grün)}.....	68
Abbildung 37: Festigkeiten von Buchenholz aus [Hering 2011] und [Osžhyar 2013] verglichen mit der Implementierung in der Subroutine.....	69
Abbildung 38: Plastisches Verhalten der Esche (a) radial und (b) tangential im Vergleich von Simulation (blau) mit den Ergebnissen von [Niemz u.a. 2014] für den elastischen Bereich (rot) ..	70
Abbildung 39: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Kriechverformungen an Holzprüfkörpern mit den Abmessungen 250*20*5mm (L*R*T) aus [Hering 2011].	71
Abbildung 40: Entwicklung der Nachgiebigkeit in longitudinaler Richtung aus [Hering 2011] verglichen mit der Simulation.	71
Abbildung 41: Visualisierung des FE-Modells für Klebstoffprüfkörper (Typ IV nach [ASTM D 638]) für Druck- und Zugversuche, wobei der grüne Teil das simulierte Teilsystem markiert unter Ausnutzung der angegebenen Symmetrieebenen. Mit MB ist der Messbereich deklariert.....	72
Abbildung 42: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für PUR bei verschiedenen Feuchten.....	73
Abbildung 43: Simuliertes Kriechverhalten von (oben) PUR bei $\sigma = 25\text{MPa}$ und (unten) PUR und MUF unter Normalklima für verschiedene Spannungszustände.....	74
Abbildung 44: Visualisierung des FE-Modells für den Bilayer mit einer passiven Lage (grün) von 1.0mm und einer aktiven Lage (Cyan) mit 4.0mm Höhe.....	75
Abbildung 45: Optimierungsergebnisse des Bilayers als verlauf und aktuelles Optimum verglichen mit der analytischen Betrachtung.....	76
Abbildung 46: Vergleich der drei Methoden zur Bestimmung neuer Punkte anhand der Verläufe der gefundenen Optima für den Buche-Fichte-Bilayer.....	76
Abbildung 47: Vergleich der drei Methoden zur Bestimmung der Startpunkte anhand der Verläufe der gefundenen Optima für den Buche-Fichte-Bilayer.....	77
Abbildung 48: Vergleich verschiedener Ersatzmodelle anhand der Verläufe der gefundenen Optima für den Buche-Fichte-Bilayer.....	77
Abbildung 49: Veranschaulichung des FE-Modells (l) für einen hybriden BSH-Querschnitt (180mm x 180mm) mit je einer Aussenlage aus Buchenholz (Cyan) und Mittellamellen aus Fichte (grün), verklebt mit PRF (rot), sowie skizzierte Materialorientierungen (r).	79

Abbildung 50: Verlauf der Optimierung eines hybriden BSH-Elements aus Buche und Fichte, wobei Plastizität, Viskoelastizität und mechano-sorptiver Effekt vernachlässigt wurden.	80
Abbildung 51: Zusammenstellung der Verläufe der Optima bei der Optimierung von hybridem BSH-Elementen mit verschiedenen Einstellungen.	81
Abbildung 52: (a) Setup 1 ohne P., V. und M.; (b) Setup 1 mit P., V. und M. und (c) Setup 2 ohne P., V. und M.: Zugspannungen in globaler y-Richtung innerhalb der Klebstoffuge für die unterschiedlichen Optimierungsläufe.	82
Abbildung 53: Visualisierung des FE-Modells für Holzprüfkörper für den Schalenversuch zur Berechnung des Feuchteflusses.	83
Abbildung 54: Darstellung der 4 verschiedenen Feuchteflussskurven.	85
Abbildung 55: BSH-Modell aus Abaqus mit dargestellten Randbedingungen und der Kontaktfläche (grün) des Körpers mit dem Umgebungsklima wo der Filmkoeffizient wirkt.	86
Abbildung 56: (oben) Berechnete Feuchteentwicklung in 10mm Tiefe für alle Proben im Feucht- und Trockenklima, sowie (unten) Gegenüberstellung der Feuchteentwicklung der Proben S0 und S5 in unterschiedlichen Tiefen.	87
Abbildung 57: Feuchteverteilung bei S5 mit einer Umgebungsfeuchte von 20%EMC nach 975h.	89
Abbildung 58: Gerechnete Feuchteentwicklung in allen BSH Proben im Vergleich zu Messwerten.	90
Abbildung 59: Gespeicherte elastische Energie aufgrund der Eigenspannungen in den Proben S0-S5 für konstant trockenes (unten) und feuchtes Klima (oben).	91
Abbildung 60: Vergleich der Feuchteentwicklung mit der Formänderungsenergiegedichte für die Referenzprobe S0 (links) mit Probe S4 (rechte) bei Befeuchtung und Trocknung.	92
Abbildung 61: Vergleich der entstehenden Spannungen in y-Richtung bei S0 (oben) und S4 (unten) bei Befeuchtung.	92
Abbildung 62: Vergleich der entstehenden Spannungen in y-Richtung bei S0 (oben) und S4 (unten) bei Trocknung.	93
Abbildung 63: Verfestigung der Fließfläche in radialer und tangentialer Richtung. Kreise markieren Bereiche mit plastischer Verformung.	93
Abbildung 64: (oben) Feuchteentwicklung unter veränderlichem Klima in 10mm Tiefe für alle Proben, sowie (unten) Vergleich der Referenzprobe S0 mit der Beschichtung S5 für Tiefen 10, 20, 40 und 60mm.	94
Abbildung 65: Gespeicherte elastische Energie aufgrund der Eigenspannungen in den Proben S0-S6 unter veränderlichem Klima.	95
Abbildung 66: Feuchteentwicklung in den Tiefen 10, 20, 40 und 60 mm sowie die Formänderungsenergiegedichte für Probe S0 (links) und S4 (rechts) bei veränderlichem Klima. ..	96
Abbildung 67: Vergleich der Spannungen bei S0 (oben) und S4 (unten) bei maximaler SED im 5. Jahr (links), sowie dem darauf folgenden lokalen Maximum (rechts).	97
Abbildung 68: Veranschaulichung des FE-Modells für die Probe HYE40 mit Symmetriebedingungen (orange), Aussenlamellen aus Eschenholz (cyan) und Mittellamellen aus Fichte (grün), verklebt mit PRF.	98
Abbildung 69: Berechnete Feuchteprofile ausgesuchter Proben zum Zeitpunkt t=7248h bei Innenraumklima.	99
Abbildung 70: Berechnete Feuchteprofile ausgesuchter Proben zum Zeitpunkt t=7248h bei Trockenraumklima.	101

Abbildung 71: Spannungen der Probe HE40-3 zum Zeitpunkt $t=7248h$. Deformationen sind 16.5-fach überhöht dargestellt.....	103
Abbildung 72: Spannungen der Probe HF40-3 zum Zeitpunkt $t=7248h$. Deformationen sind 11.3-fach überhöht dargestellt.....	104
Abbildung 73: Spannungen der Probe HYE2-3 zum Zeitpunkt $t=7248h$. Deformationen sind 14.5-fach überhöht dargestellt.....	105
Abbildung 74: Holzfeuchteverlauf der verschiedenen Holzarten in unterschiedlichen Tiefen über den Simulationszeitraum von 5 Jahren.....	111
Abbildung 75: Zeitlicher Verlauf der totalen Dehnungen aus dem mechano-sorptiven Effekt in radiale, tangential und longitudinale Richtung eines Eschelements.....	111
Abbildung 76: Zugspannungen in globaler y-Richtung innerhalb der Klebstoffugen des optimierten Aufbaus zum Zeitpunkt $t=4000h$	112
Abbildung 77: House of natural resources, ETH Zürich.....	116
Abbildung 78: Wochenmittelwerte der Temperatur (blau) und der relativen Luftfeuchte (rot) im Gebäudeinneren des House of Natural Resources (Quelle [Lyder 2017]. Heizungsinbetriebnahme im Probetrieb Dezember 2014, ab Februar 2015 regulärer Betrieb mit absinkender RH und steigender Temperatur.....	117
Abbildung 79: Geöffnete Mittelfuge bei Blockverklebung im Eingangsbereich.	119
Abbildung 80: Delamination der Verklebung einer aussenliegenden Lamelle im Eingangsbereich.	120
Abbildung 81: Rissbildung an einer Aufdopplung an einer Eschestütze (90° gedreht).....	121
Abbildung 82: Rissbildung bei Hybridelementen Fichte/Esche.....	121
Abbildung 83: Einfluss Faser-Last-Winkel, dadurch Holzbruch in Esche (oben und mittig), sowie Fichte	122
Abbildung 84: Bestückungsplan der Trockenkammer.....	130
Abbildung 85: Entwicklung der vertikalen Durchbiegungen des simulierten Prüfkörpers aus Buchenholz.	132
Abbildung 86: Vergleich der drei Methoden zur Bestimmung neuer Punkte anhand deren Lage auf einem mit Matlab interpolierten Ersatzfläche für den Buche-Fichte-Bilayer.....	133
Abbildung 87: Verlauf der Optima für einen Bilayer aus Fichte und Esche verglichen mit der analytischen Berechnung.....	133
Abbildung 88: Tangentiale Spannungen in den Holzlamellen für ein hybrides BSH-Element (eine Lage oben und unten aus Buchenholz und Orientierungen alle positiv) ohne Berücksichtigung von Plastizität, Viskoelastizität und Mechano-Sorption.....	134
Abbildung 89: Spannungen (a) radial und (b) longitudinal in den Holzlamellen für ein hybrides BSH-Element (eine Lage oben und unten aus Buchenholz und Orientierungen alle positiv) ohne Berücksichtigung von Plastizität, Viskoelastizität und Mechano-Sorption.	134
Abbildung 90: Feuchteentwicklung in allen Proben bei zyklischer Feuchtelast.	137
Abbildung 91: Aufbauten HF-40-3 (oben), HE-40-3 (Mitte) und HYE2-40-3 (unten)	141
Abbildung 92: Schädigungsentwicklung in homogenen Fichteplatten mit 40,30,20mm Lamellen im Trockenschrank.....	143
Abbildung 93: Schädigungsentwicklung in homogenen Escheplatten mit 40,30,20mm Lamellen im Trockenschrank.....	144

Abbildung 94: Schädigungsentwicklung in hybriden Fichte/Escheproben mit 40mm Lamellen im Trockenschrank.....	145
Abbildung 95: Schädigungsentwicklung in inhomogenen Eschenproben mit 40mm Lamellen im Trockenschrank.....	146
Abbildung 96: Spannungen der Probe HE40-1 zum Zeitpunkt $t=7238h$. Die Deformationen sind mit einem Überhöhungsfaktor von 57.8 dargestellt.....	147
Abbildung 97: Spannungen der Probe HF40-1 zum Zeitpunkt $t=7238h$. Die Deformationen sind mit einem Überhöhungsfaktor von 222.6 dargestellt.....	148
Abbildung 98: Spannungen der Probe HYE2-1 zum Zeitpunkt $t=7238h$. Die Deformationen sind mit einem Überhöhungsfaktor von 77.9 dargestellt.....	149

1. Einleitung

1.1. Problembeschreibung

Holz ist das Ergebnis eines evolutionären Optimierungsprozesses, mit dem Ziel, dem Baum der jeweiligen Spezies die Überlebenschancen und Vorteile im jeweiligen Biotop zu maximieren. Auf dem Weg vom Baum zum Balken verändern sich in-vivo Vorteile in technologische Nachteile des Materials Holz, die es gilt holztechnisch zu beherrschen, bzw. zu minimieren. Die starke Anisotropie, die komplizierte Feuchteabhängigkeit aller mechanischer Grössen, Kopplungen zwischen mechanischen, thermischen und hygri-schen Eigenschaften und eine ausgeprägte Geschichtsabhängigkeit von mechanischem und hygri-schem Verhalten machen das hierarchisch aufgebaute Faserverbundmaterial Holz zu einem der am schwierigsten zu beschreibenden Werkstoffe des Bauwesens. Die Eigenschaften von Holz unterliegen einer Vielzahl verschiedener Einflussgrössen. Die wichtigsten sind Holzart, Rohdichte, Feuchtegehalt und Temperatur. Der Einfluss der Temperatur spielt jedoch eher eine untergeordnete Rolle und wird daher nicht näher betrachtet. Die bestehenden Varianzen in mechanischen Eigenschaften zwischen Bäumen der gleichen Spezies führen oft dazu, dass systematische Fehler in Konstruktionen unentdeckt und aufgrund hoher Restkapazitäten ohne Konsequenzen bleiben. Die Erkenntnis, dass Holz als lebender Baustoff 'schafft' ist weit verbreitet. Gemeint ist damit das rheologische, klimaabhängige Verhalten. State-of-the-art der Auslegung von Holzstrukturen in der Praxis ignoriert dies jedoch und betrachtet lediglich den Zustand direkt nach der Fertigung. Schlechte Erfahrungen (und resultierendes schlechtes Image) mit Holzkonstruktionen in Bezug auf Materialausnutzung, Baukosten und Dauerhaftigkeit sind die Folge.

Der jahreszeitliche Verlauf der relativen Luftfeuchte in beheizten Räumen ist ein bekannter Auslöser für Schäden. Insbesondere in langen kalten Perioden sinkt im Winter die relative Luftfeuchte sehr stark ab, bedingt durch den geringeren absoluten Wassergehalt der Aussenluft, beim Erwärmen sinkt dann die relative Luftfeuchte. So sind 20% rel. Luftfeuchte in beheizten Räumen im Winter durchaus möglich, wenn keine zusätzliche Befeuchtung erfolgt. Die Feuchteänderung über dem Querschnitt ist ein durch Diffusion ablaufender, langsamer Prozess. Neben Holzart, Schnittrichtung, Holzfeuchte ist auch ein sehr grosser Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf die Zeit bis zum Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte vorhanden. Über dem Querschnitt bilden sich daher Feuchteprofile. Bei grossen Querschnitten und variierendem Umgebungsklima wird praktisch nie die Gleichgewichtsfeuchte über dem gesamten Querschnitt erreicht. Direkt an der Oberfläche wird dagegen die Gleichgewichtsfeuchte relativ schnell erreicht was zu grossen Feuchtegradienten und somit starken Eigenspannungen im Randbereich führt. Weicht die Einbaufeuchte von der mittleren zu erwartenden Holzfeuchte sehr stark ab, kommt es je nach Dimension erst nach Monaten oder gar Jahren zum annähernden Feuchteausgleich auf die zu erwartende mittlere Holzfeuchte. Es entstehen Spannungen, Risse und im Extremfall Delaminierungen. Zusammenfassend ist das in [Niemz 1997] sowie [Niemz und Sonderegger 2017] beschrieben. Die Einstellung der mittleren Bauteilfeuchte bereits bei der Fertigung auf die zu erwartende mittlere Gleichgewichtsfeuchte ist daher sehr entscheidend.

Allgemein auftretende Probleme bei Feuchteschwankungen in Holzbauten sind:

- *Im trockenen Klima*, wie in beheizten Räumen, insbesondere im Winter die Öffnung von Fugen, Rissbildung und Delaminierung von Brettschichtholz, insbesondere auch bei gebogenen Trägern durch den auftretenden Querkzug. Man beobachtet dies aber

auch bei geradem Brettschichtholz durch die Verformung insbesondere der Seitenbretter mit liegenden Jahrringen durch sogenanntes schüsseln. Die Querkzugfestigkeit ist senkrecht zur Faserrichtung ist mit ca. 4MPa bei Fichte sehr gering.

- *Im feuchten Klima*, wie z.B. im Freien unter Dach oder im Extremfall bei direkter Freibewitterung muss die Klebfuge einer hohen Feuchte widerstehen. Es darf kein Abbau wie z.B. bei UF Harzen durch Hydrolyse erfolgen. Zu trocken verklebte Bretter führen beim Quellen zu Druckspannungen, wobei Druck senkrecht zur Faser durch plastische Verformungen und Kriechen abgebaut werden kann, was das Holz im Allgemeinen verdichtet.
- *Im wechselnden feucht-trocken Klima*, wie z.B. nicht klimatisierte Räume mit stark wechselndem Klima und wechselnder Feuchte führt zu Zug- und Druckspannungen. Die Fugen öffnen sich durch die plastische Verformung mit der Zeit langsam, was oft erst nach Jahren erkennbar ist, z.B. beim Parkett durch sehr kleine bleibende Dimensionsänderung der Lamellen. Unter Belastung können mechano-sorptive Effekte zu zyklischem Spannungsaufbau führen.

Forstpolitische Entscheidungen der Vergangenheit führen dazu, dass heute zunehmend Laubholz durch die Forstwirtschaft bereitgestellt wird. Ein Grossteil wird energetisch genutzt, jedoch ist das Potential der stofflichen Nutzung im Holzbau bislang nicht ausgeschöpft. Den theoretischen Vorteilen von Hartholz mit ihrer überlegenen Festigkeit und Steifigkeit verglichen mit Nadelholz stehen ungelöste Probleme gegenüber, die durch das ausgeprägte hygrische Verhalten und einhergehende erhebliche Probleme bei der Verklebung von Laubholz verursacht werden. So werden Normvorgaben für die Delaminierung nur schwer oder gar nicht erreicht. Zwei Möglichkeiten bieten sich hier an: (1) die Verbesserung der Verklebung, was in einem laufenden Projekt (BFH, neue Holzbau, Klebstoffhersteller, Beginn März 2015) mit von Purbond (Henkel) entwickelten Primern für Esche sowie weiterentwickelte MUF Systeme sowie PRF von Dynea versucht wird, sowie (2) die Reduktion der Eigenspannungen in Brettschichtholz (BSH) über geringere Lamellendicken, strengere Grenzen für Anfangsfeuchten und Verarbeitungsfeuchte beim Verkleben, sowie strengere Sortierkriterien. Dieser hier verfolgte Ansatz muss selbstverständlich saisonale Klimazyklen berücksichtigen. Im praktischen Gebrauch kommt es teilweise insbesondere bei großen Querschnitten und trockenen Innenraumklima zur Delaminierung. Vielfach wird dieses kritischer eingeschätzt als eine Konstruktion im Freien unter Dach, mit Holzfeuchten zwischen 12-14%. Eine besondere Rolle kommt hier Oberflächenbeschichtungen zu, die in den Randbereichen zur Reduzierung der Geschwindigkeit zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte und somit zur Reduzierung von Spannungen an der Oberfläche grosser Querschnitte beitragen.

1.2. Ziele der geplanten Forschung

Typische Klimaänderungen in beheizten Innenräumen stellen für BSH mit Laubholz einen Lastfall dar, der oft zu progressiven Schäden führt. Da der Nachweis der Klebverbindungen mit Laubholz schwierig ist, stellt sich die Frage, inwieweit Massnahmen der Qualitätssicherung in Bezug auf Aufbau, Festigkeitssortierung und die Vermeidung von Feuchtegradienten, sowie Verklebung bei niederen Feuchten helfen können, um dauerhafte BSH-Träger mit Laubholz zu realisieren. Im Rahmen des Projektes stehen folgende Ziele:

- Optimierung des Aufbaus von Brettschichtholz aus Laubholz und Hybridbauten Laub- und Nadelholz (Variation Lamellendicke, Jahrringanzordnung u.a.).
- Betrachtung technologisch bedingter Schwankungen in der Holzfeuchte zwischen den Lamellen beim Verkleben (Quantifizierung des Einflusses).
- Berücksichtigung des Einflusses der Bauteilabmessungen.
- Quantifizierung des Einflusses von Beschichtungen.
- Prüfung der Realisierbarkeit solcher Maßnahmen wie Ausgleichsfugen (angewandt z.B. bei Brettsperrholz).
- Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Rissbildung im House of Natural Resources.

Ein innerhalb des NFP 66 von der ETH Zürich [Hassani 2015] entwickeltes Modell und vorhandene Materialkennwerte aus anderen Arbeiten (u.a. [Ammann 2015, Oszhay 2014, Hering 2011]) sowie vorgängig erarbeitete Datensätze für Kennwerte zu Esche und Eiche zur Berechnung von feuchteinduzierten Spannungen in Klebfugen werden genutzt. Rechnerisch ermittelten Kennwerte werden mit Experimenten abgeglichen. Ferner sollen Elemente für Langzeittests (über die Zeitphase des Projektes hinaus zur Überwachung der Delaminierung unter natürlichen Klimaschwankungen vorbereitet werden. Diese Arbeiten werden später von BFH und ETH fortgeführt. Folgende Klimabeanspruchungen sind geplant:

- Aussenklima überdacht,
- Aussenklima bewittert (nur an Reststücken),
- Trockenes Innenraumklima (HIF Gebäude),
- Trockenschrankklima.

Bauteile werden mit Feuchtesensorik instrumentiert und Langzeittests ausgesetzt. Der Beginn erfolgt innerhalb der geplanten Arbeit. Zum Auffinden optimaler Konfigurationen kann auf das FE-Programm der ETH sowie Kennwerte, für verschiedene Holzarten und Klebstoffe, die in der früheren Arbeitsgruppe Holzphysik ermittelt wurden, zurückgegriffen werden.

2. Material und Methoden

2.1. Experimenteller Ansatz: Untersuchung von Oberflächenbeschichtungen

Ziel dieser Untersuchung ist die Messung der Feuchteprofile, der Rissbildung im Vergleich zwischen unbeschichteten und beschichteten BSH bei variablem Klima. Die Wasserdampfdurchlässigkeit der unterschiedlichen Systeme wird über Schalenversuchen ermittelt.

2.1.1. Probenherstellung

Es werden 12 BSH Probekörper, homogen aus Fichtenlamellen industriell gefertigt, verwendet. Die Probekörper bestehen aus 5 Lamellen mit einer Dicke von 40mm. Die Abmasse des gesamten Probekörpers sind Breite x Höhe x Länge 120x200x510mm. Für die Untersuchung der Oberflächenbeschichtungen werden 2 Sätze a 6 Probekörper verwendet von denen 5 mit Lacken beschichtet werden (Proben S1-S5) und ein Probekörper als Referenz unbeschichtet bleibt (Probe S0). Verwendet werden verschiedene Lacke der Firma Bosshard.

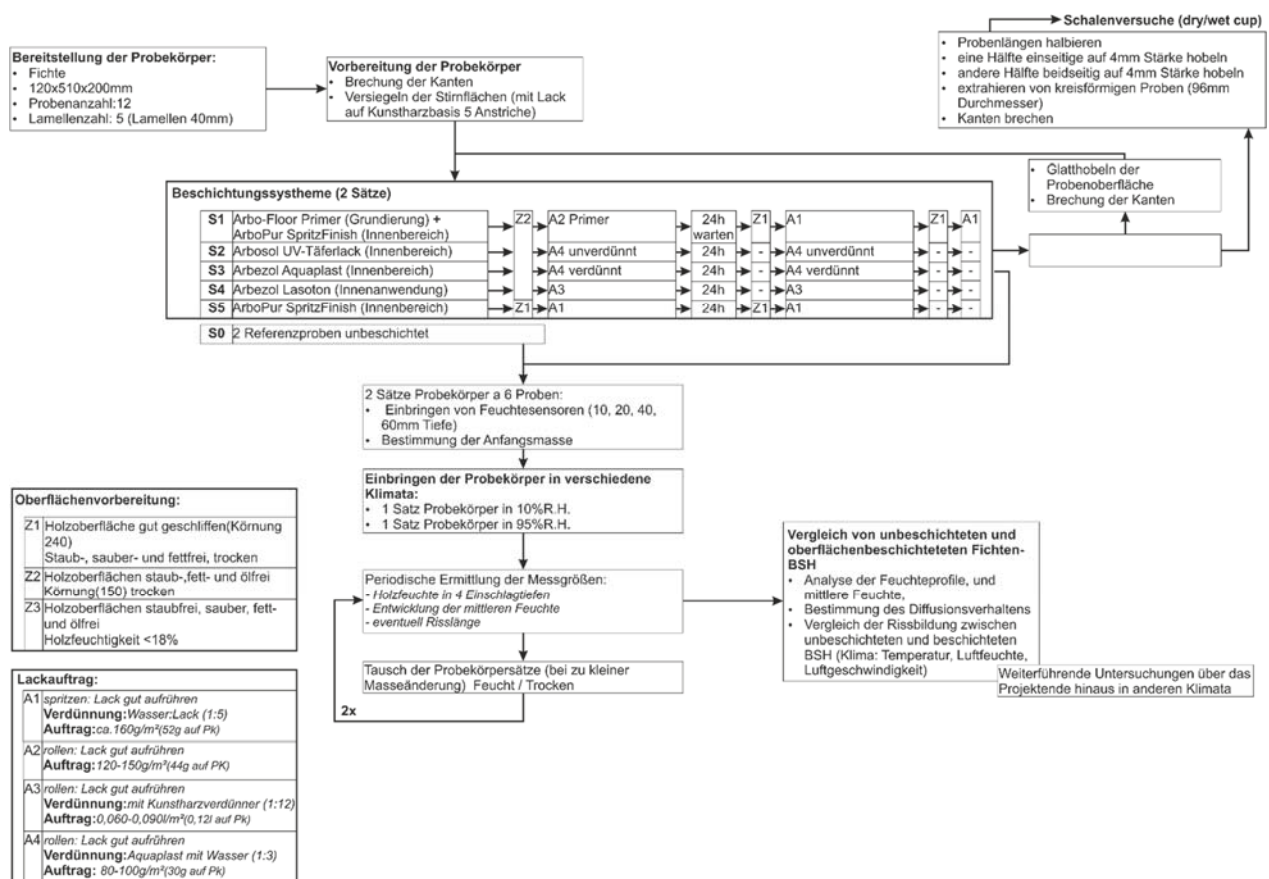


Abbildung 1: Ablaufdiagramm zur Untersuchung der Oberflächenbeschichtungssysteme.

Die verschiedenen Lacke respektive Grundierung werden folgend aufgeführt:

- Arbezol Lasoton* (farblos) geeignet zur Innenanwendung. *Arbezol Lasoton* wird mit Kunstharzverdünnung verdünnt und direkt auf den Probekörper aufgetragen. Hier sind 2 Anstriche im Abstand von 24h nötig.

- *Arbezol Aquaplast* (matt) wässriger 1K Holzlack zur Innenanwendung zum Beispiel zur Parkettversiegelung. *Arbezol Aquaplast* und *Arbosol UV-Täferlack* werden ebenfalls in 2 Anstrichen im Abstand von einem Tag direkt auf die Probekörper aufgetragen, wobei *Arbezol Aquaplast* mit Wasser verdünnt werden muss.
- *Arbo-Floor Primer* (farblos) 1K Grundierung für Holzparkett,
- *Arbosol UV-Täferlack* (farblos) 1K-Holzlack mit Lichtschutz für Innen,
- *ArboPur Spritz Finish*

Die Produktdatenblätter sind über www.bosshard-farben.ch frei verfügbar. Das als Endbeschichtung dienende *ArboPur Spritz Finish* wird einmal mit *Arbo-Floor Primer* als Grundierung aufgetragen und einmal alleinstehend ohne die Grundierung. Bei beiden Varianten erfolgt der Lackauftrag von *ArboPur* in 2 Anstrichen mit Zwischenschliff von einer Körnung von 240. Bei der Variante mit der Grundierung mit *Arbo-Floor*, wird diese in einem Anstrich aufgetragen. Das Vorgehen ist im Flussdiagramm (Abbildung 1) zusammengefasst.

Nach der Beschichtung werden die oberen 10 mm der Decklamellen abgesägt um Proben für Wasserdampfdurchlässigkeitsmessungen mit Schalenverfahren (Dry/Wet-cup) zu extrahieren. Diese sind 4.2mm dick mit Durchmesser 96 mm auf. Die nun unbeschichteten Oberflächen der BSN Träger werden frisch gehobelt und erneut nach oben beschriebener Prozedur beschichtet.

2.1.2. Versuchsplan für BSH-Proben

Die zwei BSH Probensätze bestehend aus Proben S0-S5 (Bsp. Probe S0/1 bezeichnet die unbeschichtete Referenzprobe des Satzes 1) werden in unterschiedliche Klimata (S0/1...S5/1) für Trockenkammer und (S0/2...S5/2) für 95% R.H. gebracht und periodisch gemessen. Die Ermittlung der Holzfeuchte erfolgt über Widerstands-Messverfahren [DIN-EN-13183-2] in 4 verschiedenen Einschlagtiefen (10, 20, 40 und 60mm) (s. Abbildung 3). Für jede Tiefe sind zwei Messstellen pro Probe vorgesehen. Zudem wird die Entwicklung der mittleren Feuchte über die Gesamtmasse bestimmt und eventuell auftretende Delaminationen erfasst. Nach Erreichen eines Gleichgewichtszustandes werden die Proben in das jeweils andere Klima gebracht. Diese Wechselklimamessungen werden über das Projektende hinaus weitergeführt.

2.1.3. Versuchsplan für Wasserdampfdurchlässigkeitsmessungen

Zur Quantifizierung der Wasserdampf-Diffusionsstromdichte der Beschichtung, der diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke und letztlich der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl werden Schalenversuche durchgeführt. Diese orientieren sich an den Normen [DIN EN ISO 7783; DIN EN ISO 12572; ASTM D165303] und werden jeweils als Trocken- und Feuchtschalenversuche (wet- und dry-cuptest) durchgeführt. Für jedes Beschichtungssystem S1-S5 werden je drei Versuche mit Beschichtung nach aussen, nach innen und reines Substrat für jeweils Trocken- und Feuchtschalenversuche durchgeführt, was zu $18 \times 5 = 90$ Proben führt. Diese werden in einem $50 \pm 5\%$ R.H./ 20°C Klima gelagert und die Gewichtszu-/abnahme periodisch erfasst. Als Trockenmittel wird Silicagel verwendet, während die Feuchtschalen mit Ammoniumdihydrogenphosphat-Lösung ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ -Lösung) gefüllt sind, was einer relativen Feuchte von 93% entspricht. Der gesamte Versuchsablauf ist in Abbildung 2 zusammengefasst.

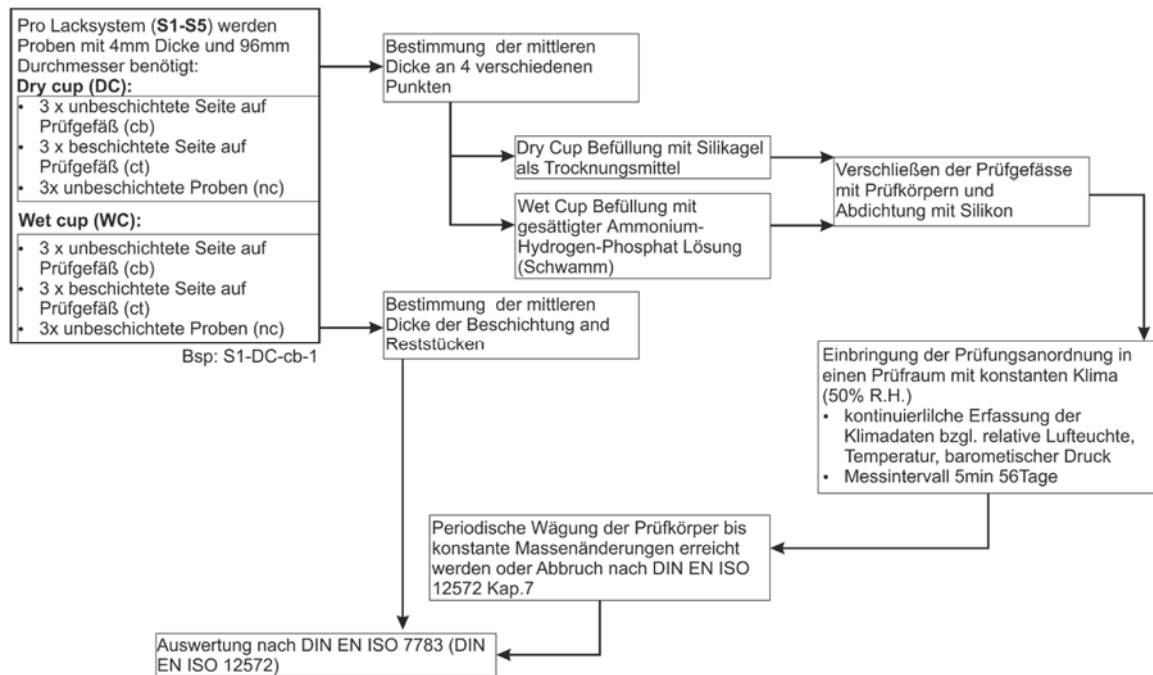


Abbildung 2: Ablaufdiagramm zur Untersuchung der Oberflächenbeschichtungssysteme mittels Dry/Wet-Cup.

2.2. Experimenteller Ansatz: Delamination in grossen Aufbauten

Feuchteinduzierte Spannungen können in BSH-Trägern zu Delaminationen und Rissbildung führen. Da die entstehenden Eigenspannungen abhängig von der Bauteilgrösse sind, bilden kleine Proben die Vorgänge nicht richtig ab. So wurden im Rahmen eines NFP66 Projektes zur Delamination Buchenproben mit 200m breiten Lamellen unterschiedlichen Klimata ausgesetzt, ohne dass die Holzfestigkeit oder Zähigkeit der Klebfugen in ausreichendem Masse erreicht wurden. Die in diesem Projekt gewählten Querschnitte von 360x360mm entsprechen den im House of Natural Resources verbauten (Hersteller neue Holzbau). Der Einfluss der Aufbauten wird mit dem in Tabelle 1 zusammengestellten Konfigurationen experimentell untersucht.

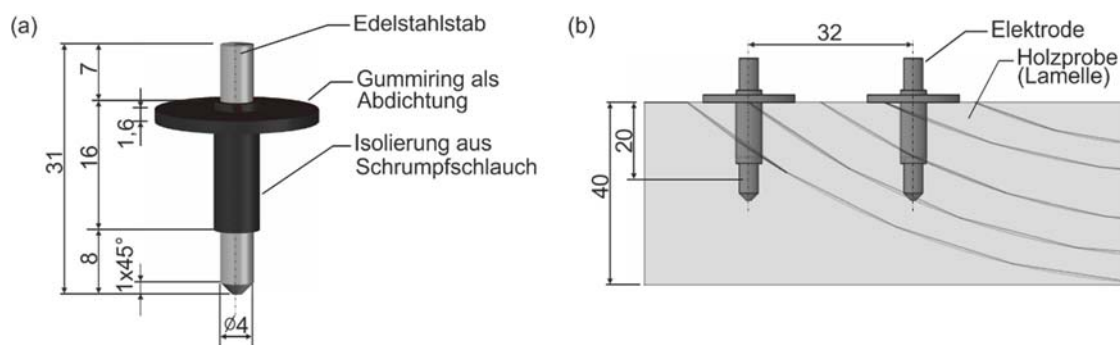


Abbildung 3: (a) Feuchtesensor mit 20mm Messtiefe und (b) Einbausituation.

Tabelle 1: Probenkatalog. S=Fladerschnitt; R=Riftschnitt; H=Halbrift, ** Genutete Bretter nach Abbildung 4.

Anzahl	Holzart	Aufbau	Masse [mm]	Bezeichnung
homogen				
3	Fichte	[F ⁹ _{40s}]	360x360x700	HF-40-1...3
3	Esche	[E ⁹ _{40s}]	360x360x700	HE-40-1...3
3	Fichte	[F ¹² _{30s}]	360x360x700	HF-30-1...3
3	Esche	[E ¹² _{30s}]	360x360x700	HE-30-1...3

3	Fichte	$[F_{20s}^{18}]$	360x360x700	HF-20-1...3
3	Esche	$[E_{20s}^{18}]$	360x360x700	HE-20-1...3
3	Fichte	$[F_{40s}^9]$	360x360x700	HF-40-1...3
inhomogen				
3	Esche	$[[E_{40s}, E_{40R}]^4, E_{40s}]$	360x360x700	IHF-40-1...3
hybrid				
3	Esche/Fichte	$[E_{40s}^3, F_{40s}^3]$	240x360x700	HYEF1-40-1...3
3	Esche/Fichte	$[E_{40s}^2, F_{40s}^2, E_{40s}^2]$	240x360x700	HYEF2-40-1...3
3	Esche**/Fichte	$[E_{40s}^2, F_{40s}^2, E_{40s}^2]$	240x360x700	HYEF3-40-1...3

2.2.1. Probenherstellung

Ziel ist es, Proben herzustellen, die in Sortierkriterien, Feuchtetoleranzen, Abmessungen und Herstellung industrieller Fertigung entsprechen. So werden aus wirtschaftlichen Gründen Bretter mit Keilzinken verbunden, um Defekte wie grosse Äste aussägen zu können. Die Verklebung der Keilzinken erfolgt mit PUR-Klebstoff. Es werden die Dichte, der Anfangsfeuchtegehalt und die Steifigkeit von jedem Brett bestimmt, um auftretende Delaminationen rechnerisch besser interpretieren zu können. Es wird eine Anfangsfeuchte von ca. 10% angestrebt.

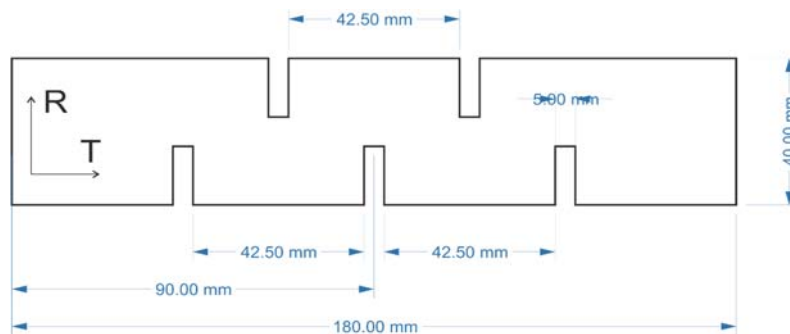


Abbildung 4: Konfigurationen der 5mm breiten Nuten in hybriden Proben. Die Aussenlamellen werden dabei nur an der Innenseite genutet.

Zunächst werden aus Teilstücken 5m lange, nummerierte Lamellen der Dicke 44mm hergestellt, deren Anfangsfeuchte während der Fertigung bestimmt werden. Diese werden dann vor der Verklebung in mehreren Schritten auf die Zieldicke (40,30,20mm) gehobelt und mit PRF Aerodux 185 miteinander verklebt und verpresst. Die 5m langen Balken werden dann geteilt und seitlich miteinander mit PRF verklebt. Die Balken werden auf 360mm gehobelt und in jeweils 700mm lange Teilstücke gesägt. Dabei wird so vorgegangen, dass an den Enden gleich lange Teilstücke entstehen, die zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften und Dichte verwendet werden. Fichte wird mit MUF verklebt, Esche und hybride Aufbauten mit PRF (Aerodux A185). In Abbildung 5 ist der Ablauf der Versuche skizziert.

Die Enden der Proben werden mit Kunstharzfarbe versiegelt und für mögliche Dehnungsfeldmessungen mit Digitaler Bildkorrelation (DIC) bespeckelt. Es wird eine Canon EOS 10Mpixel Spiegelreflexkamera verwendet. Vor der eigentlichen Messung erfolgt eine Linsenkorrektur, deren Werte über das Matlab *Camera Calibration Applet* bestimmt werden. Die durchgeführten numerischen Korrekturen der optischen Bilder sind in [Zhang 2000] beschrieben.

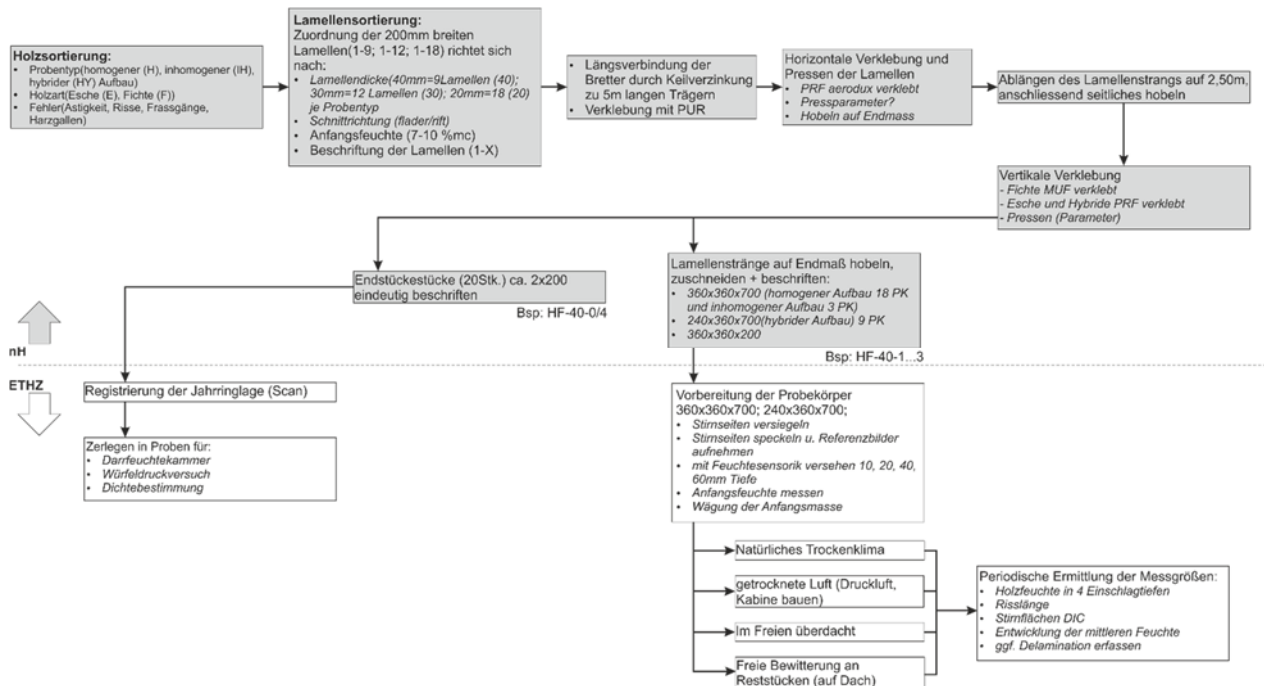


Abbildung 5: Ablaufdiagramm zur Untersuchung der Delamination.

Die Eigentliche Korrelation erfolgt über *Ncorr*, eine leistungsfähige, parallele, openSource 2D-DIC Software in Matlab [Blaber u.a. 2015], die moderner als kommerzielle Systemen von Li-mess (Vic2D) oder GOM (Aramis) ist [Harilal u.a. 2014]. Vor Versuchsbeginn wird ein Referenzbild aufgenommen. Um einen gleichbleibenden Proben-Kamera Abstand und eine identische Fokuseinstellung über den gesamten Versuchsablauf zu garantieren, wird eine Vorrichtung verwendet, die die Bildposition der Probe fixiert. Der manuelle Fokus der Kamera wird für die Versuchsdauer mit einem Klebeband fixiert. Zuletzt werden die Proben mit je 4 Feuchtesensoren in den Tiefen 10,20,40,60mm bestückt, die Messstellen eindeutig bezeichnet, und Anfangswiderstände bestimmt. Zudem wird jetzt die Gesamtmasse der Probe bestimmt.

2.2.2. Versuchsplan für Delaminationsproben

Nach der Probenherstellung, Bestückung und Ersterfassung werden die Proben in drei Sätze aufgeteilt, die unterschiedliche Klimabeanspruchungen erfahren:

1. im Aussenklima (Freien unter Dach),
2. im Innenraumklima,
3. im Trockenklima der Klimakammer (Abbildung 6),
4. Zusätzlich werden Segmente im Aussenklima bewittert (Abbildung 7).

In periodischen Abständen werden die Widerstände der Feuchtesensoren gemessen, die Gesamtmasse bestimmt, und Aufnahmen der verformten Stirnflächen für die DIC angefertigt. Zudem wird an einigen Stellen die Probengeometrie gemessen. Eventuell entstandene Delaminationen werden erfasst.

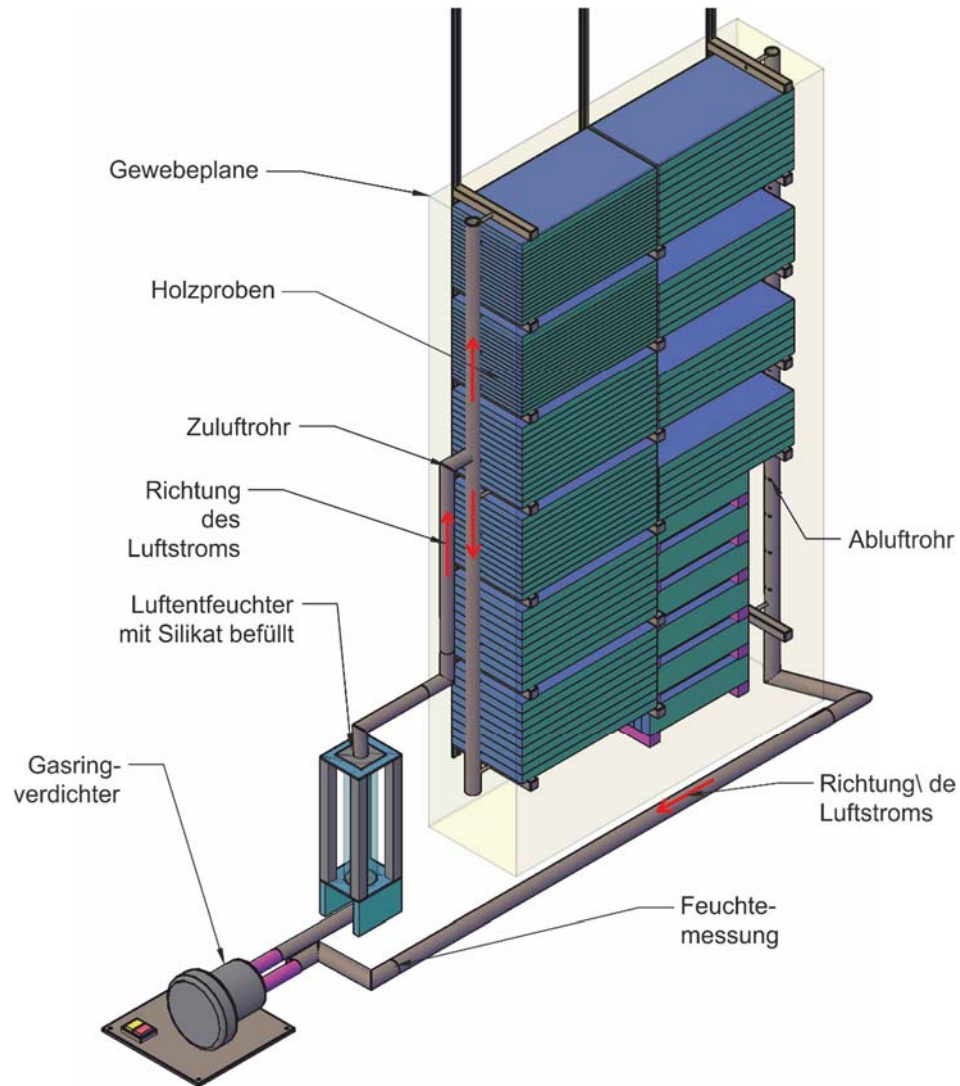


Abbildung 6: Prinzipskizze der bestückten Trockenkammer.



Abbildung 7: Proben auf den Bewitterungsprüfständen.

2.3. Rechnerischer Ansatz: Ersatzmodell-gestützte Optimierung des Langzeitverhaltens

2.3.1. Konstitutive hygro-mechanische Modellierung für Holz

Die Eigenschaften von Holz unterliegen einer Vielzahl verschiedener Einflussgrößen. Die wichtigsten sind Holzart, Rohdichte, Feuchtegehalt und Temperatur, wobei bei gemässigten Temperaturen der Einfluss der Temperatur eine untergeordnete Rolle spielt, und daher vernachlässigt wird. Es werden Fichte (*Picea abies*), und die zwei Hartholzarten Rotbuche (*Fagus sylvatica*) und Esche (*Fraxinus excelsior*) betrachtet. Ausführliche Beschreibungen der Holzstrukturen für ein tieferes Verständnis sind in [Kollmann u. Côté 1968] und [Niemz 1993] gegeben. Für die Mechanik werden Formeln und Werte angegeben, die es ermöglichen das Verhalten rechnerisch zu erfassen. Die Notation ist so gewählt, dass sie dem beschriebenen Materialmodell nach [Hassani 2015] und [Hassani u.a. 2014] entspricht. Dies umfasst auch das zugrundeliegende radial (*R*) und tangential (*T*), longitudinal (*L*) *RTL*-Koordinatensystem. Aufgrund der zumindest annähernd idealen Orthogonalität dieser drei Richtungen zueinander ist ein orthogonales Materialmodell gerechtfertigt, das allerdings in zylindrischen, lokalen Koordinatensystemen verwendet wird um die Krümmung von Jahrringen abzubilden. Einen Überblick über die durchgeführten numerischen Untersuchungen gibt Abbildung 8.

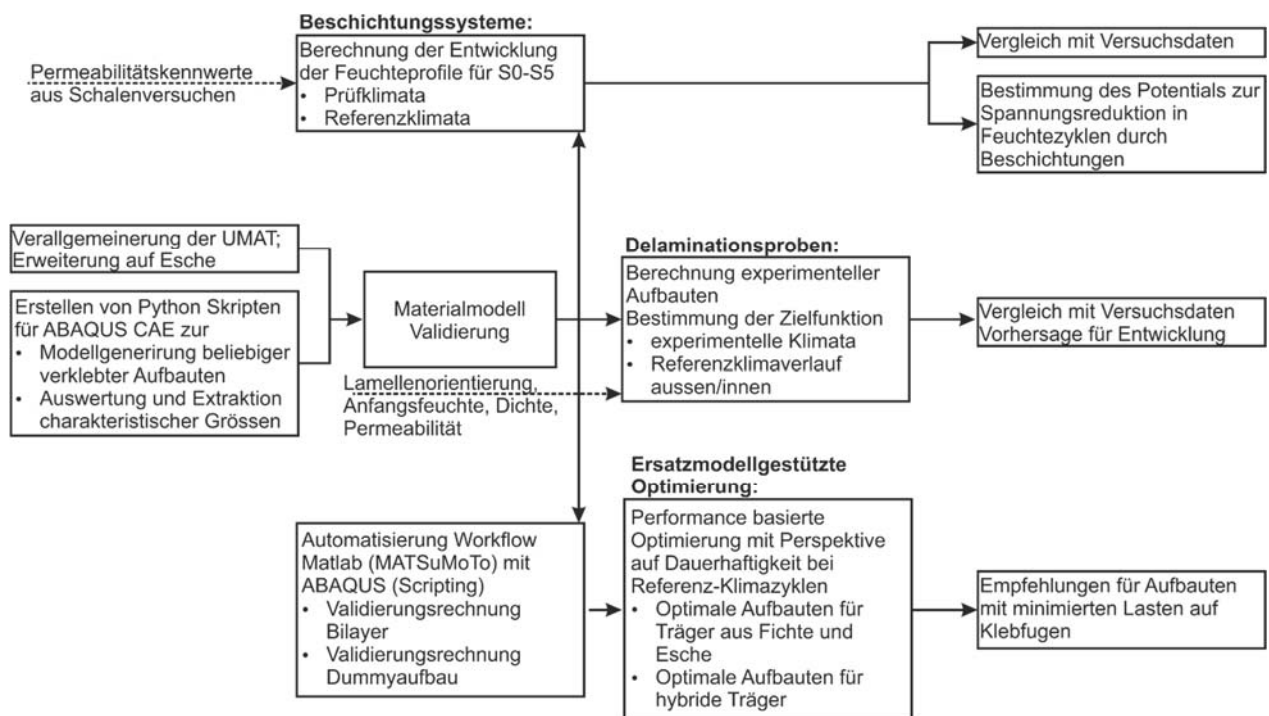


Abbildung 8: Ablaufdiagramm zur numerischen Untersuchung.

Das Feuchteverhalten von Holz hat massgeblichen Einfluss auf Verarbeitung und Einsatz. Zur Quantifizierung wird die Holzfeuchtigkeit ω mit

$$\omega = \frac{m_{\text{feucht}} - m_{\text{darrtrocken}}}{m_{\text{darrtrocken}}} \quad (1.1)$$

über die Massen des Holzprüfkörpers im feuchten und darrtrockenen Zustand in Prozent definiert. Der Zusammenhang zwischen Klima (relative Luftfeuchte R.H. ϕ) und Holzfeuchte ω ist

über Sorptionsisothermen gegeben, da Holz als hygroskopisches Material in der Lage ist über verschiedene Prozesse Wasser aufzunehmen (Adsorption) oder an die Umgebung abzugeben (Desorption). Es wird von Hysterese gesprochen, da die Desorption durch eingeschlossenes Wasser langsamer abläuft und damit höhere Holzfeuchten gemessen werden als bei der Adsorption für die gleichen Umgebungsbedingungen (s. Abbildung 9). Zur Beschreibung des Sorptionsverhaltens wurden verschiedene Modelle entwickelt, auf die hier jedoch nicht eingegangen werden soll. Sie werden in [Hansen 1986] und [Hering 2011] kurz erläutert. In [Hering 2011] werden ebenfalls Formeln angegeben, um die Sorptionsisothermen mittels mathematischer Kurve anhand von Messdaten zu fitten.

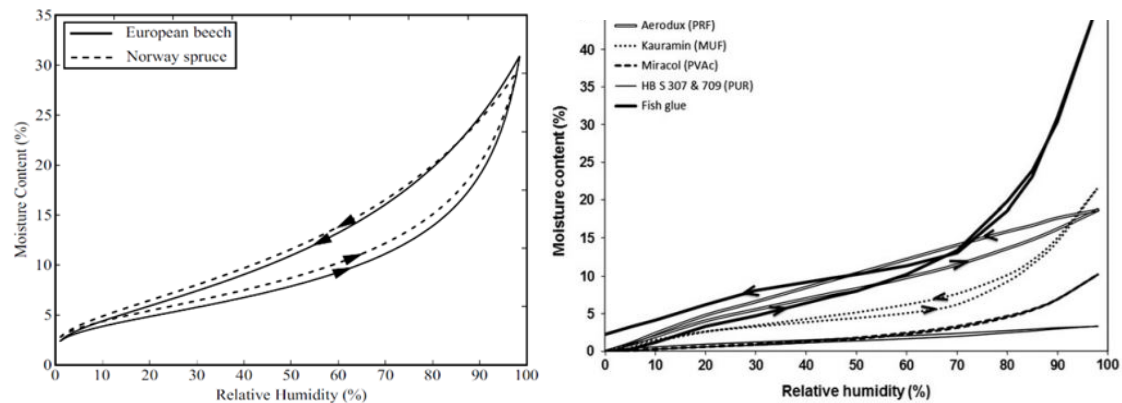


Abbildung 9: (links) Sorptionsisothermen von Buchen- und Fichtenholz aus [Hassani 2015] nach [Hansen 1986] und (rechts) von PRF, MUF, PUR, sowie weiteren Klebstoffen aus [Wimmer u. a. 2013].

Quellen und Schwinden: Die Einlagerung von Wassermolekülen in der Zellwand führt zu ihrer Ausdehnung und makroskopischem Quellen, entgegengesetzt Schwinden. In Analogie zur Temperaturexpansion werden die Quell- und Schwinddehnungen mittels Feuchteausdehnungskoeffizienten in Abhängigkeit der Änderung der Holzfeuchte zu

$$\varepsilon^{\omega} = \alpha(\omega - \omega_0) \quad (1.2)$$

Definiert [Sasi u. Gromala 2016]. Der Vektor $\alpha^T = [\alpha_R, \alpha_T, \alpha_L, 0, 0, 0]$ enthält die einzelnen Feuchteausdehnungskoeffizienten α_i . Da das Quellen und Schwinden nur unterhalb des Fasersättigungspunktes auftritt, ist für ω das Minimum aus aktueller Holzfeuchte ω_{aktuell} und Holzfeuchte bei Fasersättigung ω_{FSP} einzusetzen. Die benötigten Parameter für die Berechnung des Quellens und Schwindens sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Es wird dabei vereinfacht angenommen, dass die einzelnen Koeffizienten α_i konstant sind.

Tabelle 2: Parameter zur Berechnung des Quellens und Schwindens nach Gleichung (1.2) für Fichte, Buche und Esche.

Holzart	Quelle	α_R [%/‰]	α_T [%/‰]	α_L [%/‰]
Fichte	Gerecke-2009; Neuhaus-1981	0.170	0.330	0.005
Buche	Hering-2011	0.191	0.462	0.011
Esche	Niemz u.a.-2014	0.190	0.390	0.010

Diffusiver Feuchtetransport: Wassertransport innerhalb von Holz erfolgt bei Feuchte unterhalb der Fasersättigung über Diffusion. Vereinfachend kann von Fickschem Transport, also Ausgleich von Konzentrationsgradienten als treibende Kraft, ausgegangen werden [Gerecke 2009, Hering 2011]. Das erste Ficksche Gesetz ist mit

$$\mathbf{J} = -\mathbf{D}\nabla c \quad (1.3)$$

gegeben, wobei der Vektor $\mathbf{J}$ den Feuchtefluss beschreibt, die Matrix $\mathbf{D}$ die Diffusionskoeffizienten enthält und mit c die Wasserkonzentration bezeichnet ist. Die Wasserkonzentration $c = \omega \rho_0$ kann in Abhängigkeit der darrgetrockneten Holzdichte ρ_0 mit der Holzfeuchte ω berechnet werden. Die Konzentrationsänderung in Bezug auf die Zeit wird mit dem zweiten Fickschen Gesetz mit

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{D} \nabla \omega) \quad (1.4)$$

beschrieben. Die gegebene Definition wurde bereits vereinfacht für eine konstante Darrrohdichte ρ_0 . Das Diffusionsverhalten variiert in den verschiedenen anatomischen Richtungen, wobei von diagonalisierten Diffusionskoeffizientenmatrizen ausgegangen werden kann [Hering 2011, Hassani 2015]: $\mathbf{D} = \text{diag}[D_R, D_T, D_L]$. D_i ist abhängig von der aktuellen Holzfeuchtigkeit ω . Zur Modellierung dieses Verhaltens wird meist der folgende Exponentialansatz für $i=R, T$ und L verwendet:

$$D_i(\omega) = D_{0i} e^{\alpha_{0i}\omega} \quad (1.5)$$

Die benötigten Parameter D_{0i} und α_{0i} sind in Tabelle 22 für Fichte und Buche aufgelistet. Für Esche wurden die gleichen Parameter wie für die Buche verwendet, da keine spezifischen Messdaten vorlagen.

Bei der Betrachtung klimatischer Veränderungen spielt der Feuchtetransport über Oberflächen eine wichtige Rolle. Bei stärkeren Luftbewegungen ist dies von untergeordneter Bedeutung, da sich keine signifikanten Grenzschichten ausbilden, und somit die aus der Sorptionsisotherme resultierende Gleichgewichtsfeuchte der relativen Luftfeuchte der Umgebungsluft als Randbedingung angesetzt werden kann. Bei stehender Luft jedoch, stellt die Grenzschicht eine zusätzliche Barriere dar. Der Feuchtefluss $\mathbf{J}^s$ über die Oberfläche mit Normalenvektor $\mathbf{n}$ wird zu

$$\mathbf{n} \mathbf{J}^s = \sigma_D (c_\infty - c_{Holz}) \quad (1.6)$$

berechnet, mit den Feuchtekonzentrationen der Umgebungsluft c_{inf} und der Holzoberfläche c_{Holz} , sowie dem Emissionskoeffizient σ_D . Insbesondere bei Schalenversuchen sollte für die Berechnung des Flusses über die innen liegende Oberfläche ein feuchteabhängiger Emissionskoeffizient verwendet werden. Für ruhende Luft kann dieser gemäss [Siau u. Avramidis 1996] über die Beziehung $\sigma_D = 0.115 \exp(4\omega)$ den Einfluss der Oberflächenfeuchte berücksichtigen. Der Einfluss der Lackbeschichtungen auf den Feuchtetransport über die Oberfläche wird auf identische Weise berücksichtigt. Die korrekten Emissionskoeffizienten werden dabei invers aus den Massentransportraten der Schalenversuche ermittelt.

Rohdichte: Die Rohdichte ist eine der wichtigsten Kenngrößen von Holz. Sie unterscheidet sich je nach Holzart und Feuchtegehalt. Bei den technisch genutzten Holzarten lässt sich feststellen, dass Laubhölzer bei gleichen klimatischen Bedingungen tendenziell eine höhere Dichte aufweisen als Nadelhölzer. Zur besseren Vergleichbarkeit wird die Rohdichte an Prüfkörpern bestimmt, die unter Normbedingungen (65% relative Luftfeuchtigkeit und 20°C) gelagert werden. Unter diesen Bedingungen stellt sich eine Holzfeuchte von etwa 12% ein. In Tabelle 3 sind die Mittelwerte der Rohdichten von Fichte, Buche und Esche aufgeführt. Die in der

Tabelle mit * gekennzeichneten Werte sind in der Implementierung verwendet. Es ist zu erkennen, dass auch innerhalb einer Baumart die Streuung erheblich ist, was auf unterschiedliche regionale Wuchsbedingungen zurückzuführen ist.

Tabelle 3: Mittelwerte der Rohdichte von Fichte, Buche und Esche nach den Literaturquellen von [Hassani 2015].

Holzart	Quelle	Feuchte [%]	Dichte [kg/m ³]
Fichte	Neuhaus-1981	Darrtrocken	417
	Niemz-1993	Ca. 12	470*
	Wagenführ-1996	Ca. 12	470*
Buche	Hering-2011	12.5	691
	Niemz-1993	Ca.12	890
	Wagenführ-1996	Ca.12	720*
Esche	Niemz u.a.-2014	12.0	640
	Wagenführ-1996	Ca.12	720
	Unbekannt	Ca.12	600*

Elastische Eigenschaften: Elastisches Materialverhalten zeichnet sich durch vollständige Reversibilität aus. Besteht zwischen den auftretenden Spannungen und Dehnungen ein linearer Zusammenhang, so kann dieser mit dem allgemeinen Hook'schen Gesetz in Tensor- bzw. Matrixschreibweise beschrieben werden:

$$\sigma_{kl} = C_{klmn} \varepsilon_{mn} \quad \text{bzw.} \quad \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}_0 \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (1.7)$$

Die Matrix $\mathbf{C}_0$ ist die Steifigkeit, ihre Inverse $\mathbf{C}_0^{-1}$ die Nachgiebigkeit. Für orthotrope Materialien ist die Nachgiebigkeitsmatrix in [Bodig u. Jayne 1982] hergeleitet. Mit der verwendeten Notation im *RTL*-Koordinatensystem ergibt sich

$$\mathbf{C}_0^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_R} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T} & \frac{-\nu_{LR}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{RL}}{E_R} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T} & \frac{1}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RL}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

mit 12 unabhängige Grössen. Für die Terme auf den Nebendiagonalen können die folgenden Beziehungen eingesetzt werden:

$$\frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T}, \quad \frac{\nu_{RL}}{E_R} = \frac{\nu_{LR}}{E_L} \quad \text{und} \quad \frac{\nu_{TL}}{E_T} = \frac{\nu_{LT}}{E_L} \quad (1.9)$$

wodurch $\mathbf{C}_0^{-1}$ symmetrisch wird und nur noch 9 unabhängige Grössen zur Beschreibung des Materials benötigt werden. Die Einträge der Matrix $\mathbf{C}_0^{-1} = \mathbf{S}$ werden auch als Elastizitätszahlen

bezeichnen. Die Notation erfolgt dann mit $s_{ij}=s_{ji}$, wie sie auch [Neuhaus 1981] in seiner Untersuchung von Fichtenholz verwendet. Die Elastizitätsmoduln, Schubmoduln und Querdehnzahlen variieren in Abhängigkeit der Holzfeuchte ω . Für Fichte wurden Feuchteabhängigkeiten mittels Polynom 3.Ordnung: $P_{3,0}=b_0+b_1\omega+b_2\omega^2+b_3\omega^3$ berücksichtigt [Neuhaus 1981]. Für Buche und Esche aus [Hering 2011] und [Niemz u.a. 2014] wurde ein Polynom 1.Ordnung $P_{1,0}=b_0+b_1\omega$ verwendet. Eine Zusammenfassung der benötigten Parameter ist in Tabelle 23 gegeben.

Plastizität und Festigkeit: Zur Beschreibung des Materialversagens werden ingenieurmässig häufig Festigkeiten verwendet, welche die maximal aufnehmbare Spannung vor dem Bruch darstellen. Das Versagen eines Materials kann, wenn es sich ausgeprägt plastisch verhält, aber auch durch eine maximal zulässige Dehnung beschrieben werden. In [Hassani 2015] sind die drei nachfolgenden grundlegende Aussagen zum Versagen von Holz getroffen. Sie wurden anhand von experimentellen ein- und mehrachsigen Druck- und Zugversuchen getroffen.

- Holz weist unter Zug- und Schubbeanspruchung sprödes Versagen auf. Unter Druckbeanspruchungen hingegen ist das Verhalten ausgeprägt inelastisch.
- Für Druckbeanspruchungen wurden zwei aufeinanderfolgende Vorgänge festgestellt (siehe [Mackenzie-Helnwein u.a. 2003]). Dies sind der Zellkollaps und für grössere, nicht elastische Dehnungen, die Verfestigung und Verdichtung der kollabierten Zellen.
- Die plastische Verfestigung in den verschiedenen anatomischen Richtungen ist nur schwach gekoppelt, da verschiedene richtungsabhängige, mikromechanische Mechanismen auf der Zellebene agieren.

Abbildung 10 zeigt die prinzipiellen Spannungs-Dehnungs-Diagramme für radialen und longitudinalen Druck. Eine ausführlichere Diskussion der Versagensarten findet sich in [Bodig u. Jayne 1982, Schmidt u. Kaliske 2006 und Schmidt 2009].

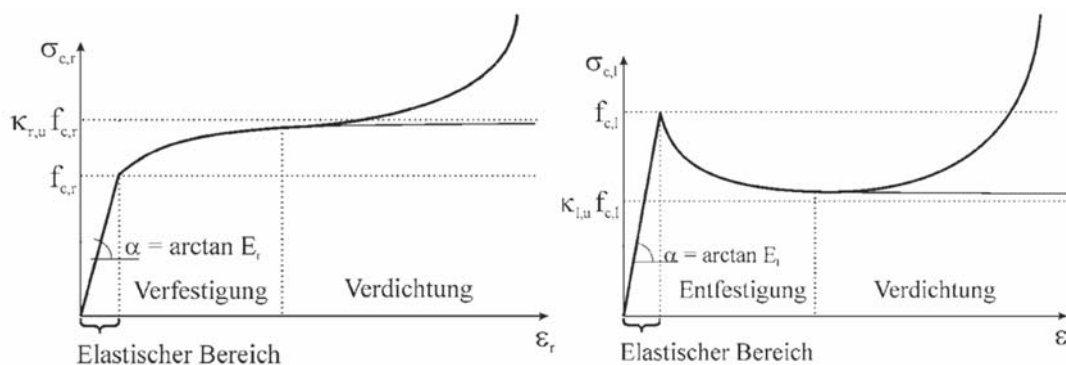


Abbildung 10: Spannungs-Dehnungs-Diagramme für Druck radial (l) und Druck longitudinal (r) aus [Schmidt u. Kaliske 2006].

Mehrflächenplastizität: Grundlegend für die Beschreibung des plastischen Verhaltens sind Fließflächen, mit denen der elastische Bereich vom inelastischen Bereich abgegrenzt wird. Einfache Modelle nutzen für Holz elliptische Fließflächen wie sie in [Hoffman 1967] oder [Tsai u. Wu 1971] beschrieben sind. Ihr Vorteil ist die unkomplizierte Anwendung, jedoch bilden sie das Verhalten der Aussagen (a) und (c) schlecht nach. Das andere Extrem ist die Beschreibung der Fließfläche durch je eine Fläche und Fließbedingung je Beanspruchungsart und -richtung. Ein Überblick über die verschiedenen Ansätze ist in [Hassani u.a. 2014] und [Sandhaas 2012] gegeben. Im Folgenden soll das Mehrflächenplastizitätsmodell von [Hassani 2015] näher betrachtet werden. Es nutzt eine Fließfläche ähnlich der in [Schmidt 2009] bestehend aus drei unabhängigen Versagensmechanismen in den anatomischen Richtungen unter

Druck. Zur Berücksichtigung der Feuchteinflüsse müssen alle benötigten Größen in Abhängigkeit der Holzfeuchte definiert werden. Der Übergang vom elastischen zum inelastischen Verhalten ist im Spannungsraum für alle drei Teilflächen mittels

$$f_l(\boldsymbol{\sigma}, \alpha_l, \omega) = \mathbf{a}_l(\omega) : \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{b}_l(\omega) : \boldsymbol{\sigma} + q_l(\alpha_l, \omega) - 1 \quad l = R, T, L \quad (1.10)$$

definiert. Dies entspricht der Definition des Versagenskriteriums als Polynom 2.Ordnung nach [Tsai u. Wu1971]. Mit α_l ist die interne Variable des Dehnungszustandes in den anatomischen Richtungen bezeichnet. Der Vektor $\mathbf{a}_l$ und die Matrix $\mathbf{b}_l$ beinhalten die Festigkeiten und werden nachfolgend definiert. Zunächst soll mit q_l aber die skalare Variable der Verfestigung definiert werden.

Das Verfestigungsverhalten wird durch den in [Hering u. Niemz 2012] gegebenen mathematischen Ansatz beschrieben, der erfolgreich auf das Verhalten von Buche unter Druck angewendet wurde. Der Ansatz basiert auf modifizierten Ramberg-Osgood-Kurven von verfügbaren Versuchsdaten, die mittels dem Exponentialansatz

$$q_l(\alpha_l, \omega) = (\beta_{0l}\omega + \beta_{1l})(1 - e^{-\beta_{2l}\alpha_l}) / f_{c,l}(\omega) \quad l = R, T, L \quad (1.11)$$

approximiert wurden. Die Skalare β_{0l} , β_{1l} und β_{2l} , sind dabei Materialkonstanten und mit $f_{c,l}(\omega)$ ist die Druckfestigkeit bei der aktuellen Holzfeuchte bezeichnet. Die Druckfestigkeit ist notwendig um die aktuelle Verfestigungsvariable $q_l(\alpha_l, \omega)$ zu normieren, damit die Konsistenz mit dem Ausdruck (1.10) gewährleistet ist. Die Festigkeiten können dem nachfolgenden Abschnitt entnommen werden. Die Parameter zur Bestimmung der Verfestigungsvariable sind in Tabelle 4 für Buche aufgeführt. Für Fichte und Esche wurden die gleichen Werte verwendet, die Verfestigungsvariable aber mit den Verhältnissen der Rohdichten skaliert. Entgegen den Arbeiten [Mackenzie-Helnwein u.a. 2003] und [Schmidt u. Kaliske 2006] wird die Verdichtung vernachlässigt.

Tabelle 4: Koeffizienten zur Bestimmung der feuchteabhängigen Verfestigungsvariable für Buche nach [Hering 2012] und [Gatteln 2013].

Richtung l	Buche		
	β_{0l} [MPa]	β_{1l} [MPa]	β_{2l} [MPa]
Radial	-0.1123	2.8765	55.29
Tangential	-0.1411	3.2736	65.56
Longitudinal	0.0	2.518	95.3

Die Festigkeitstensoren $\mathbf{a}_l$ und $\mathbf{b}_l$ wurden analog zu [Schmidt u. Kaliske 2006] für das *RTL*-Koordinatensystem definiert. Die Druckfestigkeiten sind dabei in dieser Definition mit negativen Vorzeichen einzusetzen.

Druck radial:

$$\begin{aligned}
 a_R &= \begin{bmatrix} \frac{1}{f_{c,R}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad \text{für Fichte, Buche und Esche} \\
 b_R &= \text{diag} \left[0, \frac{0.4000}{f_{c,T}^2}, \frac{-0.2500}{f_{c,L}f_{t,L}}, \frac{0.4000}{f_{s,RT}^2}, \frac{0.3300}{f_{s,RL}^2}, \frac{0.3300}{f_{s,TL}^2} \right] \quad \text{für Fichte} \\
 b_R &= \text{diag} \left[0, \frac{0.0805}{f_{c,T}^2}, \frac{-0.1490}{f_{c,L}f_{t,L}}, \frac{0.1080}{f_{s,RT}^2}, \frac{0.1125}{f_{s,RL}^2}, \frac{0.0705}{f_{s,TL}^2} \right] \quad \text{für Buche} \\
 b_R &= \text{diag} \left[0, \frac{0.1095}{f_{c,T}^2}, \frac{-0.1375}{f_{c,L}f_{t,L}}, \frac{0.1080}{f_{s,RT}^2}, \frac{0.1125}{f_{s,RL}^2}, \frac{0.0705}{f_{s,TL}^2} \right] \quad \text{für Esche}
 \end{aligned} \tag{1.12}$$

Druck tangential:

$$\begin{aligned}
 a_T &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{f_{c,T}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad \text{für Fichte, Buche und Esche} \\
 b_T &= \text{diag} \left[\frac{0.4000}{f_{c,R}^2}, 0, \frac{-0.2500}{f_{c,L}f_{t,L}}, \frac{0.4000}{f_{s,RT}^2}, \frac{0.3300}{f_{s,RL}^2}, \frac{0.3300}{f_{s,TL}^2} \right] \quad \text{für Fichte} \\
 b_T &= \text{diag} \left[\frac{0.1345}{f_{c,R}^2}, 0, \frac{-0.1375}{f_{c,L}f_{t,L}}, \frac{0.1080}{f_{s,RT}^2}, \frac{0.1125}{f_{s,RL}^2}, \frac{0.0705}{f_{s,TL}^2} \right] \quad \text{für Buche} \\
 b_T &= \text{diag} \left[\frac{0.0805}{f_{c,R}^2}, 0, \frac{-0.1490}{f_{c,L}f_{t,L}}, \frac{0.1080}{f_{s,RT}^2}, \frac{0.1125}{f_{s,RL}^2}, \frac{0.0705}{f_{s,TL}^2} \right] \quad \text{für Esche}
 \end{aligned} \tag{1.13}$$

Druck longitudinal:

$$\begin{aligned}
 a_L &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{f_{c,L}} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad \text{für Fichte, Buche und Esche} \\
 b_L &= \text{diag} \left[\frac{0.3300}{f_{c,R}^2}, \frac{0.3300}{f_{c,T}^2}, 0, \frac{0.2500}{f_{s,RT}^2}, \frac{0.2500}{f_{s,RL}^2}, \frac{0.2500}{f_{s,TL}^2} \right] \quad \text{für Fichte} \\
 b_L &= \text{diag} \left[\frac{0.0665}{f_{c,R}^2}, \frac{0.0665}{f_{c,T}^2}, 0, \frac{0.0675}{f_{s,RT}^2}, \frac{0.0855}{f_{s,RL}^2}, \frac{0.0530}{f_{s,TL}^2} \right] \quad \text{für Buche} \\
 b_L &= \text{diag} \left[\frac{0.1110}{f_{c,R}^2}, \frac{0.0900}{f_{c,T}^2}, 0, \frac{0.0675}{f_{s,RT}^2}, \frac{0.0855}{f_{s,RL}^2}, \frac{0.0530}{f_{s,TL}^2} \right] \quad \text{für Esche}
 \end{aligned} \tag{1.14}$$

Die Adaption von Fichte zu Buche bzw. Esche erfolgte mittels Skalierung der Festigkeiten bei einer Holzfeuchte von $\omega=12\%$ über

$$f_i^{\text{Buche}} = f_i^{\text{Fichte}} \frac{f_i^{\text{Fichte}}(\omega=12\%)}{f_i^{\text{Buche}}(\omega=12\%)} \quad \text{bzw.} \quad f_i^{\text{Esche}} = f_i^{\text{Fichte}} \frac{f_i^{\text{Fichte}}(\omega=12\%)}{f_i^{\text{Esche}}(\omega=12\%)}. \tag{1.15}$$

Dabei wird mit i die jeweilige Festigkeit bezeichnet, beispielsweise $i=c,R$ für die radiale Druckfestigkeit. In Abbildung 11 werden die Fließflächen für $q_i=0$ bei $\omega=12\%$ von Buche und Fichte

dargestellt, wobei $\sigma_{RT} = \sigma_{RL} = \sigma_{TL} = 0$. Mit den bis hierhin beschriebenen Parametern ist das Mehrflächenplastizitätsmodell vollständig definiert werden.

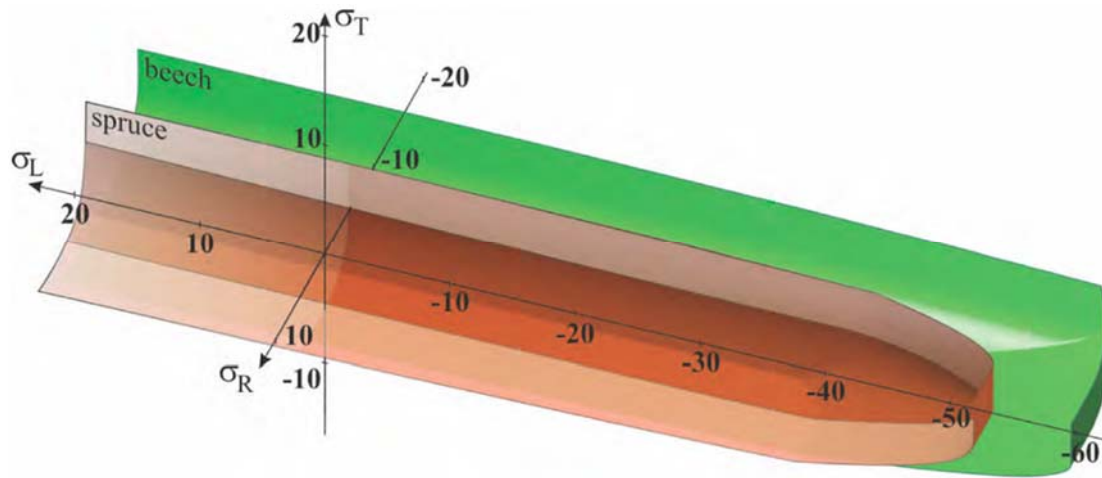


Abbildung 11: 3D-Veranschaulichung der Fließflächen von Fichte und Buche in den Hauptachsen bei $q_1=0$ und $\omega=12\%$ aus [Hassani 2015].

Implementierung der Mehrflächenplastizität:

Der verwendete allgemeine Algorithmus zur numerischen Implementierung des beschriebenen Modells ist in [Jirásek u. Bažant 2002] und [Simo u. Hughes 2001] beschrieben. Die konstitutive Beziehung der plastischen Verformungen unter Annahme einer standardmässigen assoziativen Plastizität ist durch folgende Formel gegeben. Sie wird als Fließgesetz bezeichnet und bezieht sich auf [Koiter 1953].

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl} = \sum_{l=1}^r \dot{\gamma}^l \partial_{\boldsymbol{\sigma}} f_l(\boldsymbol{\sigma}, \alpha_l, \omega) = \sum_{l=1}^r \dot{\gamma}^l (a_l(\omega) + 2b_l(\omega) : \boldsymbol{\sigma}) \quad (1.16)$$

Mit r wird die Anzahl der aktiven Fließmechanismen bezeichnet. In ähnlicher Weise folgt die Evolutionsgleichung für die Verfestigung mit Bezug auf das Verfestigungsgesetz zu

$$\dot{\boldsymbol{\alpha}} = \sum_{l=1}^r \dot{\gamma}^l \partial_{\boldsymbol{q}} f_l(\boldsymbol{\sigma}, \alpha_l, \omega) = \sum_{l=1}^r \dot{\gamma}^l \cdot \quad (1.17)$$

In den Gleichungen (1.16) und (1.17) sind $\dot{\gamma}^l$ plastische Konsistenzparameter, die die Karush-Kuhn-Tucker-Bedingungen

$$\dot{\gamma}^l \geq 0 \quad , \quad f_l(\boldsymbol{\sigma}, \alpha_l, \omega) \leq 0 \quad , \quad \dot{\gamma}^l f_l(\boldsymbol{\sigma}, \alpha_l, \omega) = 0, \quad (1.18)$$

erfüllen, ebenso wie die Konsistenzbedingungen $\dot{\gamma}^l f_l(\boldsymbol{\sigma}, \alpha_l, \omega) = 0$.

Für eine Anzahl aktiver Fließmechanismen r_{adm} und einen gegebenen Spannungszustand, sowie interne Verfestigungsvariable(n)

$$\mathbb{S}_{adm} := \{l \in \{R, T, L\} \mid f_l(\boldsymbol{\sigma}, \alpha_l, \omega) = 0\}, \quad (1.19)$$

können die Karush-Kuhn-Tucker-Bedingungen (Be- und Entlastungsbedingung) wie in [Simo u. Hughes 2002] für die Mehrflächenplastizität neu formuliert werden:

Bedingung 1: Wenn $f_l(\boldsymbol{\sigma}, \alpha_l, \omega) < 0$ oder $f_l(\boldsymbol{\sigma}, \alpha_l, \omega) = 0$ und $df_l(\boldsymbol{\sigma}, \alpha_l, \omega) < 0$ folgt $d\gamma' = 0$. Dies beschreibt einen Fall von elastischer Be- oder Entlastung, bei dem sich plastische Dehnungen und Verfestigungsvariable(n) nicht ändern.

Bedingung 2: Wenn $f_l(\boldsymbol{\sigma}, \alpha_l, \omega) = 0$ und $df_l(\boldsymbol{\sigma}, \alpha_l, \omega) = 0$, dann gilt $d\gamma' \geq 0$. Dies entspricht plastischer Beanspruchung. Die Folge sind plastische Verformungen und Änderungen der damit verbundenen internen Variable(n).

Dementsprechend wird, basierend auf Gleichung (1.19) und den Be- und Entlastungsbedingungen, für $1 \leq l \leq r_{adm}$ mit

$$S_{act} := \left\{ l \in S_{adm} \mid f_l(\boldsymbol{\sigma}, \alpha_l, \omega) = 0 \right\}$$

die Anzahl aktiver Fließmechanismen beschrieben. Mit den Gleichungen (1.16), (1.17) und den Karush-Kuhn-Tucker-Bedingungen entsteht ein System von nichtlinearen Gleichungen mit unbekanntem $d\gamma'$. Die Lösung kann mit iterativen numerischen Verfahren, wie beispielsweise dem Newton-Raphson-Verfahren, gefunden werden.

Ramberg-Osgood: Eine der einfachsten Möglichkeiten plastisches Materialverhalten rechnerisch zu erfassen ist die Ramberg-Osgood-Gleichung. Sie ist jedoch auf die Anwendung bei einachsiger Beanspruchung limitiert, daher wird sie an dieser Stelle nicht näher behandelt. In [Hering 2011] ist eine ausführliche Beschreibung mit Formeln für die konkrete Anwendung gegeben.

Festigkeiten: Auch die Festigkeiten sind wie viele andere Eigenschaften des Holzes abhängig von der Holzfeuchte. Für die kontinuierliche Definition der Festigkeiten über den kompletten Feuchtebereich wurde der Polynomansatz 1. Ordnung $P_{1,0} = b_0 + b_1 \omega$ für alle Holzarten genutzt. Die Parameter zur Beschreibung der Festigkeiten sind in Tabelle 1 nach [Hassani 2015] zusammengefasst. Die zugrundeliegenden experimentellen Daten sind in [Schmidt u. Kaliske 2006] und [Saft u. Kaliske 2011] für Fichte, in [Hering 2011] für Buche und in [Niemz u.a. 2014] für Esche zu finden. Die in Tabelle 5 angegebenen Parameter zur Bestimmung der Festigkeiten von Esche wurden dem vorliegenden implementierten Materialmodell entnommen. In Ermangelung von experimentellen Daten wurden für die Schubfestigkeiten die gleichen Parameter wie für Buchenholz verwendet.

Tabelle 5: Parameter zur Bestimmung der Festigkeiten von Fichte und Buche nach [Hassani 2015] erweitert um Werte für Esche.

Festigkeit	Fichte		Buche		Esche	
	b_1 [MPa/%]	b_0 [MPa]	b_1 [MPa/%]	b_0 [MPa]	b_1 [MPa/%]	b_0 [MPa]
$f_{c,R}$	-0.27	9.24	-0.5789	20.32	-0.4381	15.61
$f_{c,T}$	-0.27	9.24	-0.2084	7.965	-0.5728	18.35
$f_{c,L}$	-2.15	68.8	-3.504	103.9	-1.914	68.6
$f_{t,L}$	-3.275	104.8	-1.465	106.9	-1.061	144.0
$f_{cs,RT}$	-0.063	2.585	-0.1213	4.982	-0.1213	4.982
$f_{s,RL}$	-0.227	9.064	-0.3884	15.51	-0.3884	15.51
$f_{s,TL}$	-0.178	7.477	-0.3861	16.21	-0.3961	16.21

Viskoelastizität: Kriechen und Spannungsrelaxation werden als viskoelastische Eigenschaften bezeichnet. das Kriechen teilt sich in drei grundsätzliche Etappen auf, namentlich primäres, sekundäres und tertiäres Kriechen. Eine Veranschaulichung ist in Abbildung 12 gegeben. Nachfolgende Ausführungen begrenzen sich auf das primäre Kriechen. Da die Verformungen infolge primären Kriechens oder Spannungsrelaxation nahezu identisch sind, werden sie häufig, wie auch hier, mit einem einzelnen Zusammenhang beschrieben. Zur Beschreibung des Materialverhaltens werden verschiedene Kombinationen aus Federn (elastisch) und Dämpfern (viskos) verwendet. Grundlegende Kombinationen sind der *Maxwell*-Körper als Reihenanordnung einer Feder und eines Dämpfers und der *Kelvin*-Körper als Parallelanordnung beider Elemente.

Der vorliegende Ansatz nutzt eine Aneinanderreihung von *Kelvin*-Körpern und beschreibt einen vollständig reversiblen Prozess. Die treibende Spannung des i -ten *Kelvin*-Körpers ist mit

$$\sigma_i^{ve} = \sigma - \mathbf{C}_i : \boldsymbol{\varepsilon}_i^{ve} \quad (1.20)$$

gegeben. Mit $\mathbf{C}_i$ wird die viskoelastische Steifigkeitsmatrix bezeichnet. Die viskoelastische Dehnungsrate $d\boldsymbol{\varepsilon}_i^{ve}$ wird als lineare Funktion der treibenden Spannung σ_i^{ve} definiert zu:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_i^{ve} = \frac{1}{\tau_i} \mathbf{C}_i^{-1} : \sigma_i^{ve} . \quad (1.21)$$

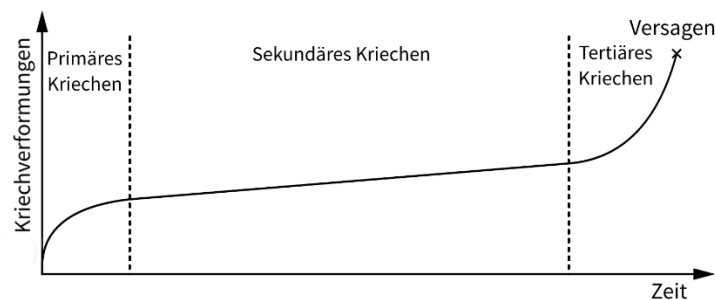


Abbildung 12: Prinzipieller zeitlicher Verlauf der Kriechverformungen.

Durch Einsetzen von Gleichung (1.20) folgt

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_i^{ve} + \frac{1}{\tau_i} \boldsymbol{\varepsilon}_i^{ve} = \frac{1}{\tau_i} \mathbf{C}_i^{-1} : \sigma(t), \quad (1.22)$$

wobei $\mathbf{C}_i^{-1}$ und τ_i die viskoelastische Nachgiebigkeitsmatrix und die charakteristische Verzögerungszeit des i -ten *Kelvin*-Körpers bezeichnen. Entsprechend [Mackenzie-Helnwein u. Hanhijärvi 2003a/b] und [Fortino u.a. 2009] wird die viskoelastische Nachgiebigkeitsmatrix proportional zur elastischen Nachgiebigkeitsmatrix angenommen. Der Proportionalitätsfaktor γ_i^{ve} ergibt sich zu $\gamma_i^{ve} = \mathbf{C}_0^{-1} / \mathbf{C}_i^{-1}$.

Für Fichtenholz wurden die γ_i^{ve} aus [Fortino u.a. 2009] übernommen, wohingegen sie für Buchenholz aus den Ergebnissen von [Hering u. Niemz 2012] berechnet wurden. Dafür wurde die feuchteabhängige Komponente J_L^{ve} der viskoelastischen Nachgiebigkeitsmatrix genutzt, die das Kriechverhalten in longitudinaler Richtung beschreibt. Für einen einzelnen *Kelvin*-Körper i ergibt sich

$$J_{iL}^{ve} = (J_{i1}\omega + J_{i0})(1 - e^{-t/\tau_i}) . \quad (1.23)$$

Damit kann γ_i^{ve} mittels des Verhältnisses von J_{iL}^{ve} zu E_L berechnet werden. Die Benötigten Parameter zur Beschreibung der Viskoelastizität sind in Tabelle 6 zusammengefasst für Fichte und Buche. Für Eschenholz wurden die Werte der Buche übernommen, da keine entsprechenden experimentellen Ergebnisse verfügbar sind.

Tabelle 6: Parameter zur Beschreibung des viskoelastischen Materialverhaltens für Fichte nach Gleichung (1.23) [Fortino u.a. 2009] und für Buche nach [Hering u. Niemz 2012].

i [-]	Fichte		Buche		
	γ_i^{ve} [-]	τ_i [h]	J_{i1} [MPa ⁻¹ /°]	J_{i0} [MPa ⁻¹]	τ_i [h]
1	1/0.085	2.4	1.11e-6	-4.99e-6	0.82
2	1/0.035	24	9.84e-7	-5.22e-6	60.86
3	1/0.070	240	8.51e-7	-5.97e-6	8.90
4	1/0.200	2400	2.82e-6	1.03e-5	3427.65

Wie aus [Mackenzie-Helnwein u. Hanhijärvi 2003a/b] und [Fortino u.a. 2009] hervorgeht, wird die viskoelastische Dehnung des i -ten *Kelvin*-Körpers durch Integration von Gleichung (1.22) berechnet zu

$$\epsilon_{i,n+1}^{ve} = \epsilon_{i,n}^{ve} \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_i}\right) + \int_{t_n}^{t_{n+1}} \frac{C_i^{-1} : \sigma(t)}{\tau_i} \exp\left(-\frac{t_{n+1}-t}{\tau_i}\right) dt , \quad (1.24)$$

Dies gilt für einen spannungsgesteuerten Vorgang mit dem Zeitschritt $\delta t = t_{n+1} - t_n$ und den viskoelastischen Dehnungstensoren $\epsilon_{i,n+1}^{ve}$, $\epsilon_{i,n}^{ve}$ zur Zeit t_{n+1} und t_n .

Mechano-sorptiver Effekt: Der mechano-sorptive Effekt lässt sich am einfachsten anhand eines Beispiels erklären, wie es in Abbildung 13 veranschaulicht ist. Unter dem auch mechano-sorptives Kriechen genannten Effekt versteht man, dass die Verformungen eines zugbeanspruchten feuchten Probekörpers deutlich grösser sind, als die Summe der eines trockenen belasteten Probekörpers und den Verformungen infolge Quellen. Der Vorgang ist auch in der entgegengesetzten Richtung mit Druckspannungen und Trocknung zu beobachten. Experimentelle Arbeiten zu diesem Thema wurden von [Hanhijärvi 2000, Mårtensson 1994, Ranta-Maunus 1975] durchgeführt. In [Hering 2011] und [Hassani 2015] findet sich eine Auflistung weiterer Arbeiten. Der mechano-sorptive Effekt ist ausgeprägter für höhere Holzfeuchte und beeinflusst von der Änderungsrate der Holzfeuchte. Unter zyklischen Feuchteänderungen wachsen die Verformungen an, was bis zum Versagen durch Ermüdung führen kann.

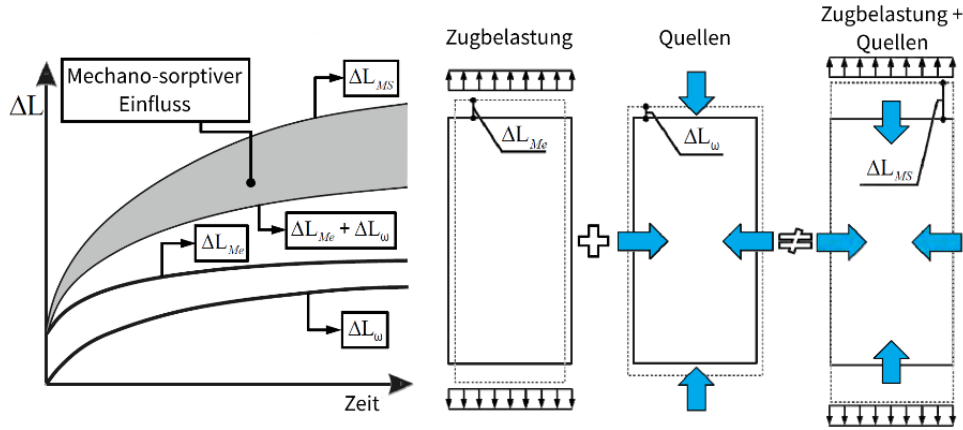


Abbildung 13: Veranschaulichung des Mechano-sorptiven Effektes mit Längenänderungen aus Zugbeanspruchung ΔL_{Me} , Quellen ΔL_{ω} und kombinierter Belastung ΔL_{MS} modifiziert aus [Hassani 2015].

Wie für die viskoelastischen Eigenschaften können auch in diesem Fall *Kelvin*-Körper genutzt werden um das Verhalten zu beschreiben. In [Mackenzie-Helnwein u. Hanhijärvi 2003a/b] wird die Plastizität als Teil der Mechano-Sorption modelliert. Die nachfolgende Betrachtung nach [Hassani 2015] orientiert sich jedoch an den Ausführungen in [Fortino u.a. 2009], die die mechano-sorptiven Einflüsse über separate Kriechdehnungen berücksichtigt. Die treibende Spannung ist analog zu Gleichung (1.20) mit

$$\sigma_j^{ms} = \sigma - \mathbf{C}_j : \epsilon_j^{ms}, \quad (1.25)$$

gegeben, wobei $\mathbf{C}_j$ die mechano-sorptive Steifigkeitsmatrix bezeichnet. Ebenso wird die zugehörige Dehnungsrate wie in Gleichung (1.21) definiert:

$$\dot{\epsilon}_j^{ms} = \frac{|\dot{\omega}|}{\mu_j} \mathbf{C}_j^{-1} : \sigma_j^{ms}. \quad (1.26)$$

Mit μ_j wird dabei die charakteristische Holzfeuchtigkeit bezeichnet und die mechano-sorptive Nachgiebigkeitsmatrix $\mathbf{C}_j^{-1}$ wird eingeführt. Nachfolgend kann eine Bestimmungsgleichung für einen einzelnen *Kelvin*-Körper zu

$$\dot{\epsilon}_j^{ms} + \frac{|\dot{\omega}|}{\mu_j} \epsilon_j^{ms} = \frac{|\dot{\omega}|}{\mu_j} \mathbf{C}_j^{-1} : \sigma(t) \quad (1.27)$$

bestimmt werden. Aus der Analogie zu Gleichung (1.22) ergibt sich für Gleichung (1.27) die Lösung

$$\epsilon_{j,n+1}^{ms} = \epsilon_{j,n}^{ms} \exp\left(-\frac{|\Delta\omega|}{\mu_j}\right) + \int_{\omega_n}^{\omega_{n+1}} \frac{\mathbf{C}_j^{-1} : \sigma(t)}{\mu_j} \exp\left(-\frac{|\omega_{n+1} - \omega(t)|}{\mu_j}\right) d|\omega(t)| \quad (1.28)$$

mit einem Feuchtigkeitsinkrement anstelle eines Zeitinkrements. Mit $|\Delta\omega| = |\omega_{n+1} - \omega_n|$ ist dabei der absolute Wert des Feuchtigkeitsinkrements bezeichnet. Die mechano-sorptiven Dehnungen zu den Zeiten t_{n+1} und t_n werden mit $\epsilon_{j,n+1}^{ms}$ und $\epsilon_{j,n}^{ms}$ notiert.

Für die Berechnung der mechano-sorptiven Nachgiebigkeitsmatrix $\mathbf{C}_j^{-1}$ wurde ein vergleichbarer Ansatz gewählt wie für die viskoelastische Nachgiebigkeitsmatrix. Der skalare dimensionslose Wert $\gamma_j^{ms} = \mathbf{C}_0^{-1} / \mathbf{C}_j^{-1}$ wird anhand der Komponenten in longitudinaler und tangentialer

Richtung der mechano-sorptiven Nachgiebigkeitsmatrix bestimmt. Konkrete Werte für Fichte sind dafür in [Fortino u.a. 2009] zu finden. Diese wurden für drei in Reihe angeordneten *Kelvin*-Körper anhand experimenteller Daten von [Toratti 1992] und [Toratti u. Svensson 2002] ermittelt. Die elementweise mechano-sorptive Nachgiebigkeitsmatrix nimmt die Form

$$\mathbf{C}_j^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{J_{jT0}^{ms} E_{T0}}{E_R} & -\frac{J_{jT0}^{ms} E_{T0} \nu_{TR}}{E_T} & -\frac{J_{jT0}^{ms} E_{T0} \nu_{LR}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{J_{jT0}^{ms} E_{T0} \nu_{RT}}{E_R} & \frac{J_{jT0}^{ms} E_{T0}}{E_T} & -\frac{J_{jT0}^{ms} E_{T0} \nu_{LT}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{J_{jT0}^{ms} E_{T0} \nu_{RL}}{E_R} & -\frac{J_{jT0}^{ms} E_{T0} \nu_{TL}}{E_T} & J_{jL}^{ms} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{J_{jT0}^{ms} E_{T0}}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{J_{jT0}^{ms} E_{T0}}{G_{RL}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{J_{jT0}^{ms} E_{T0}}{G_{TL}} \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

an, wobei die zugehörigen Werte für die Einträge J_{jT0}^{ms} und J_{jL}^{ms} , sowie die charakteristische Holzfeuchtigkeit μ_j in Tabelle 7 aufgelistet sind. Da für Buche und Esche keine Daten vorliegen, werden dafür die Werte der Fichte mittels des Verhältnisses der Rohdichten gewichtet.

Tabelle 7: Longitudinale und tangential Komponenten der mechano-sorptiven Nachgiebigkeitsmatrix (Gleichung (1.29)) für Fichte, Buche und Esche nach [Hassani 2015] gemäss [Fortino u.a. 2009].

		Fichte		Buche		Esche	
j [-]	μ_j [-]	J_{iT0}^{ms} [1/MPa]	J_{jL}^{ms} [1/MPa]	J_{iT0}^{ms} [1/MPa]	J_{jL}^{ms} [1/MPa]	J_{iT0}^{ms} [1/MPa]	J_{jL}^{ms} [1/MPa]
1	1	0.0006	0.175/ E_L	0.0004	0.1142/ E_L	0.0005	0.1371/ E_L
2	10	0.0005	0.49/ E_L	0.0004	0.32/ E_L	0.0005	0.3838/ E_L
3	100	0.005	0.035/ E_L	0.0033	0.0228/ E_L	0.0039	0.0274/ E_L

2.3.2. Hygro-mechanisches Verhalten der Adhäsive

Es gibt eine Vielzahl von Klebstoffen, die genutzt werden um Holzelemente, seien es Späne, Furniere oder Bretter, miteinander zu verkleben. Sie zeichnen sich durch unterschiedliche mechanische Eigenschaften wie Feuchtebeständigkeit, Elastizität oder Kriechneigung aus. Ein Überblick über die für Holzverklebungen gebräuchlichen Klebstoffe und eine grobe Einteilung ist in Tabelle 8 gegeben. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich wie [Hassani 2015] auf die Betrachtung von Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harze (MUF), Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harze (PRF) und Polyurethan (PUR) als 1K-System.

Tabelle 8: Überblick und Einteilung gebräuchlicher Klebstoffe in der Holzindustrie ohne Anspruch auf Vollständigkeit, sowie maximale Feuchtegehalte nach [Wimmer u.a. 2013] und Ausdehnungskoeffizienten aus [Hassani 2015] von PUR, MUF und PRF.

Physikalisch aushärtend	ω_{max} [%]	β [%/°C]
Polyvinylacetat	PVAc	
Glutinleim		
Chemisch aushärtend		
Polyadditionsklebstoffe		
Epoxidharze (meist 2K)	EP	

Polyurethane (1K oder 2K)	PUR	3.4293	0.171628
Polykondensationsklebstoffe			
Harnstoff-Formaldehyd-Harze	UF		
Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harze	MUF	24.8351	0.198063
Phenol-Formaldehyd-Harze	PF		
Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harze	PRF	18.6259	0.172869
Polyisocyanate	NCO		

Wie bereits erwähnt unterscheiden sich Klebstoffe in ihrem mechanischen Verhalten deutlich. Typischerweise treten einzelne Phänomene nicht bei allen Klebstoffen auf, weshalb nicht für jeden Klebstoff jedes mögliche Materialverhalten berücksichtigt werden muss. Im Allgemeinen handelt es sich bei Klebstoffen aber um isotrope Materialien, das heisst, ihre Eigenschaften variieren nicht aufgrund verschiedener Orientierungen.

Ebenso wie bei Holz variieren die mechanischen Eigenschaften der Klebfuge mit dem Feuchtegehalt des Klebstoffes. In Analogie zu Gleichung (1.1) kann für Klebstoffe auch ein Feuchtegehalt ω definiert werden. Für Klebstoffe liegt der maximale Feuchtegehalt typischerweise bei unter 50%, wie auch in Tabelle 8 ersichtlich. Der Feuchtegehalt unterscheidet sich je nach Umgebungsbedingungen, wie relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur. In [Wimmer u.a. 2013] sind die Sorptionsisothermen experimentell ermittelt wurden um das hygrische Verhalten der Klebstoffe zu beschreiben. Ebenso wie Holz quellen und schwinden auch Klebstoffe. Die Ausdehnungskoeffizienten β je % Feuchteänderung sind in Tabelle 8 mit angegeben.

In [Wimmer u.a. 2013] wurden auch die Diffusionskoeffizienten für die Klebstoffe ermittelt. Die benötigten Parameter sind in Tabelle 24 zusammengefasst, sodass die beschriebenen Formeln rund um das Ficksche Gesetz angewendet werden können. Im Gegensatz zu den Ausführungen für Holz genügt für Klebstoffe ein Diffusionskoeffizient

$$D(\omega) = D_0 e^{\alpha_0 \omega}, \quad (1.30)$$

da es sich um isotropes Material handelt.

Zur Beschreibung des elastischen Materialverhaltens wird das Hook'sche Gesetz für isotropes Werkstoffe verwendet. Die Steifigkeitsmatrix $\mathbf{C}_0$ ist in diesem Falle nur von zwei Kenngrössen abhängig. Dies sind das Elastizitätsmodul und die Querdehnzahl. Die Berechnung des Elastizitätsmoduls für einen spezifischen Feuchtezustand erfolgt über einen Polynomansatz 3. Ordnung $P_{3,0} = a_0 + a_1 \omega + a_2 \omega^2 + a_3 \omega^3$, wobei die Parameter a_i in Tabelle 25 zusammengefasst sind. Die Querdehnzahl wird mit $\nu=0.3$ als konstant angenommen.

Einzig PUR zeigt, wie [Kläusler 2014] beschrieben, ausgeprägt plastisches Verhalten. Aufgrund der Isotropie kann der Fliessmechanismus durch eine einzelne Fliessfläche beschrieben werden. Das Fliessgesetz wird analog den Fliessgesetzen für Holz definiert. Die Verfestigungsvariable wird mit

$$q(\alpha, \omega) = (c_0 + c_1 \omega) \alpha^{c_2} \quad (1.31)$$

definiert. Neben dem Verfestigungsgesetz wird die Festigkeit benötigt, die analog zum Elastizitätsmodul mit einem Polynomansatz 3. Ordnung in Abhängigkeit der Feuchtigkeit definiert wird. Entsprechende Zahlenwerte für die benötigten Parameter sind in Tabelle 25 aufgelistet.

Verschiedene Klebstoffe kriechen unter Langzeitbeanspruchungen. Die formelmässige Erfassung dieses Phänomens kann wiederum über eine Reihe von *Kelvin-Körpern* geschehen. In

[Hassani 2015] werden sechs dieser Körper genutzt um das viskoelastische Kriechen abzubilden. Die Formeln sind dieselben, wie für Holz dargelegt. Die notwendigen Kenngrößen aus [Hassani 2015] sind in Tabelle 27 zusammengefasst.

2.3.3. Schädigungsentwicklung in Schichtholz

Als Delaminierung bezeichnet man das Versagen der Verklebung von Lamellen. Hervorgerufen wird das Versagen durch Quellen und Schwinden der einzelnen Lamellen. Aufgrund der in tangentialer Richtung grösseren Änderungen als in radialer Richtung, verbiegen sich die einzelnen Bretter und erzeugen daher Spannungen in der Klebfuge. Landläufig wird dieses Phänomen bei einzelnen Brettern als «*schüsseln*» bezeichnet. Insbesondere an den Rändern kann es dabei neben Scherspannungen auch zu Zugspannungen senkrecht zur Klebfuge kommen, die zu Delaminierung führen können. Für BSH schreibt die [DIN EN 14080] daher vor, dass alle Lamellen so orientiert sein müssen, dass sie die Markröhre auf der gleichen Seite haben. Einzige Ausnahme bildet die Randlage, die aus Gründen der Bearbeitbarkeit entgegengesetzt orientiert sein darf. Einzelne Feuchtwechsel sind meist kein Problem, im Leben eines Bauteils kommt es aber meist zu einem häufigen Wechsel der Feuchtigkeit, insbesondere wenn es der Bewitterung ausgesetzt ist. Diese Art zyklische Beanspruchung bringt eine gewisse Hysterese mit sich, wodurch die Delaminierung begünstigt wird.

Wie aus Abschnitt 2.3.1 hervorgeht, weist Buchenholz deutliche grössere Quell- und Schwinddehnungen auf als Fichte. Dieses Verhalten wirkt sich auch auf die Dimensionsstabilität des gesamten Werkstoffs aus. Die entstehenden Zugspannungen bei hybriden Konstruktionen können daher um ein Vielfaches höher ausfallen, als bei konventionellen Konstruktionen, die rein aus Nadelholz bestehen. Aus diesem Grund sind hybride Bauteile nach [DIN EN 14080] und [DIN EN 16351] noch nicht allgemein geregelt.

Experimentelle Untersuchungen und Simulationen mit Feuchteänderungen sind in [Hassani 2015] und [Hering 2011] zu finden. Diese zeigen, dass neben der Delaminierung auch die Spannungen im Holz so gross werden können, dass sich erhebliche Risse bilden können.

2.3.4. Materialmodell: Aufbau und Implementierung

Ausgehend von den in den Abschnitten 2.3.1 und 2.3.2 beschriebenen Materialeigenschaften erfolgt hier die Beschreibung des Materialmodells in seiner Implementierung für Abaqus. Das Materialmodell beruht im Kern auf der Aufteilung der Gesamtdehnung in einzelne Komponenten, wie in Abbildung 14 illustriert ist. Je nach Material unterscheiden sich die berücksichtigten Dehnungskomponenten. Aus der Gesamtdehnung wird am Ende die Gesamtspannung errechnet.

Komponenten des Holzmodells: Das Materialmodell nach [Hassani u.a. 2014] berücksichtigt für Holz

- o elastische Dehnungen ϵ^{el} ,
- o irreversible plastische Dehnungen ϵ^{pl} ,
- o Dehnungen infolge Quellen und Schwinden ϵ^{ω} ,
- o viskoelastisches Kriechen ϵ^{ve} und
- o mechano-sorptives Kriechen ϵ^{ms} .

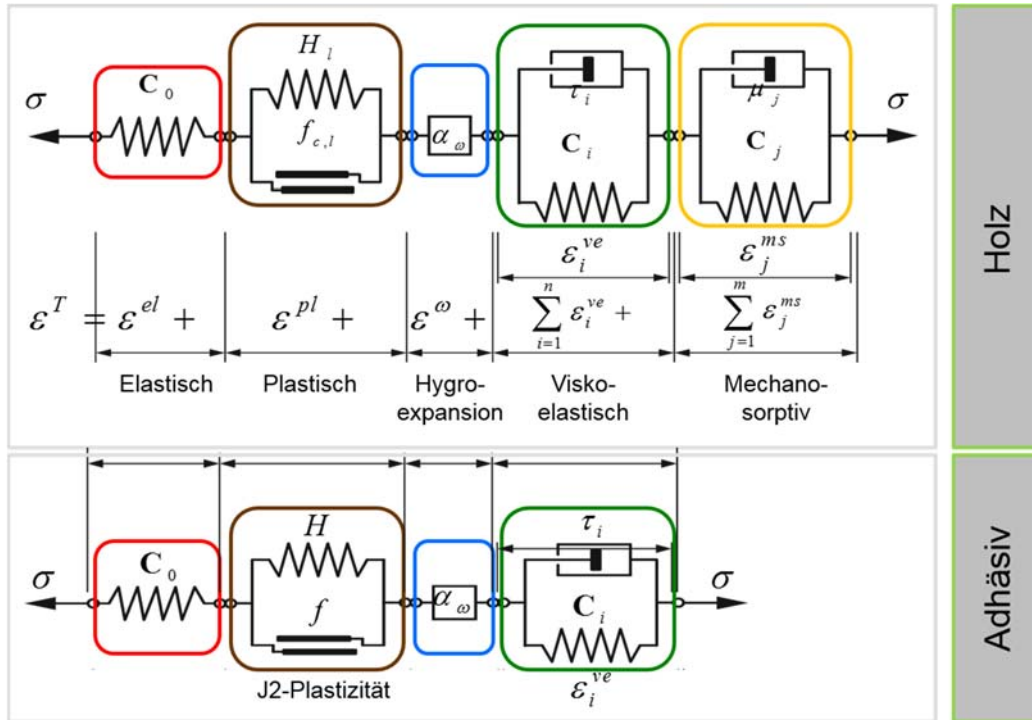


Abbildung 14: Schematische Darstellung des konstitutiven Materialmodells aus [Hassani u.a. 2014].

Die Gesamtdehnungen $\boldsymbol{\varepsilon}$ ist als Summe aller Einzeldehnungen nach [Mackenzie-Helnwein u. Hanhijärvi 2003a/b] und [Fortino u.a. 2009] mit

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^{el} + \boldsymbol{\varepsilon}^{pl} + \boldsymbol{\varepsilon}^{\omega} + \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\varepsilon}_i^{ve} + \sum_{j=1}^m \boldsymbol{\varepsilon}_j^{ms} \quad (1.32)$$

definiert. Weiterhin folgt für die Formänderungsenergie

$$\psi = \psi(T, \omega, \boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\varepsilon}^{pl}, \boldsymbol{\varepsilon}_i^{ve}, \boldsymbol{\varepsilon}_j^{ms}, \alpha_l) = \phi(T, \omega) + \psi^{el} + \psi^{ve} + \psi^{ms} + \frac{1}{2} \sum_{l=1}^r q_l \alpha_l. \quad (1.33)$$

In diesem Zusammenhang wird mit $\phi(T, \omega)$ ein allgemeiner Ausdruck für die thermische Energie bezeichnet, wobei der Temperatureinfluss im beschriebenen Materialmodell vernachlässigt wird. Alle anderen relevanten Größen sind jedoch in Abhängigkeit der aktuellen Holzfeuchte ω beschrieben. Für die einzelnen Formänderungsenergien folgt

$$\begin{aligned} \psi^{el} &= \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}^{el} : \mathbf{C}_0 : \boldsymbol{\varepsilon}^{el}, \\ \psi^{ve} &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\varepsilon}_i^{ve} : \mathbf{C}_i : \boldsymbol{\varepsilon}_i^{ve} \quad \text{und} \\ \psi^{ms} &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \boldsymbol{\varepsilon}_j^{ms} : \mathbf{C}_j : \boldsymbol{\varepsilon}_j^{ms} \end{aligned} \quad (1.34)$$

mit der elastischen Steifigkeitsmatrix $\mathbf{C}_0$, der viskoelastischen Steifigkeitsmatrix $\mathbf{C}_i$ und der mechano-sorptiven Steifigkeitsmatrix $\mathbf{C}_j$. Der letzte Term in Gleichung (1.33) beschreibt die Verfestigungsenergie infolge der irreversiblen Verformungen.

Die in grundlegende Annahme für das Materialmodell bilden infinitesimale Dehnungsänderungen. Es ist daher nicht zur Beschreibung grosser Verformungen geeignet, ebenso wie für nicht-lineares Kriechen oder Bruchprobleme.

Komponenten des Klebstoffmodells: Das Materialmodell für die Klebstoffe ist in analoger Weise wie das Materialmodell des Holzes definiert. Ausgehend von den beschriebenen Eigenschaften in Abschnitt 2.3.2 ist die Gesamtdehnung für die Klebstoffe mit

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^{el} + \boldsymbol{\varepsilon}^{pl} + \boldsymbol{\varepsilon}^{\omega} + \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\varepsilon}_i^{ve} \quad (1.35)$$

gegeben. Anzumerken ist dabei, dass nicht alle Eigenschaften für alle Klebstoffe implementiert sind. Die nachfolgende Auflistung zeigt, welches Verhalten für welchen Klebstoff abgebildet wird.

- o elastische Dehnungen $\boldsymbol{\varepsilon}^{el}$ für alle Klebstoffe (PUR, MUF, PRF)
- o Dehnungen infolge Quellen und Schwinden $\boldsymbol{\varepsilon}^{\omega}$ für alle Klebstoffe (PUR, MUF, PRF)
- o irreversible plastische Dehnungen $\boldsymbol{\varepsilon}^{pl}$ für PUR
- o viskoelastisches Kriechen $\boldsymbol{\varepsilon}_i^{ve}$ für PUR und MUF.

Die Implementierung ist aufgrund der Analogie zu Holz nahezu identisch, da nur einzelne Komponenten nicht berücksichtigt werden müssen.

Implementierung als UMAT: Um das Materialmodell in Abaqus verwenden zu können, wurde eine UMAT-Subroutine in FORTRAN programmiert. In Abaqus können die Materialien dann verwendet werden. Die Identifikation erfolgt dabei über den (englischen) Namen des Materials. Es werden Dehnungen und Spannungen für diskrete Zeitschritte (Inkrementen) $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ berechnet. Nachfolgend indiziert n den Beginn eines Inkrements und $n+1$ dessen Ende. Der iterative Prozess folgt [Mackenzie-Helnwein u. Hanhijärvi 2003a/b] und [Fortino u.a. 2009] und geht davon aus, dass die Grössen des Materialzustandes zu einer Zeit $t = t_n$ ausreichen, um die Lösung zur Zeit $t = t_{n+1}$ zu bestimmen. Diese Zustandsgrössen sind namentlich die Holzfeuchte, die Gesamtdehnungen mit allen fünf einzelnen Dehnungsanteilen (siehe Gleichung (1.33)), interne Verfestigungsvariablen und die gesamten Spannungen.

Die nachfolgenden Schritte sollen einen kurzen Überblick über das iterative Vorgehen geben und entsprechen der Beschreibung in [Hassani 2015].

Schritt 1: Initialisierung: Entsprechend dem iterativen Vorgehen werden wie nachfolgend gezeigt alle Zustandsvariablen für das aktuelle Inkrement mit dem letzten konvergierenden Iterationsschritt des vorherigen Inkrements initialisiert: $\boldsymbol{\varepsilon}_{i,n+1}^{ve(k=0)} = \boldsymbol{\varepsilon}_{i,n}^{ve}$, $\boldsymbol{\varepsilon}_{j,n+1}^{ms(k=0)} = \boldsymbol{\varepsilon}_{j,n}^{ms}$.

Der Exponent k bezeichnet den k -ten Iterationsschritt des betrachteten Inkrements. Für $k=0$ sind die Werte gleich der gefundenen Lösung des vorangegangenen Inkrements.

Schritt 2: Plastische Verformungen: Es werden nun die irreversiblen plastischen Dehnungen berechnet, falls diese auftreten sollten. Dazu wird ein Ansatz genutzt, der eine elastische Vorhersage mit einer plastischen Korrektur basierend auf der Projektion des nächstgelegenen Punktes verwendet, wie auch in [Simo u. Hughes 2002]. Mit dem Testwert der elastischen

Dehnung zum Ende des Inkrements $\epsilon_{n+1}^{el(Trial)}$ wird der entsprechende Spannungszustand untersucht unter Beachtung der Fließflächen. Wird plastisches Verhalten ermittelt, so wird der Testwert der Spannung aus dem Testwert der elastischen Dehnung berechnet mittels einer rückwärtigen Abbildung auf die Fließfläche, wie in Abbildung 15 schematisch gezeigt.

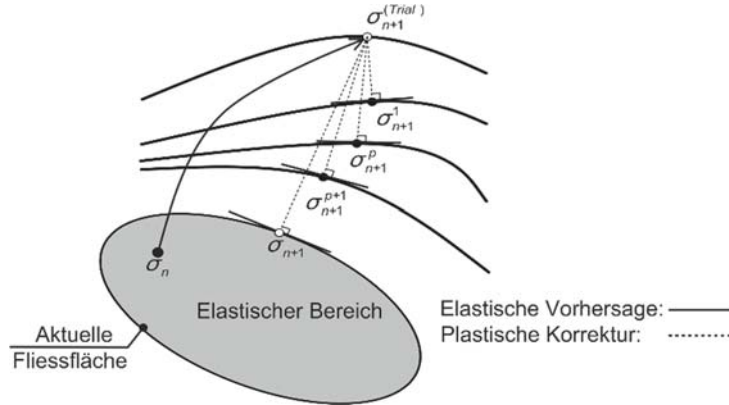


Abbildung 15: Schematische Darstellung des Konzeptes mit elastischer Vorhersage (engl.: *predictor*) und plastischer Korrektur (engl.: *corrector*) im Zusammenhang mit dem Iterationsprozess zum Finden des nächstgelegenen Punktes aus [Hassani u.a. 2014] nach [Simo u. Hughes 2002].

Die Initialisierung der plastischen Dehnungen und der zugehörigen internen Variablen ist mit

$$\epsilon_{n+1}^{pl(Trial)} = \epsilon_{n+1}^{pl(k=0)} = \epsilon_n^{pl} \quad \text{und} \quad \alpha_{l,n+1}^{(Trial)} = \alpha_{l,n+1}^{(k=0)} = \alpha_{l,n} \quad (1.36)$$

gegeben. Wie in [Simo u. Hughes 2002] beschrieben, können $\epsilon_{n+1}^{el(Trial)}$ und alle zugehörigen Zustandsvariablen mit

$$\begin{aligned} \epsilon_{n+1}^{el(Trial)} &= \left(\epsilon_{n+1} - \epsilon_{n+1}^{pl(Trial)} - \epsilon_{n+1}^{\omega} - \sum_{i=1}^n \epsilon_{i,n+1}^{ve(k)} - \sum_{j=1}^m \epsilon_{j,n+1}^{ms(k)} \right), \\ \sigma_{n+1}^{(Trial)} &= \left(\mathbf{C}_{0,n+1} : \epsilon_{n+1}^{el(Trial)} \right), \\ q_{l,n+1}^{(Trial)} &= q_l \left(\alpha_{l,n+1}^{(Trial)}, \omega_{n+1} \right) = q_l \left(\alpha_{l,n}, \omega_{n+1} \right), \\ f_{l,n+1}^{(Trial)} &= f_l \left(\sigma_{n+1}^{(Trial)}, q_{l,n+1}^{(Trial)}, \omega_{n+1} \right), \end{aligned} \quad (1.37)$$

berechnet werden. Dies ist möglich, da aus theoretischer Sicht der Testwert der elastischen Spannung aus der Superposition des plastischen Fließens im Zeitinkrement ergibt. Gilt für alle $f_{l,n+1}^{(Trial)} \leq 0$, so handelt es sich um eine reine elastische Verformung und die Konsistenzparameter zur Beschreibung des Fließens bleiben unverändert. Sobald jedoch mindestens ein $f_{l,n+1}^{(Trial)} > 0$, so treten plastische Verformungen auf und die Parameter und die Verfestigungsvariable werden neu berechnet. Dazu wird

$$\begin{aligned} \epsilon_{n+1}^{el(p)} &= \left(\epsilon_{n+1} - \epsilon_{n+1}^{pl(p)} - \epsilon_{n+1}^{\omega} - \sum_{i=1}^n \epsilon_{i,n+1}^{ve(k)} - \sum_{j=1}^m \epsilon_{j,n+1}^{ms(k)} \right), \\ \sigma_{n+1}^{(p)} &= \left(\mathbf{C}_{0,n+1} : \epsilon_{n+1}^{el(p)} \right), \\ q_{l,n+1}^{(p)} &= q_l \left(\alpha_{l,n+1}^{(p)}, \omega_{n+1} \right) \quad \text{und} \\ f_{l,n+1}^{(p)} &= f_l \left(\sigma_{n+1}^{(p)}, q_{l,n+1}^{(p)}, \omega_{n+1} \right) \end{aligned} \quad (1.38)$$

definiert, wobei mit p der p -te Iterationsschritt des Abbildungsalgorithmus bezeichnet wird. Weiterführend ergibt sich für die Entwicklung der Zustandsvariablen $\boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{pl(p+1)}$ und $\alpha_{l,n+1}^{(p+1)}$ und der Konsistenzparameter $\gamma_{n+1}^{l(p+1)}$:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{pl(p+1)} &= \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{pl(p)} + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{pl(p)} , \\ \alpha_{l,n+1}^{(p+1)} &= \alpha_{l,n+1}^{(p)} + \Delta \alpha_{l,n+1}^{(p)} \quad \text{und} \\ \Delta \gamma_{n+1}^{l(p+1)} &= \Delta \gamma_{n+1}^{l(p)} + \delta \Delta \gamma_{n+1}^{l(p)} \quad \text{für alle } l \in \mathbb{S}_{act} .\end{aligned}\tag{1.39}$$

Zum Ende des Iterationsprozesses wird $p+1$ gleich p gesetzt und die Konvergenz geprüft. Dazu wird ein plastischer Residuumsvektor mit

$$\mathbf{R}_{n+1}^{pl(p)} := \begin{Bmatrix} -\boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{pl(p)} + \boldsymbol{\varepsilon}_n^{pl} \\ -\boldsymbol{\alpha}_{n+1}^{(p)} + \boldsymbol{\alpha}_n \end{Bmatrix} + \sum_{l \in \mathbb{S}_{act}} \Delta \gamma_{n+1}^{l(p)} \begin{Bmatrix} \partial_{\boldsymbol{\sigma}} f_l(\boldsymbol{\sigma}_{n+1}^{(p)}, \alpha_{l,n+1}^{(p)}, \omega_{n+1}) \\ \partial_{\mathbf{q}} f_l(\boldsymbol{\sigma}_{n+1}^{(p)}, \alpha_{l,n+1}^{(p)}, \omega_{n+1}) \end{Bmatrix}\tag{1.40}$$

berechnet. Anschliessend werden alle Werte für die aktiven Fließflächen mit der Gleichung (1.10) neu ausgewertet. Als Abbruchbedingungen der Iteration dienen

$$\begin{aligned}f_{l,n+1}^{(p)} &:= f_l(\boldsymbol{\sigma}_{n+1}^{(p)}, \alpha_{l,n+1}^{(p)}, \omega_{n+1}) < \text{TOL}_1 \quad \text{für alle } l \in \mathbb{S}_{act} \quad \text{und} \\ \|\mathbf{R}_{n+1}^{pl(p)}\| &< \text{TOL}_2 .\end{aligned}\tag{1.41}$$

Ist eine konvergierende Lösung gefunden, so werden alle Zustandsvariablen, die die plastischen Eigenschaften betreffen, aktualisiert. In Formeln ausgedrückt lautet dies:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{pl} = \boldsymbol{\varepsilon}_n^{pl} + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{pl} , \quad \alpha_{l,n+1} = \alpha_{l,n} + \Delta \alpha_{l,n+1} \quad \text{für alle } l \in \mathbb{S}_{act} .\tag{1.42}$$

Schritt 3: Spannungsberechnung: Nun werden die Spannungen über ein iteratives Schema berechnet, dass die Spannungen in einzelne Komponenten aufteilt. Die elastischen Dehnungen sind mit

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{el(k)} = \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1} - \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{pl(k)} - \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{\omega} - \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\varepsilon}_{i,n+1}^{ve(k)} - \sum_{j=1}^m \boldsymbol{\varepsilon}_{j,n+1}^{ms(k)}\tag{1.43}$$

gegeben, wobei $\boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{pl(k)}=0$, wenn keine plastischen Verformungen auftreten. Mit diesen elastischen Dehnungen können die Spannungen der k -ten Iteration

$$\boldsymbol{\sigma}_{n+1}^{(k)} = \left(\mathbf{C}_{0,n+1} : \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{el(k)} \right)\tag{1.44}$$

berechnet werden. Anschliessend müssen alle Tangentensteifigkeiten des Modells bestimmt werden. Daher werden entsprechend [Mackenzie-Helnwein u. Hanhijärvi 2003a/b] und [Fortino u.a. 2009] die einzelnen Jacobi-Determinanten einzelnen ausgewertet und zur gesamten Tangentensteifigkeit $\mathbf{C}_{n+1}^T$ verknüpft. In [Hassani u.a. 2014] wird dieser hier nicht weiter beleuchtete Prozess detailliert erklärt, da er für die Konvergenz des gesamten Modells entscheidend ist. Die Änderung der totalen Spannungen wird mit

$$\Delta \boldsymbol{\sigma}_{n+1}^{(k)} = -\mathbf{C}_{n+1}^T : \left(\mathbf{R}^{el} + \sum_{i=1}^n \mathbf{R}_i^{ve} + \sum_{j=1}^m \mathbf{R}_j^{ms} \right)_{n+1}^{(k)}\tag{1.45}$$

berechnet, wobei die Residuen für jeden Verformungsmechanismus wie folgt definiert sind:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}^{el(k)} &= \left\{ \mathbf{C}_{0,n+1}^{-1} : \boldsymbol{\sigma}_{n+1}^{(k)} - \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{el(k)} \right\}, \\ \mathbf{R}_i^{ve(k)} &= \left\{ \boldsymbol{\varepsilon}_{i,n}^{ve} \exp(-\xi_i) + \mathbb{T}_n^{ve}(\xi_i) \mathbf{C}_{i,n}^{-1} : \boldsymbol{\sigma}_n + \mathbb{T}_{n+1}^{ve}(\xi_i) \mathbf{C}_{i,n+1}^{-1} : \boldsymbol{\sigma}_{n+1}^{(k)} - \boldsymbol{\varepsilon}_{i,n+1}^{ve(k)} \right\}, \\ \mathbf{R}_j^{ms(k)} &= \left\{ \boldsymbol{\varepsilon}_{j,n}^{ms} \exp(-\xi_j) + \mathbb{T}_n^{ms}(\xi_j) \mathbf{C}_{j,n}^{-1} : \boldsymbol{\sigma}_n + \mathbb{T}_{n+1}^{ms}(\xi_j) \mathbf{C}_{j,n+1}^{-1} : \boldsymbol{\sigma}_{n+1}^{(k)} - \boldsymbol{\varepsilon}_{j,n+1}^{ms(k)} \right\}. \end{aligned} \quad (1.46)$$

Schritt 4: Viskoelastische und mechano-sorptive Verformung: Mit den bereits berechneten internen Spannungen aus Gleichung (1.45) und den entkoppelten Residuen in den Gleichungen (1.46) können die Änderungen der viskoelastischen Dehnungen und die mechano-sorptiven Verformungen für die aktuelle Iteration der Spannungsberechnung ermittelt werden. Über

$$\begin{aligned} \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{i,n+1}^{ve(k)} &= \mathbf{R}_i^{ve(k)} + \mathbb{T}_{n+1}^{ve}(\xi_i) \mathbf{C}_{i,n+1}^{-1} : \Delta \boldsymbol{\sigma}_{n+1}^{(k)} \quad \text{für } i = (1, \dots, n) \quad \text{und} \\ \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{j,n+1}^{ms(k)} &= \mathbf{R}_j^{ms(k)} + \mathbb{T}_{n+1}^{ms}(\xi_j) \mathbf{C}_{j,n+1}^{-1} : \Delta \boldsymbol{\sigma}_{n+1}^{(k)} \quad \text{für } j = (1, \dots, m) \end{aligned} \quad (1.47)$$

werden die Dehnungsincremente $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{i,n+1}^{ve(k)}$ und $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{j,n+1}^{ms(k)}$ ermittelt. Damit können alle Kriechverformungen zum Ende des aktuellen Iterationsschrittes mit

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{i,n+1}^{ve(k+1)} = \boldsymbol{\varepsilon}_{i,n+1}^{ve(k)} + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{i,n+1}^{ve(k)}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{j,n+1}^{ms(k+1)} = \boldsymbol{\varepsilon}_{j,n+1}^{ms(k)} + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{j,n+1}^{ms(k)} \quad (1.48)$$

aktualisiert werden. Der iterative Prozess wird beendet durch den Vergleich eines verallgemeinerten Residuums

$$\mathbf{R}_{n+1}^{(k+1)} = \left\{ \mathbf{R}_{n+1}^{el(k+1)} \mathbf{R}_{i,n+1}^{ve(k+1)} \dots \mathbf{R}_{j,n+1}^{ms(k+1)} \dots \right\}^T, \quad (1.49)$$

mit einem vordefinierten Grenzwert. Das Verallgemeinerte Residuum beinhaltet alle Residuen aus den Gleichungen (1.46). Für $\|\mathbf{R}_{n+1}^{(k+1)}\| \leq \text{TOI}_3$ wird Konvergenz des Iterationsprozesses definiert und die Lösung des $(k+1)$ -ten Iterationsschrittes stellt das Ergebnis für des aktuellen Inkrements dar. Wird $\|\mathbf{R}_{n+1}^{(k+1)}\| > \text{TOI}_3$ jedoch nicht erfüllt, so wird $k+1$ gleich k gesetzt und die Schritte 2 bis 4 werden wiederholt.

Nachdem alle Werte konvergiert sind, werden die Zustandsgrößen, die von den viskoelastischen und mechano-sorptiven Dehnungen abhängen, aktualisiert:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{i,n+1}^{ve} = \boldsymbol{\varepsilon}_{i,n}^{ve} + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{i,n+1}^{ve}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{j,n+1}^{ms} = \boldsymbol{\varepsilon}_{j,n}^{ms} + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{j,n+1}^{ms}. \quad (1.50)$$

Diese aktualisierte Zustandsvariablen werden dann für das nächste Zeitinkrement beginnend bei Schritt 1 als Startgrößen verwendet.

Feuchteanalyse: Da im konstitutiven Modell nahezu alle mechanischen Kenngrößen der Materialmodelle für Holz und Klebstoffe feuchteabhängig sind, muss die jeweils aktuelle Feuchtigkeit berechnet werden. Die in Abschnitt 2.3.1 gegebenen Formeln zur Beschreibung des Diffusionsverhaltens mit dem zweiten Fick'schen Gesetz weisen eine Analogie zur Wärmeleitungsgleichung

$$\begin{aligned}\frac{\partial C}{\partial t} &= D \cdot \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right),\end{aligned}\tag{1.51}$$

auf. Für die Analogie gilt: $T=C$ und $\alpha=D$, womit die Feuchte als Wärme modelliert werden kann. Temperatur in °C wird also als prozentuale Holzfeuchte verstanden, wenn Dichte und spezifische Wärmekapazität zu 1 gesetzt werden. Aufgrund dieser Analogie und dem Fakt, dass die Wärmeleitung in Abaqus standardmässig implementiert ist, kann die Feuchteanalyse als thermische Analyse in Abaqus modelliert werden.

Eine Notwendigkeit ist jedoch, dass die Feuchteanalyse immer im Vorgang vor der mechanischen Analyse erfolgt. Bei der Anwendung ist weiterhin darauf zu achten, dass die verwendete Inkrementierung der beiden Analysen übereinstimmt, da es sich um diskret ausgewertete Zusammenhänge handelt.

Aus Sorptionsisothermen der Materialien wird der Feuchtegehalt bestimmt, der der Oberfläche direkt zugewiesen wird. Es wird also angenommen, dass die oberste Holzschicht immer ausgeglichen ist, was dem Fall bewegter Luftströmung entspricht. Jahreszeitliche Schwankungen der relativen Luftfeuchte werden über die periodische Gleichung

$$Y_i = a_1 + a_2 \cdot \sin\left(2\pi \frac{t - a_3}{t_0}\right)\tag{1.52}$$

mit $t_0=365,25d$, dem Mittelwert a_1 , der Amplitude a_2 und der Phasenverschiebung a_3 beschrieben. In Anlehnung an [Hofmann u.a. 2010] wählen wir als Referenzklima $a_1=45\%R.H.$, $a_2=15\%R.H.$ und $a_3=95Tage$, was einer Schwankung zwischen 30 und 60%R.H. entspricht.

Der Einfluss von Lackschichten wird über Oberflächenemissionkoeffizienten beschrieben, die invers aus den Ergebnissen der Schalenversuche bestimmt werden.

2.3.5. Ersatzmodell-gestützte Optimierung

Da numerische hygro-mechanische Simulationen mit Feuchtezyklen sehr zeitaufwendig sind (ca. 48 Stunden pro Rechnung), werden Ersatzmodelle (*engl. meta model, surrogate model*) verwendet, um die Zahl der notwendigen Rechenläufe zu minimieren, ohne die Zahl der untersuchten Aufbauten unzulässig zu begrenzen. Klassische Gradienten-basierte Optimierungsverfahren benötigen in der Regel deutlich mehr Rechenläufe und haben zudem die Gefahr in lokalen Extrema zu konvergieren. Ersatzmodelle interpolieren das Verhalten der Zielfunktion von zuvor untersuchten Konfigurationen, um im Optimierungsvorgang eine Vorausswahl zu treffen und unsinnige Konfigurationen auszuschliessen. Der n -dimensionale Ergebnisraum wird während des Optimierungsvorgangs mit den aktuellen Ergebnissen gefüllt und so das Ersatzmodell immer weiter verfeinert, wobei n der Anzahl Parameter des Systems entspricht. MATSuMoTo (**MATLAB Surrogate Modelling Toolbox**) ist eine Implementierung zur Behandlung von Optimierungsproblemen mittels Ersatzmodellen in Matlab.

Im Allgemeinen ist das Ziel einer Optimierung das Finden eines globalen Extremums. Das allgemeine Optimierungsproblem ist in Anlehnung an [Gritzmann 2013] mit

$$f : D \rightarrow Z \quad \text{mit} \quad F \subset D \quad \text{und} \quad Z = \mathbb{R}$$

gegeben. Jeder Punkt $x^* \in F$ mit $x \in F \Rightarrow f(x^*) \leq f(x)$ heisst dann Minimalpunkt. Mit f ist dabei die Zielfunktion (*engl. objective function*) beschrieben, für die das Minimum gefunden werden soll. Das Maximierungsproblem kann mit $f_{\max}$ durch $f_{\min} = -1 \cdot f_{\max}$ in ein Minimierungsproblem mit $f_{\min}$ überführt werden. Der zulässige Bereich F ist eine Teilmenge des Definitionsbereiches D . Mit Z wird der Wertebereich der Zielfunktion bezeichnet. Anhand des Definitionsbereiches und des Wertebereiches kann man die Optimierungsprobleme grob klassifizieren:

Optimierung eines Kriteriums: Ist $Z = \mathbb{R}$, so ist das Resultat der Zielfunktion eine reelle Zahl und es wird von einer Optimierung auf ein Kriterium hin gesprochen. Der Definitionsbereich kann dabei sowohl ein- als auch mehrdimensional sein. Einfache Beispiele sind mit der Parabel, $f(x) = ax^2 + b$, oder der Halbkugel, $f(x = (x_1, x_2)) = (r^2 - x_1^2 - x_2^2)^{0.5}$, gegeben. Für diese lässt sich das Minima respektive Maxima mittels der Differenzierung von f finden. Es gibt eine Reihe von Existenz- und Eindeutigkeitsaussagen, die herangezogen werden können um entsprechende Probleme zu behandeln, siehe [Gritzmann 2013, Jungnickel 2015].

Optimierung mehrerer Kriterien: Häufig haben Optimierungsprobleme mehrere Kriterien. Der Wertebereich von f ist damit nicht mehr eindimensional, sondern mehrdimensional. Der zugehörige Definitionsbereich kann sowohl ein- als auch mehrdimensional sein. Beispielhaft sollen bei Bauwerken meist die Baukosten minimiert werden, zugleich aber auch die Bauzeit, was ein Zielkonflikt darstellt. Sind die Ziele entgegen dem Beispiel konfliktfrei, so lässt sich das mehr-kriterielle Optimierungsproblem auf ein Problem mit einem Kriterium reduzieren. Damit können deutliche einfachere Strategien angewendet werden.

Black-Box-Optimierung: Als Black-Box-Probleme werden Probleme bezeichnet, deren Zielfunktion nicht in expliziter Form gegeben ist. Beispiel sind Probleme deren Zielwert über eine Simulation ermittelt wird. Neben der nicht explizit gegebenen Zielfunktion sind Black-Box-Probleme häufige durch die folgenden weiteren Eigenschaften gekennzeichnet, wie in [Schmidt 2009] ähnlich angeführt:

2. Der Definitionsbereich ist mehrdimensional, wobei die Anzahl der Variablen nicht unverhältnismässig gross ist.
3. Gibt es mehrere Ziele, so sind diese meist nicht konfliktfrei.
4. Es bracht einige Minuten bis Stunden zur Funktionsauswertung.
5. Die Anzahl der Funktionsauswertungen ist begrenzt aufgrund von Ressourcen (Zeit, Rechenkapazität etc.).
6. Eine wiederholte Funktionsauswertung ergibt das annähernd gleiche Ergebnis, häufig bezeichnet als geringes Rauschen.
7. Die erzielbaren Verbesserungen können sehr gross sein.

Im Folgenden wird sich auf Black-Box-Probleme beschränkt, da die Optimierungsprobleme in dieser Arbeit simulationsbasiert sind. Zur Optimierung diese haben sich Methoden auf Basis von Ersatzmodellen (*engl. Surrogate Models*) bewährt.

2.3.5.1. Optimierung mittels Ersatzmodellen

Es ist die Grundidee von Ersatzmodellen, den Funktionswert eines unbekannten Punktes auf Basis einer Anzahl bereits erfolgter Funktionsauswertungen zu schätzen. Dazu wird angenommen, dass mit den bereits vorhandenen Auswertungen ein Ersatzmodell definiert werden kann, das den realen Verlauf hinreichend genau annähert. Aus dem Ersatzmodell heraus wird ein neuer Punkt geschätzt, ausgewertet, und anschliessend verwendet, um das Ersatzmodell zu verfeinern.

Auf dem beschriebenen Konzept kann ein Algorithmus definiert werden, um das Optimum des Black-Box-Problems in den folgenden Schritten anzunähern (in Anlehnung an [Müller 2014]):

8. Bestimme eine Anzahl von Startpunkten,
9. Werte die Funktion an den Punkten aus Schritt 1 aus,
10. Passe das Ersatzmodell in die Daten aus den Schritten 1 und 2 ein,
11. Nutze das Ersatzmodell um die Funktionswerte der nicht ausgewerteten Punkte zu schätzen und entscheide, welcher Punkt als nächstes ausgewertet werden soll,
12. Werte die Funktion an dem in Schritt 4 gefundenen Punkt aus,
13. Aktualisiere das Ersatzmodell mit den neu gewonnenen Daten aus den Schritten 4 und 5,
14. Iteriere über die Schritte 4, 5 und 6, bis das Abbruchkriterium erreicht ist.

Wie aus dem vorgestellten Schemas erkennbar, gibt es vier wesentliche Punkte, in denen sich Algorithmen unterscheiden: das verwendete Ersatzmodell; die Methode zur Bestimmung der Startpunkte (Schritt 1) und der aussichtsreichsten Punkte (Schritt 4); das verwendete Abbruchkriterium.

MATSuMoTo ist eine Implementierung zur Behandlung von Optimierungsproblemen mittels Ersatzmodellen in Matlab, dessen Grundlagen in [Müller u. Piché 2011, Müller u.a. 2013, Müller u. Shoemaker 2014, Müller 2014] beschrieben sind. Die nachfolgenden kurzen Beschreibungen der möglichen Parameter beruhen auf der Erläuterung der Implementierung in [Müller 2014], ebenso wie die verwendeten Kurzbegriffe. Die zu betrachtenden Probleme können unterschiedliche Arten von Definitionsbereichen aufweisen. Grundsätzlich sind mehrdimensionale Probleme mit n Dimensionen möglich. Der Definitionsbereich kann rein kontinuierlich $D=\mathbb{R}^n$ oder ganzzahlig $D=\mathbb{Z}^n$ sein. Weiterhin sind gemischt kontinuierlich und ganzzahlige Probleme möglich. Der zulässige Bereich muss durch obere und untere Grenzen eingeschränkt werden. Zugleich ist diese Eingrenzung die einzige Möglichkeit und damit das Auslassen einzelner Bereiche nicht möglich. Als Zielfunktionen sind ausschließlich Funktionen zugelassen, die einen einzelnen Wert zurückgeben, dessen Minimum dann im Algorithmus gesucht wird.

Es gibt eine Reihe von Ersatzmodellen, die bereits erfolgreich verwendet wurden. In der MATSuMoTo sind einige davon implementiert. Sie lassen sich in vier grobe Kategorien einteilen:

RBF: Das Ersatzmodell verwendet eine radiale Basisfunktion (*engl. Radial basis function*) um den wahren Verlauf zu approximieren. Diese Methode eignet sich insbesondere für Probleme mit vielen Dimensionen, da der Aufwand zur Bestimmung notwendiger Koeffizienten nicht stark anwächst.

POLY: Diese Ersatzmodelle nutzen Regressionspolynome unterschiedlicher Ordnungen zur Approximation.

MARS: Die Methode des multivariaten adaptiven Regressions-Splines (*engl. Multivariate adaptive regression spline*) wird genutzt um das Ersatzmodell zu bestimmen.

MIX: Neben den drei bereits genannten Methoden gibt es Mischformen, bei denen jeweils zwei der Methoden über die Evidenztheorie von Dempster und Shafer miteinander verknüpft werden. Vereinfacht werden sie hier gemeinsam als separate Kategorie aufgefasst.

Weitere Details zu den einzelnen Ersatzmodellen können in [Müller 2014] oder den anfänglich genannten Artikeln gefunden werden.

Methoden zur Bestimmung der Startpunkte: Werden keine oder nicht ausreichend Startpunkte per Hand festgelegt, so gibt es die folgenden drei Methoden die Startpunkte zu bestimmen:

CORNER: Es werden alle Begrenzungspunkte des zulässigen Bereichs gewählt und der Mittelpunkt.

LHS: Die Startpunkte werden über die statistische Methode des Latin-Hypercube-Stichprobenverfahren (*engl. Latin Hypercube Sampling*) ermittelt.

SLHD: Die Startpunkte werden ebenfalls mit dem Latin-Hypercube-Stichprobenverfahren ermittelt, die Punkte sind aber symmetrisch verteilt.

Methoden zur Bestimmung der aussichtsreichsten Punkte: Für die Bestimmung der neu auszuwertenden Punkte auf Basis des Ersatzmodells stehen nachfolgende drei Varianten zur Auswahl:

SurfMin: Diese Methode verwendet als neu auszuwertenden Punkt das (lokale) Minimum des Ersatzmodells, dadurch entsteht ein sehr geringer Rechenaufwand.

CANDloc: Es handelt sich um eine statistische Methode, die neue aussichtsreichste Punkte ermittelt, indem sie diese als zufällig verstreut um den aktuell besten ausgewerteten Punkt annimmt.

CANDglob: Die Methode gleicht *CANDloc*, berücksichtigt aber zudem eine Anzahl von Punkten, die gleichmässig verteilt über den zulässigen Bereich sind um nicht zu lang in einem lokalen Minimum zu stagnieren.

Es ist möglich, mehrere neue Punkte je Iterationsschritt zu finden um die Anzahl der Aktualisierungen des Ersatzmodells zu reduzieren.

Abbruchkriterium: Als Abbruchkriterium dient in der MATSuMoTo die Anzahl maximal erlaubter Auswertungen der Zielfunktion. Aus Sicht der Implementierung ist dies das geeignetste Kriterium, da nicht bei jedem Iterationsschritt ein neues Optimum gefunden werden wird. Reine Konvergenzkriterien sind aus selbigem Grund nicht geeignet. Eine denkbare Alternative wäre eine Kombination aus Konvergenzkriterium über eine Anzahl von Iterationsschritten, das heisst, wird nach einer definierten Anzahl von Iterationen kein neues Optimum gefunden wird abgebrochen.

2.3.5.2. Optimierung simulationsbasierter Probleme

Im Fokus des Projekts steht die Optimierung von Problemen, deren Zielfunktion einer FE-Simulation bedürfen. Über die Matlab Surrogate Modelling Toolbox (MATSuMoTo) sind parametrische Modelle zu generieren und Simulation in Abaqus zu steuern, sowie alle notwendigen Informationen zur Bestimmung der Zielfunktion aus der Ergebnisdatenbank zu extrahieren. Die Anwendung erfolgt in der Optimierung eines hybriden BSH-Trägers. In der FE-Simulation wird dabei das bereits beschriebene Materialmodell verwendet um das feuchteabhängige Verhalten realitätsnah abzubilden.

Die komplette implementierte Struktur ist in Abbildung 16 illustriert. Es ist zu erkennen, dass die komplette Optimierung in Matlab stattfindet und die Simulation in Abaqus die Black Box darstellt.

Nach der Festlegung der Optimierungsparameter (Art des Ersatzmodells, Methode zur Bestimmung der Startpunkte und Methode zur Bestimmung neuer Punkte) generieren die Funktionen der MATSuMoTo einen Vektor mit Modellparametern, deren Bedeutung zuvor festgelegt wurde, ebenso wie ihre oberen und unteren Grenzen. Diese Fließkomma- und Ganzzahlen werden genutzt um ein Simulationsmodell zu erstellen. Es wird eine Schnittstelle definiert, um Parameter von Matlab in Abaqus einzulesen. Als Dateiformat dient dazu eine Textdatei, in der getrennt die Fließkomma- und Ganzzahlen abgespeichert werden. Diese Datei wird im Python-Skript über eine Funktion eingelesen und die Daten als Variablen abgespeichert. Das angesprochene Python-Skript enthält neben der angesprochenen Modellerstellung (Preprocessing) auch die Analyse (Solution) und Auswertung (Postprocessing). Es ist so ausgelegt, dass es über die Konsole ohne grafische Benutzeroberfläche durch Abaqus abgearbeitet wird. Das Postprocessing umfasst im Wesentlichen die Berechnung des Wertes der Zielfunktion, die auf unterschiedliche Komponenten der Ergebnisdatenbank zurückgreift. Für die Übertragung des errechneten Wertes der Zielfunktion in Matlab ist ebenfalls eine Textdatei als Schnittstelle definiert. Da die Simulationen in Abaqus eine deutlich längere Zeit in Anspruch nimmt, wartet der Matlab-Code mit der weiteren Ausführung, bis die Ausgabedatei erstellt wurde. Es ist dazu das Zeitintervall anzugeben, in dessen Abstand die Existenz überprüft wird, ebenso wie eine maximale Dauer, nachdem das Programm ohne Ergebnis beendet wird.

MATSuMoTo-Matlab Implementierung: Bei der Umsetzung wurde versucht den Quellcode der MATSuMoTo weitestgehend unberührt zu lassen, jedoch ist eine Anpassung unumgänglich. Der implementierte Algorithmus ist grundsätzlich darauf ausgerichtet, mehrere Evaluationen der Zielfunktion simultan auszuführen und nutzt dazu die Parallel Computing Toolbox von Matlab. Ist die Zielfunktion komplett in Matlab definiert ist dies von Vorteil. Die definierten Schnittstellen sind jedoch nur für jeweils eine FEM-Simulation und Auswertung ausgelegt, daher ist es zwingend erforderlich, den Pool zum parallelen Berechnen auf einen Kern zu beschränken, wenn er gestartet wird. In Matlab Versionen ab R2016a haben sich zudem die Befehle der Parallel Computing Toolbox verändert und wurden angepasst werden.

Der Optimierungsalgorithmus erlaubt es mehrere neue Punkte in einer Iteration zu generieren und auszuwerten. Es wurde vereinfacht angedacht, jeweils nur einen neuen Punkt je Iteration zu generieren. Wie sich eine andere Definition auswirkt ist nicht abzuschätzen.

Da es bei der Optimierung zu Programmfehlern und -abbrüchen kommen kann wird eine externe Verlaufsdatei im Textformat angelegt. Sie enthält den Wert der Zielfunktion und die zugehörigen Parameter. Die Datei wird nach jeder Iteration ergänzt und enthält daher die Werte des letzten Iterationsschrittes nicht, wenn in diesem ein Fehler auftritt. Die Datei wird fortlaufend geschrieben, soll sie neu begonnen werden, ist die alte Datei zu löschen. Der angesprochene Verlauf dient nur der Kontrolle. Die MATSuMoTo bietet standardmässig keine Möglichkeit, Parameter und zugehörige Werte der Zielfunktion einzulesen und als Startdesign zu nutzen. Es ist zu überlegen, eine entsprechende Möglichkeit zu schaffen, da insbesondere bei sehr langandauernden Simulationen so auf eine erneute Simulation verzichtet werden könnte, sofern keine Änderungen im Simulationsmodell vorgenommen werden.

Die Ergebnisse der Optimierung werden standardmässig in Form einer Struktur gespeichert. Es ist nach einer Optimierung darauf zu achten, diese Datei zu verschieben oder umzubenennen, da sie ansonsten beim nächsten Aufruf der Optimierung überschrieben wird. Wie bereits

erläutert wird als Abbruchkriterium die maximale Anzahl an Auswertungen der Zielfunktion genutzt. Da diese Anzahl insbesondere für Probleme mit vielen Dimensionen schwer sinnvoll abzuschätzen ist, könnte gegebenenfalls ein alternatives Abbruchkriterium implementiert werden.

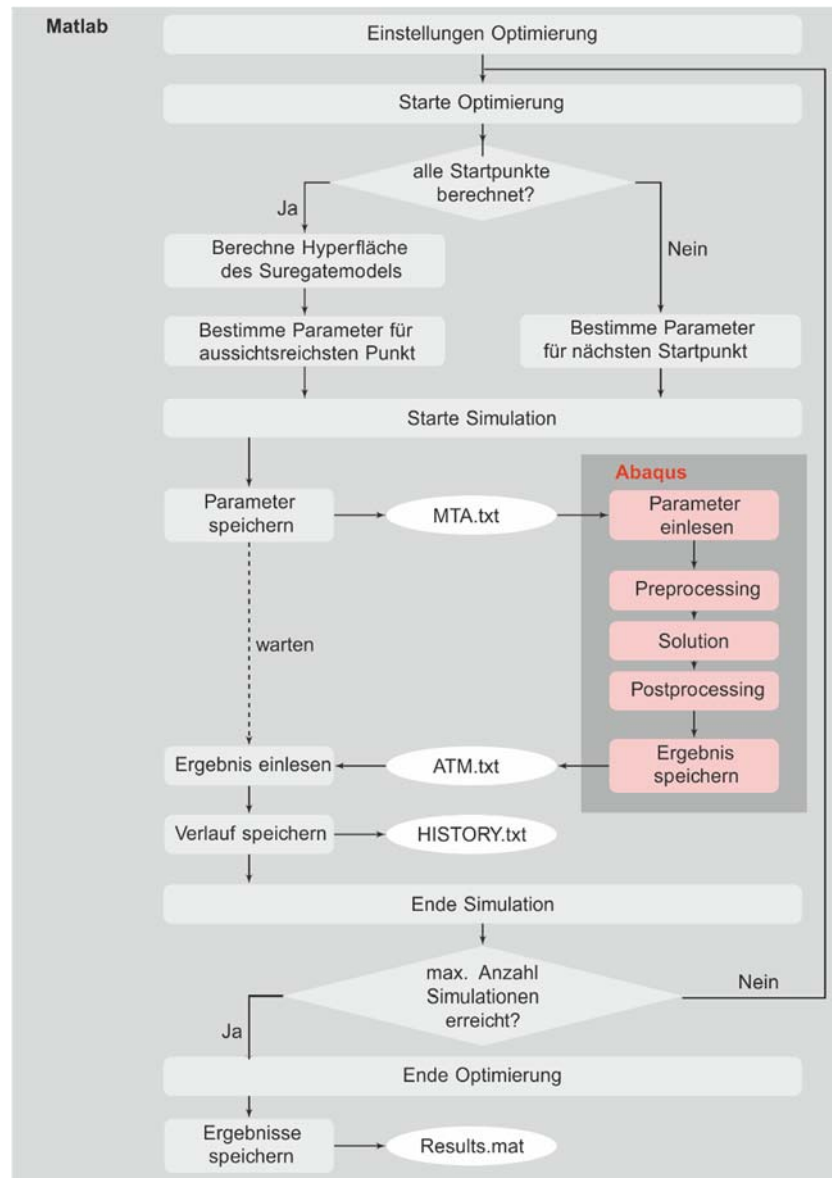


Abbildung 16: Darstellung des implementierten Struktur wobei die MATSuMoTo in Matlab zur Optimierung genutzt wird (hellgrau) und für die Simulation Abaqus (dunkelgrau); Schnittstellen und Ergebnisse werden in Dateien (weiss) abgelegt.

Skript-basierte Generierung parametrisierter FE-Modelle: Die Parameter des Optimierungsproblems werden im Python-Skript übersetzt in Eigenschaften des Simulationsmodells. Bei der Festlegung ist darauf zu achten, dass die Parameter möglichst kontinuierlich sind, damit der Optimierungsalgorithmus die Chance hat, ein Optimum zu finden. Die Generierung von einzelnen komplett definierten Modellen und das Aufrufen über einen ganzzahligen Parameter ist ebenso eine ungeeignete Wahl, wie eine grosse Anzahl von binären Parametern. Als binäre Parameter gelten Werte die nur zwei Zustände, beispielsweise den Wert 3 oder 4, haben. Solche lassen sich jedoch nicht vermeiden, denkt man z.B. an die Lamellenzahlen, die ja nur natürliche Zahlen sein können.

Bei der Definition der Zielfunktion auf Basis der Ergebnisdatenbank von Abaqus ist darauf zu achten, dass die Werte vergleichbar sind. Dies klingt trivial, ist aber beispielsweise nicht zwingend gegeben, wenn sich die Anzahl der Knoten ändert und über alle Knoten die Summe der Verschiebungen berechnet wird.

Für die Erstellung der Vernetzung sind geeignete Netzparameter zu wählen, sodass für alle möglichen Modellparameter ein geeignetes Netz entsteht. Insbesondere bei Modellparametern die einen grossen zulässigen Bereich haben ist dies wichtig um stark deformierte Elemente zu vermeiden.

Aus der Definition der Schnittstellen ergibt sich, dass die von Abaqus generierten Dateien (u.a. Modelldatenbank und Ergebnisdatenbank) mit jedem Aufruf einer Simulation durch Matlab überschrieben werden. Für sehr zeitaufwendige Simulation sollte daher das zugehörige Python-Skript so angelegt werden, dass ausgewählte Dateien bis zum Ende der Optimierung erhalten bleiben um diese nachträglich auch anderweitig auswerten zu können. Zur Begrenzung des Bedarfs an Speicherplatz wurde darauf aktuell bei der Implementierung verzichtet.

3. Resultate

Zunächst werden in Kapitel 3.1 die experimentellen Befunde und Begleitmessungen dargestellt. Diese umfassen holzphysikalische Größen wie Dichte und Anfangsfeuchten der in Delaminationsproben verbauten Lamellen aus Fichte und Esche die Startwerte für die Simulation darstellen. Es werden aber auch die relevanten Größen für Feuchtetransport durch die untersuchten Beschichtungssysteme wie Schichtdicken, Wasserdampfdiffusionswiderstände oder –äquivalente Luftschichten dargestellt, die zur Berechnung der Dämpfungswirkung von Beschichtungen auf die Spannungsentwicklung im BSH benötigt werden. Danach erfolgt die Darstellung der gemessenen Feuchteprofile, sowie die Entwicklung von feuchteinduzierten Schäden in allen BSH Proben. In Kapitel 0 werden die Ergebnisse der numerischen Berechnung der BSH Proben dargestellt. Zunächst werden die berechneten Feuchteprofile den Messungen gegenübergestellt, bevor die Spannungen und Dehnungskomponenten für die experimentellen Aufbauten und Klimata untersucht werden und gemessenen Delaminationen gegenübergestellt werden. Danach werden für beide Ansätze der Spannungsreduktion – durch Beschichtung und Aufbau – jahreszeitliche Klimaänderungen und die resultierende Spannungsakkumulation berechnet. Zuletzt werden für hybrides BSH die Ergebnisse der Optimierung zur Spannungsreduktion dargestellt.

3.1. Experimentelle Ergebnisse

3.1.1. Holzphysikalische Begleitversuche

Die Dichte der verwendeten Lamellen wurde an ausgeglichenen (65%RH / 20°C) Quadern (20x20x150 (mm³)) bestimmt. Die Verteilung der Dichte ist in Abbildung 17 mitsamt den gefitteten logarithmischen Normalverteilungen (Mittelwert, Standardabweichung) dargestellt. Auf die weitere Verwendung der individuellen Dichte der Lamellen in der Berechnung wurde verzichtet, da viele Größen schlecht mit der Dichte korrelieren.

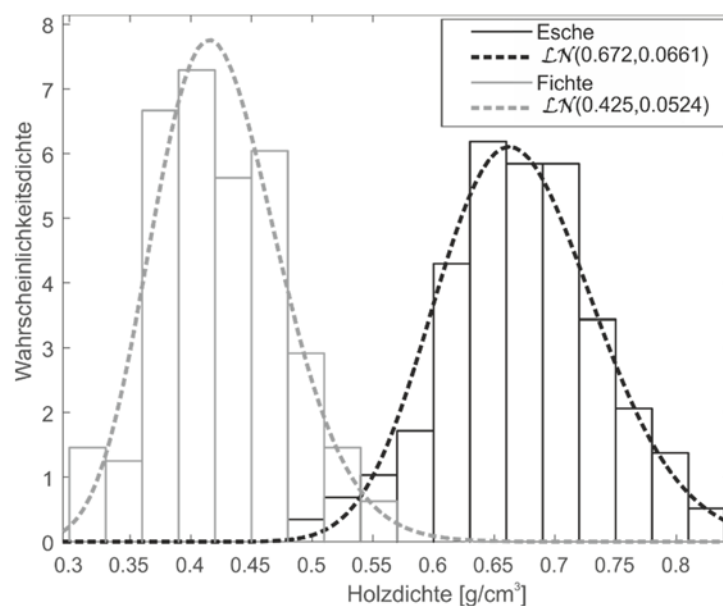


Abbildung 17: Verteilung der Rohdichten (65%RH/20°C) der Eschen- und Fichtenlamellen.

Während der Herstellung der Brettschichtholzbalken, vor der Verleimung, wurden die Anfangsfeuchten mit einem Widerstandsfeuchtemessgerät prozessbegleitend aufgezeichnet. Es

wurde mit einer mittleren Feuchte von 8.8% bei Esche und 7.3% bei Fichte verklebt (s. Abbildung 18 mit Fitparametern einer Normalverteilung). Wie man erkennt, ist die Feuchteverteilung bei der Esche deutlich breiter als bei Fichte. Zudem gibt es insbesondere bei Riffbrettern aus Esche höhere Feuchten bis zu 15%, da diese aufgrund von Beschaffungsschwierigkeiten hinzugekauft werden mussten.

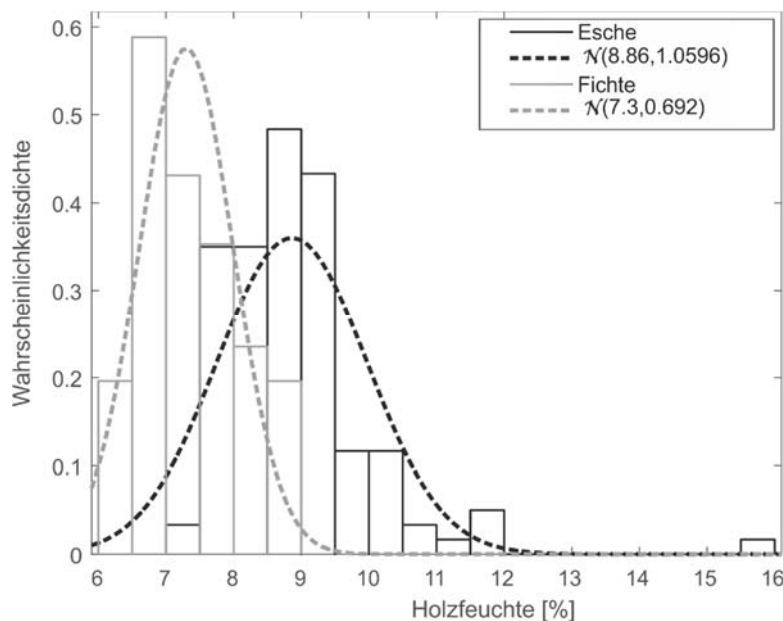


Abbildung 18: Verteilung der Anfangsfeuchten der Lamellen vor der Verklebung.

3.1.2. Feuchtetransport durch Beschichtungssysteme in Schalenversuchen

Zur Bestimmung der Wasserdampf-Diffusionsstromdichte der Beschichtungssysteme (s. Abbildung 19) wurden Schalenversuche als Trocken- und Feuchtschalenversuche durchgeführt (s. Kap. 2.1). Trockenschalenversuche mit Silikagel konnten mit hoher Zuverlässigkeit durchgeführt werden, während Nassschalenversuche mit Ammoniumdihydrogenphosphat-Lösung ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ -Lösung) aufgrund von gasförmigen Korrosionsprodukten zwischen den Aluminiumschalen und der Lösung nur vereinzelt funktionierten. Um dennoch Ergebnisse aus Nassschalenversuchen zu Verfügung zu haben, wurden Aluminiumschalen der Trockenschalenversuche nach dem Versuch aufgeschnitten und in neue, mit destilliertem Wasser befüllte Aluminiumschalen geklebt. Referenzproben mit Aluminiumscheiben (s. Bild) ergaben sehr geringe Verluste durch die PUR-Verklebung in der Größenordnung 0.2mg/Tag, die zur Korrektur aller Massenverluste verwendet wurden.

Die Auswertung erfolgte nach [DIN EN ISO 12572] und [DIN EN ISO 7789] wobei erstere die Beschichtung und das Substrat (hier Fichte) und letztere nur die Beschichtung behandelt. Der Massenverlust wird über eine Regressionsgerade zwischen Masse und Zeit ohne Berücksichtigung des nichtlinearen Anfangsbereiches bestimmt. Ihre Steigung ist der Wasserdampfdiffusionsstrom G in [g/d] durch die Probe.



Abbildung 19: Beschichtungssysteme auf Probekörpern mit Referenzprobe (unten rechts).

Als effektive Referenzfläche A zur Berechnung der Wasserdampfdiffusionsstromdichte $g=G/A$ in $[\text{kg}/(\text{sm}^2)]$ wird der Mittelwert der freien oberen ($D_o=96\text{mm}$) und unteren ($D_u=87\text{mm}$) Flächen genommen. Das Labor befindet sich auf $h=540\text{ m.ü.M.}$, was mit der internationalen Höhenformel einem atmosphärischen Druck von

$$p = p_0 \cdot \left(1 - \frac{0.0065 \text{K/m} \cdot h}{T_0}\right)^{5.255} = 1013.25 \cdot \left(1 - \frac{0.0065 \cdot 540}{293.15}\right)^{5.255} = 951.1 \text{hPa} \quad (2.1)$$

entspricht.



Abbildung 20: Schalenproben mit Aluminium Referenzprobe.

Der Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient W wird über

$$W = \frac{G}{A \cdot \Delta p_v} = \frac{g}{\Delta p_v} \left[\frac{\text{kg}}{\text{sm}^2 \text{Pa}} \right], \quad (2.2)$$

bezeichnet, wobei Δp_v die Dampfdruckdifferenz über den Probekörper, also $p_{sat}(\varphi=50\%RH)$ - $p_{sat}(\varphi=0\%RH)$ entspricht. Es gilt:

$$\Delta p_v = p_{sat}(\varphi = 50\%R.H.) - p_{sat}(\varphi = 0\%R.H.) \text{ mit } p_{sat} = \varphi \cdot 610.5 \cdot \exp\left(\frac{17.269 \cdot \theta}{237.3 + \theta}\right) [Pa] \quad (2.3)$$

mit der Temperatur θ in °C und relativen Luftfeuchte φ [-]. Der Wasserdampfdiffusions-Durchlasswiderstand $Z=1/W$, während der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient $\delta=Wd$ mit der Probendicke d . Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl $\mu = \delta_a / \delta$ mit

$$\delta_a = \frac{2.306 \cdot 10^{-5} p_0}{R_v T p} \left(\frac{T}{273}\right)^{1.81} \left[\frac{kg}{smPa}\right]. \quad (2.4)$$

R_v bezeichnet die Gaskonstante für Wasserdampf $R_v=462Nm/(kgK)$ und T die Temperatur in °C und $p_0=1013.25hPa$. Die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke $s_d=\mu d$. Wenn sie grösser als 0.2 ist, muss nach [DIN EN ISO 12572] Anhang G keine Korrektur für den Widerstand der Luftschicht im Prüfgefäß durchgeführt werden.

Die Wasserdampfdiffusionsstromdichte V der Beschichtung selbst wird wie folgt ermittelt:

$$V = \frac{V_{cs} \cdot V_s}{V_s - V_{cs}} [kg / sm^2], \quad (2.5)$$

wobei V_s die Wasserdampfdiffusionsstromdichte der unbeschichteten Fichte (Referenzprobe) ist und V_{cs} dem Wert der beschichteten Probe nach DIN_12572 entspricht. W , μ und s_d der reinen Beschichtung nach DIN_7783 sind gleich zu ermitteln wie oben beschrieben, statt g wird jedoch V verwendet und anstelle der Probendicke benötigt man die Beschichtungsdicke.

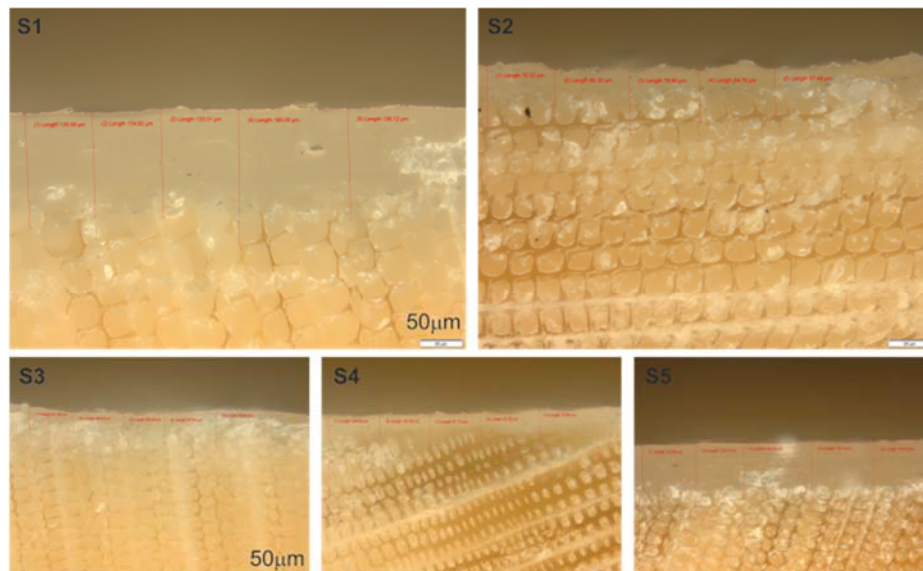


Abbildung 21: Dünnschnitte zur Bestimmung der Beschichtungsdicke.

Die Resultate aus den Schalenversuchen sind im Folgenden zusammengefasst, wobei die Ergebnisse aus vier Versuchen je Beschichtungssystem und Konfiguration gemittelt wurden. In Tabelle 9 findet man die Werte für das Substrat Fichte plus der Beschichtung (Auswertung

gemäss DIN EN ISO 12572 [2015]), während die Werte nur das Beschichtungssystem betreffend in Tabelle 10 abgebildet sind (Auswertung gemäss DIN EN ISO 7783 [2012]). Die Beschichtungsdicken wurden mit Dünnschnitten ermittelt (Abbildung 21).

Tabelle 9: Ergebnisse der Schalenversuche für Fichte und Beschichtung.

		g [kg=m ² s]	W [kg=m ² sP a]	μ [-]	s_d [m]
Referenz	dry	6,3440E-07	5,4293E-10	9,3739E+01	4,0308E-01
	wet	-1,9616E-06	-1,6788E-09	3,0317E+01	1,3036E-01
S1	db	4,5054E-07	3,8558E-10	1,3161E+02	5,6594E-01
	dt	4,0796E-07	3,4914E-10	1,4517E+02	6,2424E-01
	wb	-7,6341E-07	-6,5334E-10	8,8346E+01	3,7989E-01
	wt	-7,9485E-07	-6,8025E-10	7,6147E+01	3,2743E-01
S2	db	5,8026E-07	4,9660E-10	1,0235E+02	4,4011E-01
	dt	5,3475E-07	4,5765E-10	1,1279E+02	4,8499E-01
	wb	-1,4994E-06	-1,2832E-09	3,9597E+01	1,7027E-01
	wt	-1,8141E-06	-1,5525E-09	3,3091E+01	1,4229E-01
S3	db	5,3861E-07	4,6096E-10	1,0992E+02	4,7267E-01
	dt	5,1267E-07	4,3875E-10	1,1648E+02	5,0085E-01
	wb	-1,0337E-06	-8,8468E-10	5,7640E+01	2,4785E-01
	wt	-1,3969E-06	-1,1955E-09	4,2737E+01	1,8377E-01
S4	db	4,7721E-07	4,0841E-10	1,2429E+02	5,3443E-01
	dt	4,5815E-07	3,9210E-10	1,2971E+02	5,5774E-01
	wb	-7,9305E-07	-6,7871E-10	7,9391E+01	3,4138E-01
	wt	-9,6832E-07	-8,2871E-10	6,1849E+01	2,6595E-01
S5	db	5,1392E-07	4,3982E-10	1,1651E+02	5,0098E-01
	dt	4,4126E-07	3,7764E-10	1,3452E+02	5,7844E-01
	wb	-4,9086E-07	-4,2008E-10	1,2086E+02	5,1969E-01
	wt	-9,3341E-07	-7,9883E-10	6,3670E+01	2,7378E-01

Tabelle 10: Ergebnisse der Schalenversuche nur die Beschichtung betreffend.

		d_{Besch} [m]	V [kg=m ² s]	W [kg=m ² sP a]	μ [-]	s_d [m]
S1	db	1,6150E-04	1,5546E-06	1,3305E-09	9,6593E+02	1,5600E-01
	dt	1,6150E-04	1,1429E-06	9,7814E-10	1,3139E+03	2,1219E-01
	wb	1,6150E-04	-1,2498E-06	-1,0696E-09	1,2015E+03	1,9405E-01
	wt	1,6150E-04	-1,3364E-06	-1,1437E-09	1,1237E+03	1,8148E-01
S2	db	7,8300E-05	8,2513E-06	7,0616E-09	3,7537E+02	2,9392E-02
	dt	7,8300E-05	3,4046E-06	2,9137E-09	9,0975E+02	7,1234E-02
	wb	7,8300E-05	-7,0844E-06	-6,0630E-09	4,3720E+02	3,4233E-02
	wt	7,8300E-05	-2,4127E-05	-2,0648E-08	1,2837E+02	1,0052E-02
S3	db	7,1130E-05	3,5674E-06	3,0531E-09	9,5573E+02	6,7981E-02
	dt	7,1130E-05	2,6719E-06	2,2867E-09	1,2760E+03	9,0765E-02
	wb	7,1130E-05	-2,1854E-06	-1,8703E-09	1,5602E+03	1,1097E-01
	wt	7,1130E-05	-4,8520E-06	-4,1524E-09	7,0270E+02	4,9983E-02
S4	db	7,5400E-05	1,9261E-06	1,6484E-09	1,6700E+03	1,2591E-01
	dt	7,5400E-05	1,6492E-06	1,4114E-09	1,9504E+03	1,4706E-01
	wb	7,5400E-05	-1,3313E-06	-1,1393E-09	2,4161E+03	1,8217E-01

	wt	7,5400E-05	-1,9123E-06	-1,6366E-09	1,6820E+03	1,2682E-01
S5	db	1,3190E-04	2,1019E-06	1,7989E-09	8,7475E+02	1,1538E-01
	dt	1,3190E-04	1,4494E-06	1,2404E-09	1,2686E+03	1,6733E-01
	wb	1,3190E-04	-6,8405E-07	-5,8542E-10	2,6879E+03	3,5454E-01
	wt	1,3190E-04	-1,7808E-06	-1,5240E-09	1,0325E+03	1,3619E-01

Die folgenden Bezeichnungen wurden verwendet:

g: Wasserdampfdiffusionsstromdichte nach DIN EN ISO 12572 [2015]

V: Wasserdampfdiffusionsstromdichte nach DIN EN ISO 7783 [2012]

W: Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient

μ : Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

s_d : wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke

d_{Besch} : Beschichtungsdicke

3.1.3. Feuchteentwicklung in BSH

Holzfeuchtemessungen wurden bei (Beschichtungsproben bei) 0, 1512, 3960 und 5952 Stunden durchgeführt. Dazu wurden die Proben aus den jeweiligen Klimakammern (Klimalogger Abbildung 22) genommen und zunächst gewogen, bevor die Feuchteprofile über Widerstandsmessung gemäss DIN EN ISO 13183-2 [2002] und BDZ-MB Elektrische Holzfeuchtemessung [2004] ermittelt wurden. Wie in Abbildung 22 ersichtlich ist, weichen die effektiven Luftfeuchten von den Sollwerten aus mehreren Gründen leicht ab. Weiter muss beachtet werden, dass die Luft ständig umgewälzt wird, damit sich keine stehende Luftschicht einstellt, die als zusätzlichen Widerstand auf den Feuchteaustausch wirkt. In einer grossen Klimakammer lässt sich dieser Idealzustand jedoch nur teilweise realisieren. Im Aussenklima kann eine ideale Anströmung ebenfalls nicht realisiert werden. Im Innenraumklima wurden aufgrund der Klimaanlage annähernd 50%RH gehalten, das typisch Absinken der rel. Luftfeuchtigkeit auf 30% RH und darunter, wie es im Winter in beheizten und belüfteten Räumen üblich ist, erfolgte also nicht. Zudem muss man die Unterschiede im Diffusionswiderstand berücksichtigen. Esche lässt sich nur sehr langsam fehlerfrei trocknen, so gibt [Kollmann 1951] als Trocknungszeit bei natürlicher Trocknung 5 Jahre an (nicht näher spezifiziert). Bei unzureichender Luftbewegung kann der Prozess also über Jahre hinweg erfolgen, wenn man zudem den grossen Querschnitt des im House of Natural Resources eingesetzten Holzes (360x360mm) und die zusätzlich den Diffusionswiderstand erhöhende Wirkung der Klebfugen berücksichtigt.

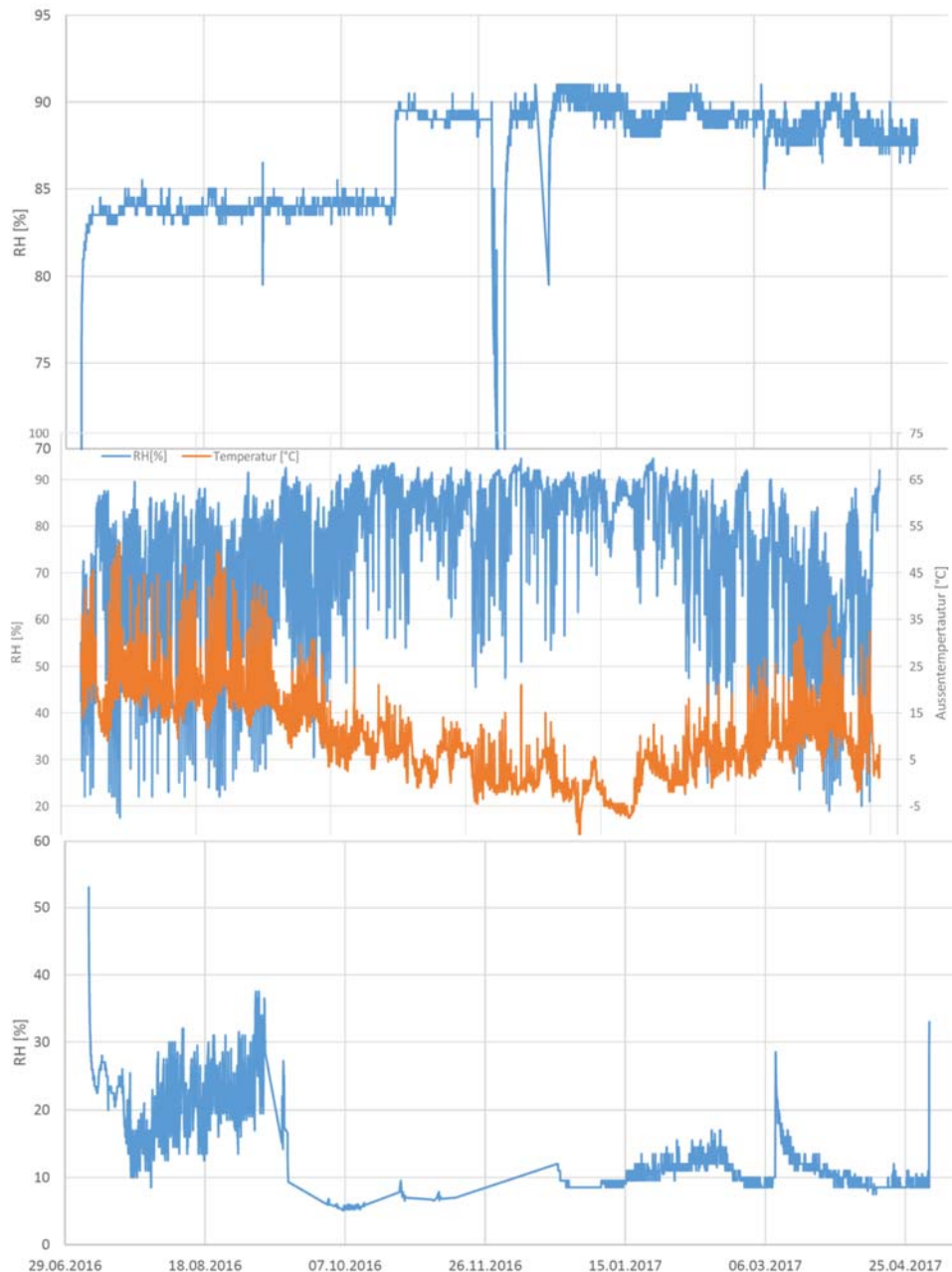


Abbildung 22: Relative Luftfeuchte in der Klimakammer mit 95%RH (oben) Aussenlager (mittig) und 10% RH (unten) Sollwert.

3.1.3.1. Fichte-BSH mit unterschiedlichen Beschichtungen

In Abbildung 23 sind die Messwerte in 10 mm Tiefe für alle Proben abgebildet. Die grössten Differenzen der Holzfeuchte zwischen den verschiedenen Beschichtungen treten nach ungefähr 150 Tagen auf. Die im feuchten Klima von der Referenzprobe angestrebten 20 %EMC (90%R.H.) entsprechen dem Klima aus Abbildung 22. Beim trockenen Klima hat zusätzlich zur schwankenden Luftfeuchte die Ungenauigkeit der Widerstandsmessung (nach DIN EN ISO 13183-2 [2002] erlaubt für Holzfeuchten von 7 – 30%EMC) einen Einfluss auf die Messwerte. Ebenfalls sind die Feuchtentwicklung von S0 und S5 über alle Messtiefen (10, 20, 40, 60 mm)

abgebildet. Eine Verzögerung des Feuchtetransports ist vor allem in feuchter Umgebung erkennbar. Dass sich bei den trocknenden Proben eher gegenteiliges zeigt, lässt sich mit den oben beschriebenen Punkten erklären. Auch reagiert die unbeschichtete Probe schneller auf die schwankende Luftfeuchte im Trockenschrank und die Messungen in diesem Feuchtebereich sind relativ ungenau. Eine tabellarische Aufstellung wird beim Vergleich mit der FEM Rechnung gezeigt (Tabelle 16).

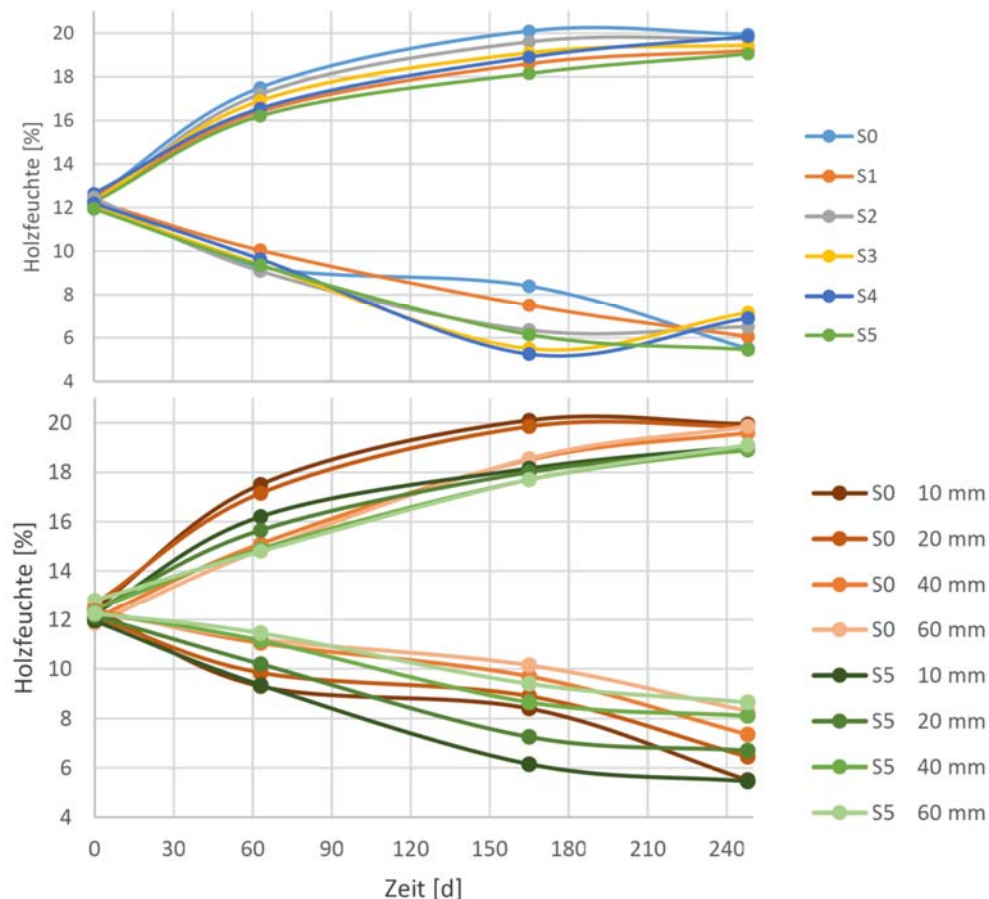


Abbildung 23: Feuchtentwicklung (oben) in 10 mm Tiefe der BSH-Proben S0-S5 im 95 % und 10 % Klima, sowie (unten) in unterschiedlichen Tiefen für Probensatz S0 und S5.

3.1.3.2. BSH Träger mit unterschiedlichen Aufbauten

In einem ersten Schritt soll näher auf die Ergebnisse aus den durchgeführten Langzeitexperimenten eingegangen werden. Dazu werden die Feuchtemessungen der Versuchsreihen 1 und 3 ausgewertet, die Verformungen analysiert und auftretende Delaminationen dokumentiert. Zunächst wurden die Gesamtmassen der Proben ermittelt. Die genauen Werte der Gesamtmassenmessung können Tabelle 39 entnommen werden. In den in Abbildung 24 dargestellten Ergebnissen sind die Masseentwicklungen der Proben HF-40 und HE-40 aus Versuchsreihe 1 (Innenklima, 2 (Aussenklima) und 3 (Trockenschrank) abgebildet, die repräsentativ sind. In allen Proben sind Masseänderungen ersichtlich. Die Proben der Versuchsreihe 1 im Innenraumklima verlieren über den gemessenen Zeitraum nur ca. 0,5 % ihrer Gesamtmasse. Da dort auch keinerlei Delaminationen auftraten, wird diese Versuchsreihe nicht weiter betrachtet.

Die Messungen der Experimente erfolgten am 05.07.2016, 07.09.2016, 16.12.2016 und 03.05.2017.

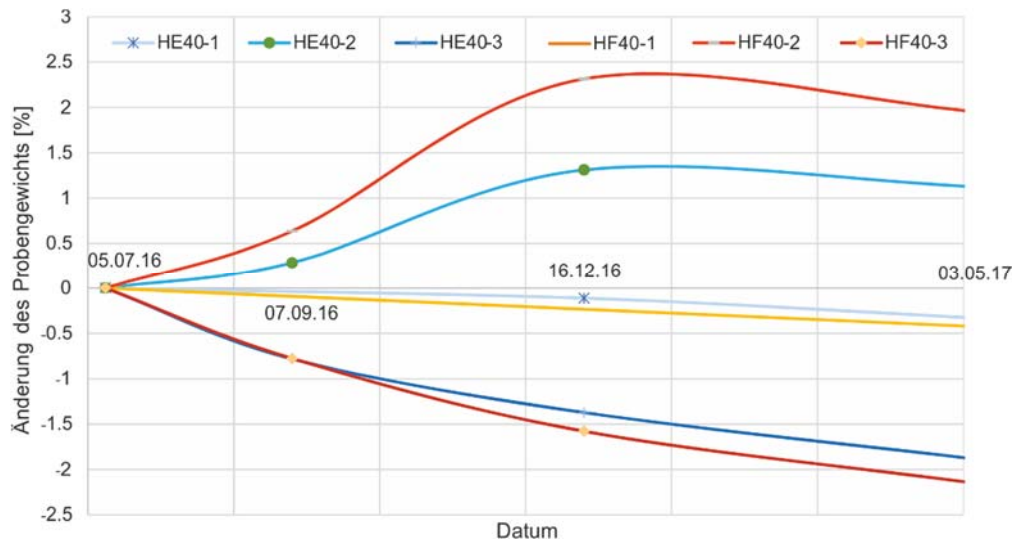


Abbildung 24: Massenentwicklung der Proben mit 40mm Lamellen.

Je 4 Paare von Feuchtesensoren in Tiefen von 10 mm, 20 mm, 40 mm und 60 mm wurden zur Messung der Feuchteänderung verwendet. In Tabelle 40 sind die Messdaten für die Versuchsreihen 1-3 vollständig aufgelistet. An dieser Stelle werden der Übersicht halber nur drei verschiedene Aufbauten dargestellt. Zuerst sollen die Messergebnisse der homogenen Aufbauten für Fichte und Esche (HF-40 und HE-40) ausgewertet werden. Daraufhin wird hinsichtlich der späteren Optimierung von hybriden Querschnitten die Feuchtemessung einer hybriden Probe ausgewertet. Dazu wird der hybride Aufbau HYE2-40 mit der Lamellenanordnung Esche-Fichte-Esche herangezogen, da diese Zusammensetzung der Lamellenanordnung auch bei der Optimierung verwendet wird.

Der Vergleich des Innenraumklimas (Reihe 1) zum Klima im Trockenschrank (Reihe 3) zwischen reiner Esche und Fichte (Abbildung 25) zeigt die Ausbildung starker Feuchteprofile in den Proben des Trockenschrankes im Verhältnis zu den Proben des Innenraumklimas. Bei diesen erkennt man eher einen Feuchteausgleich innerhalb der Lamellen, was geringe Eigenstressungen und die Entwicklung geringer Delaminationen erklärt. Der Anfangsunterschied in den Messungen kommt vermutlich daher, dass die hergestellten Lamellen nach der Trocknung noch längere Zeit gelagert wurden, bevor erneut die Holzfeuchtigkeit gemessen wurde. Bei den Proben der Serie 3 erkennt man jedoch die rasche Ausbildung eines Feuchteprofils, das insbesondere am zweiten Messtag (07.09.2016) die stärksten Gradienten aufweist.

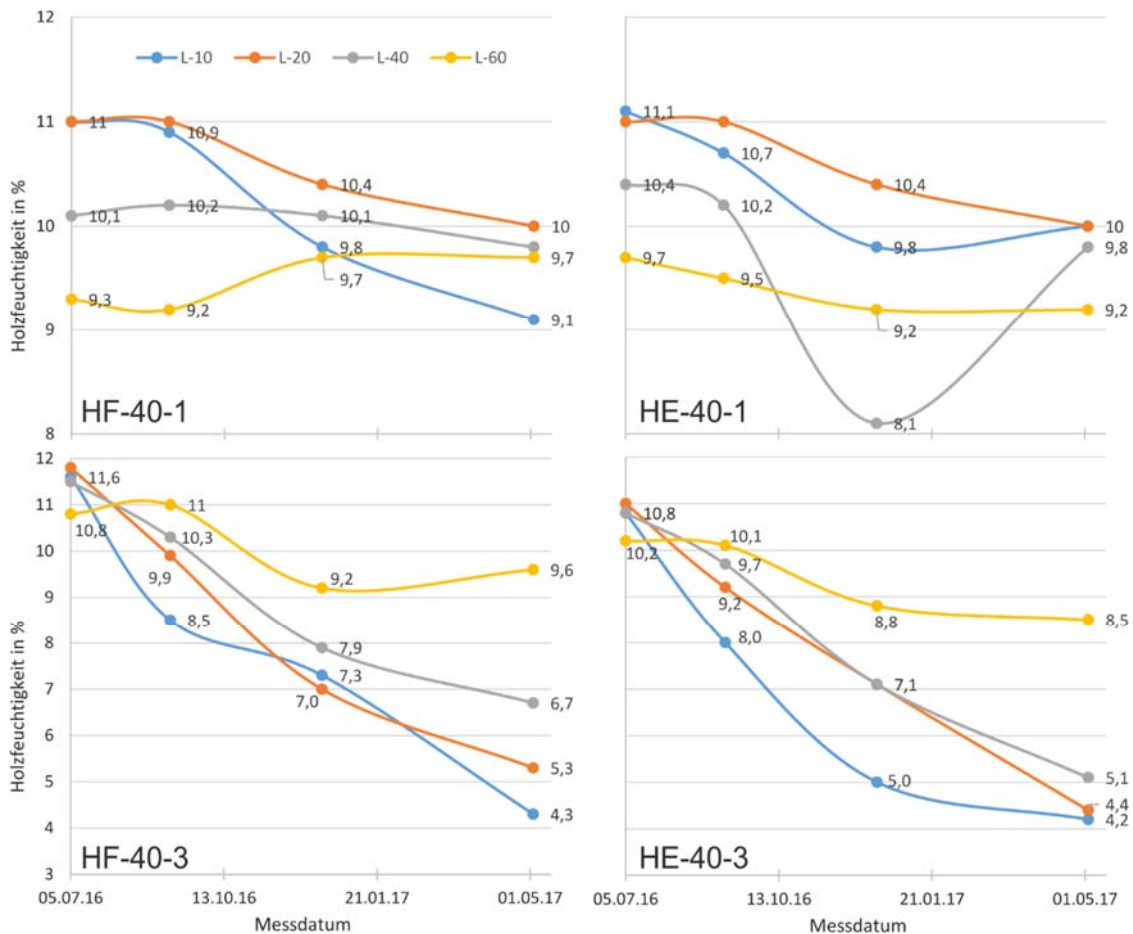


Abbildung 25: Entwicklung der Holzfeuchte in den homogenen Esche und Fichteplatten der Serien 1 und 3.

Betrachtet man die Ergebnisse der hybriden Aufbauten (Abbildung 26) fällt auf, dass die Austrocknung des Holzes über den Winter etwas höher ist als bei den homogenen Probenaufbauten. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die hybriden Aufbauten mit 240x360x700 mm kleinere Abmessungen als die homogenen Aufbauten aufweisen und somit empfindlicher auf Luftfeuchteschwankungen reagieren. Bei Serie 3 (Trockenschranklagerung) ist gut zu erkennen, dass die Holzfeuchte an den Probenrändern deutlich schneller abnimmt als im Inneren. Insgesamt erscheinen die Profile, ausser bei sehr geringen Feuchten, plausibel und korrelieren mit der Gesamtmasseentwicklung.

3.1.4. Querschnittsverformungen

Die Auswertung der Verformungen der Endquerschnitte über Bildkorrelation erfolgte über Aufnahmen mit einer 10.1 Megapixel Kamera mit Makroobjektiv. Die Korrelation und Dehnungsberechnung wurde über ncorr, eine open source Applikation für Matlab durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Speckel sehr gut erkannt werden konnten. Jedoch erwies sich die Auflösung der Kamera als zu niedrig um Verformungsunterschiede zwischen den Lamellen aufzulösen. Risse zeichnen sich jedoch deutlich durch geringe Dehnungen an Rissufern und hohe Verschiebungswerte ab. Da diese Erkenntnisse jedoch eher trivial sind, wird auf ihre Darstellung verzichtet und eine optische Beurteilung der Delaminationen durchgeführt.

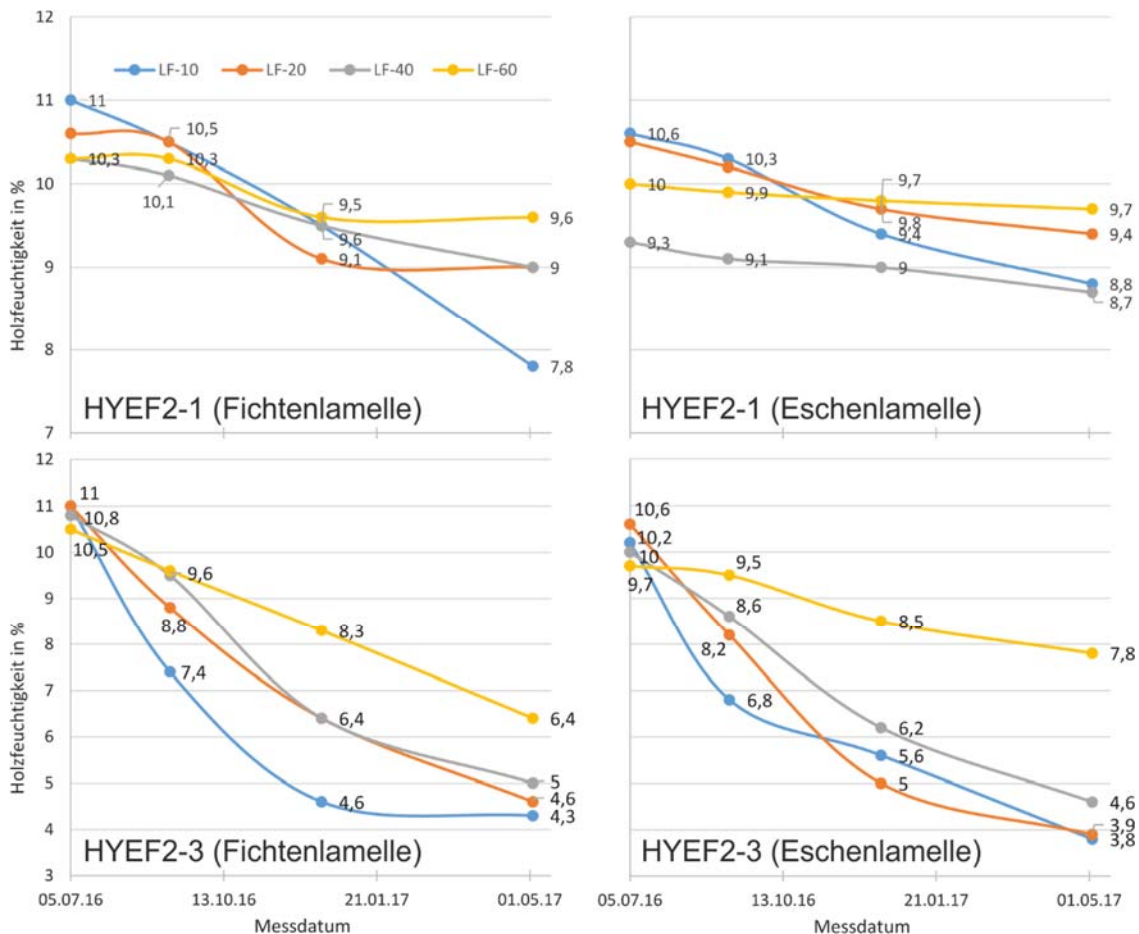


Abbildung 26: Entwicklung der Holzfeuchte in den hybriden Proben der Serien 1 und 3.

3.1.5. Schädigungsentwicklung in BSH

Bei den beschichteten Fichten-Proben wurden aufgrund der Probenabmessungen keine Delaminationen oder andere Schäden beobachtet.

In Proben der **Serie 1** (Innenraumlagerung 50%RH) treten zwar einige kleinerer Risse auf, diese sind jedoch fast nur innerhalb von Lamellen und betreffen nicht die Klebfugen, stellen also keine Delaminationen dar. Es handelt sich dabei um die Proben HF-30-1 und HF-20-1 mit Rissen an der Ober- und Unterseite.

Bei der **Serie 2** (Aussenlager überdacht) traten lediglich bei zwei hybriden Proben Risse in der Aufdopplungen auf, die sich einfach über die höheren Quellungskoeffizienten der Eschen- in Bezug auf die Fichtenlamellen erklären lassen. In den Eschenlamellen ist Druck, in den Fichtenlamellen Zug senkrecht zur Klebfuge bei Feuchteerhöhung (s. Abbildung 27). Die Schäden in den Proben im bewitterten Aussenlager sind in Abbildung 28 zusammengefasst. Man erkennt verteilte Schäden hauptsächlich in den Fichtenlamellen. Diese stellen meisst Risse durch das Holzmark oder in angrenzenden Regionen dar und nur zu einem sehr kleinen Anteil Delaminationen, die jedoch nicht tief gehen. Bei den homogenen Eschenproben beobachtet man im Prinzip keine Schäden, ausser bei zwei Lamellen innerhalb der Lamelle einen grossen Riss. Dies ist jedoch eher einer Unachtsamkeit bei der Auswahl der Lamellen geschuldet. Bei hybriden Proben finden sich auftretende Schäden ausschliesslich in den Fichtenlamellen. Dort wird auch eine Delamination in der Probe HYEF-2 am Holzart-interface beobachtet, die - wenn auch weniger ausgeprägt - ebenfalls bei der genuteten Variante HYEF-3 auftritt.

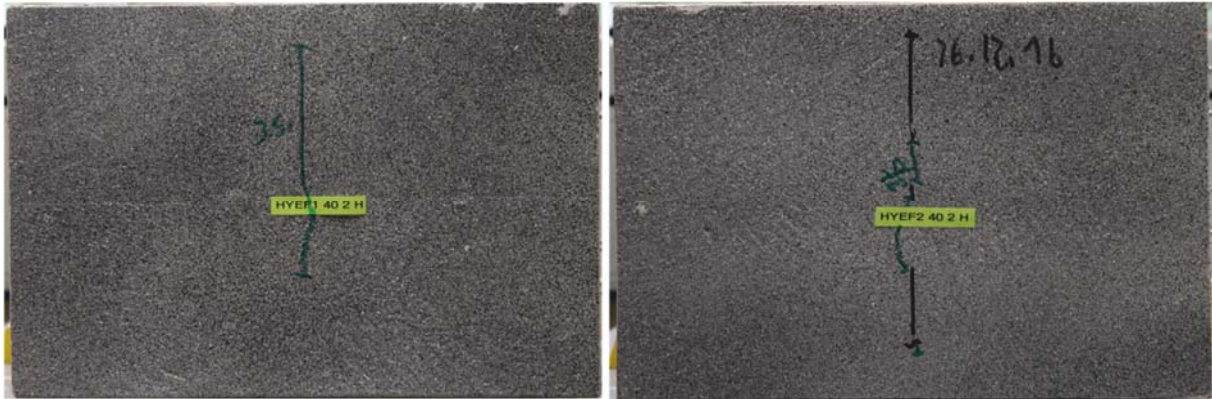


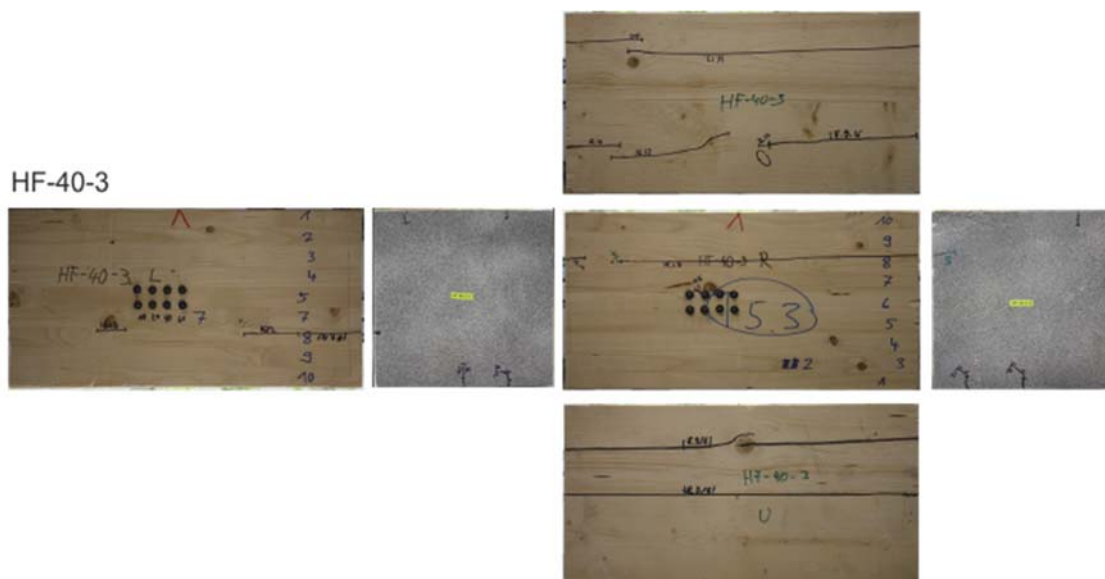
Abbildung 27: Delamination der Aufdopplung der Hybriden Proben HYE1 und 2 im überdachten Aussenlager (Serie 2).



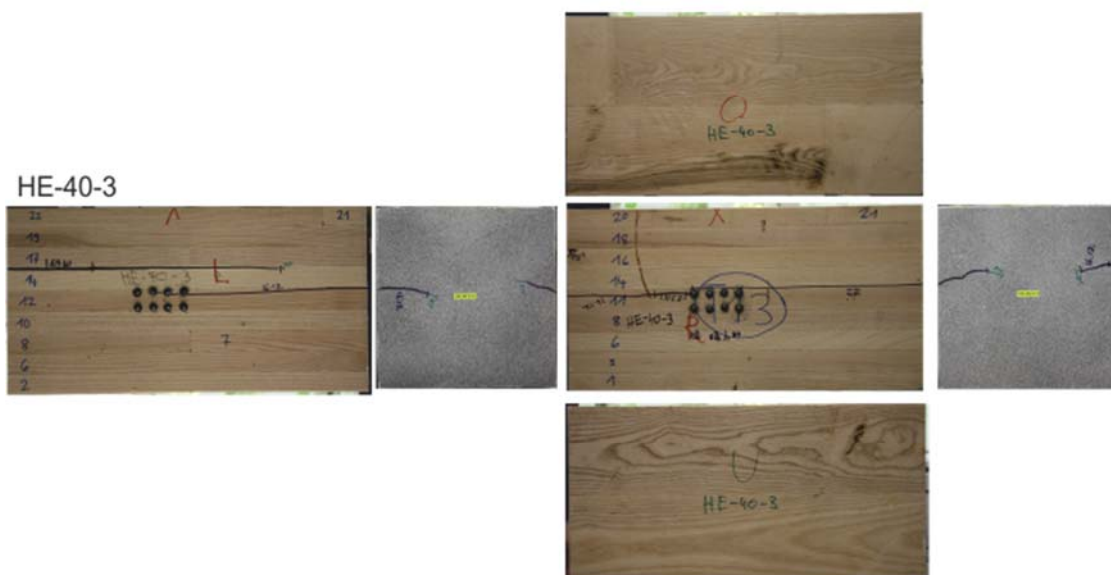
Abbildung 28: Beobachtete Schäden der Segmente im gewitterten Aussenlager.

In Bezug auf die Schädigungsentwicklung ist die **Serie 3** (Trockenraum) am ergiebigsten. Man beobachtet unterschiedliche Schädigungsarten wie Risse im Holz, Risse in den Klebfugen der Aufdopplung und Delaminationen an Lamellenklebfugen. Typische Schäden sind in Abbildung 29 dargestellt.

HF-40-3



HE-40-3



HYEF2-40-3

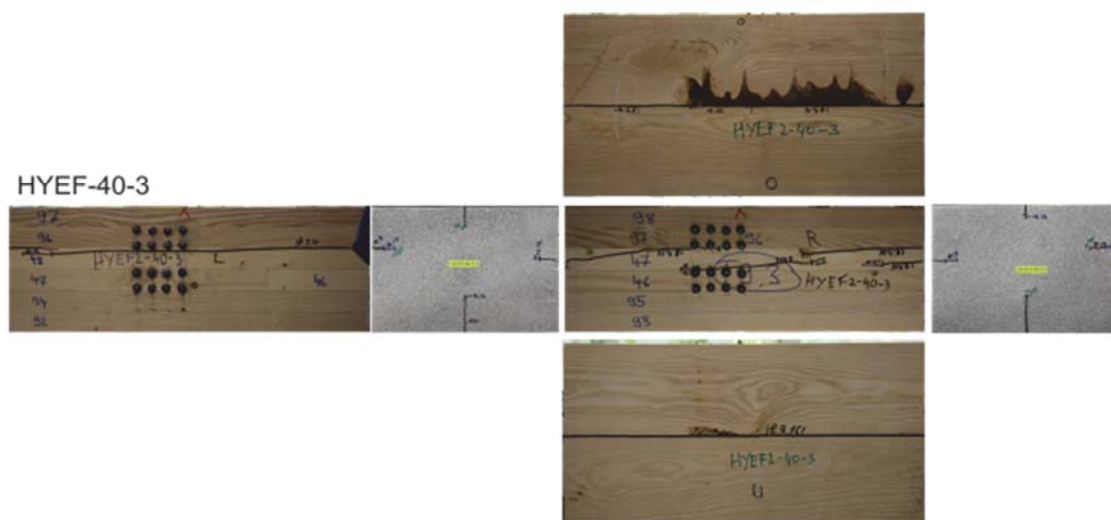


Abbildung 29: Abwicklungen der Proben HF/HE/HYEF2-40 mit eingezeichneten Schäden.

Alle Risse sind in der frühen Trocknungsphase bis zum 16.12.2016 entstanden. Die Risse haben sich danach bis zum 03.05.2017 nur noch minimal fortgesetzt. Es ist also die Periode mit den grössten Feuchtegradienten, die kritisch für die Rissbildung ist. Vergleicht man die Risse zwischen Fichte und Esche (HF-40 mit HE-40) so erkennt man, dass in der Fichte zwar viele Trocknungsrisse entstanden sind, diese aber im Holz verlaufen und nicht in der Klebfuge. Bei der Esche hingegen verlaufen Risse in der Klebfuge als Delaminationen. Dieses Verhalten ist dem Verhältnis der Bruchzähigkeit von Holz- zu Klebfugen geschuldet, dass bei Fichte geringer ist. Zudem ist bei Laubholz die Scherfestigkeit deutlich höher als bei Nadelholz, was zu höheren relativen Beanspruchungen der Klebfugen führt, angenommen man hat gleiche Festigkeit der reinen Klebfuge. Die Delaminationen in den Fugen beginnen an den seitlichen Probenrändern und setzen sich in Richtung Probeninneres hin fort. Dort geht die Delamination teilweise in Risse im Holz über, wenn sie dem Faserverlauf folgt. Bei der Fichte erkennt man noch einen tiefen Riss in der Klebfuge der Aufdopplung, der sich bei der Eschenprobe nicht entwickelt hat. Proben mit dünneren Eschenlamellen weisen diesen Riss jedoch auch auf. In Probe HYE2-40-3 sind während des Trocknungsprozesses sowohl Delamination an der Ober- und Unterseite, sowie Risse und Delamination einzelner Klebstofffugen an den Proben-seiten aufgetreten. Auf der Ober- und Unterseite ist ein Riss in der Mittelklebstofffuge aufgetreten, der sich genau gegensätzlich zu dem in Serie 2 (Absorption) bildet. Auf der linken und rechten Proben-seite ist in der Fuge zwischen Esche (Lamelle 96 bzw. 97) und Fichte (Lamelle 46 bzw. 47) entstanden. Zusätzlich ist auf der rechten Seite die Fichtenlamelle 47 gerissen. Eine vollständige Darstellung aller Proben findet sich in Abbildung 92 - Abbildung 95.

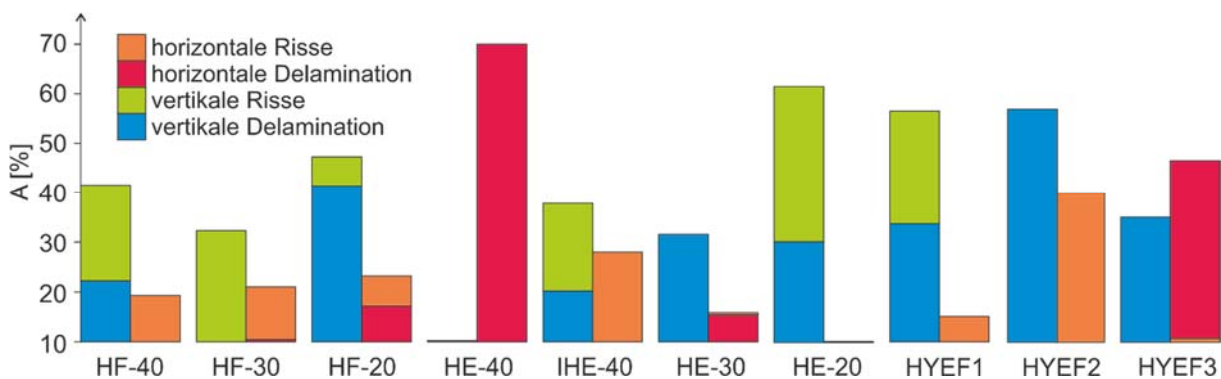


Abbildung 30: Quantifizierung der Trocknungsschäden in den BSH Aufbauten.

Zur Quantifizierung der aufgetretenen Risse werden die Aufnahmen herangezogen. Es wird zwischen Delaminationen, also Rissen in unmittelbarer Nähe zur Klebfuge und solchen im Holz unterschieden, sowie Rissorientierungen parallel zur Klebfuge der Aufdopplung und parallel zu den Lamellenklebfugen. Die Rissflächen werden auf folgende Weise bestimmt:

- bei durchgehenden Rissen über Risslänge und Mittelwert der an den Stirnenden messbaren Risstiefen,
- bei Rissen bei denen an nur einer Stirnseite die Risstiefe bestimmbar ist als Viertel einer Ellipse mit den Halbachsen Risslänge und –tiefe,
- Bei Rissen, die innerhalb der Probe enden wird als Rissfläche eine halbe Ellipse mit den Halbachsen der halben Rissbreite und $0.05 \cdot \text{Rissbreite}$ als Risstiefe genommen.

Die Flächen werden aufsummiert und mit der Gesamtfläche bei vollständigem Riss ins Verhältnis gesetzt (s. Abbildung 30). Über Schäden die übereinander liegen können dabei Werte grösser als der Gesamtfläche entstehen. Da jeweils nur eine Probe pro Aufbau hergestellt wurde, lassen sich die Schäden eher qualitativ beurteilen. Es ist interessant zu beobachten,

wie bei Fichteproben die Tendenz bei abnehmender Lamellendicke von horizontalen Rissen hin zu horizontalen Delaminationen geht, da dünnere Lamellen höhere Festigkeitswerte haben. Bei Esche jedoch zeigen dicke Lamellen eine höhere Delaminationsneigung. Bei den 20mm Lamellen treten kaum horizontale Schäden auf, dafür aber vertikale. Der Vergleich der Eschenproben mit 40mm Lamellen homogen und inhomogen, also mit alternierenden Riftbrettern, zeigt die Tendenz zu unterschiedlichen Schädigungsformen in den inhomogenen Proben. Sehr interessant ist auch der Vergleich der Proben HYEF2 und HYEF3, die bis auf die Entlastungsnuten in HYEF3 identisch sind. Wie man erkennt ist die Schädigungsausprägung in etwa gleich, bzw. die vertikalen Schäden sind aufgrund der Entlastungsnuten nicht so ausgeprägt. Betrachtet man aber nur die horizontalen Schäden, so sieht man, dass bei ungenutzten Proben diese im (Fichten-)Holz verlaufen, während durch die Nuten die Schäden in der Klebfuge verlaufen und stärker sind. Frühere Untersuchungen am IFB an Brettsperrholz kamen zu ähnlichen Ergebnissen bezüglich der Rolle der Entlastungsnuten. Bei allen hybriden treten starke vertikale Schäden auf, die auf die unterschiedliche Quellung der Holzarten zurückgehen. Eine genauere Betrachtung benötigt Informationen über die vorherrschenden Feuchteentwicklungen und die sich daraus entwickelnden Spannungen, die das Ergebnis der numerischen Berechnung sind.

3.2. Numerische Ergebnisse

3.2.1. Überprüfung des Holzmodells

Ein Validierungsbeispiel für das definierte Materialmodell ist bereits in [Hassani2015] gegeben. Dieses widmet sich vornehmlich dem Feuchtetransport und den rheologischen Eigenschaften. Nachfolgend sollen ausgewählte Punkte des Materialmodells mit experimentellen Ergebnissen verglichen werden. Alle Punkte können nicht überprüft werden, da häufig Adaptionen zwischen den Holzarten gemacht wurden aufgrund der Ermangelung von experimentellen Untersuchungen. Der Fokus liegt auf dem elastisch-plastischen Verhalten von Buche und Esche, sowie dem viskoelastischen Kriechen von Buche. Anspruch ist es, nicht den Materialpunkt zu überprüfen, sondern das Verhalten in Modellen entsprechender Prüfkörper.

Elastisches Verhalten: Für die Überprüfung des elastischen und plastischen Verhaltens von Holz wurde ein FE-Modell wie in Abbildung 31 gezeigt genutzt. Es besitzt die gleichen Abmessungen, wie die Prüfkörper von [Hering 2011] und [Oszhyar 2013], welche für Druck- und Zugversuche verwendet wurden. Das FE-Modell nutzt dabei die drei Symmetrieebenen aus, was durch die Verwendung eines kartesischen Koordinatensystems für die Materialachsen ermöglicht wird. Diese Annahme eines kartesischen Koordinatensystems wird als gute Näherung auch in den Experimenten als Grundlage für berechnete Grössen verwendet.

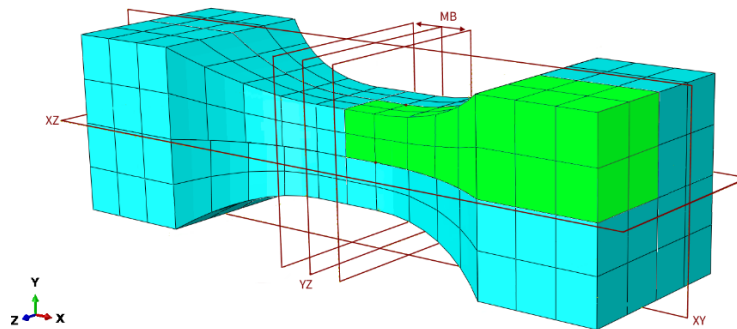


Abbildung 31: Visualisierung des FE-Modells für Holzprüfkörper für Druck- und Zugversuche, wobei der grüne Teil das simulierte Teilsystem markiert unter Ausnutzung der angegebenen Symmetrieebenen. Mit MB ist der Messbereich deklariert.

In den Einstellungen der UMAT-Subroutine wurde für die Simulationen ausgewählt, dass nur das plastische Verhalten berücksichtigt und Viskoelastizität, sowie mechano-sorptive Einflüsse vernachlässigt werden. Als dominierender Elementtyp wurden die reduziert integrierten, kubischen Elemente mit 20 Integrationspunkten gewählt. Die ermittelten und im nachfolgenden angegebenen Werte wurden aus den Verschiebungen im FE-Modell und der unverformten Geometrie berechnet. Einflüsse von Quellen und Schwinden auf die berechneten Parameter sind nicht zu erwarten, da die Holzfeuchte als konstant angenommen wurde und die Geometrie bei der entsprechenden Holzfeuchte definiert wurde. Die Messpunkte für die abzugreifenden Verschiebungen befinden sich jeweils auf der XY-Ebene und/oder XZ-Ebene, sowie auf der zur YZ-Ebene parallelen Messebene. Die Überprüfung beschränkt sich auf Buche und Esche für verschiedene Holzfeuchten, welche entsprechend vorliegender experimenteller Werte gewählt wurden.

Die Ergebnisse für die Elastizitätsmoduln in den anatomischen Richtungen aus den Simulationen unter Druck- und Zugbeanspruchungen von Buche sind in Abbildung 32 dargestellt. Neben den errechneten Werten aus den Verformungen des simulierten Testkörpers sind die experimentellen Ergebnisse aus [Hering 2011] (Druckversuche) und [Ozhay 2013] (Zugversuche) mit gezeigt. Zuletzt wurden die konkreten implementierten Kennwerte aus der UMAT-Subroutine nach [Hassani 2015] hinzugefügt. In Abbildung 32 ist gut zu erkennen, dass die Implementierung basierend auf den experimentellen Ergebnissen von [Hering 2011] getätigt wurde. Die Simulationsergebnisse bei unterschiedlichen Holzfeuchten und Belastungsrichtungen (Zug oder Druck) liegen wie erwartet nahezu auf einer Gerade, was dem implementierten linearen Zusammenhang zwischen Elastizitätsmoduln und Holzfeuchte entspricht (siehe Abschnitt 2.3.1). Entgegen der Erwartung entspricht diese Gerade nicht dem implementierten linearen Zusammenhang, was insbesondere für E_R und E_L zu beobachten ist. Mögliche Ursachen für diese Observation könnte ein fehlerhaft implementiertes Verhalten sein, aber auch naheliegender ein Effekt aus der Auswertung der Simulationen.

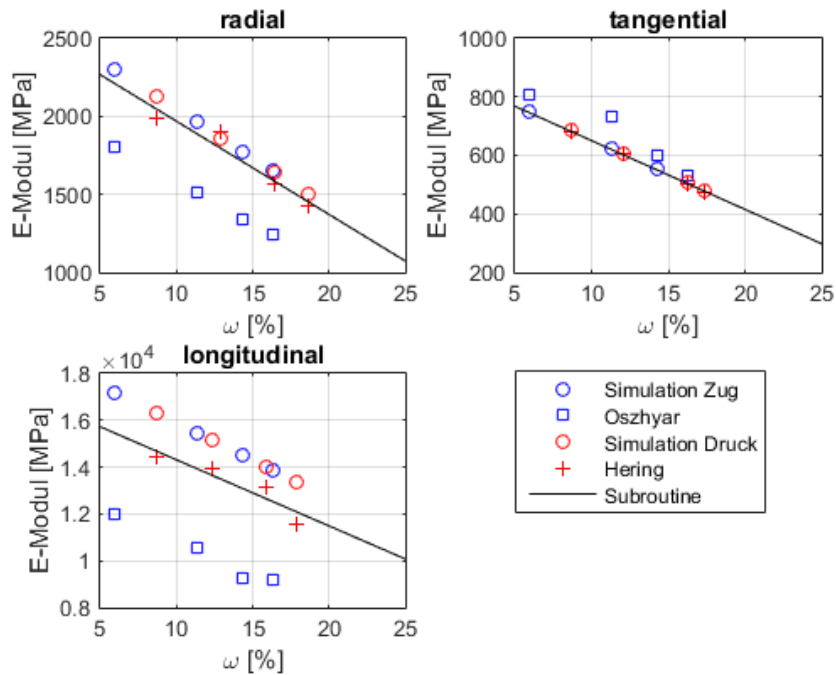


Abbildung 32: Elastizitätsmodul in verschiedenen Richtungen von Buchenholz aus [Hering 2011] und [Oszhyar 2013] verglichen mit den Simulationen und der Implementierung in der Subroutine.

Zunächst sollen jedoch die Querdehnzahlen für Buche untersucht werden, deren Ergebnisse in Abbildung 33 gezeigt sind. Die Beobachtungen für die Elastizitätsmoduln wiederholen sich für die Querdehnzahlen nahezu unverändert. Besonders auffällig sind die stark streuenden experimentellen Ergebnisse aus [Oszhyar 2013], nachdem die Elastizitätsmoduln noch gut durch einen linearen Ansatz hätten approximiert werden können. In [Oszhyar 2013] sind für die Querdehnzahlen auch Variationskoeffizienten angegeben, die mit bis zu 50% aufgrund des enormen Einflusses des Faserwinkels erheblich sind. Die Unsicherheiten der für die Implementierung genutzten Daten aus [Hering 2011] liegen jedoch auch in diesem Bereich.

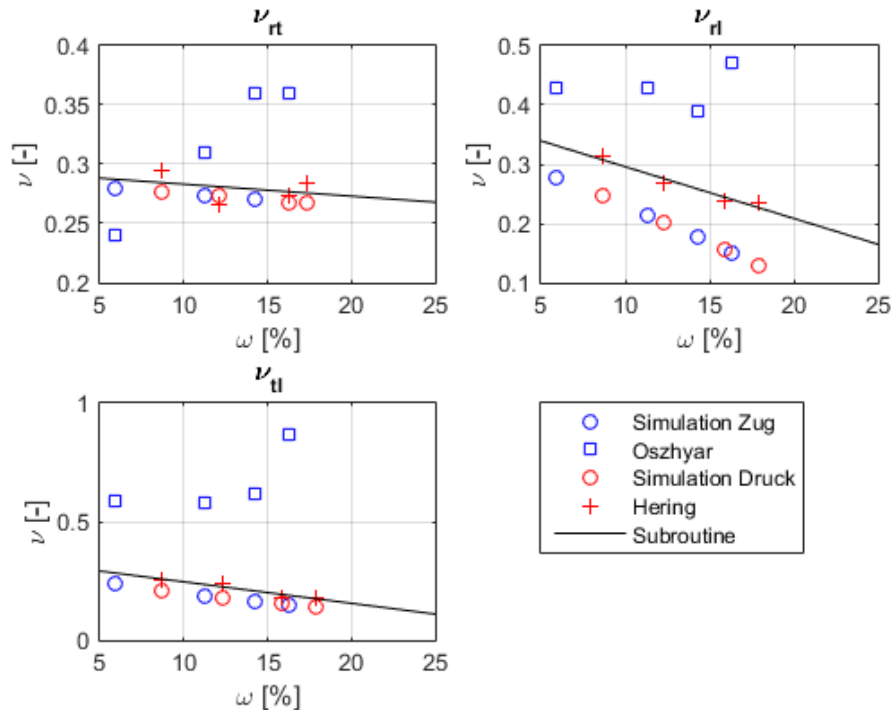


Abbildung 33: Querdehnzahlen von Buchenholz aus [Hering 2011] und [Oszhyar 2013] verglichen mit den Simulationen und der Implementierung in der Subroutine.

Der verschobene, aber nahezu lineare Zusammenhang lässt sich auch für die Querdehnzahlen beobachten. Im Gegensatz zu den Elastizitätsmoduln sind die ermittelten Querdehnzahlen jedoch geringer als die zu erwartenden implementierten Werte. Zur Bewertung dieser Beobachtung wurde ein einzelnes Element vom Typ C3D8 mit dem Materialmodell unter verformungsgesteuerter Druckbeanspruchungen simuliert. Die dabei ermittelten Elastizitätsmoduln und Querdehnzahlen entsprechen bis auf numerische Ungenauigkeiten exakt den implementierten Kenngrößen. Die Ursache für die beobachtete Verschiebung liegt demnach in den räumlichen Effekten des Simulationsmodells. In Tabelle 28 und Tabelle 29 des Anhangs sind die zugrunde liegenden Zahlenwerte für die Abbildung 32 und Abbildung 33 angegeben.

Für Esche wurden die gleichen Untersuchungen getätigt, wie für Buche. Die Ergebnisse sind in Abbildung 34 und Abbildung 35 festgehalten. Die zugehörigen Zahlenwerte sind tabellarisch im Anhang (Tabelle 30 und Tabelle 31) gegeben. In Abbildung 34 ist gut zu erkennen, dass auch für Esche Abweichungen zwischen Simulationsergebnissen und implementierten Materialeigenschaften auftreten. Die Differenzen sind prozentual nahezu identisch zu den bei Buche festgestellten. Dies kann als Bestätigung der Vermutung aufgefasst werden, dass die Modellierung der Prüfkörper für den beobachteten Unterschied verantwortlich ist. Auf die Betrachtung eines einzelnen Elements wurde daher verzichtet.

Die Querdehnzahlen in Abbildung 35 zeigen, dass mit steigender Holzfeuchte die Querdehnzahlen zunehmen. Dies steht im Gegensatz zum beobachteten Verhalten von Buche. In den Untersuchungen von [Neuhaus 1981] für Fichte wird auch eine Erhöhung mit steigender Holzfeuchte festgestellt. Die Regression mittels linearem Verhalten kann infrage gestellt werden, denn die zugrundeliegenden Werte aus [Niemz u.a. 2014] streuen deutlich. Ein Ansatz mittels Polynom 3.Ordnung wie in [Neuhaus 1981] erscheint aber insbesondere für ν_{TL} auch nicht geeignet. Der lineare Ansatz scheint daher am geeignetsten zu sein.

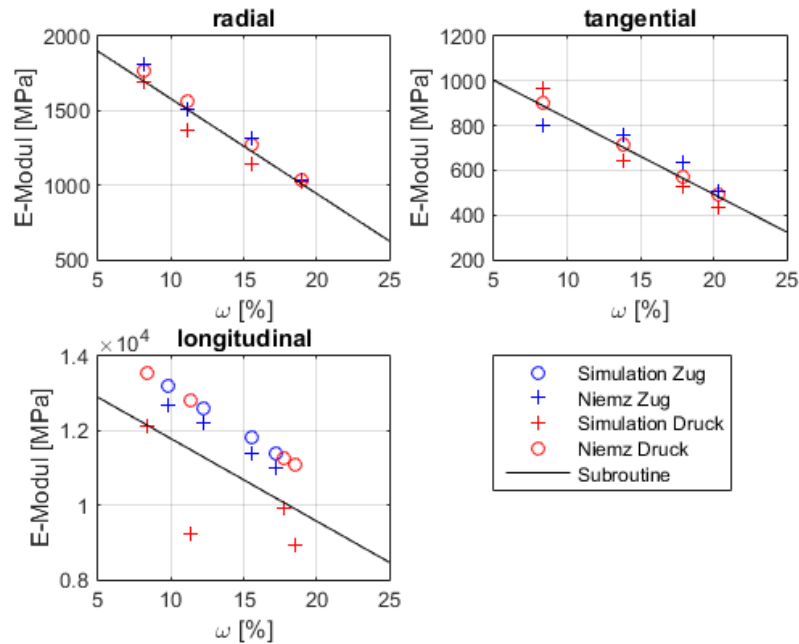


Abbildung 34: Elastizitätsmodul in verschiedenen Richtungen von Eschenholz aus [Niemz u.a. 2014] verglichen mit den Simulationen und der Implementierung in der Subroutine.

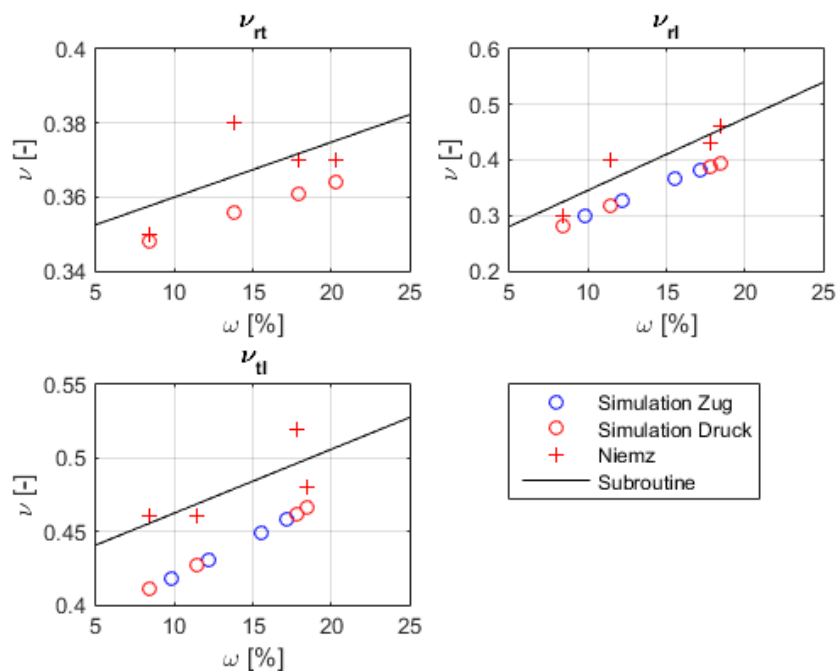


Abbildung 35: Querdehnzahlen von Eschenholz aus [Niemz u.a. 2014] verglichen mit den Simulationen und der Implementierung in der Subroutine.

Insgesamt entspricht das simulierte elastische Verhalten von Buche und Esche dem experimentell ermittelten Verhalten. Die Modellierung der knochenförmigen Prüfkörper führte jedoch zu Abweichungen.

Plastisches Verhalten: Elastisches und plastisches Verhalten wurden in den gleichen Simulationen ausgewertet. Daher gelten die allgemeinen Ausführungen zum Simulationsmodell auch hier.

Zur Überprüfung des plastischen Verhaltens werden die Spannungs-Dehnungs-Diagramme ausgewertet. Die Spannungsverläufe für **Buche** unter radialem und tangentialen Druck sind in Abbildung 36 dargestellt. Als Vergleichswerte für die blau dargestellten Simulationen dienen die Ramberg-Osgood-Kurven aus [Hering u.a. 2012] (rot) und die Implementierung eines Materialmodells in Matlab (grün).

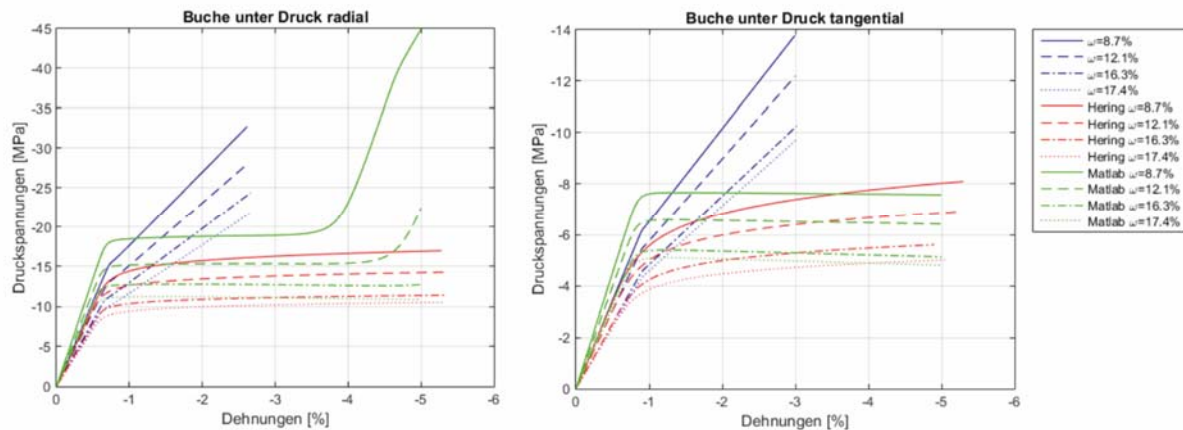


Abbildung 36: Plastisches Verhalten der Buche (l) radial und (r) tangential im Vergleich von Simulation (blau), Ergebnissen von [Hering u.a. 2012] (rot) und Matlab-Code (grün)}

Ramberg-Osgood-Kurven können genutzt werden um plastisches Verhalten unter einachsiger Beanspruchung zu charakterisieren. Die Ramberg-Osgood-Gleichung ist mit

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K_{RO}} \right)^n \quad (2.6)$$

nach [Hering u.a. 2012] gegeben, ebenso wie die Parameter E , K_{RO} und n , die in die experimentellen Daten gemittelt wurden. Aufgrund der Beschränkung auf einachsige Beanspruchungen, können mit den Ramberg-Osgood-Kurven nur die experimentellen visualisiert werden und kein mehrachsiges Materialmodell definiert werden.

Das angesprochene in Matlab implementierte Materialmodell entspricht dem in [Schmidt u. Kaliske 2006] für Fichte beschriebenen Modell, angepasst auf Buche. Die Implementierung stammt von Dr. Diego Mora (IfB, ETH Zürich). Die Materialkenngrößen wurden aus der U-MAT-Subroutine übernommen. Das Modell nach [Schmidt u. Kaliske 2006] berücksichtigt neben der Verfestigung auch die Verdichtung, wie in Abbildung 36(l) für radialen Druck gut zu erkennen ist.

Wird nur der elastische Bereich betrachtet, so ist auffällig, dass die Übereinstimmung von Simulation und Experimenten gut ist. Die Steifigkeit aus dem Matlab Modell ist hingegen grösser. Dies kann damit erklärt werden, dass in der Implementierung die Querdehnzahlen berücksichtigt werden, die Querdehnungen aber behindert sind. Schlussendlich führt das zu der erkennbaren erhöhten Steifigkeit. Neben der erhöhten Steifigkeit, bewirkt diese Querbehinderung eine höhere Fließspannung, bei der das Fließen beginnt.

Auffällig bei der Betrachtung des plastischen Bereiches ist, dass die Simulation ein lineares Fließgesetz vermuten lässt. In der Beschreibung des Modells in [Hassani 2015] wird zwar ein Potenzgesetz beschrieben (siehe Abschnitt 2.3.1), eine Überprüfung der UMAT-Subroutine

ergab jedoch, dass ein aus Stabilitätsgründen ein lineares Verfestigungsverhalten implementiert wurde. Dies führt dazu, dass sich das Material steifer verhält, als experimentell ermittelt. Im Gegensatz dazu zeigt das Materialmodell nach [Schmidt u. Kaliske 2006] sogar eine gewisse Entfestigung, was ebenfalls nicht der Realität entspricht.

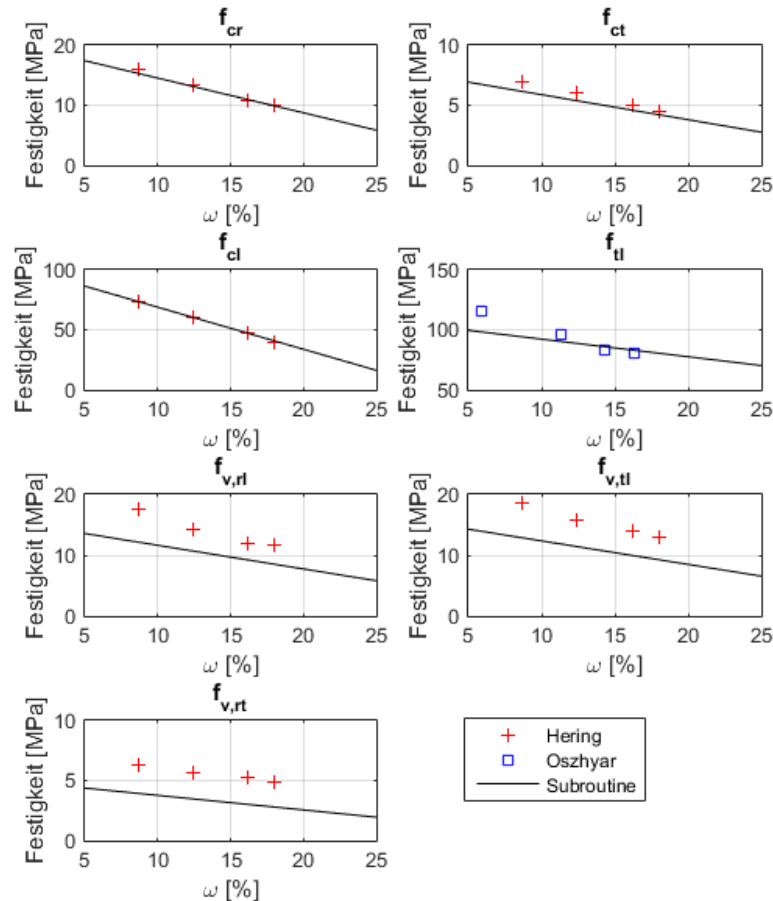


Abbildung 37: Festigkeiten von Buchenholz aus [Hering 2011] und [Oszhyar 2013] verglichen mit der Implementierung in der Subroutine.

Wie bereits angeklungen entspricht der Fließbeginn bei den Simulationen gut dem experimentell ermittelten Verhalten. Da die Fließflächen unter Verwendung der Festigkeiten definiert werden, sind in Abbildung 2.3.1} die Festigkeiten von Buchenholz dargestellt. Für die Druck- und Zugfestigkeiten entspricht der implementierte feuchteabhängige Verlauf gut den experimentellen Ergebnissen von [Hering 2011] und [Oszhyar 2013].

Auffällig sind hingegen die Schubfestigkeiten, die nach [Hassani 2015] offenbar auch aus den Daten von [Hering 2011] ermittelt wurden. Abbildung 37 zeigt aber deutlich, dass dies nicht der Fall sein kann, oder wenn erhebliche Fehler passiert sind bei der Regression. Alternativ könnten die Werte über eine Gewichtung der Festigkeiten von Fichtenholz in Abhängigkeit der Rohdichten ermittelt worden sein. Diese Vermutung wurde überprüft, konnte aber nicht bestätigt werden.

Das plastische Verhalten von **Esche** ist in Abbildung 38 in Form von Spannungs-Dehnungs-Diagrammen gezeigt. Der Verlauf ähnelt dem für Buche gezeigten Ergebnissen stark.

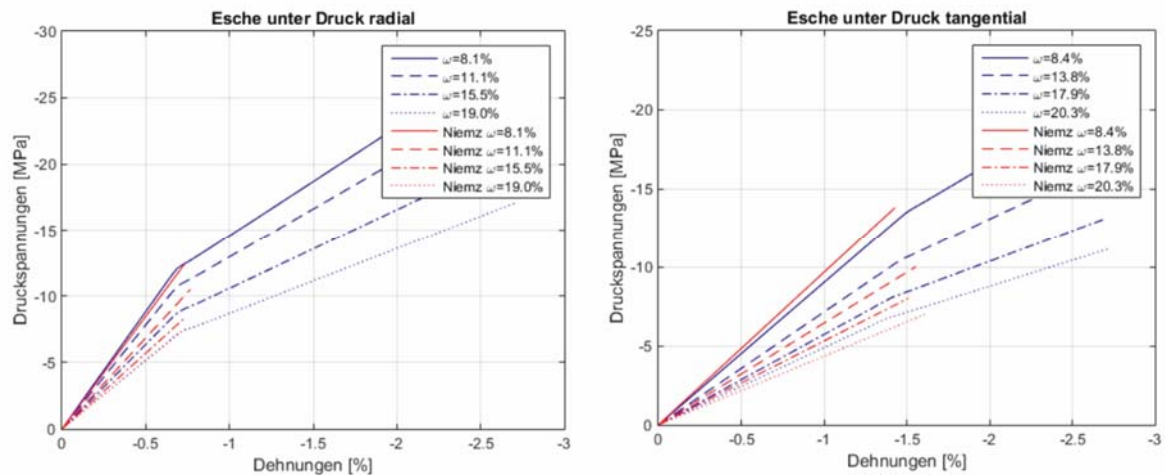


Abbildung 38: Plastisches Verhalten der Esche (a) radial und (b) tangential im Vergleich von Simulation (blau) mit den Ergebnissen von [Niemz u.a. 2014] für den elastischen Bereich (rot)

In Ermangelung experimentell verwertbarer Daten wurde zum Vergleich lediglich der elastische Bereich mit Steifigkeit und Festigkeit aus [Niemz u.a. 2014] dargestellt. Es ist erkennbar, dass der Fließbeginn gut mit den experimentellen Festigkeiten übereinstimmt. Damit kann davon ausgegangen werden, dass der elastische Bereich vollständig und realitätsnah bis zum Fließbeginn abgebildet wird. Über das plastische Fließen kann keine Aussage getroffen werden, aber es ist naheliegend, dass sich das Modell deutlich zu steif verhält.

Abschliessend ist zu bemerken, dass das plastische Verhalten zwar modelliert wird, es aber bis auf den Fließbeginn deutliche Unterschiede zum experimentell ermittelten realem Materialverhalten aufweist.

Rheologische Eigenschaften: Die Überprüfung der viskoelastischen Eigenschaften erfolgte mit einem simulierten 4-Punkt-Biegeversuch an Buchenholz, wie er in [Hering 2011] beschrieben ist. Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 39 dargestellt. Das erstellte Modell nutzt die vorhandenen Symmetrien aus und besteht aus Elementen des Typs C3D20R. Neben den Symmetriebedingungen wurden konzentrierte Kräfteinleitungspunkte an den Elementecken im Bereich der Auflager und Kräfteinleitungspunkte definiert. Als Belastung wurde ein Gewicht von umgerechnet 5kg simuliert, was näherungsweise etwa einem Viertel der Bruchlast entspricht. In der UMAT-Subroutine wurden alle Bestandteile aktiviert, auch das mechano-sorptive Verhalten.

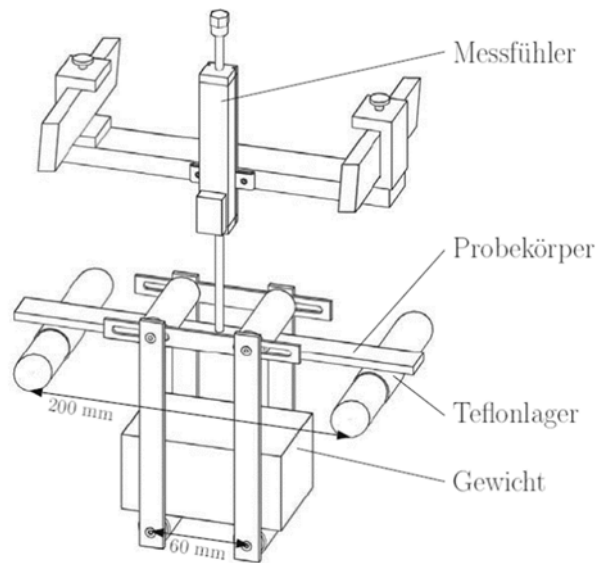


Abbildung 39: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Kriechverformungen an Holzprüfkörpern mit den Abmessungen 250*20*5mm (L*R*T) aus [Hering 2011].

Ausgewertet wurde der Versuch im mittleren Element über dem im realen Versuch der Weg-aufnehmer positioniert war. Die ermittelten Verformungen sind in Abbildung 85 im Anhang auf-gezeigt. Zur Gegenüberstellung von Simulationsergebnissen und experimentellen Daten wur-den die Nachgiebigkeiten in Abhängigkeit der Zeit berechnet. Als Grundlage dazu dienten die Spannungen und Dehnungen an der Unterseite des Modells. Die Ergebnisse sind in Abbildung 40 gezeigt. Als Vergleichswerte dient die experimentell ermittelte Nachgiebigkeit aus [Hering 2011] und nicht die ebenfalls angegebene Approximation mittels einer Reihe von *Kelvin*-Kör-pern.

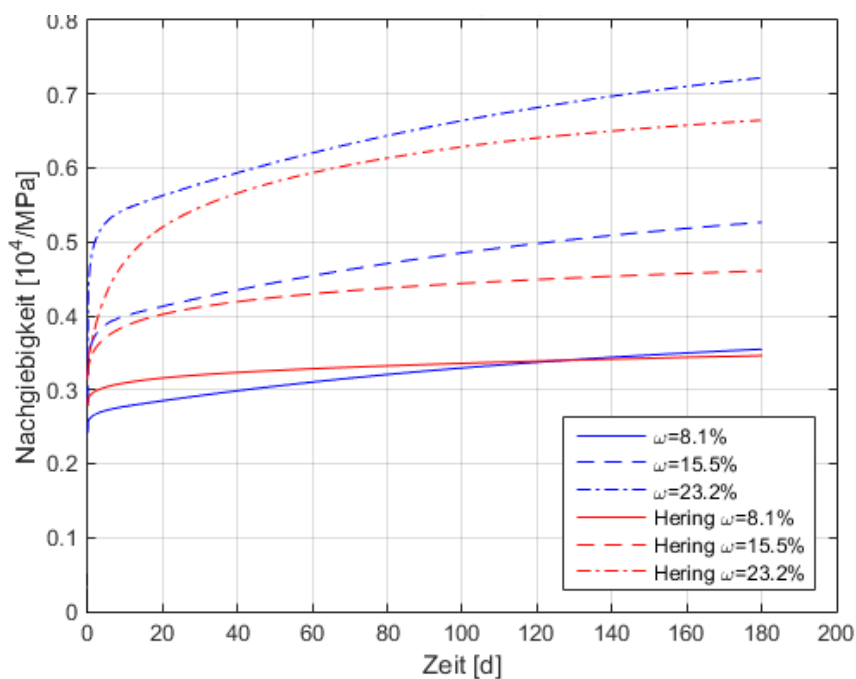


Abbildung 40: Entwicklung der Nachgiebigkeit in longitudinaler Richtung aus [Hering 2011] verglichen mit der Si-mulation.

Grundsätzlich lässt sich ein ähnliches Verhalten von Simulation und Experiment feststellen. Tendenziell ändert sich die Nachgiebigkeit in der Simulation stärker. Ein möglicher Grund könnten räumliche Einflüsse des Modells sein. So wurden Spannungen und Dehnungen nur an einem einzelnen Punkt ermittelt und kein Mittelwert über eine gewisse Region gebildet. Weiterhin verwendet das vorgestellte Materialmodell nur vier *Kelvin*-Körper und nicht sechs wie in [Hering 2011] vorgeschlagen. Der erste und letzte Körper wurden ignoriert. Die darauf beruhenden Abweichungen sind jedoch gering, wie mittels einer Handrechnung für einen bestimmten Zeit- und Feuchtezustand ermittelt werden kann. Ein anderer Grund könnte darin liegen, dass das mechano-sorptive Verhalten mit simuliert wurde und dadurch Einflüsse entstehen, die aber an sich nicht zu erwarten sind, da die Holzfeuchtigkeit konstant ist.

Da die Kriechverformungen von der Belastungsgeschichte abhängig sind und der qualitative Verlauf vernünftig ist, kann das Materialmodell grundsätzlich als geeignet eingestuft werden.

3.2.2. Überprüfung des Modells für Klebstoffe

Das Materialmodell für die Klebstoffe unterscheidet sich in einigen Punkten von dem des Holzes. Daher wird es hier gesondert mit Simulationen überprüft. Eine gebräuchliche Geometrie für Klebstoffprüfkörper ist in [ASTM D 638] mit Typ IV gegeben. Entsprechende Prüfkörper mit einer Dicke von 150µm wurden auch von [Kläusler 2014] verwendet. Eine Darstellung des Prüfkörpers und des Simulationsmodells ist in Abbildung 41 veranschaulicht. Das Simulationsmodell nutzt alle Symmetrieebenen aus. Als Messpunkte dienen die Elementknoten die in der Ebene des Messbereichs liegen.

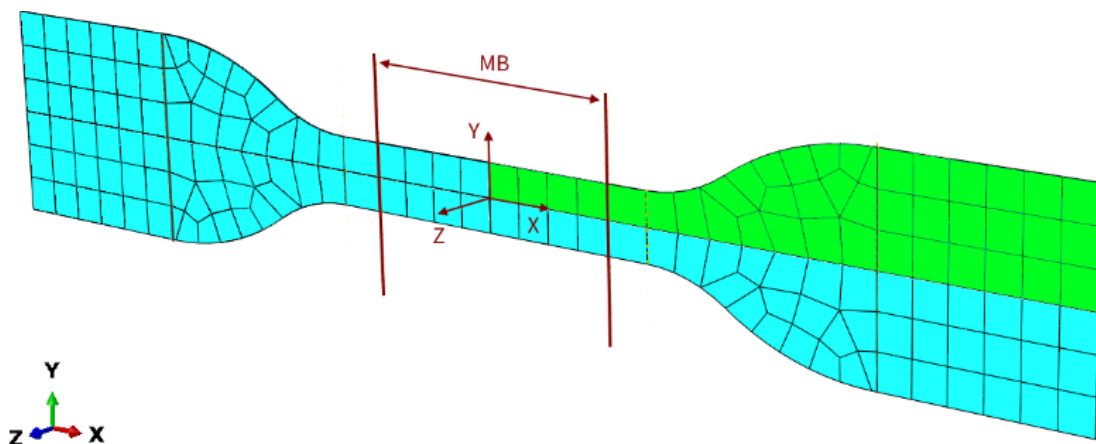


Abbildung 41: Visualisierung des FE-Modells für Klebstoffprüfkörper (Typ IV nach [ASTM D 638]) für Druck- und Zugversuche, wobei der grüne Teil das simulierte Teilsystem markiert unter Ausnutzung der angegebenen Symmetrieebenen. Mit MB ist der Messbereich deklariert.

Elastisch-plastisches Verhalten: Das elastische und plastische Verhalten wurde mit statischen Kurzzeitversuchen ermittelt. Um dies in der Simulation abzubilden wurden zeitabhängige Vorgänge in der UMAT-Subroutine deaktiviert. Die Elastizitätsmoduln wurden aus der gemessenen Kraft und den Verformungen im Messbereich über die ursprüngliche Geometrie ermittelt. Die Ergebnisse für die einzelnen Klebstoffe sind in Tabelle 11 aufgelistet. Die Feuchtigkeit wurden mittels den Sorptionskurven in [Wimmer u.a. 2013] näherungsweise für die Simulationen bestimmt, da in [Kläusler 2014] keine entsprechenden Werte angegeben sind.

Tabelle 11: Elastizitätsmoduln und Festigkeiten der verschiedenen Klebstoffe ermittelt aus den Simulationen verglichen mit experimentellen Werten.

Quelle	ϕ [%]	PUR			MUF			PRF		
		ω [%]	E [MPa]	f_a [MPa]	ω [%]	E [MPa]	f_a [MPa]	ω [%]	E [MPa]	f_a [MPa]
Simulation [Kläusler 2014]	≈ 5 5	0.5	1167 1300	≈ 26.0 33.0	0.7	4835 5100	66.6	1.4	3886 4000	30.5
Simulation [Kläusler 2014]	≈ 35 35	1.1	1090 1100	≈ 25.0 27.8	3.6	3498 3500	46.6	6.4	3543 3600	33.0
Simulation [Kläusler 2014]	≈ 65 65	1.8	1003 1000	≈ 24.5 26.6	5.5	2859 2500	39.8	10.6	3395 3400	33.8
Simulation [Kläusler 2014]	≈ 95 95	3.3	773 900	≈ 20.5 22.6	19.0	1192 1200	31.5	17.4	2428 2400	33.0

Aus der Tabelle geht hervor, dass die Steifigkeiten aus Simulation und Experiment gut übereinstimmen. Die Abweichungen sind mit dem genäherten Feuchtegehalt und den üblichen Abweichungen bei linearen Regressionen zu erklären. Neben den Elastizitätsmoduln sind auch die Festigkeiten nach [Kläusler 2014] angegeben. Die Querdehnzahlen wurden für alle Klebstoffe zu 0.3 ermittelt, was der Implementierung und [Kläusler 2014] entspricht. In [Kläusler 2014] sind die Spannungs-Dehnungs-Diagramme für die einzelnen Klebstoffe aufgelistet. Daraus geht hervor, dass lediglich PUR ausgeprägtes plastisches Verhalten aufweist. Es bildet sich ein nahezu ideal-plastisches Fließplateau aus. Im Gegensatz dazu ist das simulierte plastische Verhalten wie in Abbildung 42 noch eine deutlich erhöhte Steifigkeit nach Beginn des Fließens auf. Diese Beobachtung deckt sich mit den Ergebnissen der Überprüfung für Holz.

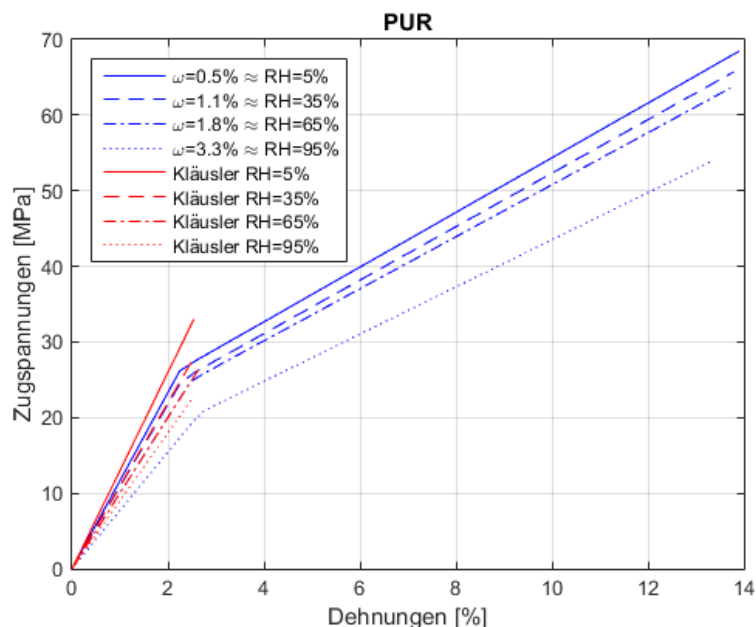


Abbildung 42: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für PUR bei verschiedenen Feuchten

Insgesamt kann das Materialmodell also das elastische Verhalten gut abbilden, die plastischen Eigenschaften von PUR jedoch nicht.

Viskoelastisches Verhalten: Das viskoelastische Kriechen wurde lediglich für PUR und MUF im Materialmodell von [Hassani 2015] implementiert, daher wird hier auch nur auf diese beiden Klebstoffe eingegangen. Die Verformungen unter Langzeitversuchen mit aktiviertem viskoelastischen Verhalten in der UMAT-Subroutine sind in Abbildung 42 gezeigt. Unten ist das Verhalten für verschiedene Spannungszustände dargestellt, wohingegen oben ein Detailausschnitt gezeigt wird.

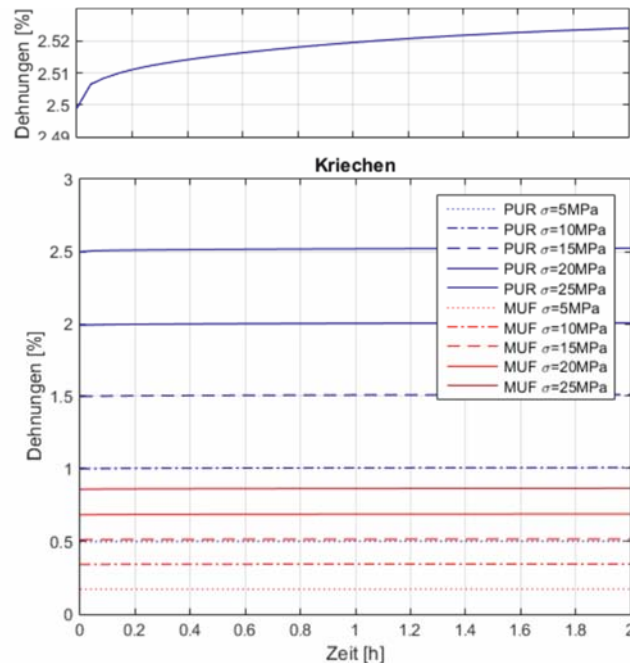


Abbildung 43: Simuliertes Kriechverhalten von (oben) PUR bei $\sigma = 25 \text{ MPa}$ und (unten) PUR und MUF unter Normalklima für verschiedene Spannungszustände.

Die notwendigen Kenngrößen sind entsprechend [Hassani 2015] aus [Touati u. Cederbaum 1997] für PUR und [Touati u. Cederbaum 1997] für MUF übernommen. Die Quellen sind aufgrund der Vielfalt heutzutage erhältlicher Klebstoffe überaltert. Weiterhin sind die in [Touati u. Cederbaum 1997] angegebenen Werte für ein Epoxidharz ermittelt worden, der kaum mit einem Polykondensationsklebstoff wie MUF vergleichbar sein dürfte. Deshalb, sowie Mangels aktueller experimenteller Ergebnisse, kann das simulierte viskoelastische Kriechen nicht quantitativ überprüft werden. Qualitativ lässt sich sagen, dass das Kriechen modelliert werden kann. Es sind jedoch experimentelle Untersuchungen notwendig um das Verhalten vernünftig zu quantifizieren, wie auch für neuere PUR Systeme, die wesentlich steifer sind als die herkömmlichen. Hier besteht noch Forschungsbedarf.

3.2.2.1. Testoptimierung für Buche-Fichte Bilayer

Ein einfaches Anwendungsproblem des Materialmodells ist ein Bilayer bestehend aus Buche und Fichte. Aufgrund des unterschiedlichen Quell- und Schwindverhaltens der zwei Holzarten, sowie der anatomischen Richtungen, verformt sich der Bilayer infolge Feuchtigkeitsänderungen. Die geringen Quell- resp. Schwinddehnungen von Fichtenholz in longitudinaler Richtung werden hier mit den deutlich grösseren Dimensionsänderungen von Buche rechtwinklig zur Faser kombiniert. Die Fichte wird als passive, die Buchenschicht als aktive bezeichnet. Optimierungsziel ist die Maximierung der aus Feuchteänderungen resultierenden Krümmung für variable Schichtdicken (Grenzen s. Tabelle 12). In [Rüggeberg u. Burgert 2015] werden solche Bilayer untersucht und mögliche praktische Anwendungen skizziert. Zum anderen ermöglicht

das Beispiel, dessen Lösung bekannt ist, eine Beurteilung unterschiedlicher Optimierungsparameter.

Tabelle 12: Zusammenfassung der Parameter x_i die bei der Optimierung des Bilayers verändert werden können.

i	Typ	Grenzen	Bedeutung
1	R	$\in [0.2, 2.0]$	Höhe der aktiven Lage
2	R	$\in [1.0, 10.0]$	Höhe der passiven Lage

Das FE-Modell in Abaqus repräsentiert ein Bilayer mit 20.0mm Breite und 100.0mm Länge mit Stabachse in globale x-Richtung. Zur Reduzierung des Rechenaufwandes wurden die xy-Ebene und die yz-Ebene als Symmetrieebene genutzt, wie in Abbildung 44 veranschaulicht. Die Lagen werden durch voll integrierte, kubische Elemente (quadratische Ansatzfunktionen; C3D20) mit Kantenlänge ca. 1.0mm diskretisiert. Die Klebstoffschicht ist als 0.1mm starke Lage zwischen aktiver und passiver Schicht modelliert und die Kontaktflächen wurden kinematisch aneinandergekoppelt. Als Klebstoff ist PRF gewählt, da dieser in der Materialdefinition nicht kriecht und keine Plastizität aufweist. Vereinfachend wird eine Trocknung von 65% auf 35% R.H. angenähert, indem die Holzfeuchte bei entsprechender Luftfeuchte anhand der Sorptionsisothermen als uniform verteilt angenommen wird. Verwendete Werte sind in Tabelle 32 angegeben. Die Veränderung erfolgt linear und im Materialmodell werden für Holz Dehnungen infolge Plastizität und Rheologie nicht berechnet.

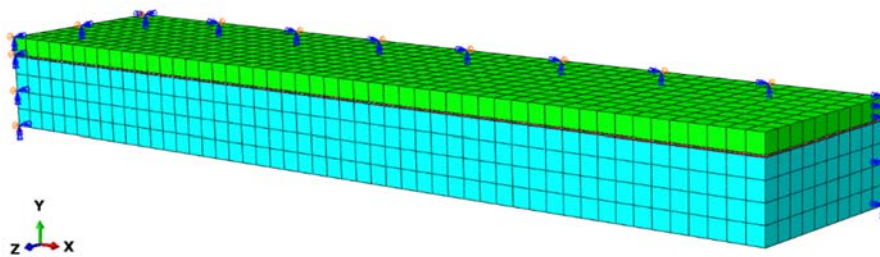


Abbildung 44: Visualisierung des FE-Modells für den Bilayer mit einer passiven Lage (grün) von 1.0mm und einer aktiven Lage (Cyan) mit 4.0mm Höhe

Die Berechnung der Zielfunktion erfolgt mit u_x, u_y -Verschiebungen an der Unterkante des freien Endes wodurch sich der Krümmungsradius ρ

$$\rho^2 = (\rho + u_y)^2 + (l + u_x)^2, \text{ resp.} \quad (2.7)$$

$$\rho = -\frac{u_y^2 + (l + u_x)^2}{2u_y}$$

ergibt. Die Krümmung, also die in der Zielfunktion zu maximierende Grösse $\kappa = 1/\rho$ [1/m]. Die analytische Vergleichslösung wurde in [Timoschenko 1925] angegebene:

$$\kappa = \frac{6(\alpha_a - \alpha_p)(\omega_2 - \omega_1)(1+m)^2}{h \left(3(1+m)^2 + (1+mn) \left(m^2 + \frac{1}{mn} \right) \right)} \quad \text{mit } m = \frac{h_a}{h_p}, n = \frac{E_a}{E_p} \text{ und } h = h_a + h_p. \quad (2.8)$$

Mit dem Indizes a und b werden aktive respektive passive Lage bezeichnet. Die notwendigen Materialparameter sind in Kapitel 2.3.1 aufgelistet.

Optimierungsergebnisse: Für die Optimierung mittels MATSuMoTo wird angenommen, dass das Optimum potentiell im Bereich der Begrenzungen liegen könnte. Für Startpunkte wird also zunächst die Einstellung *CORNER* verwendet. Die maximale Anzahl von Simulationen wird auf 20 gesetzt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 45 dargestellt. Es sind zusätzlich für die in der Optimierung evaluierten Punkte die Krümmung nach Gleichung (2.8) gegenübergestellt. Die Höhe der Klebstoffschicht wurde dabei der Buchenholzlage zugeschlagen, da sie bei geringen Lagenstärken nicht vernachlässigbar ist. Die Gesamtrechnenzeit betrug ca. 30 Minuten.

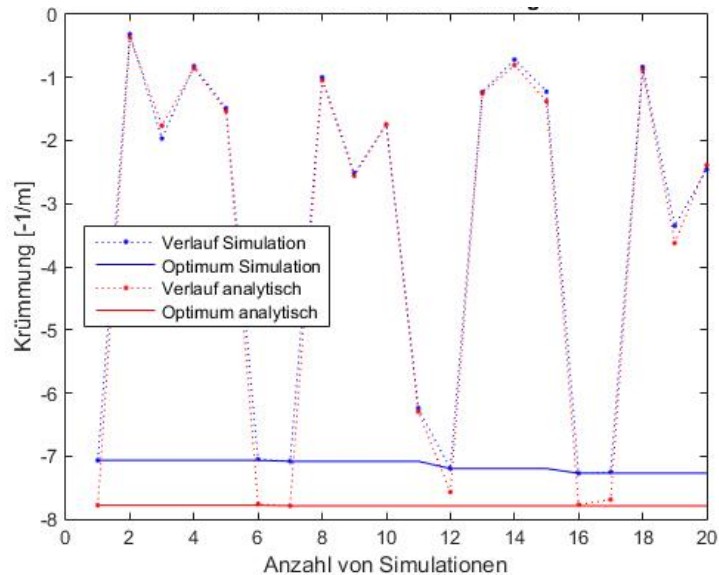


Abbildung 45: Optimierungsergebnisse des Bilayers als Verlauf und aktuelles Optimum verglichen mit der analytischen Betrachtung.

Die maximale per Optimierung ermittelte Krümmung beträgt 7.27m^{-1} für Lagenstärken von 0.29mm für Fichte und 1.00mm für Buche. Das Optimum aus den gegebenen Punkten bei analytischer Berechnung beträgt 7.73m^{-1} für 0.20mm und 1.00mm. Die Optimierung wurde mit den gleichen Einstellungen (*20-CORNER-RBFcub-CANDglob*) für einen Bilayer mit Eschenholz anstelle von Buchenholz durchgeführt. Das Optimum wurde bei 0.26mm und 1.00mm gefunden und beträgt 7.50m^{-1} (s. Abbildung 87).

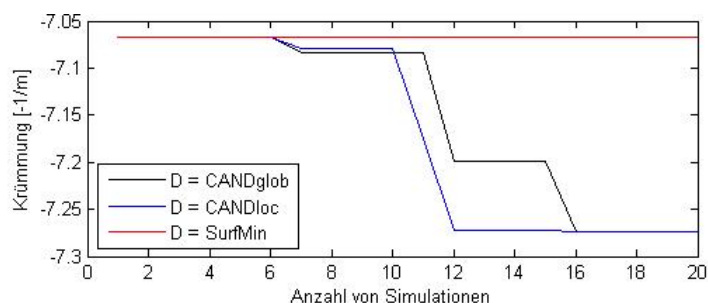


Abbildung 46: Vergleich der drei Methoden zur Bestimmung neuer Punkte anhand der Verläufe der gefundenen Optima für den Buche-Fichte-Bilayer.

Auswirkung von Optimierungsparametern am Bilayer-beispiel: Für den Bilayer aus Buche und Fichte wurden verschiedene Optimierungseinstellungen getestet. Der Einfluss der Suchstrategie für neu zu evaluierende Punkte ist in Abbildung 46 mit dem Verlauf der Optima gezeigt. Mit der Methode *SurfMin* wird das Maximum im Randpunkt bei 0.2mm und 1.0mm mit einer Krümmung von 7.07mm gefunden. Die gefundenen Maxima mit den anderen beiden

Methoden sind auf 10 Nachkommastellen identisch und die Höhe der Fichtenholzlage unterscheidet sich marginal um 0.006mm.

Weiterhin wurde der Einfluss der Startpunktbestimmung untersucht. Die entsprechenden Verläufe sind in Abbildung 47 dargestellt. Alle Optimierungsdurchläufe finden das gleiche Optimum. Die zugehörigen Höhen der Fichtenholzlage unterscheiden sich jedoch abermals geringfügig um maximal 0.014mm.

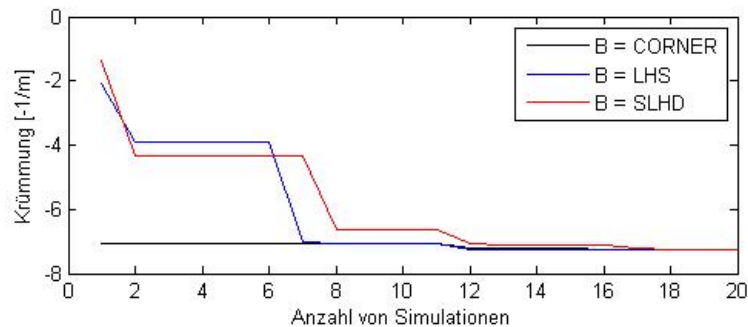


Abbildung 47: Vergleich der drei Methoden zur Bestimmung der Startpunkte anhand der Verläufe der gefundenen Optima für den Buche-Fichte-Bilayer.

Aufgrund der Vielzahl von möglichen Ersatzmodellen wurde eine Auswahl getroffen. Dies sind die kubische radiale Basisfunktion *RBFcub*), quadratische und kubisch reduziert integrierte Regressionspolynome (*POLYquad* und *POLYcubr*) und multivariate adaptive Regressions-Splines (*MARS*). Auf die Betrachtung gemischter Ersatzmodelle wurde verzichtet. Abbildung 48 fasst die Ergebnisse zusammen. Die Wahl der Startpunkte musste mittels *LHS* erfolgen, da nicht alle Ersatzmodelle mit den Randpunkten arbeiten können. Eine Zusammenfassung aller gefundenen Optima mit den zugehörigen Einstellungen ist in Tabelle 33 zu finden.

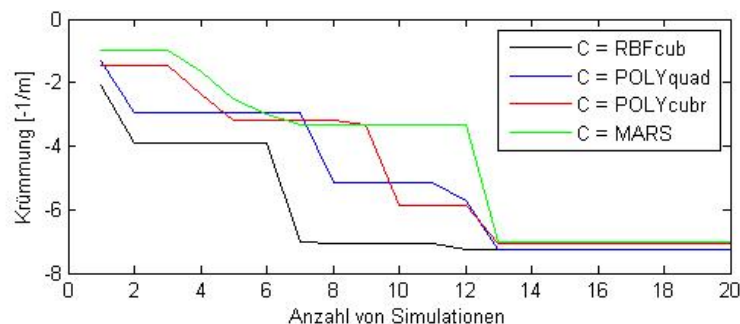


Abbildung 48: Vergleich verschiedener Ersatzmodelle anhand der Verläufe der gefundenen Optima für den Buche-Fichte-Bilayer.

Vergleicht man die gefundenen Ergebnisse der Optimierung und die analytischen Werte mit den im Versuch ermittelten Werten aus [Rüggeberg u. Burgert 2015], so liegen alle Werte in der gleichen Größenordnung. Ein konkreter Zahlenvergleich ist aufgrund der unterschiedlichen Materialorientierung und eines anderen Feuchtigkeitsbereiches nicht möglich. Die nach [Timoschenko 1925] berechneten analytischen Vergleichswerte liefern generell höhere Krümmungen als das FE-Modell in Abaqus. Eine mögliche Erklärung ist der Einfluss der Klebstofflage. Diese ist deutlich steifer als die Buchenholzlage und ihre Auswirkungen werden daher unterschätzt, obwohl ihre Dicke in der passiven Lage berücksichtigt wurde. Zudem führt Klebstoff senkrecht zur Faser in einer Zone zu einer Versteifung. Bei detaillierter Betrachtung ergibt sich, dass der Einfluss der Klebstoffschicht mit zunehmend stärkeren Lagen jedoch abnimmt

und auch fast verschwindet. Grundsätzlich wird das FE-Modell daher als geeignet betrachtet um das Verhalten des Bilayers zu beschreiben.

Aus den einzelnen Vergleichen der Optimierungseinstellungen geht hervor, dass die Standardeinstellungen (*A-LHS-RBFcub-CANDglob*) insgesamt am besten konvergieren bei einer maximalen Anzahl von 20 Simulationen. Die Methode der Startpunkte hat einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Lösung. Neben der Methode *CANDglob* scheint die verwandte Methode *CANDloc* nahezu identische Optima zu finden. Es wurden jedoch nicht alle möglichen Kombinationen getestet. *SurfMin* in Kombination mit *CORNER* liefert jedoch keine akzeptablen Resultate. Der Vergleich der Ersatzmodelle zeigt, dass die Unterschiede je nach gewünschter Genauigkeit nicht zwingend relevant sind. In den getesteten Kombinationen erweist sich das standardmässige *RBFcub* als beste Wahl. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Einstellungen geringe Gültigkeit über den Einzelfall hinaus haben, wobei die Default-Werte der Toolbox [Müller 2014] zu guten Ergebnissen geführt haben.

3.2.2.2. Testoptimierung für hybrides Brettschichtholz mit vereinfachtem konstitutiven Modell

Mit hybridem Brettschichtholz wird das Ziel verfolgt, höhere Beanspruchungen aufnehmen zu können, als mit konventionellem Brettschichtholz. Für die Dauerhaftigkeit ist es notwendig, den Querschnitt so zu wählen, dass Delaminierung vermieden wird.

Das vorgestellte Modell soll einen ersten Ansatz zur Optimierung der Querschnitte von hybriden Brettschichtholz geben. Der Fokus liegt dabei ausschliesslich auf der Quantifizierung des Risikos für Delaminierung. Die Wahl der Holzart Buche oder Esche ist hierfür von untergeordneter Bedeutung.

Simulationsmodell: Es wurde ein BSH-Träger mit einem quadratischen Querschnitt modelliert, dessen Kantenlänge 180mm beträgt. Die Länge des Balkenabschnittes wurde ebenfalls zu 180mm gewählt. Grundsätzlich wird in Aussenlamellen (aus Buchen) und Innenlamellen (aus Fichte) unterschieden. Die Lamellen aus Buche können 20, 30 oder 40mm hoch sein. Die Aussenlamellen sind jeweils symmetrisch an der Ober- und Unterseite des Trägers angeordnet. Anzahl und Stärke der Buchenlamellen sind die ersten zwei veränderlichen Parameter der Optimierung. Alle Innenlamellen haben eine Stärke von 20mm, damit für die feste Querschnittsgeometrie immer eine geeignete Schichtung der Lamellen gefunden werden kann. Gelagert ist der Träger mittels Minimallagerung, um keine Verformungen zu behindern. Da es sich um einen möglichst charakteristischen Abschnitt handeln soll, wurde in der yz-Ebene eine Symmetriebedingung eingefügt. Abbildung 49 zeigt die komplette Geometrie des FE-Modells mit den Lagerungsbedingungen.

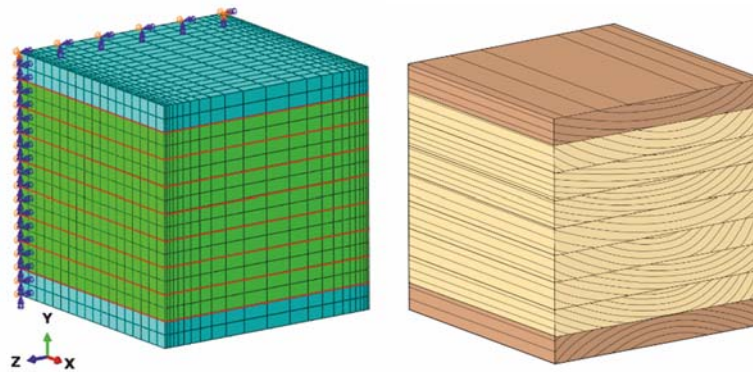


Abbildung 49: Veranschaulichung des FE-Modells (l) für einen hybriden BSH-Querschnitt (180mm x 180mm) mit je einer Aussenlage aus Buchenholz (Cyan) und Mittellamellen aus Fichte (grün), verklebt mit PRF (rot), sowie skizzierte Materialorientierungen (r).

Das FE-Modell wurde mit Elementen des Typs C3D20 vernetzt, wobei die Kantenlängen in globale x- und x-Richtung jeweils 10mm betragen. In Querrichtung des Trägers (globale z-Richtung) wurde, beginnend in der Mitte, das Netz von 20mm auf 2mm an den Rändern verfeinert, siehe Abbildung 49 (links). Diese Gestaltung trägt dem Umstand Rechnung, dass Delaminierung im Allgemeinen an den Aussenkanten beginnt.

Als Materialien wurden, wie bereits angeklungen, Buche und Fichte verwendet, die durch das Materialmodell modelliert sind. Langzeiteffekte und Plastizität wurden dabei zunächst vereinfachend nicht betrachtet und deren Berechnung abgestellt. Die einzelnen Lamellen besitzen jeweils ein zylindrisches Koordinatensystem für die Materialorientierung. Dieses wird Beschrieben durch die Lage der Markröhre, wenn die Lamelle als Teil des noch nicht zersägten Baumstammes angesehen wird. Das Mark verläuft Grundsätzlich in globaler x-Richtung. Für die zugehörigen y- und z-Koordinaten wurde ein Set von zufälligen Koordinatenpaaren erstellt. Die y-Koordinate ist im Bereich von 20 bis 180mm verteilt und die z-Koordinate im Bereich von -20 bis 20mm. Die Lage der Markröhre bezieht sich dabei immer auf den Schwerpunkt des Lamellenquerschnitts.

Es wird unterschieden in positive Orientierung einer Lamelle (y-Koordinate der Markröhre positiv) und negative Orientierung (y-Koordinate der Markröhre mit -1 multipliziert). Der Grundzustand ist eine positive Orientierung aller Lamellen. Mit dem dritten veränderlichen Parameter kann beginnend von der untersten Lage definiert werden, wie viele Lagen negativ orientiert sein sollen. In Abbildung 49 (rechts) ist dies genau eine Lage.

Eine Zusammenfassung der Modellierungsparameter ist in Tabelle 13 gegeben. Da sich die einzelnen Parameter bei bestimmten Werten widersprechen können, erfolgt eine Überprüfung, sodass immer ein gültiges Modell erstellt wird.

Tabelle 13: Zusammenfassung der Parameter x_i , die bei der Optimierung des hybriden BSH verändert werden.

i	Typ	Grenzen	Bedeutung
1	Z	$\in [0, 2]$	Höhe der Aussenlamellen ($x_1=0 \rightarrow 20\text{mm}$; $x_1=1 \rightarrow 30\text{mm}$; $x_1=2 \rightarrow 40\text{mm}$)
2	Z	$\in [1, 4]$	Anzahl der Aussenlamellen
3	Z	$\in [0, 8]$	Anzahl negativ orientierter Lamellen beginnend mit der untersten Lage

Zur Bestimmung des Risikos für Delaminierung, wurde eine lineare Erhöhung der Holzfeuchte modelliert. Als Feuchtigkeit dienten dabei die genäherten Werte für 65% und 95% relative Luftfeuchtigkeit, wie sie in Tabelle 32 angegeben sind. Das Normklima wurde als Ausgangspunkt gewählt, um modellhaft zu berücksichtigen, dass nach der Fertigung annähernd keine Eigenspannungen im Querschnitt vorhanden sind.

Als Zielfunktion dient ein Kriterium, welches auf den Normalspannungen in der Klebstoffuge basiert. Es beruht auf der Annahme, dass die Normalspannungen in globaler y-Richtung (vgl. Abbildung 49) eine Aussage über das Delaminierungsrisiko zulassen. Diese Spannungskomponente wurde am Ende der Feuchtigkeitssteigerung aus der Ergebnisdatenbank ausgelesen.

Drucknormalspannungen in der angesprochenen Richtung sind unproblematisch, daher werden nur die Zugspannungen verwendet. Das Kriterium ist mit

$$f_{\sigma} = \bar{\sigma}_t \frac{n_t}{n} \quad (2.9)$$

$\bar{\sigma}_t$ der durchschnittliche Wert der Zugspannungen bezeichnet ist. Mit dem Verhältnis der Integrationspunkte, an denen Zugspannungen festgestellt werden, n_t zur Anzahl aller Integrationspunkte n wird anschliessend gewichtet, wie gross der gefährdete Bereich ist. Durch diese Definition ist das Kriterium unabhängig von der Anzahl der Lamellen.

Um zu berücksichtigen, dass die Delaminierung an den Aussenkanten beginnt, wurden beidseitig nur die äusseren 10% des Querschnitts betrachtet. Da die Komponenten an den Integrationspunkten der Elemente ausgewertet werden, sind die äusseren Kanten zusätzlich stärker gewichtet, da in diesen Bereichen die Vernetzung feiner ist.

Optimierungsergebnisse: Die verwendeten Einstellungen für die MATSuMoTo wurden entsprechend den gewonnenen Erkenntnissen bei der Optimierung des Bilayers gewählt. Da es insgesamt drei veränderliche Grössen gibt, werden 8 Startpunkte benötigt. Die maximale Anzahl an Evaluationen wurde deshalb auf 20 festgesetzt. Damit ergibt sich *20-CORNER-RBFcub-CANDglob* als Kombination für die Einstellungen.

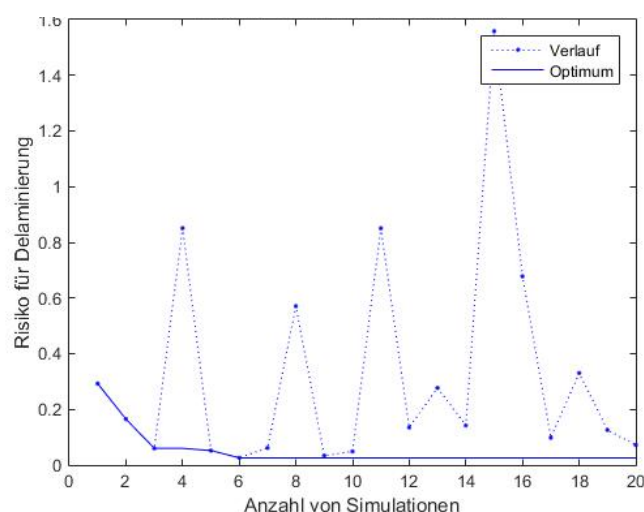


Abbildung 50: Verlauf der Optimierung eines hybriden BSH-Elements aus Buche und Fichte, wobei Plastizität, Viskoelastizität und mechano-sorptiver Effekt vernachlässigt wurden.

Werden Plastizität, Viskoelastizität und der mechano-sorptive Effekt nicht berücksichtigt, so erhält man die Werte, die in Abbildung 50 dargestellt sind. Aus dem Verlauf ist zu erkennen, dass nach der Evaluation der Startpunkte kein neuer Bestwert gefunden werden konnte. Das Optimum liegt bei $x=(0, \backslash, 1 \backslash, 0)$ mit $f(x)=0.026$.

Die gleiche Optimierung wurde, unter Berücksichtigung der zuvor vernachlässigten Effekte, noch einmal durchgeführt. Die benötigte Zeit für die Optimierung stieg dabei von zuvor rund 45 Minuten auf knapp 12 Stunden an. Die Parameterkombination des Optimums änderte sich, wie zu erwarten, nicht. Der neue Wert der Zielfunktion beträgt 0.071.

Neben der soeben genannten zweiten Optimierung wurde eine dritte durchgeführt. Bei dieser wurden die zulässigen Bereiche der Variablen so angepasst, dass mindestens die unterste Lage negativ orientiert ist. Ansonsten wurden gegenüber der ersten Optimierung keine Anpassungen vorgenommen. Das Optimum wurde mit $f(x)=0.094$ bei $x=(0, \backslash, 1 \backslash, 1)$ gefunden.

Eine Gegenüberstellung der drei vorgestellten Optimierungsläufe ist in Abbildung 51 gezeigt. Eine Auswahl der zugehörigen Zahlenwerte ist Tabelle 34 gelistet.

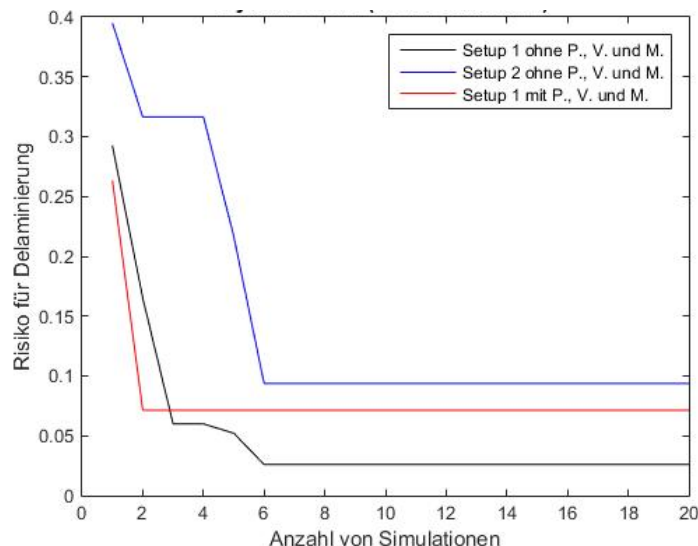


Abbildung 51: Zusammenstellung der Verläufe der Optima bei der Optimierung von hybridem BSH-Elementen mit verschiedenen Einstellungen.

Abbildung 51 zeigt die Unterschiede infolge von Plastizität, Viskoelastizität und dem mechano-sorptivem Effekt. Weiterhin sind die Effekte aus unterschiedlich gewählten Grenzen sichtbar.

Die angeführten Unterschiede können auch qualitativ in Abbildung 52 erkannt werden. In dieser sind die ausgewerteten Zugspannungen in der Klebstofffuge dargestellt. Die Darstellungen entsprechen den Optima der drei Optimierungsläufen. Abbildung 52 (a) und (b) sind also durch $x=(0, \backslash, 1 \backslash, 0)$ und c durch $x=(0, \backslash, 1 \backslash, 1)$ gekennzeichnet. Insbesondere in Teilabbildung (c) ist zu erkennen, wie in der untersten Klebstofflage die Spannungen deutlich grösser sind, als bei den anderen beiden Berechnungen.

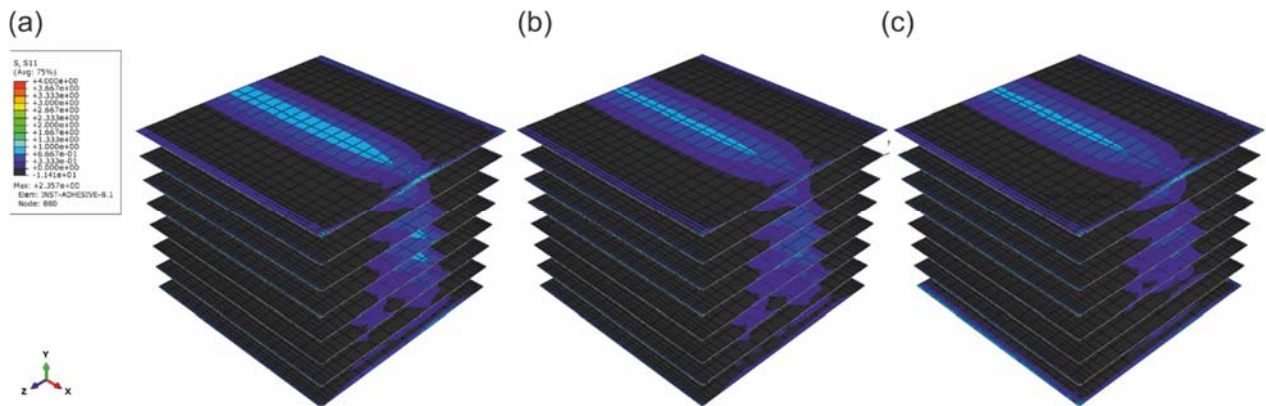


Abbildung 52: (a) Setup 1 ohne P., V. und M.; (b) Setup 1 mit P., V. und M. und (c) Setup 2 ohne P., V. und M.: Zugspannungen in globaler y-Richtung innerhalb der Klebstoffuge für die unterschiedlichen Optimierungsläufe.

Im Anhang 8.4 sind, für den ersten Optimierungslauf mit $x=(0,1,1,0)$, die Spannungsverläufe für die Holzlamellen gegeben. Sie dienen mehr der qualitativen Beurteilung, ob das FE-Modell plausible Ergebnisse liefert, als der quantitativen Auswertung.

Interpretation: Werden zunächst die Spannungsverläufe betrachtet, dann lässt sich feststellen, dass diese recht plausibel erscheinen. Die Zugspannungen im Klebstoff senkrecht zur Fuge zeigen deutliche Maxima an den Rändern des Gesamtquerschnitts. Diese wurden auch als initiierend für die Delaminierung angenommen. Am freien Ende des Elements treten keine signifikanten Spannungsspitzen auf, ebenso ändert sich der Verlauf nicht wesentlich gegenüber der restlichen Elementlänge. Die verwendeten Lagerbedingungen können daher als geeignet eingestuft werden.

Insgesamt sind die mit dem FE-Modell berechneten Spannungsverläufe plausibel. Dies gilt sowohl für die Spannungen in der Klebstoffuge, als auch für die unterschiedlichen Lamellen. Neben den Spannungen entsprechen auch die Verformungen, die hier nicht aufgezeigt sind, den Erwartungen.

Nachdem nun das Simulationsmodell als geeignet eingestuft wurde, richtet sich der Blick auf die Optimierung. Für die veränderlichen Variablen ergab sich, dass ein Querschnitt aus 7 Lamellen aus Fichtenholz mit je einer Lamelle an der Ober- und Unterseite aus Buche am besten geeignet ist. Die Lamellen sollten dabei immer die gleiche Orientierung aufweisen, um ein geringes Risiko für Delaminierung zu haben. Damit entspricht das Optimierungsergebnis der in [DIN EN 14080] angegebenen Anforderung an die Orientierung der einzelnen Lagen von Brett-schichtholz. Da die Anforderungen in der Norm auf experimentellen Untersuchungen beruhen, ist davon auszugehen, dass dies auch wirklich die beste Lösung für das Optimierungsproblem ist.

Die Optimierung unter der Bedingung, dass mindestens die unterste Lamelle entgegen der anderen orientiert ist, ergab, dass die Anordnung wie in Abbildung 49(rechts) am effektivsten ist. Die konkreten Zahlenwerte der Zielfunktion variieren zwischen den einzelnen Optimierungen, obwohl für gleiche Variablen gleiche Werte resultieren sollten. Die Simulation und/oder das Kriterium scheinen daher sehr sensitiv auf die internen Konvergenzkriterien zu sein, da lediglich die dabei nötigen Iterationsschritte nicht vordefiniert wurden. Diese Vermutung legen auch die Spannungsverläufe der Klebfuge nahe, da diese solche Unterschiede nicht klar zeigen. Nichtsdestotrotz führen die Optimierungen zu plausiblen Ergebnissen.

Die Definition der Zielfunktion liefert zwar vernünftige Ergebnisse, die angestrebte Vergleichbarkeit zwischen Simulationen ist aber nicht gegeben. Alternative zur Verwendung der Spannungen wäre die Nutzung der elastischen Dehnungen angemessen, da die derzeit mit berücksichtigten Anteile, unter anderem aus Viskoelastizität, nicht treibend bei eventuellen Bruchvorgängen sind.

Insgesamt liefert die Optimierung gute Anhaltspunkte zur Vermeidung von Delaminierung. Erweiterte Simulationsmodelle sind vermutlich in der Lage, hybrides Brettschichtholz auch mit Blick auf die mechanische Performance zu optimieren. Das aktuelle Modell berücksichtigt hingegen nur einen konstanten Querschnitt.

3.2.3. Bestimmung effektiver Filmkoeffizienten für beschichtete Proben

Mit der Software "Abaqus"-FEM wurde für die 4 verschiedenen Fälle der Schalenversuche Berechnungen durchgeführt, um den Filmkoeffizient und den Feuchtefluss ermitteln zu können. Dazu erstellt man als erstes eine Geometrie, welche dem der Probekörper entspricht, also als 4mm dicke Scheibe der Fläche 120x100mm. Wie im Versuch repräsentiert die Fläche die Tangential-Longitudinal-Ebene des Fichtenholzes, womit die Radialrichtung normal zur Ebene steht. Daraufhin wird diese mit den folgenden Randbedingungen versehen: Im Trockenschalenversuch mit der zur Schale abgewandten Beschichtung wurde der erste von oben wirkende Filmkoeffizient bei 1000 angesetzt und für jeden Rechnungsschritt verringert in den Schritten 1, 0.5, 0.1, 0.05, 0.01 bis 0.0001. Die Sorptionsisotherme von Fichte liegt bei einer relativen Luftfeuchte von 50% (welche im Klimaschrank herrscht) bei 10°C, weshalb diese als oben wirksame Umgebungstemperatur angesetzt wurde. Die von unten wirksame Umgebungstemperatur wurde mit 0°C festgelegt. Der von unten wirksame Filmkoeffizient ist zunächst unbekannt, kann aber annäherungsweise über die unten von wirksame von Abaqus berechnete Temperatur gefunden werden, indem man sie in die folgende Formel $\sigma_D = 0.115 \exp(4\omega)$ einsetzt und den errechneten Wert als Filmkoeffizient einträgt. Diesen Schritt wiederholt man solange bis die unten wirksame Temperatur sich nicht mehr verändert. Daraufhin lassen sich die Werte für den Feuchtefluss aus der Visualisierung des Wärmeflusses ablesen als auch die oben und unten wirksame Temperatur.

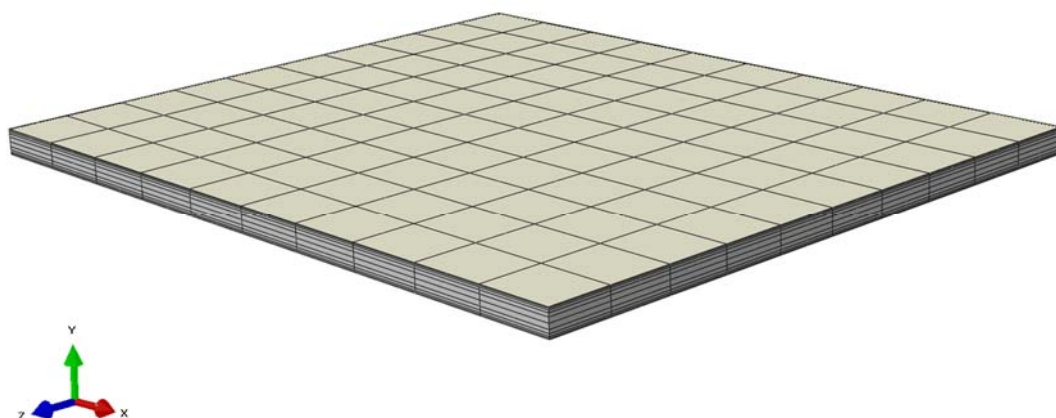


Abbildung 53: Visualisierung des FE-Modells für Holzprüfkörper für den Schalenversuch zur Berechnung des Feuchteflusses.

Im Trockenschalenversuch mit der zur Schale zugewandten Beschichtung wurde der von oben wirkende Filmkoeffizient mit 1000 für alle Rechnungsschritte festgesetzt, da auf der Oberseite der Probekörper keine Veränderungen zu erwarten sind.

Bei den geforderten 50 % R.H. im Raum sind die Umgebungsbedingungen 10%EMC auf der Oberseite, auf der Unterseite für die Nassschalenversuche mit 93 % R.H. etwa 23%EMC und bei den Trockenschalenversuchen entsprechend 0%EMC.

Für die Berechnung werden quadratische Heat Transfer Elemente (DC3D20) und ein 10x10 Netz in der Ebene verwendet. Über die Körperdicke werden 10 Seeds gesetzt, wobei die Unterteilung am Rand feiner gewählt wird (double biased) (s. Abbildung 53).

Mit den ermittelten Daten aus der FE-Simulation der Schalenversuche, kann die Beziehung zwischen Feuchtestromfluss J [kg/sm²] und Filmkoeffizient c_D [kg/m²s%] mathematisch beschrieben werden. Dazu wird die Beziehung

$$J(c_D) = \frac{a}{1 + 10^{(b-c_D)c}} \quad (2.10)$$

an die vier Datensätze gefittet, wodurch man für die verschiedenen Versuche die Parameter a, b und c erhält. Die Beziehung kann darauf invers mit den ermittelten Wasserdampfdiffusionsstromdichten aus den Schalenversuchen als Feuchtestromfluss genutzt werden um die charakteristischen Filmkoeffizienten der Beschichtungssysteme zu berechnen:

$$\log(c_D) = b - \frac{\log(a / J - 1)}{c}. \quad (2.11)$$

Damit Gleichung (2.11) auf die Messwerte angewendet werden kann, werden die Messwerte skaliert. Dazu wird das Verhältnis der Kurvenobergrenze der gefitteten Gleichung zum Mittelwert der Referenzproben berechnet und als Skalierungsfaktor verwendet. Die Wasserdampfstromdichten können dann mit Gleichung (2.11) zu Filmkoeffizienten für S1-S5 umgerechnet werden, die später dazu benutzt werden um die Beschichtungen im FE-Modell für BSH zu modellieren. Dabei muss untersucht werden, ob die vier Versuche auf einen Koeffizienten je Beschichtungssystem schliessen oder ob sich die Werte für Dry und Wet Cup unterscheiden.

Tabelle 14: Parameter der Fits an Gl. (2.10) für die vier Schalenversuchstypen (dt, db, wb, wt).

Variante	a	b	c
dt Parameter	0,5615	-1,199	0,9606
dt conf.Interval	0,5606 0,5625	-1,202 -1,195	0,9551 0,9662
db Parameter	0,8643	-1,121	1,091
db conf.Interval	0,8519 0,8767	-1,146 -1,097	1,03 1,152
wt Parameter	1,086	-1,139	1,06
wt conf.Interval	1,083 1,09	-1,144 -1,133	1,047 1,073
wb Parameter	1,831	-0,7923	0,9507
wb conf.Interval	1,824 1,838	-0,7991 -0,7855	0,9405 0,961

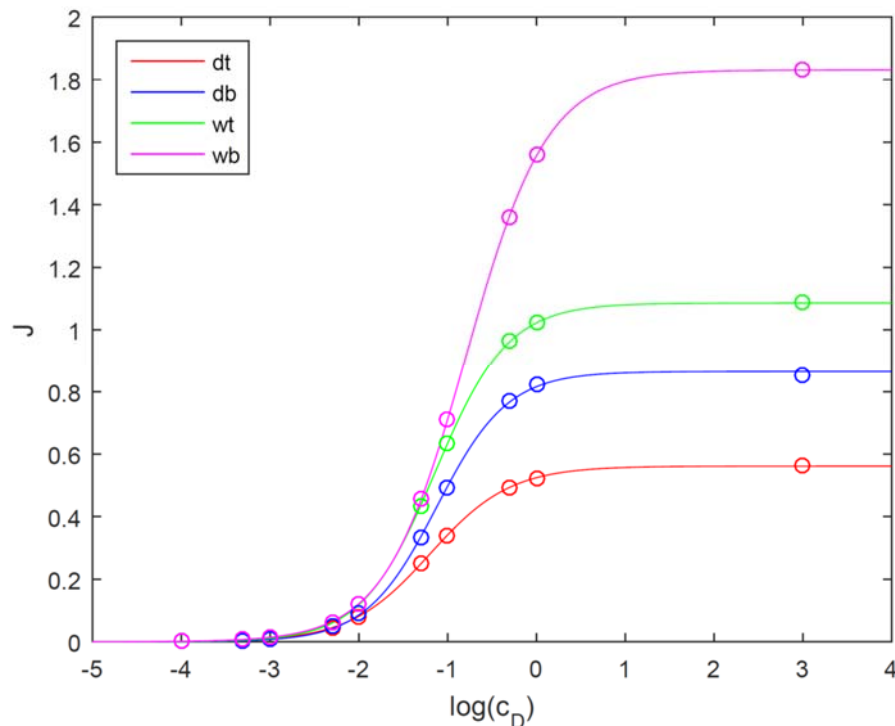


Abbildung 54: Darstellung der 4 verschiedenen Feuchteflusskurven.

Zur inversen Ermittlung der effektiven, charakteristischen Filmkoeffizienten der Beschichtungssysteme werden die in den Schalenversuchen ermittelten Wasserdampfstromdichten durch Fichtenholz und Beschichtung (Tabelle 9) skaliert und in der Inversen (Gl. (2.11)) als Feuchtefluss eingesetzt. Die daraus berechneten Filmkoeffizienten sind in Tabelle 15 ersichtlich.

Tabelle 15: Ermittelte Filmkoeffizienten für S1-S5 bei den verschiedenen Versuchen.

c_D	S1	S2	S3	S4	S5
db	0,166392	0,439652	0,345738	0,201362	0,222668
dt	0,116418	0,493286	0,235795	0,1704	0,13625
wb	0,064334	0,554908	0,180519	0,082279	0,050825
wt	0,046579	0,77483	0,170628	0,070889	0,062896

Es hat sich herausgestellt, dass sich die Filmkoeffizienten der einzelnen Beschichtungen nicht nur zwischen Feuchteaufnahme und Trocknung unterscheiden, sondern dass die Beschichtungsseite auch einen Einfluss hat. Daher werden für die FE-Simulation der BSH-Träger jeweils die Filmkoeffizienten aus den Versuchen mit der Schale zugewandten Beschichtung verwendet (db, wb), da die Beschichtungen zwischen der BSH-Oberfläche und dem Klima von Bedeutung liegen.

3.2.4. Berechnung des Einflusses der Beschichtung auf BSH

Da für die BSH-Träger neben der Feuchteentwicklung auch die Eigenspannungszustände von Interesse sind, werden zwei unterschiedliche Modelle benötigt. Die Geometrie bleibt dabei für beide Berechnungen dieselbe, wobei die Dimensionen des Modellkörpers den BSH-Proben entsprechen. Er besteht aus fünf Fichten-Lamellen mit einer Breite von 120 mm in x-Richtung, die Längsrichtung (z-Achse) ist dabei im Modell auf 100 mm begrenzt und die Dicke in y-

Richtung beträgt für die mittleren drei Lamellen 40 mm sowie 12 mm für die äusseren zwei, da von diesen die Schalenversuchsproben abgesägt wurden. Die einzelnen Lamellen bekommen alle lokale zylindrische Koordinatensysteme, welche die Orientierung der Jahrringe darstellen. Diese wurden an den entsprechenden Versuchskörpern bereits ermittelt und sind in Tabelle 35 ersichtlich. Die MUF-Leimschicht wird jeweils als 0.2 mm dicke Platte mit derselben Grundfläche modelliert. In Abbildung 56 ist der Modellkörper dargestellt.

Das Feuchte-Transportmodell für den BSH-Träger ist ähnlich aufgebaut wie das Schalenversuchmodell. Fichte wird wie beim Schalenversuch durch eine orthotrope temperaturabhängige Leitfähigkeit charakterisiert. Für MUF wird ein Material mit isotroper Leitfähigkeit nach Gl. (1.5) verwendet, wobei $D_0=9.792 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{h}$ und $\alpha_0=0.231$ ist. Dichte und spezifische Wärmekapazität werden auch hier auf 1 gesetzt. Der Übergang zwischen MUF und Fichte wird als Kontakt definiert mit einem Leitungswiderstand von 0.1. Über eine «Surface Film condition» werden die Umgebungstemperatur (Feuchte in Prozent an Holzoberfläche mittels Sorptionisothermen nach Abbildung 9 sowie die in Abschnitt 3.2.3 bestimmten Filmkoeffizienten an den Körper übergeben, wobei die in z-Richtung zeigenden Flächen unberührt bleiben und in diese Richtung somit kein Feuchtefluss entsteht. Für die FE-Rechnung werden quadratische Heat Transfer Elemente (DC3D20) verwendet. In der x-z-Ebene wird ein 25x25 Netz gesetzt, wobei dieses in x-Richtung gegen beide Ränder und in z-Richtung gegen den hinteren Rand feiner unterteilt wird. Alle Lamellen erhalten in y-Richtung je 5 Seeds mit feinerer Randunterteilung, während die Leimschichten in der Dicke nicht aufgeteilt werden.

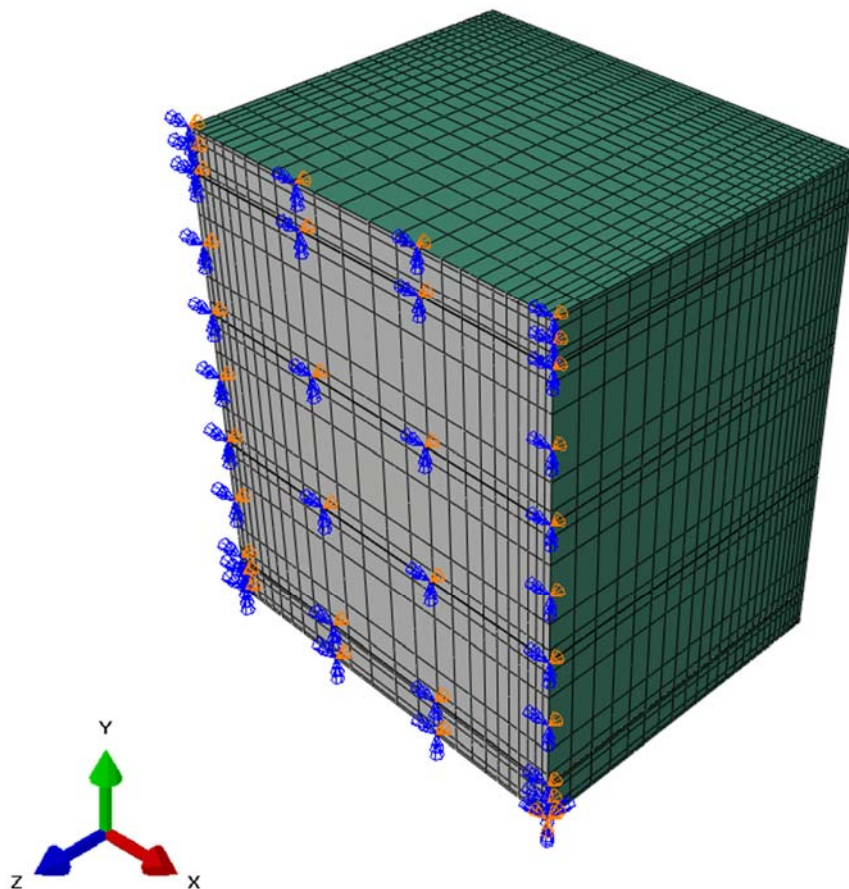


Abbildung 55: BSH-Modell aus Abaqus mit dargestellten Randbedingungen und der Kontaktfläche (grün) des Körpers mit dem Umgebungsklima wo der Filmkoeffizient wirkt.

Die Feuchte-Modelle dienen den mechanischen Modellen als Grundlage. Es kommt das rheologische Materialmodell zum Einsatz mit der berechneten Feuchte als einzige Belastung auf den Körper. Die Lamellen und Leimschichten sind fest miteinander verbunden und werden als Randbedingungen Translation in x- und y-Richtung sowie Rotation um die z-Achse an einem Punkt blockiert und zusätzlich eine z-Symmetrie in der vorderen Fläche eingebaut. Das Netz ist identisch zum vorherigen Netz, jedoch kommen anstelle der Wärmeleitungselemente quadratische 3D Mechanische Elemente (C3D20R) mit reduzierter Integration zum Einsatz.

3.2.4.1. Einfluss der Beschichtung auf Feuchteprofile

Es werden die Proben S0-S5 beider Sätze über einen Zeitraum von einem Jahr unter Einfluss von konstantem Klima simuliert. Entsprechend den Klimadaten aus Abbildung 22 werden für das feuchte Klima 20%EMC (90 % R.H.) und für das trockene 7.5%EMC (25 % R.H.) verwendet. Die Filmkoeffizienten aus Tabelle 15 werden in die Modelle eingefügt und über eine Dauer von 8760 h (1 Jahr) unter konstantem Klima simuliert. Mittels linearer Interpolation werden die Holzfeuchten in den entsprechenden Tiefen (10, 20, 40, 60 mm) an den Messzeitpunkten bestimmt (s. Abbildung 56) und mit den Messwerten verglichen.

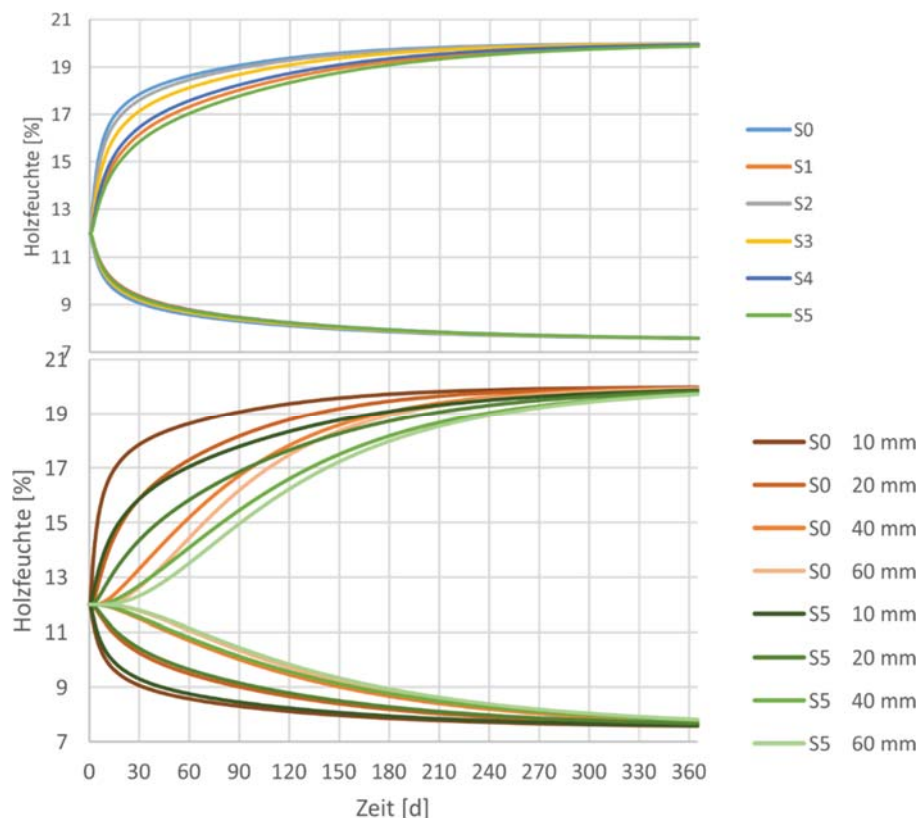


Abbildung 56: (oben) Berechnete Feuchteentwicklung in 10mm Tiefe für alle Proben im Feucht- und Trockenklima, sowie (unten) Gegenüberstellung der Feuchteentwicklung der Proben S0 und S5 in unterschiedlichen Tiefen.

Die Gegenüberstellung sowie die prozentuale Abweichungen sind in Tabelle 16 dargestellt. Die Unterschiede zwischen dem FE-Modell und den Messwerten sind im Allgemeinen sehr gering, nur bei extrem tiefen Messwerten kommt es zu Abweichungen von mehr als 10 %, dies hängt mit der Ungenauigkeit der Widerstandsmessung bei tiefen Werten sowie der simulierten 25 % RH (entspricht 7.5 % Holzfeuchte bei Trocknung) zusammen, welche von der Realität abweicht.

Tabelle 16: Vergleich der FE-Rechnung mit entsprechenden Messwerten.

Messdatum Zeit [h]	Tiefe [mm]	04.07.16 0			05.09.16 1512			16.12.16 3960			09.03.17 5952		
		Messung [%]	FE [%]	Abwei- chung [%]	Messung [%]	FE [%]	Abweichung [%]	Messung [%]	FE [%]	Abwei- chung [%]	Messung [%]	FE [%]	Abweichung [%]
S0-1 cD= 1000	10	12.45	12.00	3.61	17.50	18.68	-6.72	20.10	19.65	2.23	19.95	19.89	0.28
	20	12.65	12.00	5.14	17.15	17.39	-1.37	19.85	19.32	2.65	19.85	19.80	0.27
	40	12.05	12.00	0.41	15.10	15.34	-1.59	18.50	18.81	-1.69	19.60	19.65	-0.23
	60	11.85	12.00	-1.27	14.85	14.61	1.64	18.55	18.63	-0.43	19.85	19.59	1.30
S1-1 cD= 0,064	10	12.45	12.00	3.61	16.40	17.51	-6.74	18.60	19.11	-2.76	19.20	19.65	-2.33
	20	12.20	12.00	1.64	15.15	16.33	-7.77	17.80	18.71	-5.09	18.70	19.49	-4.22
	40	12.30	12.00	2.44	15.00	14.58	2.83	17.55	18.09	-3.08	18.60	19.25	-3.51
	60	12.15	12.00	1.23	14.10	13.98	0.85	16.95	17.87	-5.45	18.35	19.17	-4.48
S2-1 cD= 0,554	10	12.20	12.00	1.64	17.20	18.51	-7.64	19.60	19.59	0.04	19.75	19.87	-0.62
	20	12.25	12.00	2.04	16.70	17.22	-3.12	19.05	19.25	-1.04	19.35	19.76	-2.14
	40	12.45	12.00	3.61	15.35	15.20	1.01	18.50	18.72	-1.17	19.55	19.60	-0.27
	60	12.70	12.00	5.51	15.30	14.48	5.39	18.80	18.53	1.45	19.95	19.55	2.03
S3-1 cD= 0,180	10	12.30	12.00	2.44	16.90	18.13	-7.30	19.10	19.50	-2.10	19.45	19.83	-1.96
	20	12.55	12.00	4.38	16.65	16.82	-0.99	19.10	19.16	-0.30	19.65	19.72	-0.34
	40	12.70	12.00	5.51	15.65	14.80	5.43	18.65	18.63	0.10	19.65	19.54	0.54
	60	12.80	12.00	6.25	15.45	14.10	8.71	18.55	18.44	0.57	19.80	19.48	1.59
S4-1 cD= 0,082	10	12.65	12.00	5.14	16.55	17.59	-6.29	18.90	19.26	-1.91	19.85	19.72	0.65
	20	12.25	12.00	2.04	15.65	16.31	-4.25	18.25	18.88	-3.45	19.20	19.58	-1.97
	40	12.10	12.00	0.83	14.20	14.43	-1.59	17.45	18.30	-4.87	18.85	19.37	-2.75
	60	12.25	12.00	2.04	14.00	13.79	1.49	17.40	18.10	-4.00	18.85	19.29	-2.36
S5-1 cD= 0,050	10	12.25	12.00	2.04	16.20	17.23	-6.35	18.15	18.95	-4.42	19.05	19.56	-2.67
	20	12.40	12.00	3.23	15.65	16.08	-2.75	18.00	18.53	-2.94	18.90	19.39	-2.57
	40	12.45	12.00	3.61	14.90	14.39	3.40	17.70	17.89	-1.09	18.95	19.13	-0.95
	60	12.80	12.00	6.25	14.80	13.83	6.57	17.70	17.67	0.17	19.10	19.04	0.30
S0-2 cD= 1000	10	12.40	12.00	3.23	9.30	8.54	8.18	8.40	7.92	5.76	5.50	7.70	-40.00
	20	12.10	12.00	0.83	9.85	9.44	4.21	8.90	8.30	6.79	6.45	7.88	-22.23
	40	12.40	12.00	3.23	11.05	10.63	3.78	9.70	8.85	8.72	7.35	8.16	-11.00
	60	12.30	12.00	2.44	11.20	11.00	1.78	10.15	9.04	10.89	8.30	8.25	0.56
S1-2 cD= 0,166	10	12.30	12.00	2.44	10.05	8.76	12.88	7.50	8.01	-6.78	6.05	7.75	-28.04
	20	12.55	12.00	4.38	10.65	9.61	9.81	8.35	8.38	-0.32	7.75	7.93	-2.29
	40	12.20	12.00	1.64	11.10	10.72	3.45	8.90	8.91	-0.14	8.25	8.20	0.66
	60	12.05	12.00	0.41	11.40	11.05	3.03	10.00	9.09	9.05	8.90	8.29	6.88
S2-2 cD= 0,439	10	12.45	12.00	3.61	9.10	8.63	5.17	6.35	7.96	-25.38	6.50	7.73	-18.85
	20	12.30	12.00	2.44	10.15	9.51	6.28	6.40	8.34	-30.38	6.50	7.91	-21.76
	40	12.35	12.00	2.83	10.95	10.68	2.44	9.05	8.91	1.59	8.05	8.20	-1.81
	60	12.40	12.00	3.23	11.40	11.04	3.14	9.40	9.10	3.22	8.75	8.29	5.23
S3-2 cD= 0,345	10	12.05	12.00	0.41	9.40	8.68	7.65	5.50	7.95	-44.54	7.15	7.72	-7.98
	20	12.45	12.00	3.61	10.10	9.58	5.17	6.85	8.32	-21.39	7.00	7.90	-12.88
	40	12.55	12.00	4.38	11.05	10.75	2.68	8.45	8.85	-4.74	8.10	8.17	-0.88
	60	12.60	12.00	4.76	11.45	11.11	2.97	9.60	9.03	5.90	9.10	8.26	9.19
S4-2 cD= 0,201	10	12.20	12.00	1.64	9.65	8.76	9.20	5.25	7.99	-52.19	6.90	7.74	-12.23
	20	12.20	12.00	1.64	10.25	9.65	5.89	6.10	8.36	-37.03	7.45	7.93	-6.43
	40	12.45	12.00	3.61	11.05	10.80	2.29	8.95	8.90	0.59	8.45	8.20	2.91
	60	12.55	12.00	4.38	11.50	11.14	3.10	9.70	9.08	6.39	8.95	8.30	7.28
S5-2 cD= 0,222	10	11.95	12.00	-0.42	9.35	8.74	6.48	6.15	7.98	-29.77	5.45	7.74	-41.99
	20	12.15	12.00	1.23	10.20	9.63	5.58	7.25	8.35	-15.15	6.70	7.92	-18.25
	40	12.30	12.00	2.44	11.15	10.79	3.25	8.65	8.89	-2.73	8.10	8.20	-1.19
	6												
	0	12.25	12.00	2.04	11.45	11.14	2.74	9.40	9.07	3.52	8.65	8.29	4.15

In Abbildung 57 ist die Feuchteverteilung nach 975 h von S5 unter feuchten Bedingungen als Beispiel aufgezeigt. Es ist gut ersichtlich, dass die Feuchte von aussen nach innen geht und an den Klebfugen durch deren geringere Durchlässigkeit gebremst wird. Dort entstehen grosse Feuchte- und somit Spannungsgradienten.

Für die Tiefen 10, 20, 40 und 60 mm in der Mittellamelle wurden die Werte mittels linearer Interpolation aus den Knotentemperaturen ermittelt. Eine Verzögerung der Feuchteaufnahme

durch Beschichtung der Oberflächen ist in Abbildung 56 (oben) gut erkennbar. S5 kristallisiert sich dabei mit dem kleinsten Filmkoeffizienten (vgl. Tabelle 15) als bestes Beschichtungssystem bezüglich der Feuchtaufnahme heraus. Unter trockenen Bedingungen verhalten sich die beschichteten Proben in der Simulation ähnlich wie die unbeschichtete Referenzprobe, eine klare Verzögerung ist nicht erkennbar.

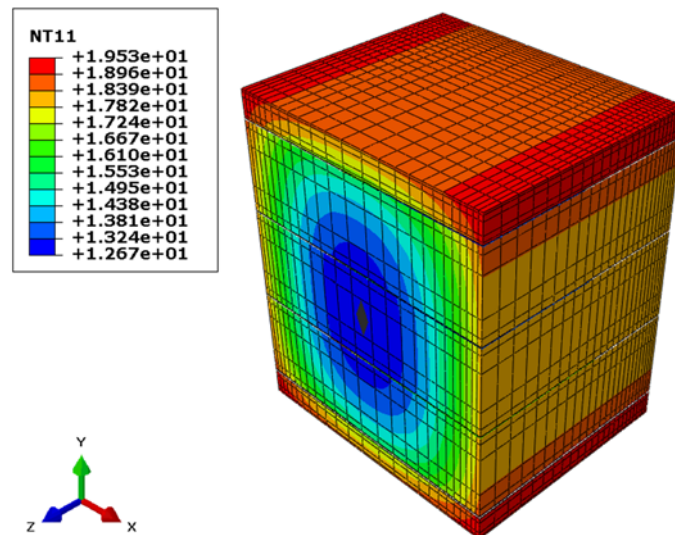


Abbildung 57: Feuchteverteilung bei S5 mit einer Umgebungsfeuchte von 20%EMC nach 975h.

In Abbildung 58 sind die Messwerte und die Feuchteentwicklung über die Tiefe aus der FE-Simulation an den Messzeitpunkten für alle Proben dargestellt. Anhand der im Allgemeinen geringen Abweichungen kann darauf geschlossen werden, dass die Beschichtungen durch die berechneten Filmkoeffizienten gut charakterisiert werden und das Modell so für weitere Simulationen verwendet werden kann. Man muss jedoch bedenken, dass schwankende Luftfeuchtigkeit und ungleichmässige Umströmung der Proben, sowie hohe Fehler bei der Holzfeuchtebestimmung über Widerstandsmessung bei tiefen Werten die experimentellen Daten verzerren können. Dennoch erkennt man klare Unterschiede in den Feuchteprofilen der unterschiedlichen Beschichtungssysteme untereinander und mit den Referenzproben. Dies gilt insbesondere bei der Feuchtaufnahme.

Zusammenfassen stellt sich bei genauerer Untersuchung der Beschichtungssysteme anhand der Simulationsreihe mit konstantem Klima heraus, dass die vorliegenden Beschichtungssysteme S1 - S5 den Feuchtetransport vor allem bei Feuchtaufnahme verzögern und bei Trocknung keinen wirklichen Unterschied bewirken. Mit dem kleinsten Filmkoeffizienten (wb-Wert) ist somit das System S5 ArboPur SpritzFinish am besten geeignet die Feuchteentwicklung zu verzögern. Da nicht Feuchtwerte sondern –Gradienten für die Entwicklung von Eigenspannungen verantwortlich sind, lässt sich aus der Verzögerung allein, jedoch keine klare Aussage über ein optimales Beschichtungssystem machen. Hierzu ist die Anwendung des rheologischen Holzmodells bei transienten Feuchteentwicklung notwendig.

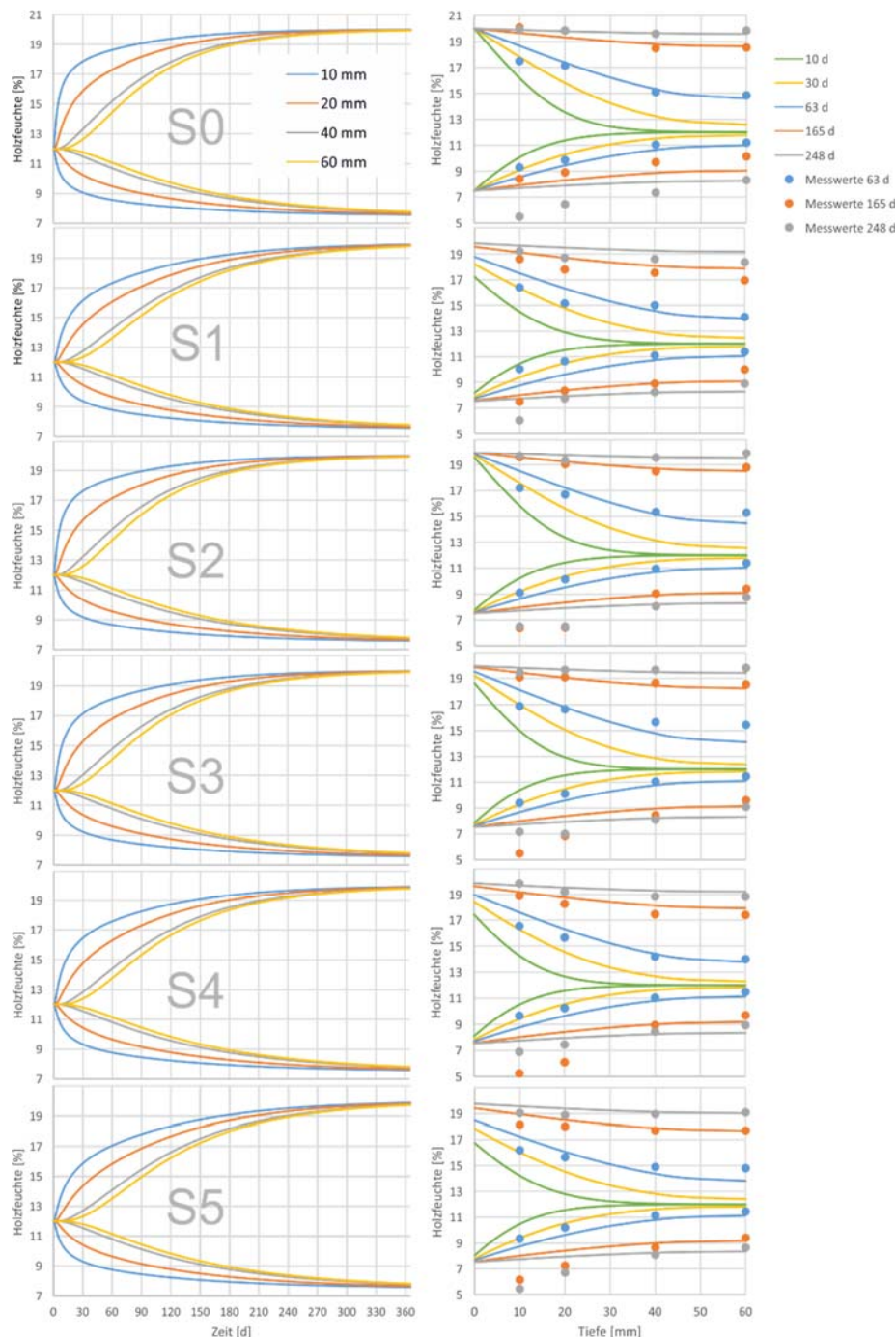


Abbildung 58: Gerechnete Feuchteentwicklung in allen BSH Proben im Vergleich zu Messwerten. Zeitliche Entwicklung links, sowie Feuchteprofile an 5 Messtagen rechts.

3.2.4.2. Einfluss der Beschichtung auf Spannungsevolution bei konstantem Klima

Untersucht werden Eigenspannungen die aufgrund des Quell- und Schwindverhaltens des Fichtenholzes unter den simulierten Feuchteentwicklungen auftreten. Entsprechend läuft die Berechnung über die gleiche Zeitdauer von einem Jahr. Anhand der gespeicherten elastischen Energiedichte (strain energy density) werden die verschiedenen Beschichtungssysteme miteinander verglichen, wobei die extremen Systeme genauer untersucht und mit der Referenz (S0) verglichen werden. In erster Linie interessieren dabei die Spannungen in y-Richtung, da

diese zu Delamination führen können. Zusätzlich stehen die Zustandsvariablen aus dem verwendeten Materialmodell zur Verfügung, die unter anderem die Betrachtung der Plastizität ermöglichen.

Damit die Berechnungen der Eigenspannungen laufen, muss die Umgebungstemperatur schrittweise auf den gewünschten Wert erhöht bzw. gesenkt werden. Ansonsten wird der Sprung der anfänglichen 12 % Holzfeuchte im BSH-Modell auf 20 % bzw. 7.5 % an der Oberfläche problematisch. Damit die Eigenspannungen der Proben S0 bis S5 unter feuchtem wie auch trockenem Klima miteinander verglichen werden können, bedient man sich der gespeicherten elastischen Energiedichte (strain energy density) also skalarem Wert. In Abbildung 59 ist diese für alle simulierten Proben gezeigt, wobei die obere Gruppe Satz 1 (feuchtes Klima) abbildet und die untere entsprechend jene von Satz 2 (trockenes Klima). Während die Kurven unter trockenen Bedingungen relativ nahe beisammen sind, streuen jene von Satz 1 über die ganze Simulationsdauer. Alle Proben erfahren jedoch zuerst einen steilen Anstieg bis zum Maximum, worauf die Energie wieder abflacht und gegen ein Gleichgewicht strebt. Auffällig ist auch, dass unter feuchten Bedingungen S2 und S3 einen höheren Maximalwert als die Referenzprobe S0 erreichen.

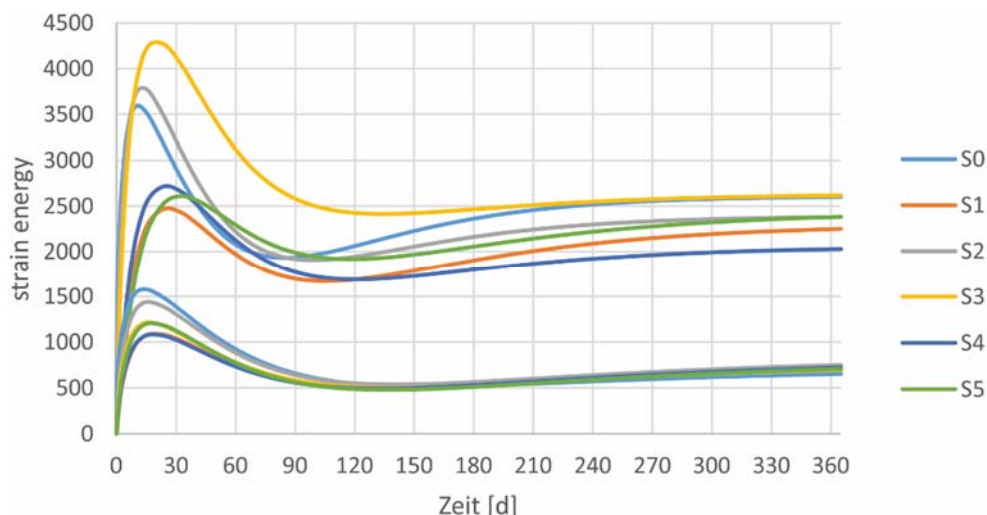


Abbildung 59: Gespeicherte elastische Energie aufgrund der Eigenspannungen in den Proben S0-S5 für konstant trockenes (unten) und feuchtes Klima (oben).

Bei Betrachtung der Spannungsspitzen ist ersichtlich, dass diese ausschliesslich in den Klebfugen auftreten. Auch werden in x-Richtung höhere Werte als in y-Richtung erzielt (vgl. Tabelle 37), dies hängt vermutlich mit den grösseren Feuchtegradienten in diese Richtung zusammen. Da aber mögliche Delamination interessiert, wird weiter nur auf die y-Spannungen eingegangen.

Für eine genauere Untersuchung wird die Probe S4 mit der Referenzprobe S0 verglichen. Es wurde S4 gewählt, da sie sowohl für feuchtes wie auch trockenes Klima einen der kleinsten Peaks sowie auch Endwert erreicht. In Abbildung 60 werden die beiden Systeme unter feuchten Bedingungen gegenübergestellt. Der Maximalwert der elastischen Energie wird zum Zeitpunkt des grössten Feuchtegradienten erreicht.

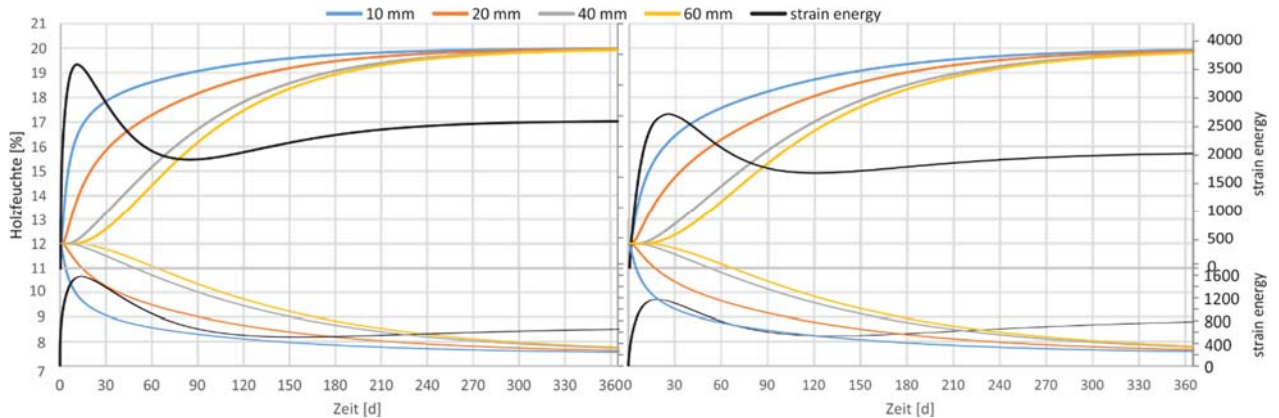


Abbildung 60: Vergleich der Feuchteentwicklung mit der Formänderungsenergie für die Referenzprobe S0 (links) mit Probe S4 (rechte) bei Befeuchtung und Trocknung.

Wenn man die Spannungen in y-Richtung zu diesen Zeitpunkten betrachtet (Abbildung 61), erkennt man an den Seiten des Trägers Druckspannungen und im Kern geringe Zugspannungen. Die Spannungsspitzen finden sich ausschliesslich in den Klebfugen und fallen für den beschichteten Körper sowohl für Zug wie auch Druckspannungen um etwa den Betrag 1 MPa geringer aus. Bei Betrachtung der Situation nach einem Jahr haben sich die Druckspannungen zurückgebildet und es sind vor allem im unbeschichteten Körper Zugspannungen entstanden, wobei die Spannungsspitzen weiterhin in den Klebfugen liegen.

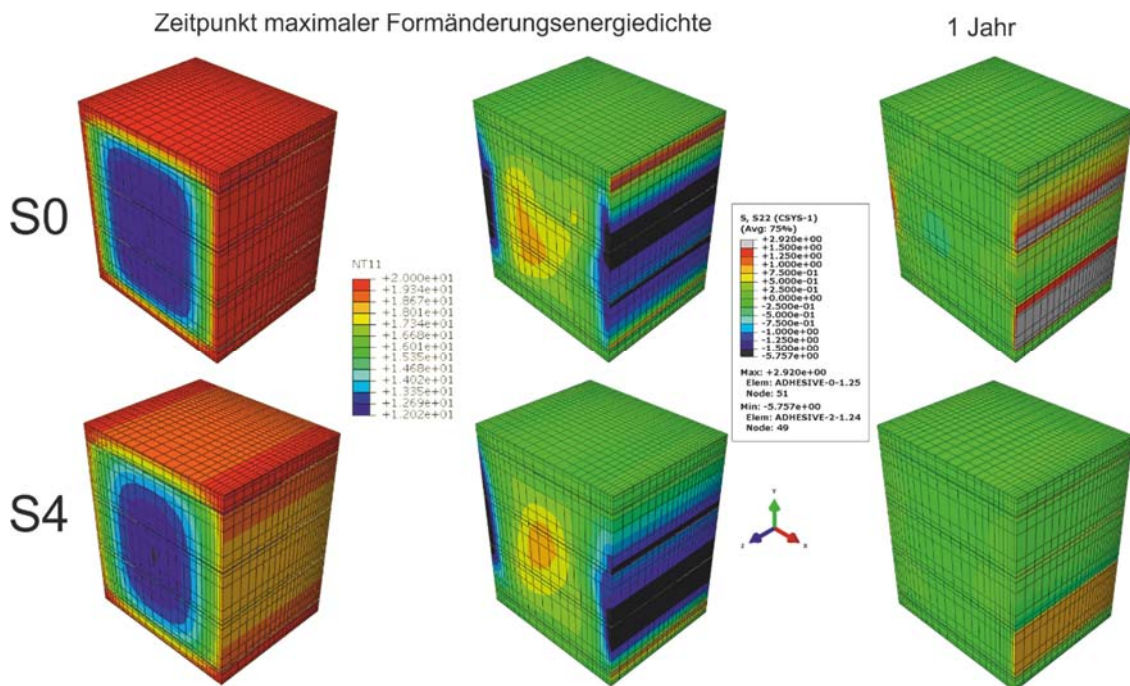


Abbildung 61: Vergleich der entstehenden Spannungen in y-Richtung bei S0 (oben) und S4 (unten) bei Befeuchtung.

Unter konstant trockenem Klima herrschen zum Zeitpunkt der maximalen elastischen Energie an den Seiten Zugspannungen in y-Richtung vor, welche zu Delamination führen könnten (vgl. Abbildung 62). Bei der beschichteten Probe (S4) fallen die unter Zug stehende Bereiche geringer aus und die Spannungsspitzen sind um etwa 1.5 MPa kleiner als bei der unbeschichteten Referenzprobe (S0). Die Spitzen bauen sich nach einem Jahr ein wenig ab und wie bereits

unter feuchtem Klima wechseln die Spannungen an den Seiten das Vorzeichen, womit leichte Druckspannungen bei beiden Proben entstehen.

Durch die entstehenden Eigenspannungen kann es im Brettschichtholz zur Aktivierung plastischer Bereiche kommen. Dies hauptsächlich bei der Befeuchtung, da Fließflächen bei hoher Feuchte deutlich kleiner sind als bei geringer. Abgesehen von kleinen Bereichen am seitlichen Rand der Klebfugen bei S0_1 und S2_1 (siehe Abbildung 63), treten allerdings keine auf.

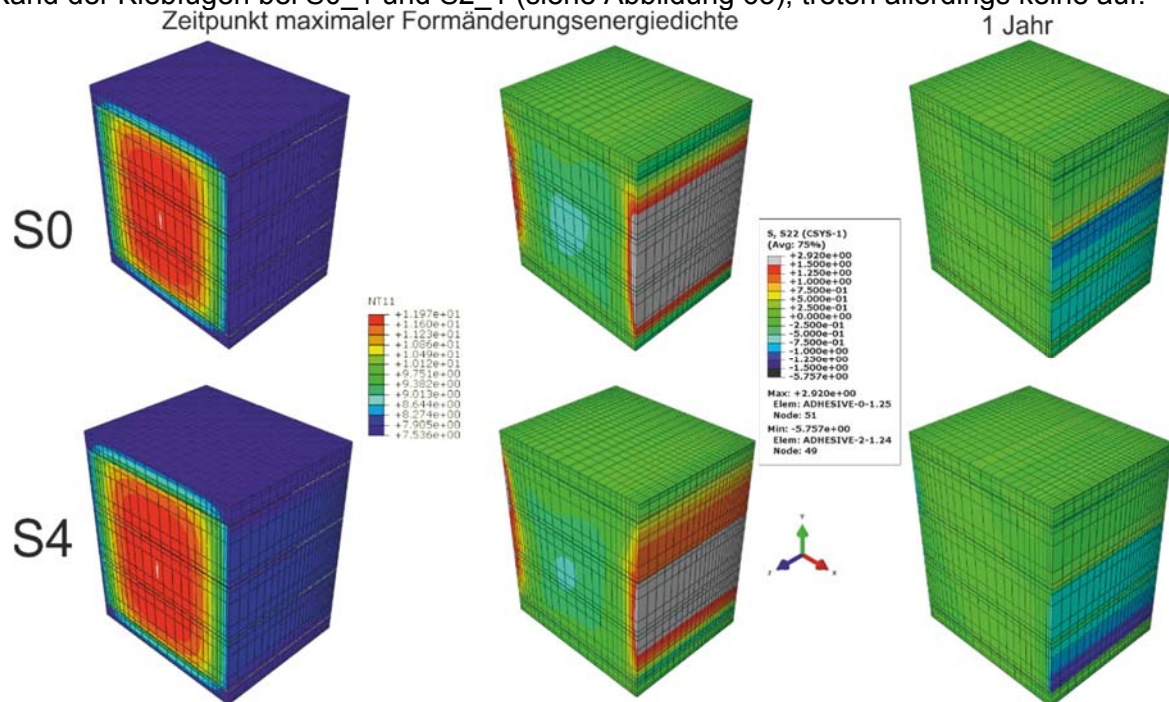


Abbildung 62: Vergleich der entstehenden Spannungen in y-Richtung bei S0 (oben) und S4 (unten) bei Trocknung.

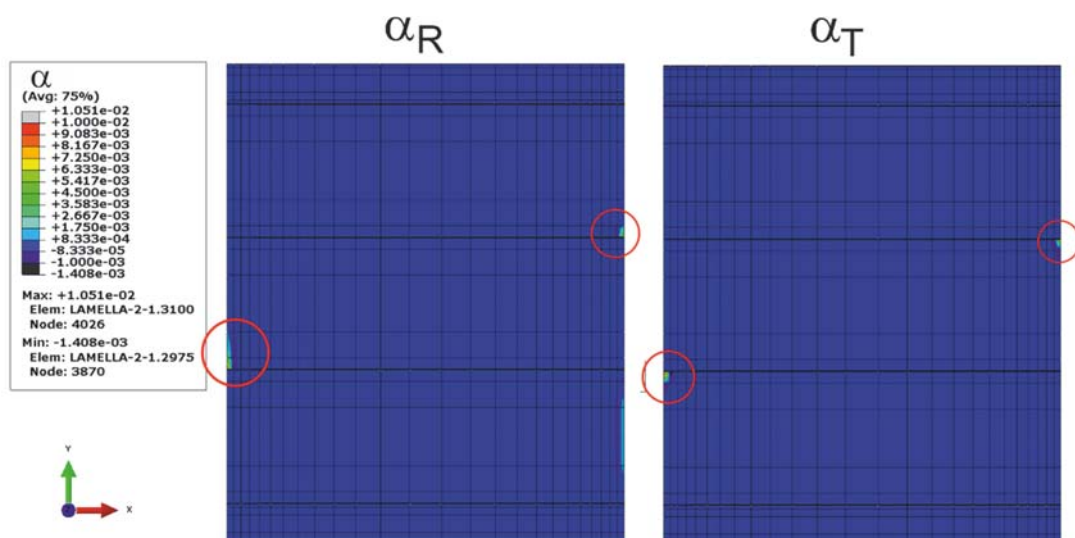


Abbildung 63: Verfestigung der Fließfläche in radialer und tangentialer Richtung. Kreise markieren Bereiche mit plastischer Verformung.

3.2.4.3. Einfluss der Beschichtung bei Klimazyklen

Um den Einfluss von veränderlichem Klima zu untersuchen wird die Umgebungstemperatur als eine sinusförmige Amplitude ([Kornadt u. a., 2010]) zwischen 8 – 17%EMC mit einer Periode von einem Jahr simuliert (dies entspricht 30 - 85 % R.H.), die Hysterese der Sorptionsisotherme wird dabei vernachlässigt. Da sich die Sätze 1 und 2 nur durch die Lagerorte unterscheiden, reicht es mit einem Satz S0 - 5 zu rechnen. Wie die Beschichtungen mit den Filmkoeffizienten simuliert werden, ist abhängig davon, ob sich je Beschichtungssystem ein charakteristischer Koeffizient ermitteln lässt oder dieser abhängig von den Umgebungsbedingungen ist. Die Simulationsdauer wird auf 5 Jahre gesetzt, kann aber für weitere Untersuchungen erhöht werden. In erster Linie interessiert wie sich die Amplitude über die Tiefe des BSH-Trägers verhält. Da für feuchtes und trockenes Klima unterschiedliche effektive Filmkoeffizienten gelten, werden die Beschichtungen durch eine Sinuswelle simuliert die zwischen den db- und wb-Werten schwingt. Die Frequenz ist dabei die selbe wie beim veränderlichen Klima.

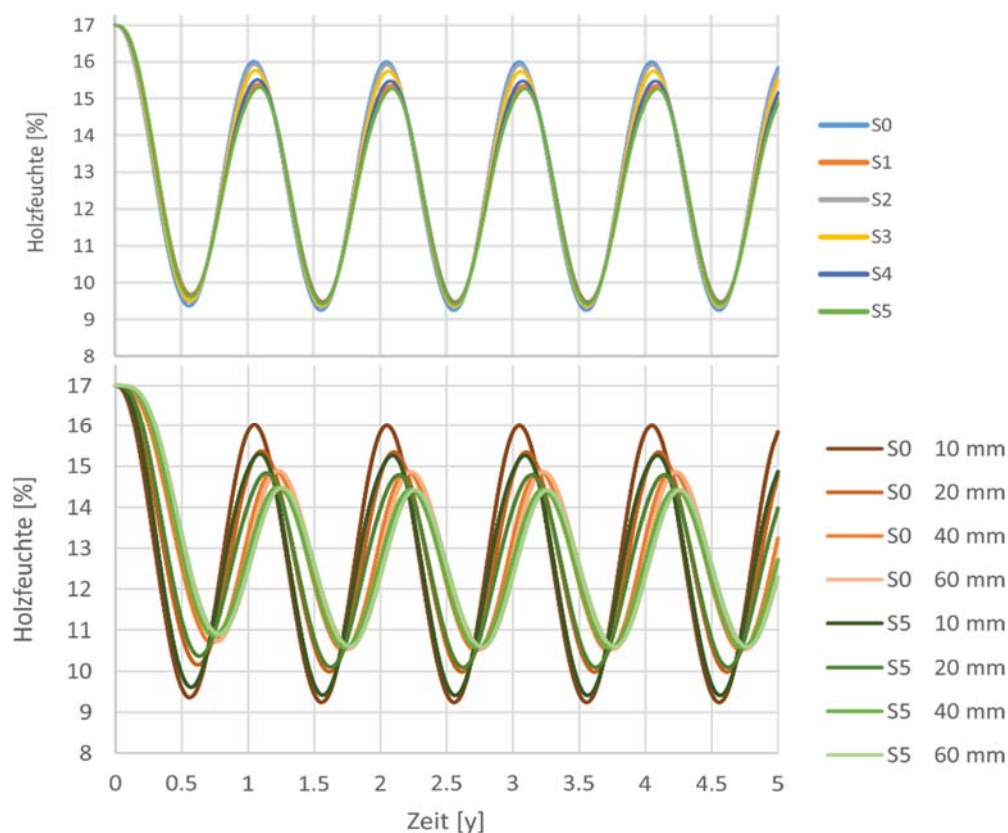


Abbildung 64:(oben) Feuchteentwicklung unter veränderlichem Klima in 10mm Tiefe für alle Proben, sowie (unten) Vergleich der Referenzprobe S0 mit der Beschichtung S5 für Tiefen 10, 20, 40 und 60mm.

Die FE-Berechnung für Spannungsentwicklung unter veränderlichem Klima läuft gleich ab wie unter konstantem Klima. Der einzige Unterschied ist, dass die Simulation der Feuchteentwicklung in veränderlichem Klima stattgefunden hat. Durch die Amplitude können Eigenspannungen entstehen die sich auf nachfolgende Zyklen auswirken und so immer höhere Spannungsspitzen erzeugen, anhand der gespeicherten elastischen Energie kann dies untersucht werden. Extreme Systeme werden dabei wieder genauer betrachtet um feststellen zu können, ob mit einer Beschichtung geringere Eigenspannungen erzielt werden, da die Spannungen sich aber über den Verlauf der Amplitude verändern, müssen diese zu verschiedenen Zeitpunkten betrachtet werden.

In Abbildung 64 ist die Feuchteentwicklung in 10 mm Tiefe aller Proben unter dem veränderlichen Klima dargestellt. Die simulierte Umgebungstemperatur schwingt zwischen 8 - 17 C (30 - 85 % R.H). Es ist erkennbar, dass es bei den Feuchtemaxima zwischen den Beschichtungen grössere Unterschiede gibt als bei den Minima. Die Werte streuen von 15.26 % bei S5 bis 16.00 % bei der Referenz S0 in der Feuchtphase, während in der Trockenphase Holzfeuchten von 9.24 % bei der Referenz S0 bis 9.50 % bei S1 erreicht werden und somit näher beieinander sind. Die Extremwerte sowie der Phasenwinkel und -differenz finden sich in Tabelle A.11 für die Tiefen 0, 10, 20, 40 und 60 mm.

Bei den mittleren Tiefen (20 und 40 mm) kommt es teilweise zu unterschiedlichen Phasenwinkeln der Sinuswelle als nur durch die Tiefenwirkung beobachtet werden könnten, in 10 mm wie auch 60 mm treten jedoch keine Unterschiede auf (vgl. Tabelle 38). Da für die Simulationen eine Auflösung von 20 Ausgabeintervallen pro Jahr gewählt wurde, was Schritten von 438 h entspricht, kann dies jedoch nicht wirklich beurteilt werden, weil die effektiven Extremwerte irgendwo in diesem Zeitfenster zustande kommen können.

Bei Betrachtung über die ganze Tiefe stellt sich heraus, dass die Unterschiede der Extremwerte zwischen geringen Tiefen grösser sind als im Kern des Trägers. So verändert sich die Amplitude zwischen der Oberfläche und 20 mm Tiefe im Feuchten wie auch Trockenem um etwa 2 %EMC, während zwischen 40 und 60 mm (der Mitte des Trägers) fast gar kein Unterschied mehr besteht. Womöglich hängt dies damit zusammen, dass die inneren Regionen länger brauchen um sich der Umgebungstemperatur anzupassen, als sie durch die gewählte Frequenz erhalten.

Während den Feuchtphasen lässt sich ein klarer Unterschied in allen Tiefen zwischen beschichtetem und unbeschichtetem Brettschichtholz erkennen (vgl. Abbildung 64 unten), eine Verzögerung des Trocknungsprozesses zeigt sich jedoch nur minimal wie bereits unter konstantem Klima.

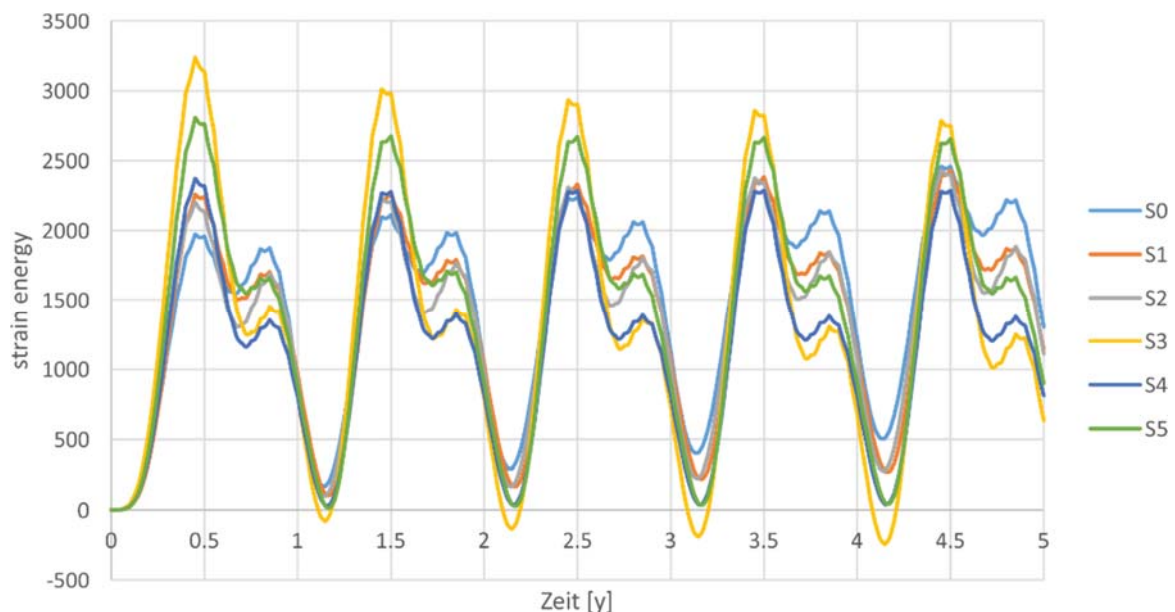


Abbildung 65: Gespeicherte elastische Energie aufgrund der Eigenspannungen in den Proben S0-S6 unter veränderlichem Klima.

In Abbildung 65 ist die elastische Energie der simulierten Proben S0 - S5 unter dem gewählten veränderlichem Klima geplottet. Die Maximalwerte von S0, S1 und S2 steigen dabei mit jedem

Zyklus ein wenig an, dies hängt vermutlich damit zusammen, dass Eigenspannungen aus einem früheren Zyklus nicht ganz abgebaut werden konnten und diese sich nun überlagern. Bei S5 ist eine leichte Abnahme der Peaks und bei S3 eine relativ starke ersichtlich. Die Formänderungsenergie von S4 hat sich bereits im 2. Jahr eingependelt und erreicht mit jedem Zyklus ungefähr den selben Maximalwert. Da dieser Wert im 5. Simulationsjahr auch der Kleinste ist, wird S4 genauer betrachtet.

In Abbildung 66 sind die Feuchteentwicklung (10, 20, 40, 60 mm Tiefe), die Formänderungsenergiedichte (SED) dargestellt. Die Spannungsverteilung in y-Richtung zu den Zeitpunkten der zwei Maxima im 5. Jahr der SED von S0 und S4 sind in Abbildung 67 abgebildet. Die beobachteten Maxima treten ungefähr zum Zeitpunkt des grössten Feuchtegradienten während der Trocknung und die Minima entsprechend bei der Feuchtaufnahme auf. Der zweite Hochpunkt der SED bildet sich etwa zum Zeitpunkt, wo der Kern des Brettschichtholzes trockener als die oberflächennahen Bereiche wird.

Während der Minima finden sich sowohl in S4 als auch in der Referenz S0 nur sehr geringe Eigenspannungen, sogar die Spitzenwerte in den Klebfugen liegen jeweils unterhalb von 1 MPa. Unter maximaler elastischer Energie sind an den Seiten des BSH Zugspannungen entstanden, beim mit S4 beschichteten Träger sind dabei grössere Spannungsfelder, wie auch Spitzenwerte (in den Klebfugen) zu finden als im Unbeschichteten trotz der geringeren Energiewerte. Bis der zweite Peak erreicht ist, haben sich die seitlichen Zugspannungen in Druckspannungen umgewandelt und die Spitzenwerte in den Klebfugen sich zurückgebildet. Die Spannungen sowie deren Verteilung sind zu den drei betrachteten Zeitpunkten (zwei Höhepunkte und Tiefpunkt) zwischen beschichtetem BSH (S4) und der unbeschichteten Referenz (S0) sehr ähnlich. Höhere elastische Energie führt somit nicht zwingend zu grösseren Spannungen, womit die SED für veränderliches Klima sich nicht das optimale Entscheidungskriterium erweist.

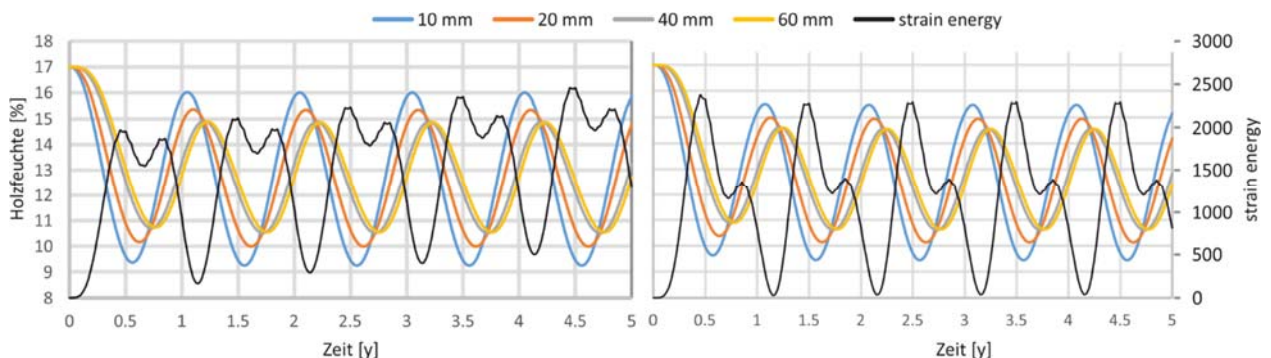


Abbildung 66: Feuchteentwicklung in den Tiefen 10, 20, 40 und 60 mm sowie die Formänderungsenergiedichte für Probe S0 (links) und S4 (rechts) bei veränderlichem Klima.

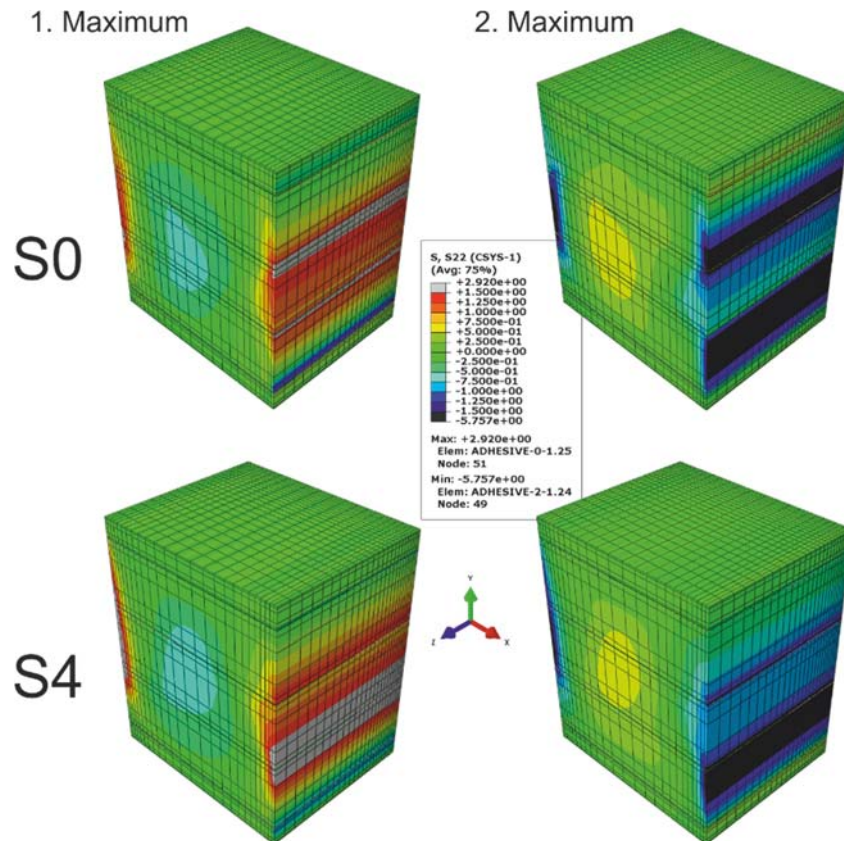


Abbildung 67: Vergleich der Spannungen bei S0 (oben) und S4 (unten) bei maximaler SED im 5. Jahr (links), sowie dem darauf folgenden lokalen Maximum (rechts).

3.2.5. Einfluss der Holzart und des Aufbaus

Da es sich bei den FE-Berechnungen mit Feuchtetransport um sehr rechenaufwändige Modelle handelt, werden die Modellabmessungen für die Berechnungen reduziert und nur ein Ausschnitt der Proben modelliert. Die Kantenabmessungen der FE-Aufbauten betragen 360x180x180 mm bzw. 240x180x180 mm. Um die reale Größe von 360x360x700 mm abbilden zu können, werden Rand- und Symmetriebedingungen genutzt (siehe Abbildung 68). Der Feuchte-austausch erfolgt über eine Seitenfläche, sowie über die Ober- und Unterseite. Da die Proben auf der Stirnseite versiegelt sind, kann über diese kein Feuchte-austausch stattfinden. Die Klebstoffe werden aufgrund ihrer geringen Feuchtedurchlässigkeit mit niedrigen Feuchtedurchgangskoeffizienten modelliert. Für die Berechnung wird der Zeitraum der Messungen von Juli 2016 bis Mai 2017 angesetzt, was einer Dauer von 7248h entspricht. Es werden jeweils reduzierte Elemente mit quadratischer Ansatzfunktion verwendet.

Für die Implementierung der Holzfeuchten werden als Anfangsholzfeuchten die unterschiedlichen Feuchten der gemessenen Lamellenwerte der Experimentproben herangezogen. Dazu werden die Mittelwerte aus 40 mm und 60 mm Tiefe verwendet. Die Anfangsfeuchte der Klebstoffe wird als 6,5 % angenommen. Zudem werden als Randbedingungen die relativen Luftfeuchten in den unterschiedlichen Klimata definiert. Daraus ergeben sich die zu erwartenden Holzfeuchten bzw. Klebstofffeuchten. Die Implementierung des Feuchtetransports wird für zwei der erhobenen Versuchsreihen, bei welchen Schäden zu erwarten sind, durchgeführt. Nachfolgend werden die Holz- und Klebstofffeuchten definiert.

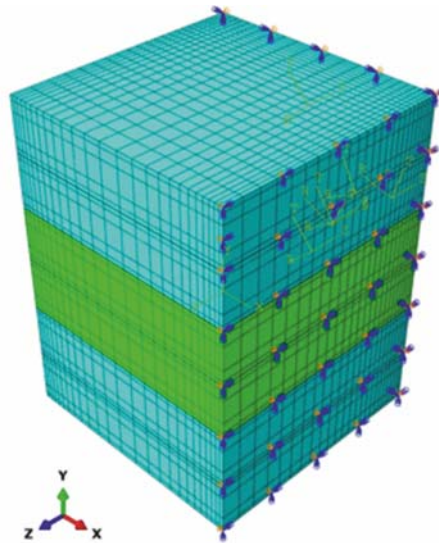


Abbildung 68: Veranschaulichung des FE-Modells für die Probe HYE-40 mit Symmetriebedingungen (orange), Aussenlamellen aus Eschenholz (cyan) und Mittellamellen aus Fichte (grün), verklebt mit PRF.

Für den Vergleich der Experimentergebnisse werden zwei Versuchsreihen mit FE-Modellen nachgerechnet. Dazu wird zum einen die Versuchsreihe 1 im Aussenklima nachgerechnet. Hinsichtlich der späteren Optimierung mit periodischen Klimaschwankungen sind die Ergebnisse dieses Langzeitexperiments interessant. Zum anderen wird Versuchsreihe 3 in der Trockenkammer in einem FE-Modell modelliert und berechnet. Aufgrund der starken Austrocknung können vor allem qualitative Aussagen über das Delaminationsrisiko von hybriden Brett-schichthölzern gemacht werden. Die Proben der Versuchsreihe 1 sind im Innenraumklima aufgestellt. Für die Implementierung des Feuchte-transportes wird für die Nachrechnung der Experimente vereinfacht eine konstante, gemittelte relative Luftfeuchtigkeit als Randbedingung definiert. Die Messungen erfolgten im Zeitraum Juli (ca. 60 % R.H.) bis April (ca. 40 % R.H.). Als konstanter Mittelwert wird daher eine relative Luftfeuchte von 50 % angesetzt. Daraus ergibt sich eine zu erwartende Holzfeuchte von ca. 9,5 %. Für die Klebstoffe werden für PUR 2 %, für MUF 4 % und für PRF 8 % angesetzt. Für die Versuchsreihe 3 (Trockenkammer) wird ein Wert von ca. 10 % für die relative Luftfeuchte angenommen. Daraus ergibt sich eine zu erwartende Holzfeuchte von 3 %. Der Wert erscheint etwas zu niedrig, zieht man jedoch Werte aus anderen Sorptionsisothermen heran, ist festzustellen, dass in niedrigen Luftfeuchtigkeitsbereichen die Holzfeuchten geringer sind. Die Feuchten der Klebstoffe ergeben sich für PUR zu 0,5 %, für MUF zu 1 % und für PRF zu 2 %.

3.2.5.1. Versuchsreihe 1: Innenraumklima

In Abbildung 69 sind die Ergebnisse der FE-Berechnung der Probe HF-40-1, HE-40-1 und HYE-2-1 dargestellt. Bei Fichte ist die Holzfeuchte über die betrachteten Querschnittsbereiche nahezu konstant. Nur zwischen den einzelnen Lamellen sind Feuchtesprünge gut zu erkennen. Die Differenz der Holzfeuchte zwischen einer Tiefe von 60 mm und 10 mm beträgt lediglich ca. 0,2 %. Dies erscheint hinsichtlich des geringen Feuchteunterschiedes zwischen der gemittelten Anfangs- (ca. 9,7 %) und Endfeuchte (ca. 9,5 %) plausibel. Bei Esche sind deutlichere Feuchteunterschiede zwischen den einzelnen Lamellen zu erkennen, was auf die grossen Unterschiede der vorgegebenen Anfangsfeuchten (8 % - 10,1 %) der Lamellen zurückzuführen ist. Wie bei Fichte sind die Holzfeuchtedifferenzen zwischen einer Tiefe von 60 mm und 10 mm gering, was ebenfalls mit den geringen Feuchteunterschieden von Anfangs- und Endfeuchte erklärt werden kann.

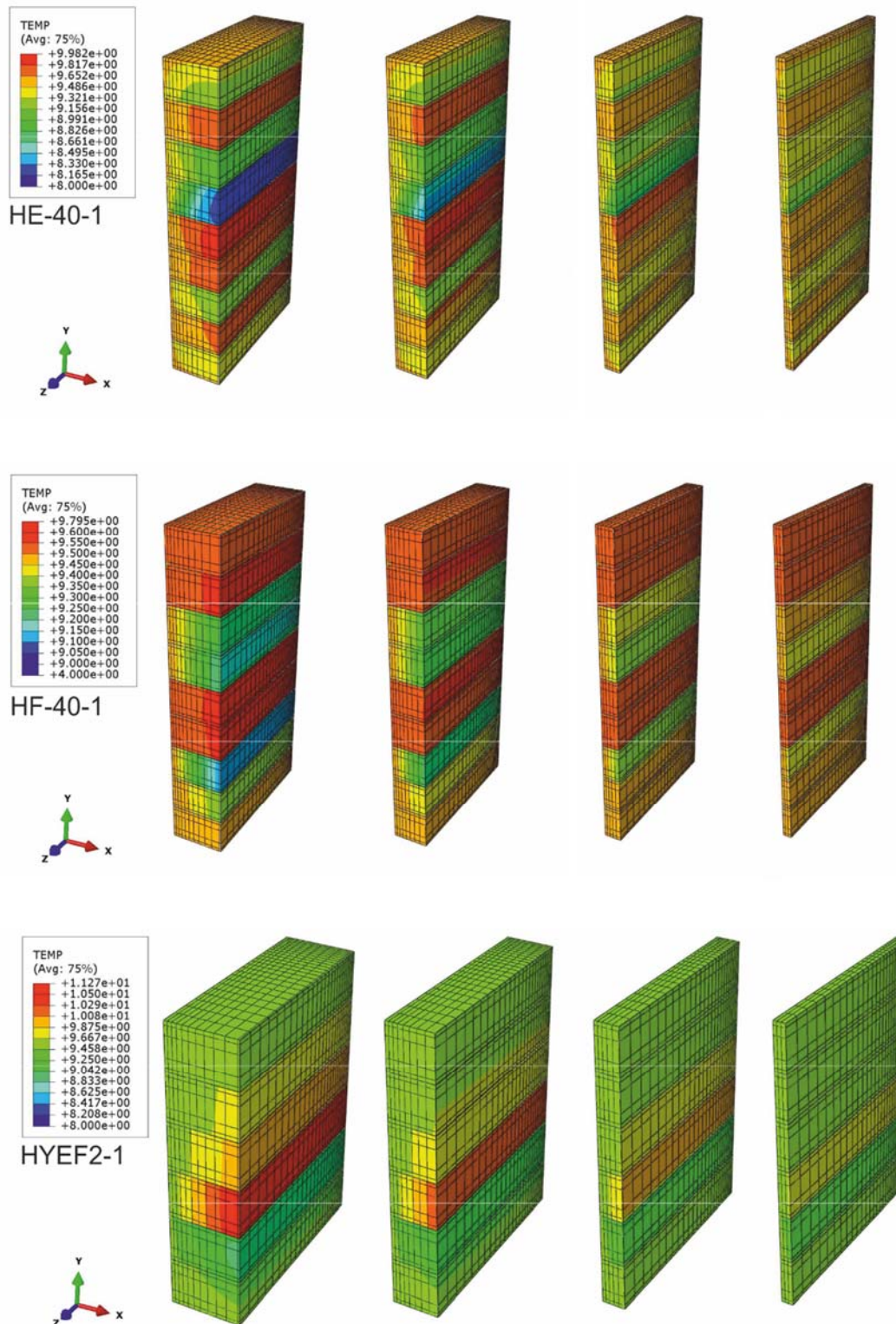


Abbildung 69: Berechnete Feuchteprofile ausgesuchter Proben zum Zeitpunkt $t=7248\text{h}$ bei Innenraumklima.

Für die hybride Probe HYE2-1 aus Esche und Fichte sind deutliche Unterschiede der Lamellenfeuchten zu erkennen. Wie bei den anderen Proben sind die Feuchteunterschiede in den unterschiedlichen Tiefen sehr gering.

Auf Grundlage der berechneten Feuchteprofile der Proben werden die feuchteinduzierten Spannungen in Abaqus berechnet. Hierzu werden die in Kapitel 2.3 beschriebenen Materialmodelle, welche als UMAT-Subroutine implementiert wurden, angewendet. Anhand der berechneten Spannungen kann überprüft werden, ob bei der theoretischen Berechnung der Proben ein Delaminationsgefahr besteht. Um dies festzustellen, werden die Spannungen in den Holzlamellen und in den Klebstoffugen in die Normalspannungsrichtungen betrachtet. Für die weitere Dokumentation werden folgende Richtungsbeziehungen verwendet:

- S11 - Normalspannungen in x-Richtung,
- S22 - Normalspannungen in y-Richtung,
- S33 - Normalspannungen in z-Richtung.

Die Ergebnisse aus den Spannungsberechnungen der Versuchsreihe 1 sind im Anhang Abbildung 96, Abbildung 97, Abbildung 98 dargestellt. In allen betrachteten Proben sind nur kleine resultierende Spannungen zu erkennen und somit besteht keine Gefahr der Delamination oder Rissbildung. Da die Resultate aus den Berechnungen später hinsichtlich des Delaminations- und Rissbildungsrisikos ausgewertet werden, sollen die Proben hier nicht ausführlicher diskutiert werden.

3.2.5.2. Versuchsreihe 3: Trockenkammer

In Abbildung 70 sind die Ergebnisse der FE-Berechnung der Proben HF-40-3, HE-40-3 und HYE2-3 dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass die Holzfeuchte von innen nach aussen hin deutlich abnimmt. Bei Fichte beträgt die Differenz der Holzfeuchte zwischen einer Tiefe von 60mm und 10mm bis zu 6%. Dies erscheint hinsichtlich des hohen Feuchteunterschiedes zwischen der gemittelten Anfangs- (ca. 11 %) und Endfeuchte (ca. 3 %) plausibel. Wie bei den Proben der Versuchsreihe 1 erfolgt die Trocknung überwiegend in horizontale Richtung, da Klebfugen eine deutlich geringere Diffusivität hat als Holz. Bei Esche sind ebenfalls deutliche Feuchteunterschiede zwischen den einzelnen Lamellen zu erkennen, was auf die grossen Unterschiede der vorgegebenen Anfangsfeuchten (8,3 % - 10,5 %) der Lamellen zurückzuführen ist. Wie bei Fichte sind die Holzfeuchtedifferenzen zwischen einer Tiefe von 60 mm und 10 mm gross, was sich ebenfalls aus hohen Feuchteunterschieden von Anfangs- und Endfeuchte erklärt. Für die hybride Probe HYE2-3 aus Esche und Fichte sind deutliche Unterschiede der Lamellenfeuchten zu erkennen. Fichtenholz (mittlere Lamellen) trocknen deutlich schneller als das Eschenholz (jeweils äussere Lamellen). Wie bei den anderen Proben sind die Feuchteunterschiede in den unterschiedlichen Tiefen relativ hoch.

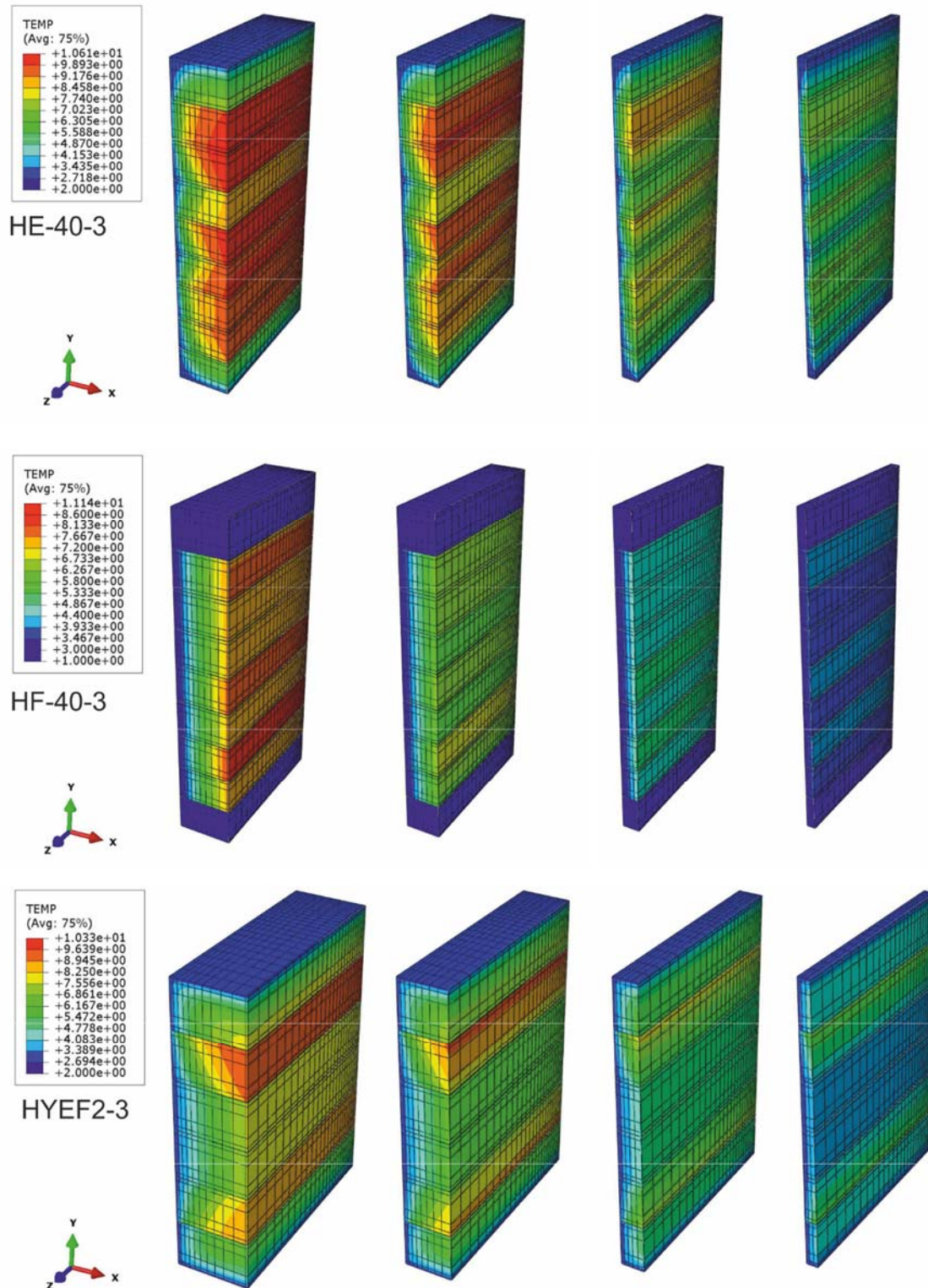


Abbildung 70: Berechnete Feuchteprofile ausgesuchter Proben zum Zeitpunkt $t=7248\text{h}$ bei Trockenraumklima.

Im Unterschied zum Innenraumklima liefert die Spannungsberechnung der Proben der Versuchsreihe 3 (Trockenlagerung) deutlich grössere Spannungen. Die berechneten Spannungen der Probe HE-40-3 können Abbildung 71 entnommen werden. Die Berechnungen ergeben für S11 grosse Randzugspannungen in den Holzlamellen (oben links) von maximal 15 MPa, was oberhalb der Festigkeit liegt und somit Schäden zu erwarten sind. Die Spannungen in der Klebstoffuge (oben rechts) sind durchgehend Druckspannungen, welche zum Probenrand hin

auf einen Maximalwert von 62 MPa zunehmen. Senkrecht dazu sind die Spannungen S22 in den Lamellen (mittig links) überwiegend Zugspannungen. Am Rand betragen diese Zugspannungen ca. 5 MPa. In der Mitte des Probenrandes nehmen diese Zugspannungen im Holz zu den Klebstoffugen hin zu. Dort ergeben sich Maximalwerte von ca. 6 MPa. Die Klebstoffugen (mittig rechts) weisen hohe Zugspannungen von 18,8 MPa an den Probenrändern auf. In longitudinale Richtung sind wie bei der vorherigen Probe die Spannungen S33 in den Holzlamellen (unten links) gering. Am freien Ende sind sie erneut nahezu null. In den Klebstoffugen (unten rechts) sind Zugspannungen von 20 MPa am Probenrand, grosse Druckspannungen von 38 MPa im Probeninneren zu erkennen.

In Abbildung 72 sind die Spannungen der Probe HF-40-3 in die Normalspannungsrichtungen für die Holzlamellen und die Klebstoffugen dargestellt. Die Berechnungen liefern für S11 an den Probenrändern hohe Druck- (ca. 71 MPa), für die Probenmitte hohe Zugspannungen (ca. 65 MPa) in den Klebstoffugen (oben rechts). In den Holzlamellen (oben links) sind nur kleine Spannungen zu erkennen. Für S22 liefern die Berechnungen Zugspannungen von 8,8 MPa senkrecht zur Klebstoffuge (mittig rechts). Auch in der Spannungsberechnung der Holzlamellen (mittig links) sind höhere Spannungen von ca. 5 MPa in radiale Richtung zu erkennen. In longitudinale Richtung sind die Spannungen S33 in den Holzlamellen (unten links) gering. Am freien Ende in z-Richtungen sind sie nahezu null. In den Klebstoffugen (unten rechts) sind grosse Zugspannungen von 33 MPa am Probenrand, grosse Druckspannungen von 28 MPa im Probeninneren zu erkennen.

In Abbildung 73 sind die errechneten Spannungen der hybriden Probe HYE2-3 dargestellt. Erneut ergeben sich für die Spannungen S11 in den Holzlamellen (oben links) geringe Zugspannungen, welche in den inneren Lamellen zum Probeninneren hin bereichsweise in Druckspannungen übergehen. In den Klebstoffugen (oben rechts) sind wie bei der vorherigen Probe erneut ausschliesslich Druckspannungen zu erkennen. In der mittleren Fuge zwischen den Fichtenlamellen haben sie einen Maximalwert von 68,5 MPa. Die Spannungen S22 an den Lamellenrändern (mittig links) sind überwiegend Zugspannungen von ca. 5 MPa. In manchen Bereichen, vor allem in der Nähe der Klebstoffugen, ergeben sich entweder höhere Zugspannungen von bis zu 7,5 MPa oder geringe Druckspannungen an den Probenkanten. In den Klebstoffugen (mittig rechts) ergeben sich maximale Zugspannungen von 12,75 MPa in der oberen Fuge zwischen Fichten- und Eschenlamellen. Zum Probeninnern gehen die Spannungen erneut in Druckspannungen über. Die Spannungen S33 in longitudinale Richtung in den Holzlamellen (unten links) sind wie bei den vorherigen Berechnungen gering. Erneut sind sie am freien Ende der Probe nahezu null. Die Klebstoffugen weisen erneut höhere Zugspannungen von ca. 16 MPa am Probenrand, sowie hohe Druckspannungen von maximal 40 MPa im Probeninneren, auf (unten rechts).

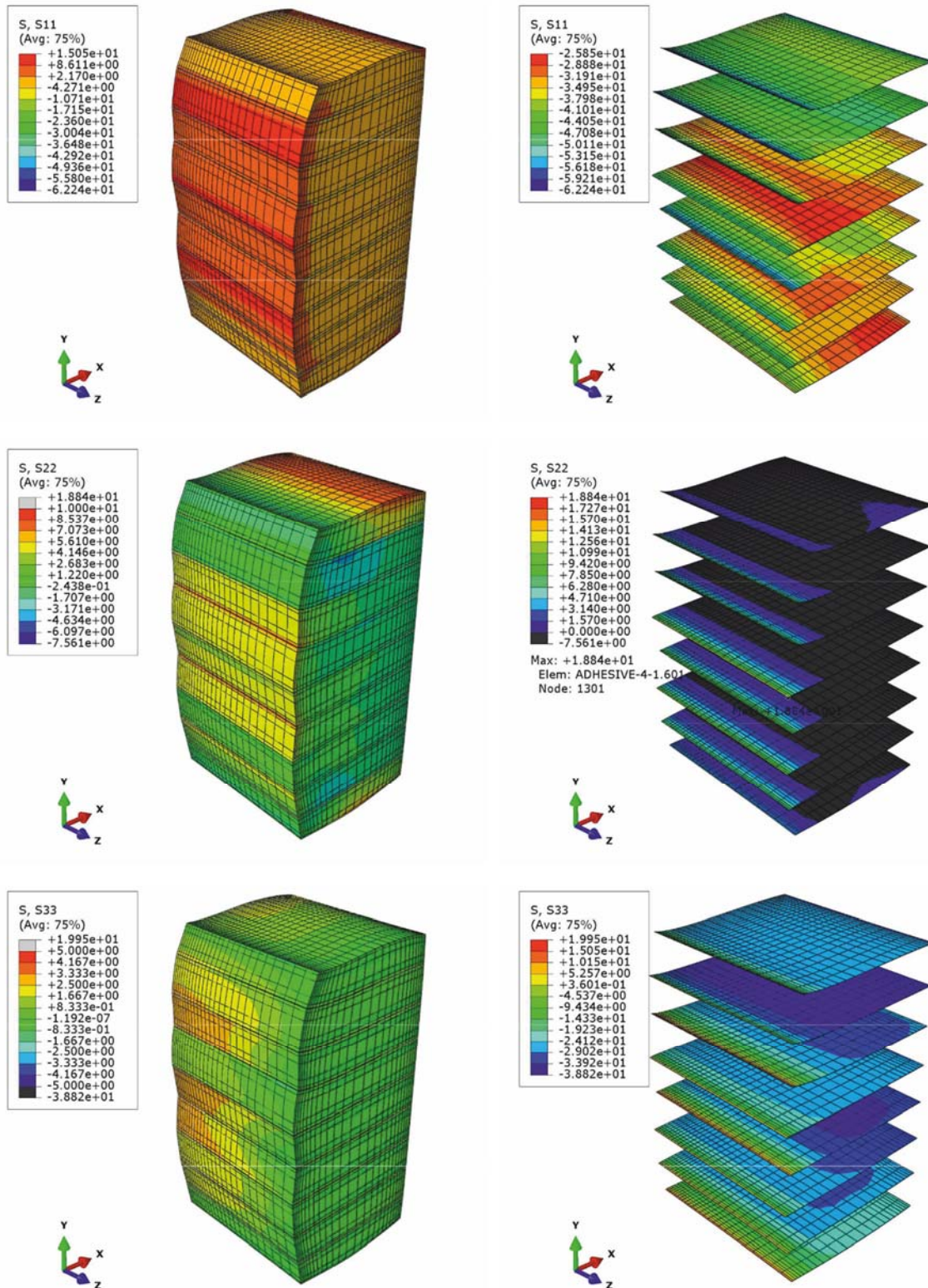


Abbildung 71: Spannungen der Probe HE40-3 zum Zeitpunkt t=7248h. Deformationen sind 16.5-fach überhöht dargestellt.

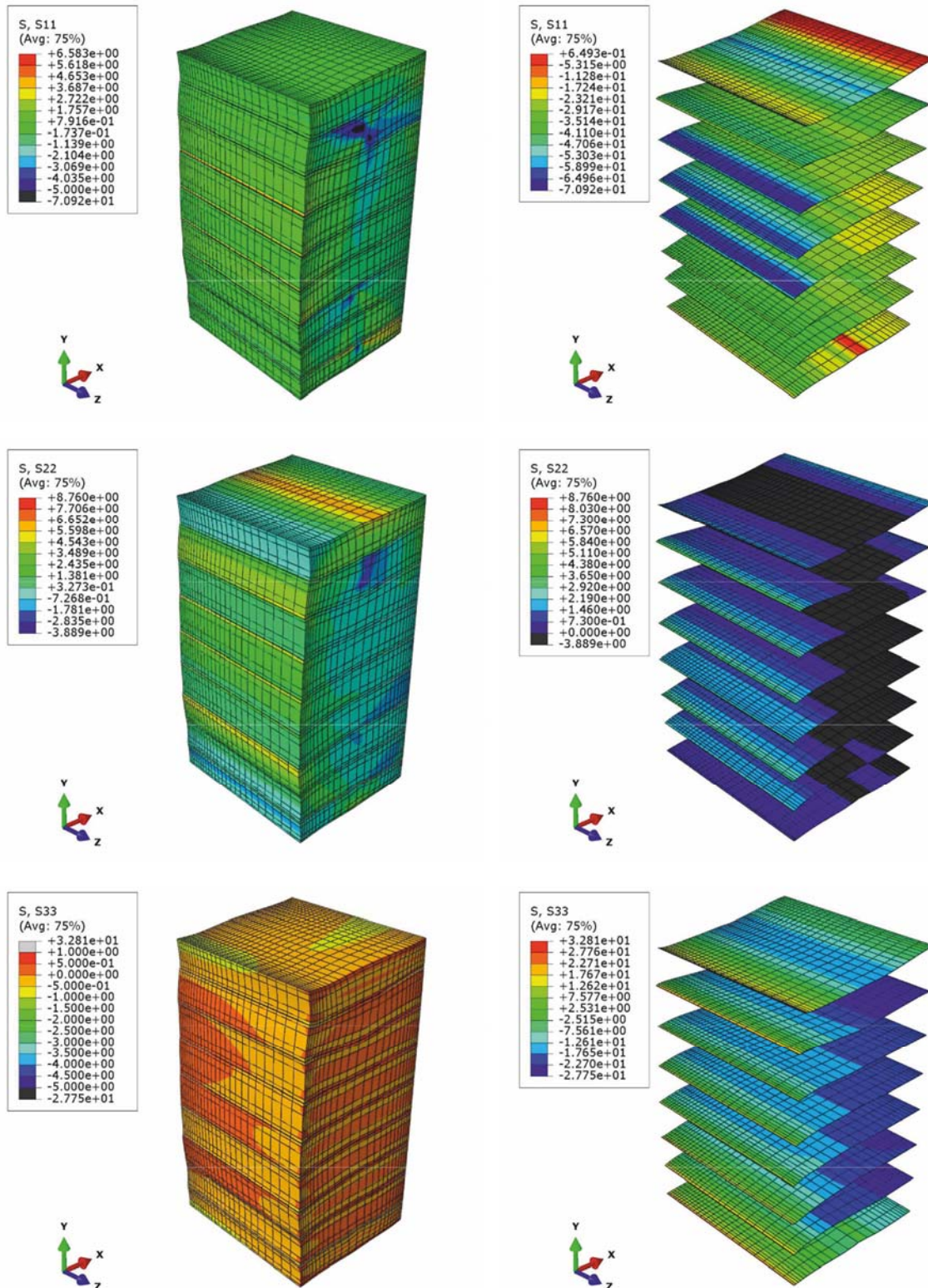


Abbildung 72: Spannungen der Probe HF40-3 zum Zeitpunkt t=7248h. Deformationen sind 11.3-fach überhöht dargestellt.



3.2.5.3. Gegenüberstellung der Rechenergebnisse mit den Experimenten

Die Feuchtemessungen der Proben im Innenraumklima sowie Trockenklima erscheinen nach qualitativer Betrachtung plausibel. Die Holzfeuchtigkeit bleibt im Innenraumklima aufgrund der fehlenden Klimaschwankungen nahezu konstant, in der Trockenkammer hingegen nimmt sie wegen der niedrigen relativen Luftfeuchtigkeit stark ab. Ausserdem lassen sich die unterschiedlichen Holzfeuchten in den verschiedenen Messtiefen gut erkennen.

Wie erläutert, wurde für die Berechnung der Feuchteprofile eine Endfeuchte anhand der Sorptionsisotherme festgelegt, um einen Feuchtetransport im Holz zu simulieren. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen die unterschiedlichen Endfeuchten deutlich. Während im Innenraumklima die Holzfeuchten in horizontaler Richtung nahezu konstant sind, ist bei den Ergebnissen der Trockenkammerproben ein deutlicher Feuchteunterschied zwischen äusseren und inneren Bereichen zu erkennen. Die Ränder der Proben haben nach einem Berechnungszeitraum von ca. einem Jahr die Endfeuchte erreicht. Des Weiteren sind bei hybriden Proben deutliche Unterschiede in der Trocknung der unterschiedlichen Holzarten in horizontaler Richtung zu erkennen. Da es keine genauen Wert des Diffusionskoeffizienten für Esche gibt, wurden für die Berechnungen die Werte von Buche übernommen. Die Werte für Fichte sind wesentlich geringer als für Esche, wonach die Trocknung in Fichte schneller erfolgen muss als in Esche. Dies ist im Feuchteprofil der hybriden Probe deutlich zu sehen. Durch die geringe Durchlässigkeit der Klebstoffe kann nur ein sehr geringer Feuchteaustausch zwischen den einzelnen Lamellen stattfinden, was zu Feuchtesprüngen zwischen den Lamellen führt.

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass die berechneten Feuchteprofile in horizontaler Richtung gut mit den gemessenen Proben übereinstimmen. Die gemessenen Feuchteprofile und Endfeuchten im Innenraum sowie in der Trockenkammer entsprechen nahezu den berechneten Ergebnissen. Dies soll beispielhaft an den Feuchteprofilen der Probe HF-40-3 gezeigt werden. Dazu werden die gemessenen Experimentlamellen (bei hybridem Aufbau vereinfacht nur Fichtenlamelle) und die dazugehörige Lamelle in den Berechnungen verglichen. Nachfolgend sind in Tabelle 17 Werte der Messungen und Berechnungen dargestellt.

Tabelle 17: Gemessene und berechnete Holzfeuchten zum Zeitpunkt t=7248h der Versuchsreihen 1 und 3.

Proben	Lamelle [von oben]	Tiefe [mm]	Messung [%]	Berechnung [%]	Abweichung [%]
HF-40-1	5	60	9,7	9,7	max. 5
		40	9,8	9,7	
		20	10,0	9,6	
		10	9,1	9,5	
HE-40-1	5	60	9,2	9,9	max. 7
		40	9,8	9,8	
		20	10,0	9,6	
		10	10,0	9,5	
HYEF2-1	4	60	9,6	10,5	ca. 10-20
		40	9,0	10	
		20	9,0	9,8	
		10	7,8	9,6	
HF-40-3	5	60	9,6	8,2	max. 17
		40	6,7	6,7	
		20	5,3	5,2	
		10	4,0	4,2	
HE-40-3	4 und 5	60	8,5	9,1	ca. 20-50
		40	5,1	7,5	
		20	4,4	5,6	
		10	4,2	5,0	
HYEF2-3	4	60	6,4	7,7	max. 20
		40	5,0	5,7	
		20	4,6	5,0	
		10	4,3	4,0	

Grössere Differenzen zwischen Messungen und Berechnungen der Werte in 60 mm und 40 mm Tiefe lassen sich vor allem durch die Mittelung (gemittelte Werte der Messungen in 60 mm und 40 mm) der Lamellenanfangsfeuchten für die Berechnungen erklären.

Die Spannungen der nachgerechneten Experimentproben erscheinen nach qualitativer Betrachtung plausibel. Die Spannungen S_{11} in tangentialer Richtung führen zu Druck- bzw. Zugspannungen in den Holzlamellen und zu Zug- bzw. Druckspannungen in den Klebstoffugen. In radiale Richtungen ergeben sich am Probenrand Zugspannungen S_{22} im Holz, welche zu Zugspannungen in den Klebstoffugen im Randbereich führen. Die Spannungen S_{33} in longitudinale Richtung sind richtigerweise am freien Probenrand nahezu null. Zudem sind die feuchteinduzierten Spannungen in den Proben aus der Trockenkammer deutlich höher als die Spannungen der Proben aus dem Innenraumklima. Die starke Austrocknung in der Trockenkammer, welche gut in den Feuchteprofilen sichtbar ist, erzeugt die zu erwartenden höheren Spannungen in den Proben.

Betrachtet man die Spannungsergebnisse etwas genauer, lassen sich weitere Zusammenhänge zwischen den Feuchteprofilen und den ermittelten Spannungen erkennen. In den Feuchteprofilen der homogenen Aufbauten sind deutliche Feuchteunterschiede zwischen den einzelnen Lamellen zu erkennen. Diese Feuchteunterschiede führen zu unterschiedlichem Quellen und Schwinden der einzelnen Lamellen. In den Klebstoffugen zwischen den Lamellen ist das unterschiedliche Quellen und Schwinden durch deutlich höhere Spannungen in die Normalspannungsrichtungen ersichtlich. Auch im Feuchteprofil des hybriden Aufbaus ist ein Feuchteunterschied zwischen den Holzlamellen zu erkennen. Dieser Feuchteunterschied kann zum einen auf unterschiedliche Anfangsfeuchten der Lamellen, zum anderen auf das unterschiedliche Diffusionsverhalten von Fichte und Esche zurückgeführt werden. Demnach entstehen zwischen den unterschiedlichen Holzarten zwangsläufig Feuchtesprünge, welche zu hohen Normalspannungen in der dazwischenliegenden Klebstoffuge führen.

Abschliessend werden die auftretenden Delaminationen der Klebstoffugen und Risse in den Holzlamellen in den Experimentproben qualitativ mit den Spannungsberechnungen verglichen. Ein genauer Vergleich der maximalen Spannungswerte in den Klebstoffugen mit den Zugfestigkeiten der Klebstoffe ist hinsichtlich der mangelhaften Kenntnis der Zugfestigkeit der Klebstoffe nicht sinnvoll. Da in den Spannungsberechnungen ausschliesslich die linke, sowie obere und untere Probenseite modelliert wurde, werden nachfolgend nur die Ergebnisse dieser Seiten verglichen und diskutiert. Betrachtet man die Probe HF-40-3 (Abbildung 29), sind deutliche Risse in den Holzlamellen zu erkennen. In den Spannungsergebnissen der Probe HF-40-3 (Abbildung 72) sind in der dritten Holzlamelle von unten hohe Zugspannungen senkrecht zur Klebstoffuge zu erkennen. In der Experimentprobe ist an dieser Stelle ein deutlicher Riss zu sehen. An der Probenoberseite sind in der Spannungsberechnung grosse resultierende Spannungen erkennbar, welche sich in den Proben durch Risse an der Ober- und Unterseite widerspiegeln. Auch zwischen den dokumentierten Delaminationen (Abbildung 29) und den berechneten Spannungen (Abbildung 71) der Probe HE-40-3 lassen sich Zusammenhänge erkennen. In der vierten Fuge von oben treten in der Berechnung die maximalen Zugspannungen im Klebstoff auf, zusätzlich sind in der darüber liegenden Fuge hohe Zugspannungen berechnet worden. Die Dokumentation der Experimentproben zeigt, dass auch in diesen beiden Fugen eine Delamination aufgetreten ist. Im Vergleich zur homogenen Fichtenprobe sind an der Ober- und Unterseite trotz höherer Spannungen keine Risse aufgetreten. Zum einen kann dies auf die höhere Zugfestigkeit des Eschenholzes, zum anderen auf die Jahrringlagen der Lamellen zurückgeführt werden. Zudem werden die Delaminationen und Spannungsberechnun-

gen der Probe HYE2-40-3 ausgewertet. Die Delaminationen können Abbildung 29, die Spannungsberechnungen Abbildung 73 entnommen werden. Erneut tritt an den Stellen der maximalen Zugspannungen eine Delamination in der Klebstoffuge auf. Im Vergleich zu den vorherigen beiden Proben tritt zudem eine Delamination der Klebstoffuge der Aufdopplung auf.

Zuletzt sollen noch die beiden Proben HE-40-3 und IHE-40-3 hinsichtlich des Einflusses von Riftbrettern auf das Delaminationsrisiko diskutiert werden. Auch wenn die Spannungsberechnungen (siehe Tabelle 17) nur gering unterschiedliche Spannungen liefern, unterscheiden sich die auftretenden Delaminationen. Während die Probe HE-40-3 (Abbildung 29) tiefe seitliche Delamination aufweist, ist in der Probe IHE-40-3 (siehe Abbildung 95) keine Delamination der Klebstoffuge aufgetreten. Hier hingegen tritt in der dritten Lamelle von oben (Riftbrett) ein Riss auf. Die Verwendung von Riftbrettern wirkt sich somit in diesem Aufbau aufgrund der kleineren entstehenden Querspannungen positiv auf das Delaminationsrisiko aus, sich jedoch nicht verallgemeinern lässt.

3.2.6. Optimierung hybrider BSH-Träger

Mit der Kenntnis aus den Experimenten und den theoretischen Berechnungen sollen die Querschnittaufbauten für hybride Holzträger Elemente optimiert werden. Um aussagekräftige Ergebnisse mit vertretbarem Rechenaufwand zu erhalten, müssen von vornherein einige Überlegungen hinsichtlich sinnvoller Bedingungen und Eingabeparameter gemacht werden. Das Ziel in einer Optimierung besteht darin, ein Maximum oder ein Minimum eines Optimierungsproblems zu finden. In der Arbeit wurde das allgemeine Optimierungsproblem in Anlehnung an Gritzmann [2013] herangezogen. Hierbei wird eine Zielfunktion (engl. objective function) beschrieben, für die ein Minimum gefunden werden soll. Die verwendete Optimierungsmethode mit Ersatzmodellen wurde in Kap. 2.3.5 beschrieben, und an zwei einfachen Beispielen (hybrides Bilayer Kap. 3.2.2.1 und einfacher hybrider BSH Buche-Fichte Träger 3.2.2.2) verifiziert und demonstriert. Als Erweiterung wird nun Esche gerechnet und das vollständige Materialmodell mit allen Dehnungskomponenten angewandt. Zudem werden Feuchtezyklen gerechnet, da das Hauptaugenmerk auf der Dauerhaftigkeit der Querschnitte liegt und Delaminationen möglichst vermieden werden sollen. Um keine Verformungen zu behindern, ist der Ausschnitt des Trägers mittels Minimallagerung gelagert. Zur Optimierung des gegebenen Querschnitts werden einige Modellierungsparameter als veränderlich vorausgesetzt. Diese sind in nachfolgender Tabelle dargestellt:

Tabelle 18: Veränderliche Parameter x_i für die Optimierung des hybriden BSH.

i	Typ	Grenzen	Bedeutung
1	Real	$\in [20, 40]$	Höhe der Aussenlamellen ($x_1 = 0 \Rightarrow 20$ mm, $x_1 = 1 \Rightarrow 30$ mm und $x_1 = 2 \Rightarrow 40$ mm)
2	Integer	$\in [0, 4]$	Anzahl der Aussenlamellen
3	Integer	$\in [0, 8]$	Anzahl negativ orientierter Lamellen beginnend mit der untersten Lage

Um vergleichbare Ergebnisse der einzelnen Simulation gewährleisten zu können, muss zu Beginn der Optimierung eine Nebenbedingung festgelegt werden. So sind die Probenabmessungen nur teilweise über Breite und Länge vorgegeben, während die Modellhöhe variabel ist. Folglich ist die Modellhöhe über die Lamellendicke als kontinuierliche Variable definiert. Um dennoch vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wird die Biegesteifigkeit $E \cdot I$ [N/mm²] der

Querschnitte als Nebenbedingung festgelegt. Somit geht neben dem Elastizitätsmodul der unterschiedlichen Holzarten (Fichte: 10000 N/mm², Esche: 13000 N/mm²) auch deren Lage im Querschnitt in die Optimierung mit ein. Mit dieser Nebenbedingung ist eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei gleichzeitig variierenden Abmessungen möglich.

Zur Optimierung wurde ein BSH-Träger mit den Kantenabmessungen von 180 mm Länge, 180 mm Breite und einer variablen Höhe modelliert. Grundsätzlich wird zwischen Aussen- und Innenlamellen unterschieden. Die Innenlamellen werden als Fichte, die Aussenlamellen als Esche modelliert und sind symmetrisch an der Ober- und Unterseite des Trägers angeordnet. Die Höhe der Lamellen aus Esche wird mit einem kontinuierlichen Parameter vorgegeben, welcher eine Höhe von 20 mm bis 40 mm vorsieht. Ein weiterer veränderlicher Parameter stellt die Anzahl der Aussenlamellen dar. Der Aufbau wird nach den Vorschlägen der SIA 265/1[2009] realisiert. Diese besagt, dass bei unterschiedlichen Festigkeitsklassen der Aussen- und Innenlamellen, die Aussenlamellen bestimmte Kriterien erfüllen sollen. Die Gesamthöhe der Lamellen an Ober- und Unterseite sollen jeweils 1/6 der Trägerhöhe, sowie mindestens aus 2 Lamellen bestehen. Deshalb wurde ein Kriterium implementiert, welches den Aufbau mit nur einer Aussenlamelle ausschliesst und eine Höhe der Aussenlamellen von mindestens 40 mm garantiert. Die Höhen der Lamellen werden in Abhängigkeit der Referenzsteifigkeit (2,67·E12 Nmm) und den Höhen der Aussenlamellen ermittelt, sind jedoch auf 20 mm bis 40 mm begrenzt. Somit ergibt sich bei allen möglichen Querschnittaufbauten eine gleiche Biegesteifigkeit. Als letzter veränderlicher Eingabeparameter wurde wie in Kap.3.2.2.2. die Orientierung einer Lamelle definiert (vgl. Tabelle 18).

Als Zielfunktion der Optimierung diene ein Kriterium, welches auf den Normalzugspannungen in der Klebstofffuge basiert. Dabei wurde angenommen, dass anhand der Normalzugspannungen senkrecht zu den Klebstofffugen eine Aussage über das Delaminationsrisiko gemacht werden kann. Die mit dem FE-Modell berechneten Spannungen erschienen nach qualitativer Betrachtung plausibel. Es lässt sich jedoch feststellen, dass die konkreten Zahlenwerte der Zielfunktion zwischen den einzelnen Optimierungen variieren, da für jede Optimierung ein neuer Satz an Startwerten gesammelt wird. Erweitert wird das Zielkriterium um die Masse m_{BSH} (Rohdichte Esche 650 kg/m³/ Fichte 420 kg/m³) sowie die Höhe h_{BSH} des hybriden Aufbaus. Die verwendete Multi-kriterien Zielfunktion, die minimiert werden soll, lautet

$$f = a \cdot f_{\sigma} + b \cdot m_{BSH} + c \cdot h_{BSH} \quad (2.12)$$

mit f_{σ} aus Gl.2.9 und a , b und c als Gewichtungsfaktoren der Zielgrössen. Da $b=0$ oder $c=0$ zu trivialen Ergebnissen homogener Aufbauten aus Esche, bzw. Fichte führt, wird für die spätere Optimierung unterschiedliche Gewichtung untersucht.

Das FE-Modell wird mit Elementen des Typs C3D20 vernetzt, wobei das Netz zu den Kanten und den Klebstofffugen hin von 20 mm auf 2 mm verfeinert wird. Durch die Verfeinerung der Elemente zu den Rändern hin, soll eine genauere Berechnung der Spannungen ermöglicht werden, da Delamination im Allgemeinen an den Aussenkanten beginnt. Die optimale Konfiguration wird aus Zeitgründen über das hygro-elastische Modell gefunden und auf diese dann das vollständige Materialmodell angewandt, da die Berechnungen unter Berücksichtigung der Plastizität, Viskoelastizität und dem mechano-sorptiven Effekt sehr rechenaufwändig sind, und rein hygroelastisch dennoch 16 Stunden benötigen. Es werden die Bedingungen aus der Trockenkammer herangezogen, was eine Senkung der Luftfeuchte von 65 % auf 10 % bedeutet.

Aufgrund der Erfahrungen aus Kap.3.2.2.2 werden für die Optimierung 8 Startpunkte gesetzt und maximal 20 Evaluationen durchgeführt, was zu einer Einstellungskombination von 20-CORNER-RBFcub-CANDglob führt. Die Optimierungen wurden mit drei unterschiedlichen Gewichtungen der Zielgrößen durchgeführt:

Tabelle 19:Zusammenfassung der Gewichtungsfaktoren a, b und c der Optimierungsläufe.

Faktoren	Optimierungslauf 1	Optimierungslauf 2	Optimierungslauf 3
a	0,33	0,45	0,60
b	0,33	0,20	0,20
c	0,33	0,35	0,20

Für dem Optimierungslauf 1 ergeben sich die in Tabelle 20 dargestellten Werte. Das gefundene Optimum liegt bei $x = (3, 5, 29.6759)$ mit $f(x)=81.3361$. Im zweiten Lauf wurde ein Optimum für $x = (4, 6, 21.1535)$ mit $f(x)=85.9472$ gefunden und im dritten liegt das Optimum bei $x = (2, 3, 29.3894)$ mit $f(x)=50.2284$. In allen Optimierungsläufen sind deutliche Spitzen in den jeweiligen Verläufen zu erkennen. Für die Optimierung wurde ein Abbruchkriterium implementiert, welches die Simulation bei zu kleiner Fichtenlage (nur eine Fichtenlamelle mit Dicke < 20 mm) abbricht und einen neuen Startpunkt generiert. Damit die Optimierungsergebnisse durch dieses Kriterium nicht beeinflusst werden, darf der ausgegebene Optimierungswert des Kriteriums auf keinen Fall niedriger als das mögliche Optimum sein.

Tabelle 20: Zusammenfassung der optimierten Zielgrößen der verschiedenen Gewichtungen.

Optimierungslauf	Delaminationsrisiko	Masse	Höhe
	[%]	[kg]	[mm]
1	2,84	4,58	239,06
2	2,92	4,52	239,22
3	1,81	4,16	241,56

Zusätzlich zu den Optimierungen mit den vorgestellten Zielgrößen wurden weitere Optimierungsläufe durchgeführt. Anstatt gemittelter Zugspannungen wurde die maximal auftretende Zugspannung in den Klebstoffugen als Zielgrösse herangezogen. Die Ergebnisse der Optimierungen sind im Anhang Tabelle 42 dargestellt. Da in FE-Berechnungen lokale Spannungsspitzen auftreten können, ist eine Optimierung mittels maximalen Spannungen problematisch, weshalb die Ergebnisse auch nicht weiter diskutiert werden.

Unter zyklischer Feuchteänderung können die Verformungen von Holzbauteilen stark anwachsen, was bis zu einem Versagen führen kann. Aus diesem Grund wird für den optimierten Querschnitt eine Berechnung unter periodischem Klimaeinfluss über 5 Jahre (43800 Stunden) durchgeführt. Da eine Langzeitbetrachtung vorliegt, sollen nun auch die rheologischen Eigenschaften des Holzes berücksichtigt werden. Der mechano-sorptive Effekt ist vor allem bei höheren Holzfeuchten stark ausgeprägt, weshalb für die Berechnung ein Innenraumklima implementiert wird. Dazu werden die jährlichen Minimal- und Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit als neue Randbedingungen verwendet. Diese ergeben sich zu 30 % bzw. 80 %. Die Berechnung erfolgt unter Berücksichtigung der Plastizität, der Viskoelastizität, sowie den mechano-sorptiven Effekten.

In Abbildung 74 sind die Holzfeuchten über den Simulationszeitraum dargestellt. Es lässt sich deutlich erkennen, dass die Holzfeuchteschwankungen zum Probeninneren hin abnehmen. Ausserdem verzögert sich die Holzfeuchteänderung mit zunehmender Messtiefe. Als Anfangs-

feuchte wurde für Esche 9,5 %, für Fichte 10,5 % angesetzt. Während die Holzfeuchteamplituden beim Fichtenholz konstant sind, nehmen sie beim Eschenholz aufgrund der geringeren Anfangsfeuchte zu bzw. ab. Des Weiteren nehmen die Amplituden der Holzfeuchte beim Eschenholz zum Probeninneren hin stärker ab, da Eschenholz kleinere radiale und tangentiale Diffusionskoeffizienten besitzt als Fichte und somit ein langsamerer Feuchtetransport stattfindet. Da für Esche keine spezifischen Messdaten der Koeffizienten vorliegen, wurden die Koeffizienten für Buche herangezogen.

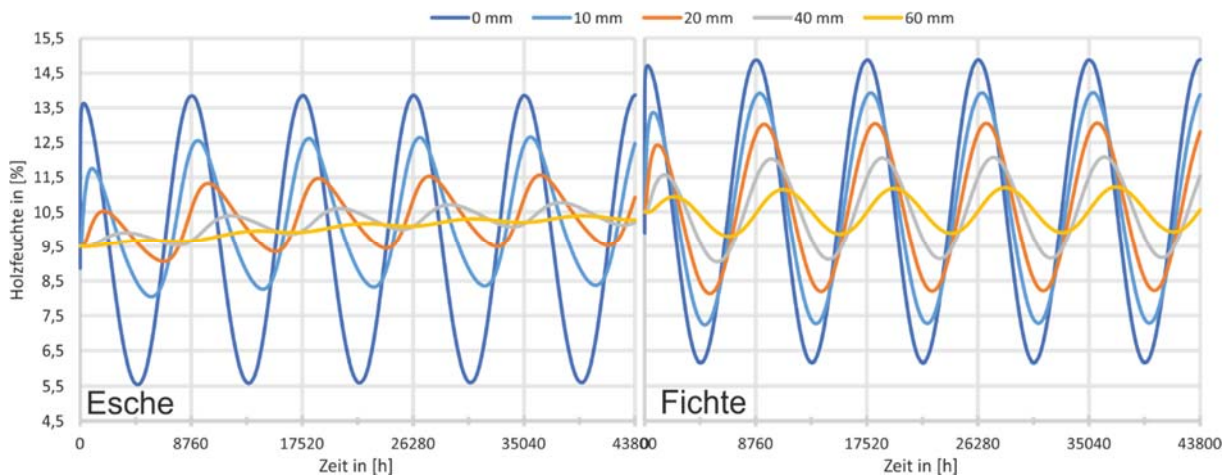


Abbildung 74: Holzfeuchteverlauf der verschiedenen Holzarten in unterschiedlichen Tiefen über den Simulationszeitraum von 5 Jahren.

Die aufgrund des mechano-sorptiven Effektes entstehenden Dehnungen sind in Abbildung 75 dargestellt. Es sind die totalen Dehnungen eines Escheelements in der Nähe der Klebstoffuge zwischen Fichte und Esche abgebildet. Dort treten hohe lokale Spannungen und Feuchteinkremente respektive -dekremente auf, welche den mechano-sorptiven Effekts hervorrufen. Die Grafik dient hierbei eher zur qualitativen Beurteilung. Vergleicht man die Holzfeuchteverläufe mit dem Verlauf der Dehnungen, lässt sich ein Zusammenhang erkennen. Mit jedem Holzfeuchtezyklus werden die Dehnungsamplituden grösser, was über viele Jahre hinweg zu Spannungsaufbau und Versagen führen kann.

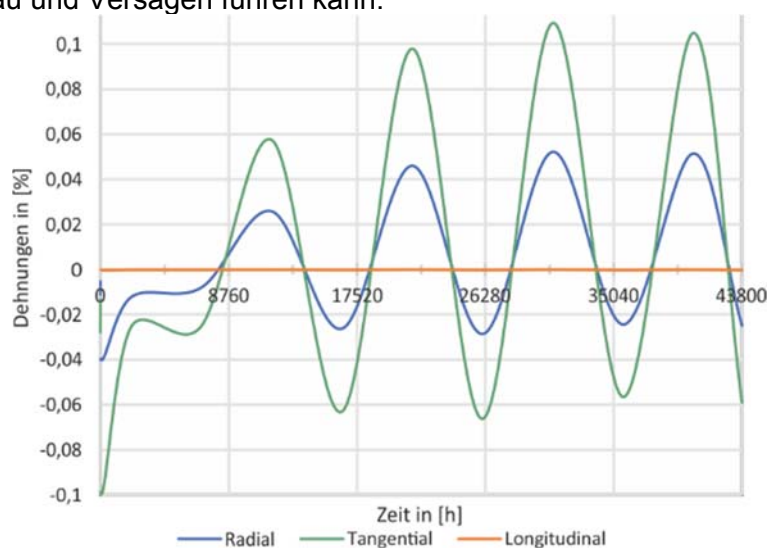


Abbildung 75: Zeitlicher Verlauf der totalen Dehnungen aus dem mechano-sorptiven Effekt in radiale, tangentiale und longitudinale Richtung eines Escheelements.

Zunächst betrachtet man die feuchteinduzierten Spannungsverläufe des optimalen Querschnittsaufbaus mit den Parametern $x = (2, 3, 29.3894)$ sowohl mit, als auch ohne Berücksichtigung der Plastizität, der Viskoelastizität sowie des mechano-sorptiven Effektes (s. Abbildung 76). Diese erscheinen recht plausibel. An den Rändern des Querschnitts treten die grössten Zugspannungen senkrecht zur Klebstoffuge auf, was auch als initiiierend für die Delaminationen angenommen wurde. Am freien Rand sowie an den Seiten mit Symmetriebedingungen treten keine Spannungsspitzen auf. Die maximalen Zugspannungen treten in der zweiten Klebstoffuge von oben bzw. unten auf. Wie schon bei der Berechnung der hybriden Experimentprobe sind dies die Fugen, welche zwischen den Esche- und Fichtenlamellen liegen. Vergleicht man die maximalen Spannungswerte ($19,17 \text{ N/mm}^2$) mit den Spannungen der hybriden Probe HYE2-40-3 ($12,75 \text{ N/mm}^2$) stellt sich jedoch die Frage, wieso bei der Optimierung ein anderer Aufbau mit höheren Maximalspannungen als Optimum gefunden wird. Dies lässt sich damit erklären, dass bei den Experimentproben die genaue Jahresringlage bekannt war, bei der Optimierung werden hingegen zufällig erstellte Koordinaten verwendet. Die Unterschiede dieser Materialorientierung können Spannungsunterschiede von bis zu 50 % mit sich bringen. Hierbei ist hinzuzufügen, dass die Maximalwerte der Spannungsberechnung mit Berücksichtigung von Plastizität (P.), Viskoelastizität (V.), und dem mechano-sorptiven Effekt (M.) verglichen wurden, da für die Berechnung der Experimente diese Einstellungen verwendet wurden.

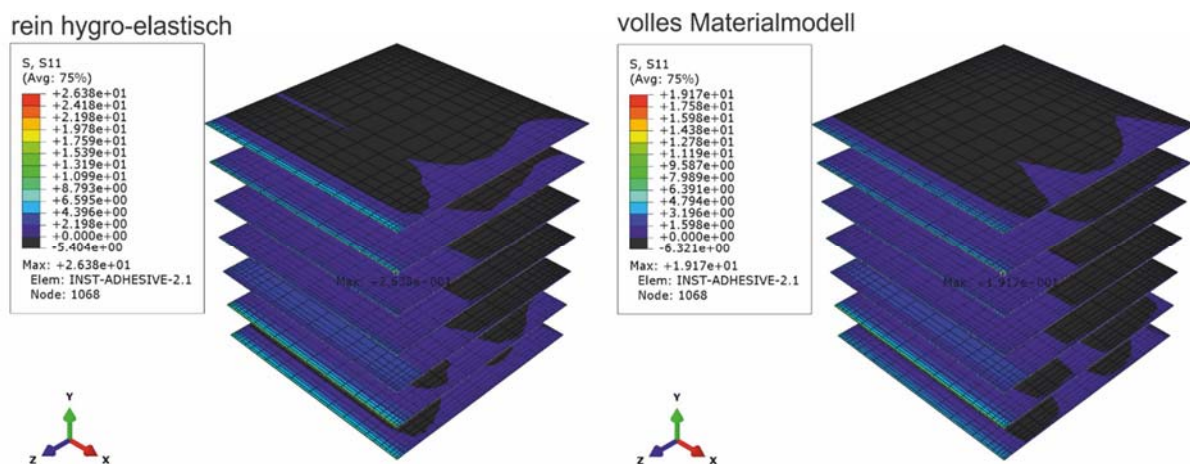


Abbildung 76: Zugspannungen in globaler y-Richtung innerhalb der Klebstoffugen des optimierten Aufbaus zum Zeitpunkt $t=4000\text{h}$.

Mit der Verifizierung des Simulationsmodells richtet sich der Blick nun auf die Optimierung. Die Optimierung ergab für die veränderlichen Variablen einen Querschnittsaufbau, welcher aus vier Fichtenlamellen im Inneren und jeweils zwei Eschenlamellen an der Ober- und Unterseite besteht. Die Lamellen sollten entgegen der in DIN EN 14080 [2013] angegebenen Anforderung der gleichen Lamellenorientierung aller Lagen, unterschiedliche Orientierungen aufweisen. Das Optimum ergab hierfür drei negativ orientierte Lamellen an der Unterseite. Eine Vergleichsberechnung mit durchgängig positiver Orientierung wurde nicht durchgeführt, weshalb die Größenordnung des Einflusses der negativen Lamellenorientierung auf das Delaminationsrisiko nicht abgeschätzt werden kann. Des Weiteren wurde aufgrund des grossen Rechenaufwandes keine Berechnung mit Berücksichtigung mit dem vollen Materialmodell durchgeführt. In Abbildung 76 ist jedoch eine Reduktion der Maximalspannungen mit diesen Einstellungen zu erkennen. Inwiefern sich diese Effekte auf die Optimierung auswirken, müsste mit zusätzlichen Optimierungsläufen untersucht werden.

4. Diskussion

4.1. Materialmodellierung, Optimierung und Verifikation

Die hygro-mechanische Modellierung von Holz in FE-Programmen ist eine herausfordernde Aufgabe. Das vorgestellte Materialmodell nach [Hassani 2015] ermöglicht es, 3D Probleme in Abaqus zu simulieren. Neben dem elastischen und plastischem Verhalten, werden auch Viskoelastizität und Mechano-Sorption, sowie Quellen und Schwinden feuchteabhängig berücksichtigt. Die Überprüfung ergab, dass Holzeigenschaften hinreichend genau abgebildet werden. Bei der Überprüfung des Modells für Klebstoffe wurde festgestellt, dass keine belastbaren, aktuellen Versuchsergebnisse vorliegen und daher Validierungen für viskoelastisches Verhalten schwer möglich sind. Die Elastizität der Klebstoffe wurde gut abgebildet, aber bei der Plastizität von PUR sind die gleichen Probleme wie beim Modell für Holz festzustellen. In der Summe wird das Materialmodell mit gewissen Einschränkungen als geeignet erachtet.

Ein Programmablauf zur Verknüpfung eines Optimierungsalgorithmus mit FE-Simulationen in Abaqus wurde erfolgreich implementiert. Mit geeigneten Beispielen wurde die Implementierung getestet und verschiedene Einstellungen zur Optimierung anhand von Ersatzmodellen über die MATSuMoTo ausprobiert. Für eine effiziente Optimierung wurde der gesamte Modellierungs-, Simulations- und Auswertungsablauf über Python Skripte implementiert und damit für beliebige Aufbauten automatisiert. Die Verifikationsrechnungen gaben gute Übereinstimmung mit der bekannten Lösung.

4.2. Reduktion des Delaminationsrisikos durch Beschichtungssysteme

Die Interaktion des Beschichtungssystems mit dem Holz bei der Trocknung und Befeuchtung erweist sich bei genauer Betrachtung als nicht trivial. Die untersuchten Beschichtungssysteme verzögerten alle die Absorption, wenn auch mit unterschiedlicher Stärke, beeinflussten die Feuchteabgabe bei der Desorption nicht wesentlich. Dies gilt für Klimasprünge (Abbildung 56) sowie periodische Klimaänderungen (Abbildung 64). Es wurden die extremsten Beschichtungen (S4 und S5) ins Verhältnis zur Referenz ohne Beschichtung (S0) gesetzt und man erkennt eindeutige Unterschiede in den Feuchteprofilen und –gradienten (Abbildung 60, Abbildung 61, Abbildung 62). Die Verwendung der aus Schalenversuchen bestimmten Filmkoeffizienten für die Berechnung der Feuchteprofile in BSH Proben erwies sich als zuverlässig innerhalb enger Grenzen (Abbildung 58, Tabelle 16). Folglich lässt sich das verifizierte Holzmodell (Kap. 3.2.1) anwenden um zuverlässige Aussagen über vorherrschende Spannungs- und Verformungszustände zu bestimmen.

Als skalares Vergleichsmass für die Eigenspannungen wurde die Formänderungsenergie-dichte (SED) verwendet. Diese hat ein Maximum im zeitlichen Verlauf, das zeitlich mit dem Maximum in den Feuchtegradienten übereinstimmt. Während ArboPur SpritzFinisch (S5) noch am effektivsten Absorption behindert hat, zeigt sich, dass Arbezol Lasoton (S4) in Bezug auf die kumulierten Eigenspannungen im Verhältnis zur unbeschichteten Probe die besten Ergebnisse liefert (Reduktion SED um 22%, max. y-Spannung um 50%; vgl. Tabelle 37, Abbildung 60, Abbildung 61, Abbildung 62). Auch stellen sich geringere unter Zug stehende Bereiche ein, was das Delaminationsrisiko senkt.

Der wahre Vorteil der Beschichtung zeigt sich jedoch erst in der zyklischen Betrachtung. In der Absorptionsphase werden Spannungen erreicht, die plastische (vgl. Abbildung 63), viskoelastische und mechano-sorptive Dehnungen hervorrufen. In der Desorptionsphase führt dies dann zu sich zyklisch aufbauenden Eigenspannungen die Festigkeitswerte erreichen können. Durch die Verzögerungswirkung der Beschichtung wird dieser Spannungsaufbau effektiv reduziert (Abbildung 66). In den Berechnungen wird immer die der einzelnen Probe entsprechende Jahrringlage gerechnet, was zwar gut zum Vergleich mit den Proben ist, die Beurteilung des Effekts der Beschichtung jedoch etwas erschwert.

4.3. Dauerhafte BSH Aufbauten

Klassierungen, Sortierkriterien und Verarbeitungsvorschriften bei der Verklebung spiegeln das Verhalten von BSH in Versuchen wie Vierpunktbiegung oder im Delaminationsversuch wieder. Dauerhaftigkeit über Jahrzehnte wird schlichtweg angenommen, wenn Aufbauten bei gängigen Kurzzeitversuchen gut abschneiden – obwohl zahlreiche Beobachtungen von Schädigungsbildung nach Jahrzehnten nahelegen, dass diese Perspektive zu kurzfristig ist. Durch die Verwendung hochpreisiger Laubholzträger oder hybrider Träger wird diese Thematik noch verstärkt, was neben der ästhetischen Komponente auch Fragen reduzierter Resttragfähigkeit aufwirft. Da Feuchtetransport in Holz nicht beschleunigt werden kann sind numerische Vorhersagen, bei denen in angemessener Zeit das Verhalten über Jahrzehnte berechnet werden kann, das einzige verfügbare Werkzeug.

Die Untersuchung unterschiedlicher homogener und hybrider Aufbauten aus Fichte und Esche bei Ausgleich in unterschiedlichen Klimata zeigen Schäden hauptsächlich in trockenem Klima. Bei Fichteproben besteht eine Tendenz bei abnehmender Lamellendicke von horizontalen Rissen hin zu horizontalen Delaminationen, da dünnere Lamellen höhere Festigkeitswerte haben. Bei Esche jedoch zeigen dicke Lamellen eine höhere Delaminationsneigung und bei den dünnsten Lamellen treten kaum horizontale Schäden auf, dafür aber vertikale. Der Vergleich der Eschenproben mit 40mm Lamellen homogen und inhomogen, also mit alternierenden Riffbrettern, zeigt die Tendenz zu unterschiedlichen Schädigungsformen der inhomogenen Proben. Hybride Aufbauten weisen aufgrund der unterschiedlichen Quellung zwischen Fichte und Esche alle Probleme mit den Klebfugen zur Aufdopplung auf. Beim Vergleich der hybriden Proben mit Entlastungsnuten ist die Schädigungsausprägung in etwa gleich, bzw. die vertikalen Schäden sind aufgrund der Entlastungsnuten nicht so ausgeprägt. Betrachtet man aber nur die horizontalen Schäden, so entsteht der Eindruck, dass Nuten Delamination sogar fördern.

Die Berechnung der Feuchteprofile zeigt sehr gute Übereinstimmung mit den Messungen für fast alle Proben, und die daraus resultierenden Eigenspannungen, bzw. deren Konzentrationen treten in der Nähe von beobachteten Schäden auf, was zu der Schlussfolgerung führt, dass die Simulation die Verhältnisse in den Proben ausreichend gut wiedergibt und als Kriterium zur Beurteilung der Delaminationsneigung ausreichend ist. Somit steht ein potentes Werkzeug zur Optimierung von Aufbauten bez. Schädigungsbildung bei Klimazyklen zur Verfügung. Von einer Diskretisierung des Schadensverlaufes selber wird jedoch abgesehen, da Simulationszeiten bei einer solchen Betrachtung extrem ansteigen [Hassani u.a. 2016].

Bei der Optimierung von hybriden Brettschichtholz sind verschiedene Herausforderungen zu meistern. Zum einen muss die Erstellung eines entsprechenden FE-Modells automatisiert sein um kontinuierliche topologische Variationen durchführen zu können. Dies ist notwendig um

dem Optimierungsalgorithmus die Möglichkeit zu geben ein vernünftiges Ersatzmodell zu finden. Die zweite Herausforderung liegt in der Zielfunktion. Im Beispiel wurde ein gewichtetes Spannungskriterium genutzt um ein Delaminierungsrisiko zu quantifizieren. Wichtig ist die Vergleichbarkeit zwischen einzelnen Simulationen und die Reduzierung auf einen einzelnen Wert. Aus dem vorgestellten Simulationsmodell für Brettschichtholz wurde ermittelt, dass auch für hybride Konstruktionen die Lamellen entsprechend der Norm für normales Brettschichtholz angeordnet werden sollten. Die Grösse der Gewichtungsfaktoren für Spannung, Masse und Bauteildimensionen der Zielfunktion ist jedoch beliebig, bzw. muss an den konstruktiven Kontext angepasst sein. Zur anwendungsorientierten Optimierung bietet es sich an, komplexere Kriterien zu bestimmen, die beispielsweise auch die Tragfähigkeit oder den Materialverbrauch neben dem Delaminierungsrisiko berücksichtigen.

Abschliessend kann gesagt werden, dass das vorhandene Potential der Verknüpfung von Optimierungen mittels Ersatzmodellen mit aufwändigen FE-Simulationen in der Zukunft zu effektiver Produktentwicklung angewendet werden kann, da das Vorgehen sehr zielgerichtet ist.

5. Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Schädigungsbeobachtungen am House of Natural Resources Stand 7/2017

Das House of Natural Resources (HNR) der ETH wurde im Zeitraum von September 2013 bis Juni 2015 (Eröffnung) errichtet (Abbildung 77). Es dient als Versuchsgebäude für die Erprobung neuer Technologien und Werkstoffe. Neben zahlreichen anderen Neuerungen wie einer vorgespannten Rahmenkonstruktion wurde die Tragkonstruktionen aus Brettschichtholz in Esche (vertikale Säulen, teils auch Verstärkung der horizontalen Balken aus Fichtenbrettschichtholz im Auflagerbereich mit Esche) gefertigt. Ebenso wurde Baubuche (Furnierschichtholz der Fa. Pollmeier/Kreuzburg für die Deckenkonstruktion eingesetzt Holz-Beton-Verbund) eingesetzt. Das gesamte Gebäude ist instrumentiert und wird auch durch entsprechende Forschungsmassnahmen begleitet (z.B. Dissertationen Leyder, Abschluss 2017 geplant). Die Vorspannung der Konstruktion wird kontrolliert, ebenso das Klima sowie die Rissbildung.



Abbildung 77: House of natural resources, ETH Zürich.

Beim Eschenbrettschichtholz (Verarbeitung s. **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.**) wurden zunächst Träger mit 190mm Breite gefertigt, diese wurden dann auf die doppelte Breite im Block verklebt. Die vertikalen Stützen hatten nach der Blockverklebung eine Querschnittsabmessung von 380mmx380mm. Bei Blockverleimungen Fichte/Esche wurde der MUF Türmerleim 686 eingesetzt. Die horizontalen Träger aus Fichte mit Eschenverstärkung im Auflagerbereich (Hybridelemente) wurden bei der Fa. Häring im Block mit den von der neue Holzbau, Lungern gelieferttem Eschenbrettschichtholz verklebt. Der Aufbau der Holzkonstruktion in Zürich erfolgte durch die Fa. Häring.

Der Klebstoff, die Lamellendicke sowie die Holzfeuchte entsprachen dem damals üblichen Stand der Kenntnis. Nach Delaminierungsversuchen mit verschiedenen Melaminsystemen, PUR, PRF (Aerodux) wurden gewisse technische Änderungen vorgenommen. Die Lamellendicke bei Esche beträgt heute 30mm, die Holzfeuchte bei Einsatz im Innenbereich 8% und es wird oft PRF/Aerodux verwendet. Prinzipiell wären auch 1 KPUR von Henkel mit Primer geeignet.

Tabelle 21: Herstellungsbedingungen und verwendete Klebstoffe.

	<i>Holzfeuchte beim Verkleben</i>	<i>Lamel- lendicke</i>	<i>Klebstoffe</i>	<i>Firma</i>
Esche	10-12%	40mm	-MUF (Dynea Prefere 4546 mit Härter 5020) für Lamellen -PU Henkel HB S109 für Keilverzinkungen -MUF Türmerleim 686 für Blockverleimung	Fa. Neue Holzbau, Lungern (Zulieferer für Häring für Blockverklebung)
Fichte	10-12%	40mm	-PU Henkel HB S309 -PU Henkel HB S109 für Keilverzinkungen -MUF Türmerleim 686 für Blockverleimung	Fa. Häring
Esche/Fichte	10-12%	s.o.	PU Henkel HB S309	Fa. Häring

Das Gebäude ist nicht klimatisiert. Die Temperatur (Wochenmittelwerte) schwankt zwischen 10°C im Winter, (unbeheizte Periode über Weihnachten) und 32°C im Sommer. Die relative Luftfeuchte schwankt zwischen 72% im Sommer/Frühherbst und 30% im Winter (Abbildung 78). Durch die grosse Glasfassade erfolgt eine starke Aufheizung, insbesondere auch der Träger die direkt hinter der Glasfassade liegen. Die Luftzirkulation variiert zwischen den Räumen und dem Treppenhaus und ist im Eingangsbereich stärker als in den Räumen selbst.

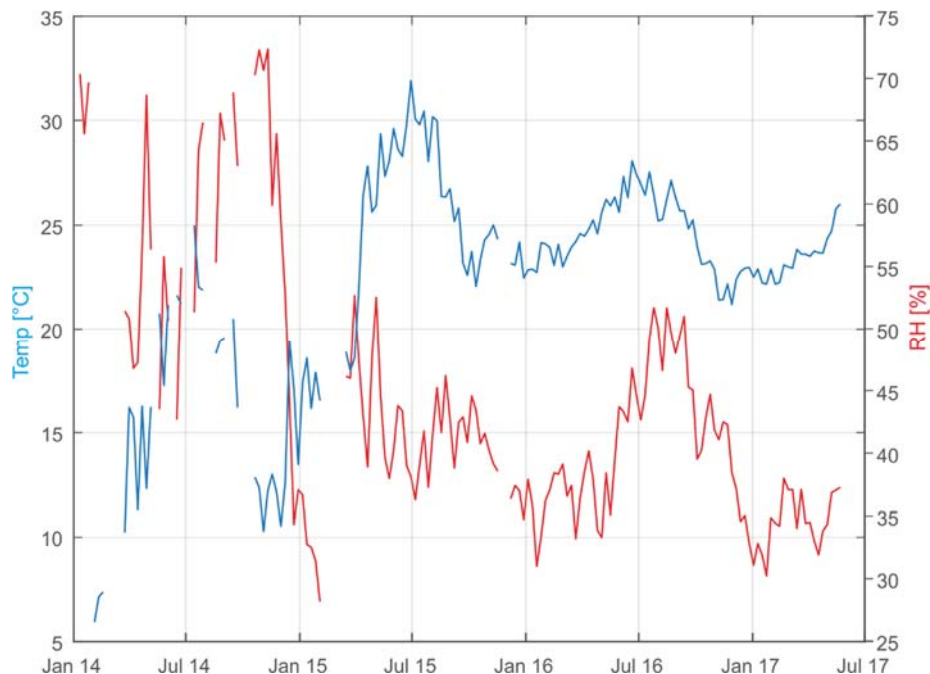


Abbildung 78: Wochenmittelwerte der Temperatur (blau) und der relativen Luftfeuchte (rot) im Gebäudeinneren des House of Natural Resources (Quelle [Leyder 2017]. Heizungsinbetriebnahme im Probetrieb Dezember 2014, ab Februar 2015 regulärer Betrieb mit absinkender RH und steigender Temperatur.

5.1. Visuelle Beurteilung des Zustands des BSH im HNR 7/2017

Farbänderung/Verschmutzung: Bei unbehandeltem Holz kommt es u.a. durch Oxydation zu den bekannten Farbänderungen. So dunkelt Fichte nach (gelblich braun), bei Esche ist der Effekt nicht so ausgeprägt [Pitt 2010, Sonderegger et.al. 2015, Niemz u. Sonderegger 2017]. Eine komplette Beurteilung des Zustandes erfolgt im Rahmen der Dissertation von Frau Leyder an der ETH (Betreuung Prof. Frangi), deren Abschluss für 2017 geplant ist. Nachfolgend erfolgt eine kurze, qualitative Bewertung, um Schlussfolgerungen für die Simulation und die Laborversuche abzuleiten. Die Fichte dunkelte bereits deutlich nach, eine weitere Nachdunkelung ist noch zu erwarten. Bei der Esche ist der Effekt deutlich weniger ausgeprägt, ein gewisser Farbänderungseffekt ist aber auch hier erkennbar. Die Decke aus Baubuche (gedämpftes Holz, daher leicht rötlicher Farbton) zeigt kaum sichtbare Farbveränderungen.

Rissbildung/Delaminierung: In der Brettschichtholzkonstruktion kam es zu deutlich sichtbaren Rissen im Holz aber auch teilweise zur Delaminierung. Dabei handelt es sich um optische Mängel. Die Risse gehen in Trockenperiode stärker auf und schliessen sich dann etwas, wenn Luftfeuchte steigt, wobei zu beachten ist, dass alle Aufnahmen im Juli entstanden sind. Im Eingangsbereich kam es durch stärkere Luftzirkulation am häufigsten zu Schwindrissen und zur Delaminierung. Dies dürfte auf die schnellere Feuchteänderung in dem Bereich zurückzuführen sein.

Delaminierung von Klebfugen: Die Mittelfugen der im Block verklebten Elemente (190mmx190mm) gehen sehr oft auf (Abbildung 79). Das betrifft eine Vielzahl der Stützen. Das dürfte auf unzureichend einbringbaren Pressdruck bei den grossen zu verklebenden Querschnitten zurückzuführen sein. Hier müsste perspektivisch eine bessere Lösung gefunden werden. Analoge Effekte wurden auch in anderen Gebäuden aus Fichtenholz (Vaxjö/Schweden, Laval/ Kanada festgestellt) [Niemz 2016]. Delaminationen von Lamellen (Abbildung 80) werden ebenfalls beobachtet, und gehen wahrscheinlich auf grössere Feuchteunterschiede der verklebten Lamellen zurück.



Abbildung 79: Geöffnete Mittelfuge bei Blockverklebung im Eingangsbereich.



Abbildung 80: Delamination der Verklebung einer aussenliegenden Lamelle im Eingangsbereich.

Auffallend oft kommt es zur Rissbildung im Holz oder zur Delaminierung bei Aufdopplungen. Hier tritt konstruktionsbedingt offensichtlich Spannungsspitzen auf (Abbildung 81).

Rissbildung bei Materialkombinationen Fichte/Esche: Bei den Hybridelementen Fichte/Esche kam es durch das unterschiedliche Schwindverhalten von Fichte und Esche verstärkt zu Rissen. Ggf. könnten hier auch geringe Feuchtedifferenzen des Brettschichtholzes aus Fichte und Esche hinzukommen (Abbildung 82).



Abbildung 81: Rissbildung an einer Aufdopplung an einer Eschestütze (90°gedreht).



Abbildung 82: Rissbildung bei Hybridelementen Fichte/Esche.

Holzrisse: Auch im Holz kam es zur Rissbildung (Abbildung 83). Häufig gerissen sind breite Decklamellen (190mm Breite) mit liegenden Jahrringen (grosses Schwindmass), teilweise laufen die Risse aber an den Klebfugen vorbei durch das Holz. Hier ist ein Einfluss des Faser-Lastwinkels erkennbar [Hankinson 1921]. Generell ist zu vermerken, dass bei Laubholz eine stärkere Abweichung von der Geradfasrigkeit vorliegt als bei nadelholz, die Stämme sind oft leicht gekrümmt.



Abbildung 83: Einfluss Faser-Last-Winkel, dadurch Holzbruch in Esche (oben und mittig), sowie Fichte

6. Schlussfolgerungen und Ausblick

Der Vergleich der Ergebnisse aus den Berechnungen der Feuchteprofile und der Spannungen mit den Ergebnissen aus den Experimenten ergab, dass die Nachrechnungen die Experimentproben gut abbilden. Es liessen sich deutlich die Einflüsse der Anfangsfeuchten, das Diffusionsverhalten, sowie das Quell- und Schwindverhalten der unterschiedlichen Holzarten auf die feuchteinduzierten Spannungen und die damit verbundenen Delaminationen erkennen.

Das verwendete Materialmodell, welches die rheologischen Eigenschaften, die Plastizität sowie die mechano-sorptiven Effekte berücksichtigt, stellt somit eine Möglichkeit zur ausreichend genauen Berücksichtigung von feuchteabhängigem Verhalten in FE-Simulationen dar und kann als Kern für Optimierungen von Holzkomponenten eingesetzt werden. Die Optimierung von hybriden Holzelementen mittels Ersatzmodellen stellt eine gute Möglichkeit dar, die feuchteinduzierten Spannungen im Querschnitt zu minimieren. Mit dieser Methode konnte in Anlehnung an die durchgeführten Langzeitexperimente ein optimaler Aufbau gefunden werden, bei welchem die feuchteinduzierten Eigenspannungen minimiert wurden. Die Optimierungen mittels Ersatzmodellen zusammen mit FE-Simulationen ermöglicht eine effektive Produktentwicklung z.B. von hybridem Brettschichtholz.

Die beobachteten Schädigungsformen in den Laborproben im Trockenklima und den Tragsstrukturen im House of Natural Resources zeigen deutliche Parallelen. Betrachtet man die Tatsache, dass die Proben im Innenraumklima jedoch keine Schäden aufweisen, so wird die Rolle der Verarbeitung deutlich. Dies betrifft die Holzfeuchte bei der Verleimung, die mit 10-12% deutlich über den 7-8% der Proben dieses Projektes liegt. Wie man erkennt sind 10-12% auch über den gerechneten Gleichgewichtfeuchten, was grundsätzlich zu starken Eigenspannungen führt. Die Verwendung von MUF-Klebstoffen ist ebenfalls den im Projekt verwendeten PRF unterlegen und erreicht eigentlich nicht die Vorgaben der DIN EN 302-2 [Ammann u.a. 2016]. Zudem weisen einige Lamellen extreme Schrägfasrigkeit auf die nicht üblichen Sortierkriterien entspricht. Es ist also eine Kombination aus konstruktiven und verarbeitungstechnischen Gründen, die zu der beobachteten Rissbildung im HRN führt, die sich nicht auf BSH aus Esche oder hybride Aufbauten verallgemeinern lässt. So zeigen unsere Versuche, dass sich bei ausreichender Trocknung auf 7-8%, enger Verteilung der Anfangsfeuchten, der Verwendung von PRF (eventuell auch 1K-PUR von Henkel mit Primer), sorgfältiger Sortierung und klimatisiertem Innenklima Risse selbst in hybriden Aufbauten weitgehend vermeiden lassen. Zudem können Beschichtungssysteme die Feuchteaufnahme bei Klimaschwankungen insofern verzögern, dass Feuchtegradienten signifikant kleiner werden.

Hinsichtlich zukünftiger Untersuchungen besteht die Möglichkeit, die Optimierung von hybridem Brettschichtholz weiter voran zu treiben. Zum einen kann das verwendete FE-Modell weiterhin angepasst werden, sei es durch genauere Modellierung des Feuchteübergangs mit Multi-Fickschem Gesetz, durch bleibende mechano-sorptive Dehnungen, genauere Plastizitätsmodelle oder viskoelastische Gesetze, die unterschiedliche anatomische Richtungen koppeln. Durch die Einführung weiterer Parameter wie Feuchtevariationen der Lamellen, Breitevariationen etc. kann das Modell variabler optimiert werden. Die Wahl zusätzlicher Parameter sollte allerdings ausreichen abgewogen werden, da mit ihr auch die Berechnungsdauer der Optimierung stark ansteigt. Darüber hinaus bieten sich viele Möglichkeiten bei der Wahl der Zielgrößen und ihrer Gewichtung. Aus anwendungsorientierter Sicht ist es weiterhin sinnvoll, Kriterien zu bestimmen, welche mehrere Zielgrößen berücksichtigen. Neben den bereits genutzten Zielgrößen des Delaminationsrisikos, der Masse und der Querschnittshöhe können auch die Tragfähigkeit oder die Dehnungen in Betracht gezogen werden.

7. Literaturverzeichnis

- [Ammann 2015] Ammann, Samuel D.: Mechanical performance of glue joints in structural hardwood elements, ETH Zürich, Schweiz, Dissertation, 2015.
- [Ammann u.a. 2016] Ammann, S.D.; Schlegel, S.; Beyer, M.; Aehlig, K.; Lehmann, M.; Jung, H.; Niemz, P.: Quality assessment of glued ash wood for construction engineering. European Journal of Wood and Wood Products 74 (1/2016), 67-74.
- [ASTM D 638] ASTM International: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, (2010).
- [ASTM D 1654-03] ASTM International: Standard Test Method for Water Vapor Transmission of Organic Coating Films. West Conshohocken, USA, July 2002.
- [BDZ-MB Elektrische Holzfeuchtemessung 2004] Merkblatt - Elektrische Holzfeuchtemessung. 2004
- [Blaber u. a. 2015] Blaber, J.; Adair, B.; Antoniou, A.: Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software. Experimental Mechanics 55 (6/2015), 1105-1122.
- [Bodig u. Jayne 1982] Bodig, Jozsef; Jayne, Benjamin A.: Mechanics of wood and wood composites. Van Nostrand Reinhold, 1982.
- [DIN EN 13183-2] Deutsches Institut für Normung e.V.: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz; Teil 2: Schätzung durch Widerstands-Messverfahren. Berlin, Juli 2002.
- [DIN EN 14080] DIN EN 14080: Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen. 2013
- [DIN EN 16351] DIN EN 16351: Holzbauwerke - Brettspertholz - Anforderungen. 2015.
- [DIN EN ISO 12572] Deutsches Institut für Normung e.V.: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit. Berlin, Januar 2015.
- [DIN EN ISO 7789] Deutsches Institut für Normung e.V.: Beschichtungsstoffe - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Schalenverfahren. Berlin, Februar 2011.
- [Fortino u. a. 2009] Fortino, Stefania; Mirianon, Florian; Toratti, Tomi: A 3D moisture stress FEM analysis for time dependent problems in timber structures. Mechanics of Time-Dependent Materials 13 (4/2009), 333-356.
- [Gatteln 2013] Gatteln, Pascal: Plastizität von Buchenholz, ETH Zürich, Schweiz, Bachelorarbeit, 2013.
- [Gereke 2009] Gereke, Thomas: Moisture-induced stresses in cross-laminated wood panels, ETH Zürich, Schweiz, Dissertation, 2009.
- [Gritzmann 2013] Gritzmann, Peter: Grundlagen der Mathematischen Optimierung. Springer-Verlag, 2013.
- [Hanhijärvi 2000] Hanhijärvi, Antti: Deformation properties of Finnish spruce and pine wood in tangential and radial directions in association to high temperature drying, Part III: Experimental results under drying conditions (mechano-sorptive creep). Holz als Roh- und Werkstoffe 58 (1-2/2000), 63-71.
- [Hansen 1986] Hansen, Kurt K.: Sorption Isotherms - A Catalogue. The Technical University of Denmark: Building Materials Laboratory Technical Report 162 (1986), Nr. 86.
- [Harilal u. a. 2014] Harilal, R u. a.: Adaptation of open source 2D DIC software Ncorr for solidmechanics applications. (2014). In: 9th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, 1-6 November, New Delhi, India.
- [Harkinson, R.L. 1921] Hankinson, R. L. (1921): Investigation of crushing strength of spruce at varying angles of grain. Air Force Information Circular No. 259 (1921), U. S. Air Service.
- [Hassani 2015] Hassani, Mohammad M.: Adhesive Bonding of Structural Hardwood Elements, ETH Zürich, Schweiz, Dissertation, 2015.

- [Hassani u. a. 2014] Hassani, Mohammad M.; Wittel, Falk K.; Hering, Stefan; Herrmann, Hans J.: Rheological Model for Wood. *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering* 283 (2015) 1032–1060.
- [Hassani u.a. 2016] Hassani, M.M.; Wittel, F.K.; Ammann, S.; Niemz, P.; Herrmann, H.J.: Moisture Induced Damage Evolution in Laminated Beech, *Wood Science and Technology* 50 (5/2016), 917-940.
- [Hering 2011] Hering, Stefan: Charakterisierung und Modellierung der Materialeigenschaften von Rotbuchenholz zur Simulation von Holzverklebungen, ETH Zürich, Schweiz, Dissertation, 2011
- [Hering u. Niemz 2012] Hering, Stefan; Niemz, Peter: Moisture-dependent, viscoelastic creep of European beech wood in longitudinal direction. *European Journal of Wood and Wood Products* 70 (5/2012), 667-670.
- [Hering u. a. 2012] Hering, Stefan; Saft, Susanne; Resch, Eckart; Niemz, Peter; Kaliske, Michael: Characterization of moisture-dependent plasticity of beech wood and its application to a multi-surface plasticity model. *Holzforschung* 66 (2012), 373-380.
- [Hoffman 1967] Hoffman, Oscar: The Brittle Strength of Orthotropic Materials. *Journal of Composite Materials* 1 (2/1967), 200-206.
- [Hofmann u. a. 2010] Hofmann, Markus; Geyer, Christoph; Kornadt, Oliver: Abhängigkeiten des Raumklimas im jahreszeitlichen Verlauf. *Bauphysik* 32 (2/2010), 73-72.
- [Jirásek u. Bažant 2002] Jirásek, Milan; Bažant, Zdenek P.: *Inelastic Analysis of Structures*. John Wiley & Sons, 2002.
- [Jungnickel 2015] Jungnickel, Dieter: *Optimierungsmethoden, Eine Einführung*. 3. Springer-Verlag, 2015.
- [Kläusler 2014] Kläusler, Oliver: *Improvement of One-Component Polyurethane Bonded Wooden Joints under Wet Conditions*, ETH Zürich, Schweiz, Dissertation, 2014.
- [Koiter 1953] Koiter, W. T.: Stress-strain relations, uniqueness and variational theorems for elastic-plastic materials with a singular yield surface. *Quarterly of Applied Mathematics* 11 (1953), 350-354.
- [Kollmann 1951] Kollmann, F.: *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe* (2. Ausg., Bd. 1). Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag, 1951.
- [Kollmann u. Côté 1968] Kollmann, Franz F. P.; Côté, Wilfred A.: *Principles of Wood Science and Technology*. Bd. 1 - Solid Wood. Springer-Verlag, 1968.
- [Kornadt u. a. 2010] Kornadt, Oliver ; Geyer, Christoph ; Hofmann, Markus: Abhängigkeiten des Raumklimas im jahreszeitlichen Verlauf. In: *Bauphysik* 32 (2010), Nr. 2, S. 73–82.
- [Leyder, C 2017] Leyder, C.: *Messungen am House of Natural Resources der ETH Zürich*. Unveröffentlichter Bericht. ETH Zürich: ETH Zürich, IBK (2017).
- [Mackenzie-Helnwein u. a. 2003] Mackenzie-Helnwein, P.; Eberhardsteiner, J.; Mang, A. H.: A multi-surface plasticity model for clear wood and its application to the finite element analysis of structural details. *Computational Mechanics* 31 (1/2003), 204-218.
- [Mackenzie-Helnwein u. Hanhijärvi 2003a] Mackenzie-Helnwein, P.; Hanhijärvi, A.: Computational Analysis of Quality Reduction during Drying of Lumber due to Irrecoverable Deformation, I: Orthotropic Viscoelastic-Mechanosorptive-Plastic Material Model for the Transverse Plane of Wood. *Journal of Engineering Mechanics* 129 (9/2003), 996-1005.
- [Mackenzie-Helnwein u. Hanhijärvi 2003b] Mackenzie-Helnwein, P.; Hanhijärvi, A.: Computational Analysis of Quality Reduction during Drying of Lumber due to Irrecoverable Deformation, II: Algorithmic Aspects and Practical Application. *Journal of Engineering Mechanics* 129 (9/2003), 1006-1016.
- [Mårtensson 1994] Mårtensson, A.: Creep Behavior of Structural Timber under Varying Humidity Conditions. *Journal of Structural Engineering* 120 (9/1994), 2565-2582.

- [Müller 2014] Müller, Juliane: MATSuMoTo: The MATLAB Surrogate Model Toolbox For Computationally Expensive Black-Box Global Optimization Problems. In: ArXiv e-prints (2014).
- [Müller u. Piché 2011] Müller, Juliane; Piché, Robert: Mixture Surrogate Models Based on Dempster-Shafer Theory for Global Optimization Problems. *Journal of Global Optimization* 51 (1/2011), 79-104.
- [Müller u. Shoemaker 2014] Müller, Juliane; Shoemaker, Christine A.: Influence of Ensemble Surrogate Models and Sampling Strategy on the Solution Quality of Algorithms for Computationally Expensive Black-Box Global Optimization Problems. *Journal of Global Optimization* 60 (2/2014), 123-144.
- [Müller u. a. 2013] Müller, Juliane; Shoemaker, Christine A.; Piché, Robert: SO-MI: A Surrogate Model Algorithm for Computationally Expensive Nonlinear Mixed-Integer Black-Box Global Optimization Problems. *Computers and Operations Research* 40 (5/2013), 1383-1400.
- [Müller u. a. 2014] Müller, Juliane; Shoemaker, Christine A. ; Piché, Robert: SO-I: A Surrogate Model Algorithm for Expensive Nonlinear Integer Programming Problems Including Global Optimization Applications. *Journal of Global Optimization* 59 (4/2014), 865-889.
- [Neuhaus 1981] Neuhaus, F.-Helmuth: Elastizitätszahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit, Ruhr-Universität, Bochum, Deutschland, Dissertation, 1981.
- [Niemz 1993] Niemz, Peter: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co, 1993.
- [Niemz 1997] Niemz, P.: Eigenspannungen in Holz und Holzwerkstoffen. *Holz Zentralblatt* 123(5/1997), 84-86.
- [Niemz u. a. 2014] Niemz, Peter; Clauss, Sebastian; Michel, Franco; Hänsch, Daniel; Hänsel, Andreas: Physical and mechanical properties of common ash. *Wood Research* 59 (4/2014), 671-682.
- [Niemz 2016] Niemz, Peter: Einfluss von Feuchteschwankungen bei Verklebungen. *Holz-Zentralblatt* (2016), 1219-1221.
- [Niemz u. Sonderegger 2017] Niemz, P. und Sonderegger, W.: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. 2. Überarbeitete und erweiterte Aufl. Leipzig: Fachbuchverlag im Carl Hanser Verlag (2017).
- [Osžhyar 2013] Osžhyar, Tomasz: Moisture and Time-dependent Orthotropic Mechanical Characterization of Beech Wood, ETH Zürich, Schweiz, Dissertation, 2013.
- [Pitt 2010] Pitt, W.: 33 Farbtafeln Parkett. Holzmann Medien (2010).
- [Ranta-Maunus 1975] Ranta-Maunus, Alpo: The viscoelasticity of wood at varying moisture content. *Wood Science and Technology* 9 (3/1975), 189-205.
- [Rüggeberg u. Burgert 2015] Rüggeberg, Markus; Burgert, Ingo: Bio-Inspired Wooden Actuators for Large Scale Applications. *PLoS ONE* 10 (4/2015), e0120718.
- [Saft u. Kaliske 2011] Saft, Susanne; Kaliske, Michael: Numerical simulation of the ductile failure of mechanically and moisture loaded wooden structures. *Computers & Structures* 89 (23-24/2011), 2460-2470.
- [Sandhaas 2012] Sandhaas, Carmen: Mechanical behaviour of timber joints with slotted-in steel plates, Delft University of Technology, Niederlande, Dissertation, 2012.
- [Sasi u. Gromala 2016] Sasi, Arun ; Gromala, Przemyslaw: Simulating Moisture diffusion in polymers using thermal-moisture analogy. In: 17th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (2016), S. 1–8
- [Schmidt 2009] Schmidt, Hansjörg: Parallelisierung Ersatzmodell-gestützter Optimierungsverfahren, TU Chemnitz, Deutschland, Diplomarbeit, 2009.

- [Schmidt u. Kaliske 2006] Schmidt, Jörg; Kaliske, Michael: Zur dreidimensionalen Materialmodellierung von Fichtenholz mittels eines Mehrflächen-Plastizitätsmodells. Holz als Roh und Werkstoff 64 (2006), 393-402.
- [Schmidt u. a. 2010] Schmidt, Michael ; Frese, Matthias ; Blass, Hans J. ; Glos, Peter: Bauaufsichtlich zugelassen - Hochfestes Brettschichtholz aus Buche. In: Holz Zentralblatt (2010), Nr. 4, S. 98–99.
- [SIA 265/1 2009] SIA 265/1: Holzbau - Ergänzende Festlegungen. 2009.
- [Siau u. Avramidis 1996] Siau, John F.; Avramidis, Stavros: The surface emission coefficient of wood. Wood and Fiber Science 28 (2/1996). 178-185.
- [Simo u. Hughes 2002] Simo, J. C.; Hughes, T. J. R.: Computational Inelasticity. Bd. Interdisciplinary Applied Mathematics. Springer-Verlag, 2002.
- [Sonderegger u.a. 2015] Sonderegger, W.; Kránitz, K.; Bues, C.-T.; Niemz, P.: Aging effects on physical and mechanical properties of spruce, fir and oak wood. Journal of Cultural Heritage 16 (6/2015), 883-889.
- [Timoschenko 1925] Timoshenko, Stephen: Analysis of bi-metal thermostats. Journal of the Optical Society of America and Review of Scientific Instruments 11 (3/1025), 233-255.
- [Toratti 1992] Toratti, Tomi: Creep of timber beams in a variable environment. Technical Report, Lab. of Structural Engineering and Building Physics, Helsinki University of Technology, Finland (1992), Nr. 31.
- [Toratti u. Svensson 2002] Toratti, Tomi; Svensson, Staffan: The viscoelasticity of wood at varying moisture content. Wood Science and Technology 36 (2/2002), 145-156.
- [Touati u. Cederbaum 1997] Touati, D.; Cederbaum, G.: On the Prediction of Stress Relaxation From Known Creep of Nonlinear Materials. Journal of Engineering Materials and Technology 119 (2/1997), 121-124.
- [Touati u. Cederbaum 1998] Touati, D.; Cederbaum, G.: Stress Relaxation of Nonlinear Thermoviscoelastic Materials Predicted from Known Creep. In: Mechanics of Time-Dependent Materials 1 (3/1998), 321-330.
- [Tsai u. Wu 1971] Tsai, S. W.; Wu, E. M.: A General Theory of Strength for Anisotropic Materials. Journal of Composite Materials 5 (1/1971), 58-80.
- [Wagenführ 1996] Wagenführ, Rudi: Holzatlas. Hanser Fachbuch, 1996.
- [Wimmer u. a. 2013] Wimmer, Rupert; Kläusler, Oliver; Niemz, Peter: Water sorption mechanisms of commercial wood adhesive films. Wood science and technology 47 (4/2013), 763–775.
- [Zhang 2000] Zhang, Z.: A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 22 (11/2000), 1330-1334.

8. Anhänge

8.1. Materialparameter des rheologischen Modells

8.1.1. Holz

Tabelle 22: Parameter zur Bestimmung der Diffusionskoeffizienten $D_i(\omega)$ für Fichte und Buche nach Gleichung (1.5)

Holzart	Quelle	Richtung l	D_{0l} [mm ² /h]	α_{0l} [–]
Fichte	[Saft u. Kaliske 2011]	Radial	0.288	0.04
		Tangential	0.288	0.04
		Longitudinal	0.720	0.04
Buche	[Hering 2011]	Radial	0.02630	0.199724
		Tangential	0.00370	0.265280
		Longitudinal	21.8999	-0.038545

Tabelle 23: Parameter zur Bestimmung von Elastizitätsmoduln, Schubmoduln und Querdehnzahlen für Fichte nach [Neuhaus 1981], Buche nach [Hering 2011] und Esche gemittelt in [Niemz u.a. 2014].

Holzart		E_R [MPa]	E_T [MPa]	E_L [MPa]	ν_{RT} [MPa]	ν_{RL} [MPa]	ν_{TL} [MPa]	ν_{TR} [–]	ν_{LR} [–]	ν_{LT} [–]
								$\cdot 10^{-3}$	$\cdot 10^{-3}$	$\cdot 10^{-3}$
Fichte	b_0	999.64	506.08	12791.75	61.33	762.8	880.75	153.4	232.0	285.7
	b_1	3.61	5.0	15.22	-1.07	5.93	1.39	10.8	-8.6	-41.0
	b_2	-2.09	-1.35	-9.01	-0.06	-1.99	-1.39	0.398	2.8784	7.1907
	b_3	0.0467	0.0297	0.1885	0.0017	0.0477	0.0277	-0.0191	-0.07862	-0.1642
Buche	b_0	2565.6	885.4	17136.7	667.8	1482	1100	293.3	383.0	336.8
	b_1	-59.7	-23.4	-282.4	-15.19	-15.26	-17.72	-1.012	-8.722	-9.071
Esche	b_0	2216.0	1172.0	14000.0	479.5	1543.0	1211.0	345.1	215.6	419.1
	b_1	-63.65	-33.94	-221.4	-11.57	-29.65	-24.13	-1.485	-122.970	-4.340

8.1.2. Klebstoffe

Tabelle 24: Parameter zur Bestimmung der feuchteabhängigen Diffusionskoeffizienten von PUR, MUF und PRF aus [Hassani 2015] nach [Wimmer u.a. 2013].

	PUR	MUF	PRF
D_0 [mm ² /h]	3.067e-03	9.792e-04	4.047e-04
α_0 [–]	0.057	0.231	0.231

Tabelle 25: Parameter zur Bestimmung der feuchteabhängigen Elastizitätsmoduls von PUR, MUF und PRF aus [Hassani 2015] nach [Kläusler 2014].

Klebstoff	a_0 [MPa]	a_1 [MPa/%]	a_2 [MPa/% ²]	a_3 [MPa/% ³]
PUR	1242.0	-158.30	26.250	-6.4430
MUF	5355.0	-604.10	33.270	-0.6805
PRF	4176.0	-176.90	19.380	-0.8521

Tabelle 26: Parameter zur Bestimmung der feuchteabhängigen Festigkeit und der Verfestigungsvariable nach Gleichung (1.31) von PUR aus [Hassani 2015] nach [Kläusler 2014].

Festigkeit	a_0 [MPa]	a_1 [MPa/%]	a_2 [MPa/% ²]	a_3 [MPa/% ³]
------------	-------------	---------------	-----------------------------	-----------------------------

$f_y(\omega)$	29.21	-7.734	4.696	-0.9505
Verfestigung	c_0 [MPa]	c_1 [MPa/%]	c_2 [-]	
$q(\alpha, \omega)$	60.3030	-12.1352	0.5326	

Tabelle 27: Parameter zur Bestimmung der Einträge J_i der viskoelastischen Nachgiebigkeitsmatrix für die einzelnen Kelvin-Körper aus [Hassani 2015] nach [Touati u. Cederbaum 1997] für PUR und [Touati u. Cederbaum 1998] für MUF.

i	τ_i [h]	PUR	MUF
		J_i [MPa ⁻¹]	J_i [MPa ⁻¹]
1	1e-4	4.63471e-06	1.946580e-06
2	1e-3	1.79861e-06	0.755417e-06
3	1e-2	2.69802e-06	1.133170e-06
4	1e-1	3.34791e-06	1.406120e-06
5	1e0	6.18187e-06	2.596390e-06
6	1e1	2.39631e-06	1.006450e-06

8.2. Realisierung der Trockenkammer

Die Trockenkammer wurde in einen Innenraum als 2700x1500x500mm Einhausung mit Gewebeplane realisiert. Die Dimensionen sind so gewählt, dass ein kompletter Probensatz Delaminations-BSH und Beschichtungs-BSH gut untergebracht werden kann und genügend umströmt ist (Bestückungsplan siehe Abbildung 84).

Trockene Luft strömt auf der einen Seite durch ein Durchmesser 70mm Zuluftrohr mit gleichmässig verteilten Luftauslasslöchern (Durchmesser 4mm) in die Kammer, während auf der anderen Seite ein Durchmesser 70mm Abluftrohr mit ebenfalls gleichmässig verteilten Luftabsauglöchern (Durchmesser 6mm) für die Abführung der Luft verantwortlich ist. Auf diese Weise wird ein gleichmässiger Luftstrom durch die Kammer gewährleistet. Die Kammer kann auf zwei unterschiedliche Arten betrieben werden.

1. Zum einen als offenes System, bei dem die Zuluft aus dem Gebäudedruckluftsystem stammt. Diese Luft hat eine relative Feuchte von ca. 10%. Die Abluft wird dann einfach in den Raum entlassen. Dieser Modus wird für die erste Phase der Trocknung verwendet.
2. Der Betriebsmodus als geschlossenes System verwendet eine Konfiguration, wie sie in der Gebäudetrocknung Anwendung findet. Dazu wird ein Gasringverdichter (Allegra SKV V80 S), der für Dauerbetrieb mit maximalem Druck von +160mBar, respektive -150mBar und einem Volumenstrom von 145m³/Stunde ausgelegt ist, verwendet. Der Ringverdichter bläst die abgesaugte, verdichtete Luft in ein Rohr (Durchmesser 110mm) mit eingesetztem Sieb, das 400 mm hoch locker mit Silikagel Granulat gefüllt ist. In periodischen Abständen wird die Silikagel Füllung durch dehydriertes Silikagel ersetzt. Dieser Entfeuchtungsmodus wird für längere Trocknungszeiten verwendet.

Während des gesamten Betriebs wird die relative Feuchte und Temperatur der Abluft erfasst.

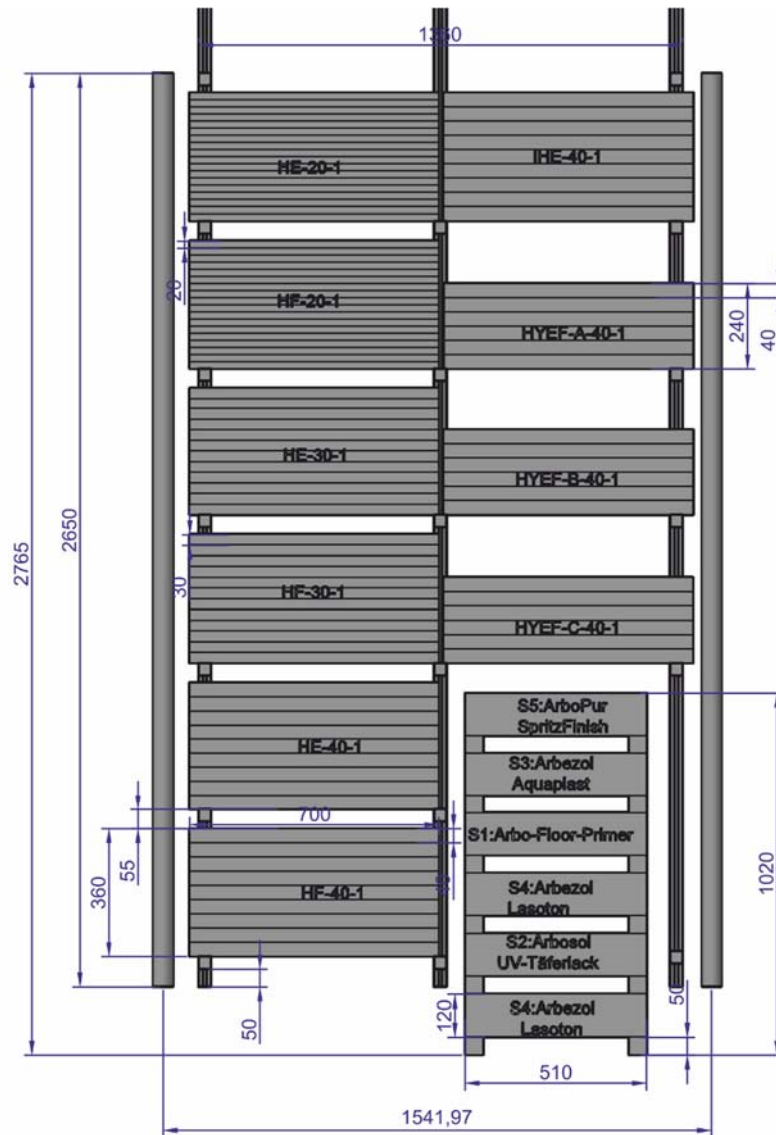


Abbildung 84: Bestückungsplan der Trockenkammer.

8.3. Werte aus der Überprüfung des Materialmodells

8.3.1. Buche

Tabelle 28: Gegenüberstellung von Simulationsergebnissen und experimentellen Werten: Elastizitätsmoduli von Buchenholz in verschiedenen Richtungen bei variierenden Holzfeuchten.

Quelle	ω [%]	E_r [MPa]	E_t [MPa]	E_l [MPa]
Simulation Zug	5.9	2298	752	17178
[Osžhyar 2013]	5.9	1800	810	12020
Simulation Zug	11.3	1961	624	15464
[Osžhyar 2013]	11.3	1510	730	10560
Simulation Zug	14.3	1774	553	14513
[Osžhyar 2013]	14.3	1340	600	9270
Simulation Zug	16.3	1650	506	13881
[Osžhyar 2013]	16.3	1240	530	9200

Simulation Druck	8.7/8.7/8.7	2123	686	16289
[Hering 2011]	8.7/8.7/8.7	1992	679	14419
Simulation Druck	12.9/12.1/12.3	1862	605	15147
[Hering 2011]	12.9/12.1/12.3	1897	606	13905
Simulation Druck	16.4/16.3/15.9	1644	506	14007
[Hering 2011]	16.4/16.3/15.9	1570	505	13157
Simulation Druck	18.6/17.4/17.9	1507	480	13374
[Hering 2011]	18.6/17.4/17.9	1426	475	11584

Tabelle 29: Gegenüberstellung von Simulationsergebnissen und experimentellen Werten: Querdehnzahlen von Buchenholz in verschiedenen Richtungen bei variierenden Holzfeuchte.

Quelle	ω [%]	v_{tr} [-]	v_{lr} [-]	v_{rt} [-]	v_{lt} [-]	v_{rl} [-]	v_{tl} [-]
Simulation Zug	5.9	0.794	0.046	0.279	0.013	0.278	0.236
[Osžhyar 2013]	5.9	0.53	0.04	0.24	0.04	0.43	0.59
Simulation Zug	11.3	0.798	0.037	0.273	0.010	0.215	0.189
[Osžhyar 2013]	11.3	0.61	0.04	0.31	0.04	0.43	0.58
Simulation Zug	14.3	0.805	0.032	0.270	0.008	0.177	0.165
[Osžhyar 2013]	14.3	0.65	0.05	0.36	0.04	0.39	0.62
Simulation Zug	16.3	0.811	0.029	0.268	0.007	0.151	0.150
[Osžhyar 2013]	16.3	0.70	0.04	0.36	0.05	0.47	0.87
Simulation Druck	8.7/8.7/8.7	0.795	0.041	0.276	0.011	0.246	0.211
[Hering 2011]	8.7/8.7/8.7	0.645	0.093	0.294	0.101	0.314	0.255
Simulation Druck	12.9/12.1/12.3	0.801	0.034	0.273	0.009	0.202	0.180
[Hering 2011]	12.8/12.3/12.2	0.635	0.067	0.266	0.089	0.267	0.235
Simulation Druck	16.4/16.3/15.9	0.811	0.029	0.268	0.007	0.156	0.153
[Hering 2011]	16.2/15.9/16.0	0.636	0.063	0.274	0.064	0.237	0.180
Simulation Druck	18.6/17.4/17.9	0.822	0.025	0.267	0.006	0.129	0.140
[Hering 2011]	18.6/17.9/17.3	0.630	0.047	0.284	0.062	0.236	0.181

8.3.2. Esche

Tabelle 30: Gegenüberstellung von Simulationsergebnissen und experimentellen Werten: Elastizitätsmodul von Eschenholz in verschiedenen Richtungen bei variierenden Holzfeuchte.

Quelle	ω [%]	E_r [MPa]	E_t [MPa]	E_l [MPa]
Simulation Zug	8.1/8.4/9.8	1764	901	13194
[Niemz u. a. 2014]	8.1/8.4/9.8	1810	804	12700
Simulation Zug	11.1/13.8/12.2	1564	713	12615
[Niemz u. a. 2014]	11.1/13.8/12.2	1510	759	12200
Simulation Zug	15.5/17.9/15.5	1270	571	11819
[Niemz u. a. 2014]	15.5/17.9/15.5	1320	635	11400
Simulation Zug	19.0/20.3/17.2	1037	488	11409
[Niemz u. a. 2014]	19.0/20.3/17.2	1030	505	11000
Simulation Druck	8.1/8.4/8.4	1764	901	13532
[Niemz u. a. 2014]	8.1/8.4/8.4	1695	965	12110
Simulation Druck	11.1/13.8/11.4	1564	713	12808
[Niemz u. a. 2014]	11.1/13.8/11.4	1368	643	9221
Simulation Druck	15.5/17.9/17.8	1270	571	11264
[Niemz u. a. 2014]	15.5/17.9/17.8	1139	530	9908
Simulation Druck	19.0/20.3/18.5	1037	488	11095
[Niemz u. a. 2014]	19.0/20.3/18.5	1024	434	8922

Tabelle 31: Gegenüberstellung von Simulationsergebnissen und experimentellen Werten: Querdehnnzahlen von Eschenholz in verschiedenen Richtungen bei variierenden Holzfeuchte.

Quelle	ω [%]	ν_{tr} [-]	ν_{lr} [-]	ν_{rt} [-]	ν_{lt} [-]	ν_{rl} [-]	ν_{tl} [-]
Simulation Zug	8.1/8.4/9.8	0.651	0.044	0.348	0.032	0.299	0.418
Simulation Druck	8.1/8.4/8.4	0.651	0.044	0.348	0.032	0.282	0.411
[Niemz u. a. 2014]	8.1/8.4/8.4	0.66	0.05	0.35	0.03	0.30	0.46
Simulation Zug	11.1/13.8/12.2	0.659	0.046	0.356	0.030	0.327	0.431
Simulation Druck	11.1/13.8/11.4	0.659	0.046	0.356	0.030	0.318	0.427
[Niemz u. a. 2014]	11.1/13.8/11.4	0.70	0.09	0.38	0.04	0.40	0.46
Simulation Zug	15.5/17.9/15.5	0.672	0.048	0.361	0.027	0.365	0.449
Simulation Druck	15.5/17.9/17.8	0.672	0.048	0.361	0.027	0.388	0.462
[Niemz u. a. 2014]	15.5/17.9/17.8	0.73	0.08	0.37	0.04	0.43	0.52
Simulation Zug	19.0/20.3/17.2	0.681	0.047	0.364	0.025	0.382	0.458
Simulation Druck	19.0/20.3/18.5	0.681	0.047	0.364	0.025	0.395	0.466
[Niemz u. a. 2014]	19.0/20.3/18.5	0.74	0.10	0.37	0.04	0.46	0.48

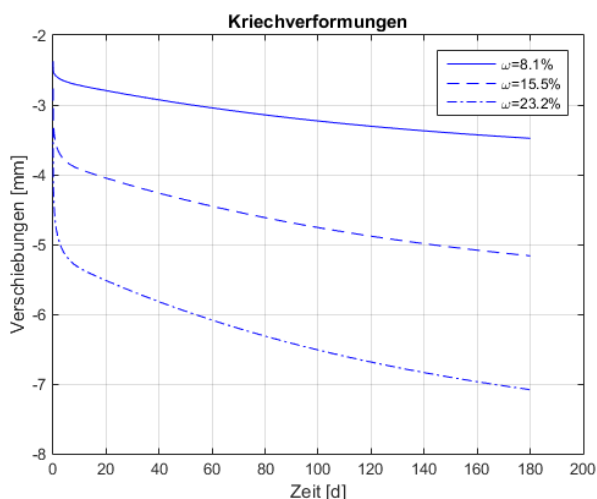


Abbildung 85: Entwicklung der vertikalen Durchbiegungen des simulierten Prüfkörpers aus Buchenholz.

8.4. Ergänzende Daten zu den Berechnungen

8.4.1. Holzfeuchtemodellierung

Tabelle 32: Feuchtegehalt ω in % (näherungsweise) in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit für die realitätsnahe Modellierung der Optimierungsprobleme in den Abschnitten 3.2.2.1 und 3.2.2.2}.

Material	Luftfeuchtigkeit		
	35 %	65 %	95 %
Fichte	7.0	12.0	24.0
Buche	8.5	12.5	24.0
Esche	8.5	12.5	24.0
PRF	6.5	10.5	17.5

8.4.2. Bilayer

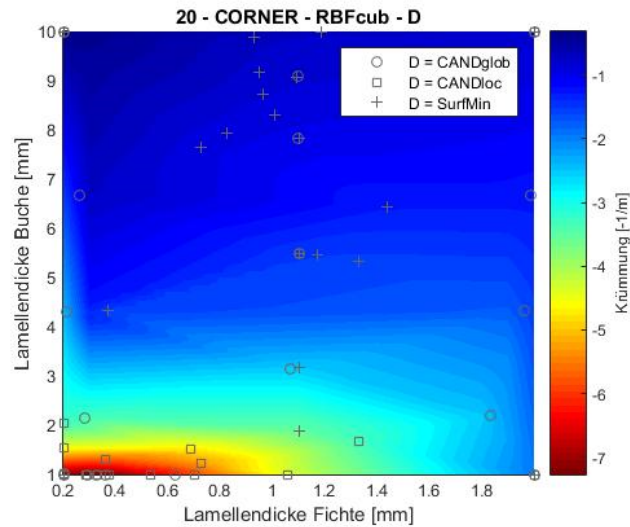


Abbildung 86: Vergleich der drei Methoden zur Bestimmung neuer Punkte anhand deren Lage auf einem mit Matlab interpolierten Ersatzfläche für den Buche-Fichte-Bilayer.

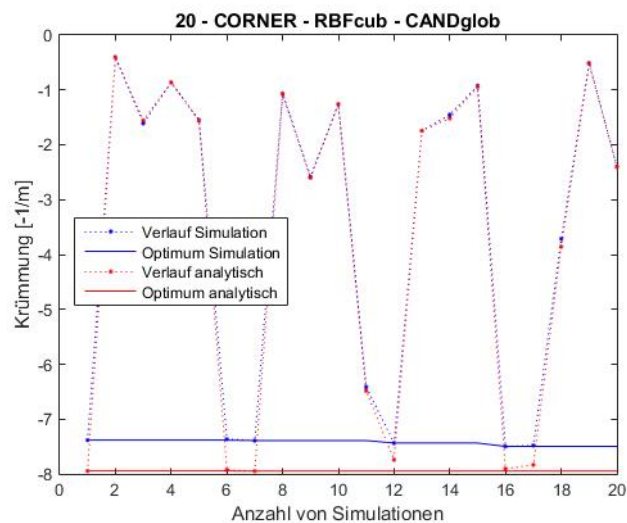


Abbildung 87: Verlauf der Optima für einen Bilayer aus Fichte und Esche verglichen mit der analytischen Berechnung.

Tabelle 33: Zusammenstellung aller Ergebnisse und Einstellungen von den verschiedenen Optimierungen des Bilayers aus Buche und Fichte.

Einstellungen	Optimum [1/m]	Fichtenlage [mm]	Buchenlage [mm]	Rechenzeit [s]
20-CORNER-RBFcub-CANDglob	7.2733	0.2916	1.0000	1550
20-CORNER-RBFcub-CANDloc	7.2733	0.2910	1.0000	1139
20-CORNER-RBFcub-SurfMin	7.0679	0.2000	1.0000	2040
20-SLHD-RBFcub-CANDglob	7.2697	0.2786	1.0000	1521
20-LHS-RBFcub-CANDglob	7.2733	0.2926	1.0000	1621
20-LHS-POLYquad-CANDglob	7.2342	0.3417	1.0000	1564
20-LHS-POLYcubr-CANDglob	7.0679	0.2000	1.0000	1501
20-LHS-MARS-CANDglob	7.0205	0.2621	1.0378	1666

8.4.3. Hybrides Brettschichtholz

Tabelle 34: Zusammenstellung ausgewählter Ergebnisse für die Optimierungsläufe von hybriden BSH-Elementen.

		Setup 1 ohne P., V. und M.	mit P., V. und M.	Setup 2 ohne P., V. und M.
Zeit	[s]	2831	42716	21912
Werte	(0, 1, 0)	0.0260	0.0713	
	(0, 1, 1)	0.0488	0.0735	0.0937
	(1, 1, 1)	0.1260	0.1572	0.2201
	(1, 1, 0)	0.0339	0.0802	
	(0, 1, 8)	0.0617	0.0810	

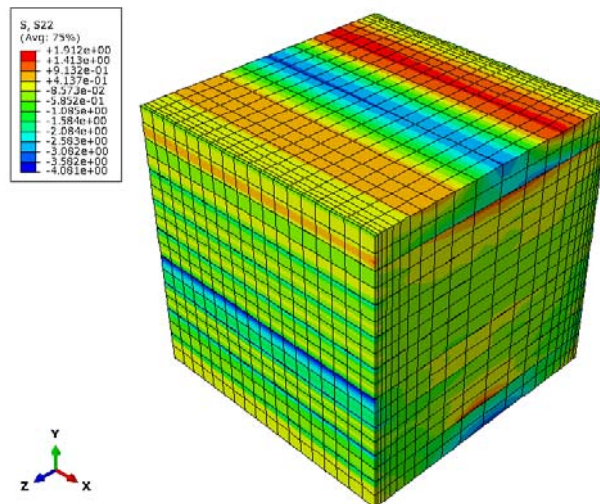


Abbildung 88: Tangentiale Spannungen in den Holzlamellen für ein hybrides BSH-Element (eine Lage oben und unten aus Buchenholz und Orientierungen alle positiv) ohne Berücksichtigung von Plastizität, Viskoelastizität und Mechano-Sorption.

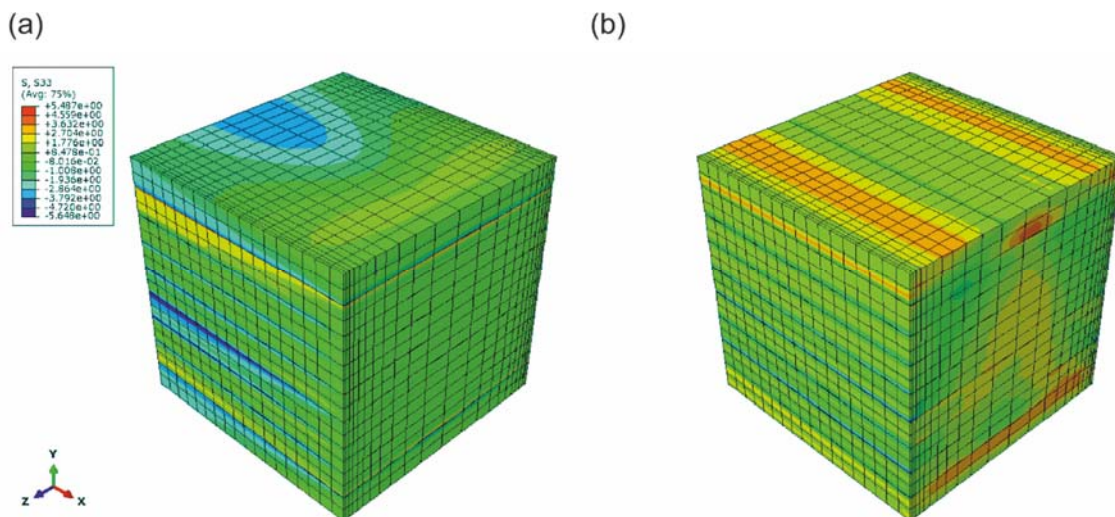


Abbildung 89: Spannungen (a) radial und (b) longitudinal in den Holzlamellen für ein hybrides BSH-Element (eine Lage oben und unten aus Buchenholz und Orientierungen alle positiv) ohne Berücksichtigung von Plastizität, Viskoelastizität und Mechano-Sorption.

8.4.4. Beschichtetes Brettschichtholz

Tabelle 35: Stammkoordinaten der Lamellen der BSH-Proben, wobei die Lamellen von unten nach oben mit 0 - 4 nummeriert sind.

	x0	y0	x1	y1	x2	y2	x3	y3	x4	y4
S0_1	-87.5	50.5	60	72	-49.5	92.25	44.5	81.25	54.5	49.75
S0_2	60.5	63.5	57	80.5	64	89.5	-88.5	-53.5	-60.5	64
S1_1	98	-4	-59	55.5	-62.5	89	52	-75	57	59.5
S1_2	-67.5	-68	-63	-77	60.5	-80.5	66.5	-77.5	84	-33.5
S2_1	-55.5	-47.5	-63.5	-76	56	-69	67.5	-69.5	-57	63
S2_2	61	-61	71	36	-47.5	-73.5	-78	-74	-74	-57
S3_1	-69	54	-60	94.5	99.5	7	-67	-72	-60	90
S3_2	-50	-38	-61.5	106	-60.5	98	64.5	66	67	61.5
S4_1	61	-42.5	62	88.5	-60	-68	-61.5	-65.5	-60	-60
S4_2	-85.5	-52	65	91.5	61	105	-69	101	-73	63.5
S5_1	-78	-21	72	89	-80	0	56.5	-66	66	-48.5
S5_2	-64	-48	-68.5	64.5	-51	80.5	66	91	57	51.5

Tabelle 36: Liste mit den durchgeführten Simulationen

Feuchteentwicklung bei konstantem Klima		Eigenspannungen bei konstantem Klima		Feuchteentwicklung bei veränderlichem Klima		Eigenspannungen bei veränderlichem Klima	
Probe	Dauer [h]	Probe	Dauer [h]	Probe	Dauer [h]	Probe	Dauer [h]
S0_1	8760	S0_1	8760	S0_1	87600	S0_1	87600
S0_2	8760	S0_2	8760	S1_1	43800	S1_1	43800
S1_1	8760	S1_1	8760	S2_1	43800	S2_1	43800
S1_2	8760	S1_2	8760	S3_1	43800	S3_1	43800
S2_1	8760	S2_1	8760	S4_1	43800	S4_1	43800
S2_2	8760	S2_2	8760	S5_1	43800	S5_1	43800
S3_1	8760	S3_1	8760				
S3_2	8760	S3_2	8760				
S4_1	8760	S4_1	8760				
S4_2	8760	S4_2	8760				
S5_1	8760	S5_1	8760				
S5_2	8760	S5_2	8760				

Tabelle 37: Extremale Spannungen in x- (S11) und y-Richtung (S22) nach einem Jahr unter konstantem Klima (Satz 1: 90 % R.H., Satz 2: 25 % R.H.) in [MPa]), die kleinsten Spannungen wurden jeweils fett geschrieben.

	S11 Max	Min	S22 Max	Min
S0_1	8.008	-5.136	4.776	-2.715
S1_1	7.256	-6.057	3.311	-2.919
S2_1	6.89	-4.748	3.864	-2.749
S3_1	6.899	-6.353	2.968	-2.771
S4_1	7.409	-4.008	2.698	-2.768
S5_1	6.797	-5.373	2.815	-2.842

S0_2	6.77	-9.144	3.4	-3.404
S1_2	5.719	-8.111	3.536	-3.742
S2_2	7.428	-7.165	3.496	-3.76
S3_2	5.392	-8.954	3.462	-3.215
S4_2	4.134	-8.543	3.295	-3.196
S5_2	5.006	-7.91	3.374	-3.6

Tabelle 38: Extremwerte, Phasenwinkel und -differenz zu den Amplituden in den Tiefen 10, 20, 40, 60 mm der Proben S0-S5 unter veränderlichem Klima.

	Tiefe [mm]	Max [%]	Min [%]	Phasenwinkel [rad]	Phasendifferenz [h]
S0	0	17.00	8.00	0.00	0
	10	16.00	9.24	0.31	438
	20	15.35	10.00	0.63	876
	40	14.89	10.53	1.26	1752
	60	14.85	10.55	1.57	2190
S1	0	16.12	8.36	0.00	0
	10	15.34	9.50	0.31	438
	20	14.84	10.18	0.94	1314
	40	14.47	10.63	1.57	2190
	60	14.48	10.66	1.57	2190
S2	0	16.88	8.14	0.00	0
	10	15.91	9.34	0.31	438
	20	15.27	10.08	0.63	876
	40	14.84	10.59	1.26	1752
	60	14.80	10.60	1.57	2190
S3	0	16.64	8.18	0.00	0
	10	15.73	9.37	0.31	438
	20	15.14	10.10	0.63	876
	40	14.73	10.59	1.57	2190
	60	14.71	10.61	1.57	2190
S4	0	16.26	8.30	0.00	0
	10	15.45	9.46	0.31	438
	20	14.93	10.16	0.94	1314
	40	14.55	10.62	1.57	2190
	60	14.56	10.64	1.57	2190
S5	0	15.98	8.27	0.00	0
	10	15.26	9.42	0.31	438
	20	14.78	10.13	0.63	876
	40	14.41	10.59	1.57	2190
	60	14.42	10.61	1.57	2190

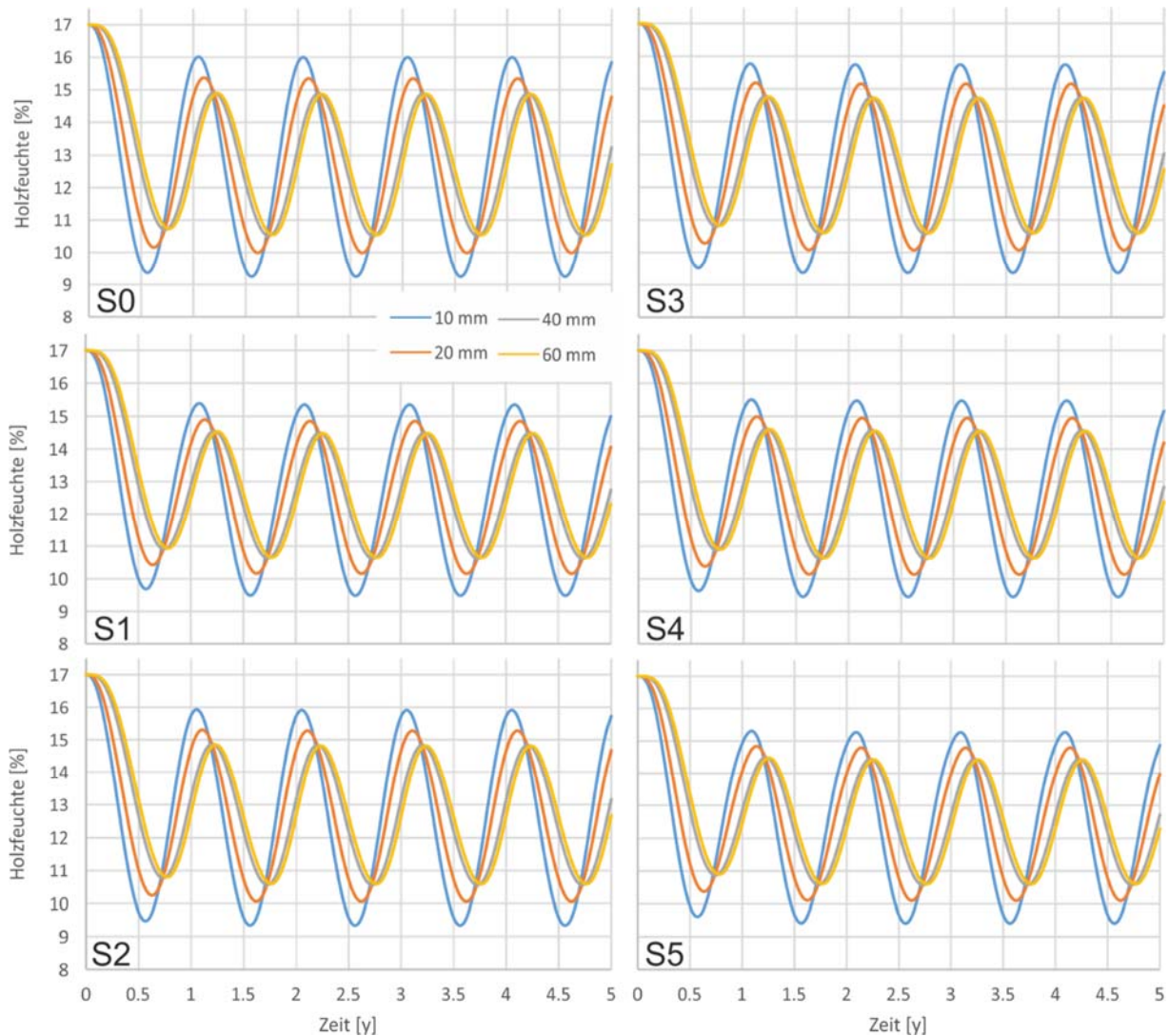


Abbildung 90 Feuchteentwicklung in allen Proben bei zyklischer Feuchtelast.

8.5. Grosse Delaminationsproben

8.5.1. Messwerte der tiefenabhängigen Feuchte

Tabelle 39: Gesamtmasse in g der Proben.

Probe	05.07.2016	07.09.2016	16.12.2016	03.05.2017
HF-40-1	37100	-	-	36940
HE-40-1	62280	-	62210	62070
HF-30-1	39450	-	-	39210
HE-30-1	63890	-	63820	63660
HF-20-1	40240	-	-	39940
HE-20-1	62060	-	61980	61840
IHE-40-1	62140	62150	62060	61920
HYEF1-40-1	33430	-	33390	33290
HYEF2-40-1	36460	-	36420	36310
HYEF3-40-1	34760	-	34650	34520
Probe	05.07.2016	07.09.2016	16.12.2016	03.05.2017
HF-40-2	37580	37820	38450	38310
HE-40-2	62490	62670	63310	63190
HF-30-2	39680	39900	40510	40400
HE-30-2	63680	63890	64470	64630
HF-20-2	39940	40130	40740	40570
HE-20-2	62440	62640	63310	63170

Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung Projekt 2015-04 | Feuchteinduzierte Spannungen und Delaminierungen in Brettschichtholz

IHE-40-2	62200	62400	63030	62950
HYEF1-40-2	33800	34000	34520	34430
HYEF2-40-2	36190	36150	36650	36580
HYEF3-40-2	34620	34830	35350	35270
Probe	05.07.2016	07.09.2016	16.12.2016	03.05.2017
HF-40-3	37370	37080	36780	36560
HE-40-3	62660	62170	61800	61470
HF-30-3	39550	39190	38900	38667
HE-30-3	63470	62990	62650	62350
HF-20-3	40050	39610	39300	39010
HE-20-3	62720	62240	61900	61600
IHE-40-3	62090	61630	61280	60970
HYEF1-40-3	34090	33820	33580	33360
HYEF2-40-3	36000	35650	35380	35150
HYEF3-40-3	34580	34150	33870	33650

Tabelle 40: Tiefenabhängige Feuchte in allen Delaminationsproben.

Probe	Datum	R-10	R-20	R-40	R-60	L-10	L-20	L-40	L-60
HF-40-1	05.07.2016	11,5	11,6	10,4	10,4	11,0	11,0	10,1	9,3
	07.09.2016	11,3	11,8	10,5	10,8	10,9	11,0	10,2	9,2
	16.12.2016	10,2	10,7	10,4	11,0	9,8	10,4	11,1	9,7
	03.05.2017	9,7	10,9	10,5	10,9	9,1	10,0	9,8	9,7
HE-40-1	05.07.2016	10,1	9,9	10,2	9,2	11,1	11,0	10,4	9,7
	07.09.2016	9,8	9,8	9,8	9,2	10,7	10,5	10,2	9,5
	16.12.2016	8,9	9,2	9,6	9,7	9,8	10,0	8,1	9,2
	03.05.2017	8,6	8,8	9,3	8,7	10,0	9,9	9,8	9,2
HF-30-1	05.07.2016	12,1	12,0	11,3	11,0	11,5	12,0	11,0	10,8
	07.09.2016	11,3	11,6	11,1	11,3	11,3	12,0	11,0	11,1
	16.12.2016	10,3	10,8	10,9	11,2	10,6	11,3	11,1	11,5
	03.05.2017	9,6	10,5	10,6	11,0	9,8	10,8	10,5	11,0
HE-30-1	05.07.2016	10,0	10,4	9,8	9,2	10,5	10,6	10,3	10,0
	07.09.2016	9,9	10,3	9,7	9,3	10,3	10,4	10,1	9,5
	16.12.2016	9,0	9,7	9,2	8,8	9,3	9,2	9,7	9,5
	03.05.2017	8,6	9,4	9,2	8,9	8,9	9,6	9,7	9,5
HF-20-1	05.07.2016	11,3	11,4	11,0	11,1	12,1	12,3	11,8	12,7
	07.09.2016	11,4	11,8	11,4	11,2	11,9	12,6	12,3	12,6
	16.12.2016	10,2	11,0	11,0	10,9	10,9	12,1	11,9	9,8
	03.05.2017	9,6	10,7	11,0	10,9	9,9	11,2	11,6	11,6
HE-20-1	05.07.2016	10,6	11,0	10,4	9,5	9,4	9,5	9,1	9,1
	07.09.2016	10,4	10,9	10,2	9,2	9,2	9,3	9,0	9,0
	16.12.2016	9,9	10,4	9,9	8,2	7,8	7,9	8,6	8,7
	03.05.2017	9,2	10,1	9,7	9,0	7,8	8,6	8,7	8,8
IHE-40-1	05.07.2016	10,2	10,0	10,1	9,2	10,1	10,0	10,2	9,2
	07.09.2016	9,8	9,9	10,0	9,1	9,7	9,8	10,0	8,9
	16.12.2016	9,0	9,4	9,8	8,8	8,8	9,3	9,6	9,0
	03.05.2017	8,6	9,2	9,6	8,8	8,7	9,0	9,5	9,2

Probe	Datum	RE-10	RE-20	RE-40	RE-60	LE-10	LE-20	LE-40	LE-60
HYEF1-1	05.07.2016	10,2	10,2	9,9	8,8	10,0	9,8	9,3	9,3
	07.09.2016	10,0	10,0	9,7	8,6	9,7	9,7	9,2	9,1
	16.12.2016	9,1	9,6	9,3	9,7	8,9	9,3	9,2	8,9
	03.05.2017	8,6	9,2	9,0	8,2	8,0	9,2	9,0	9,0
HYEF2-1	05.07.2016	10,8	10,8	10,7	10,0	10,6	10,5	9,3	10,0
	07.09.2016	10,4	10,6	10,4	9,9	10,3	10,2	9,1	9,9
	16.12.2016	9,2	10,0	10,0	9,6	9,4	9,7	9,0	9,8
	03.05.2017	8,9	9,5	9,7	9,5	8,8	9,4	8,7	9,7
HYEF3-1	05.07.2016	9,9	10,0	9,8	10,2	10,6	10,6	10,7	10,6
	07.09.2016	10,0	9,9	9,5	10,0	10,4	10,6	10,4	10,4
	16.12.2016	8,8	9,2	9,2	9,6	9,3	9,6	9,7	9,7
	03.05.2017	8,4	8,8	8,8	9,2	9,0	9,5	9,4	9,5
Probe	Datum	RF-10	RF-20	RF-40	RF-60	LF-10	LF-20	LF-40	LF-60
HYEF1-1	05.07.2016	11,1	11,1	11,4	10,5	10,8	10,8	11,0	10,5
	07.09.2016	10,6	11,0	11,2	10,1	10,3	10,5	10,7	10,3
	16.12.2016	9,3	10,2	10,3	9,2	9,0	9,6	10,0	10,0
	03.05.2017	8,4	9,7	9,8	9,1	8,2	9,4	9,6	9,2
HYEF2-1	05.07.2016	10,6	10,5	10,8	9,7	11,0	10,6	10,3	10,3
	07.09.2016	10,5	11,0	10,8	10,3	10,5	10,5	10,1	10,3

Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung Projekt 2015-04 | Feuchteinduzierte Spannungen und Delaminierungen in Brettschichtholz

	16.12.2016	9,7	9,6	10,2	9,8	9,5	9,1	9,5	9,6
	03.05.2017	8,1	10,0	9,8	9,2	7,8	9,0	9,0	9,6
HYEF3-1	05.07.2016	10,8	10,3	11,6	10,8	11,0	11,3	10,8	10,6
	07.09.2016	11,0	11,1	11,3	10,7	10,6	11,2	10,8	10,6
	16.12.2016	9,8	10,0	11,3	10,3	9,7	10,5	10,8	10,3
	03.05.2017	8,1	10,2	10,1	10,1	8,6	10,1	10,1	10,0

Probe	Datum	R-10	R-20	R-40	R-60	L-10	L-20	L-40	L-60
HF-40-2	05.07.2016	12,0	11,0	11,3	10,0	11,7	10,8	10,8	10,1
	07.09.2016	13,3	12,2	11,5	10,4	13,1	12,4	11,4	10,7
	16.12.2016	18,8	17,5	12,8	10,3	19,4	16,1	12,3	8,9
	03.05.2017	15,2	14,8	13,7	11,8	14,7	14,2	13,4	11,8
HE-40-2	05.07.2016	10,1	9,8	9,6	9,7	11,0	10,4	10,0	10,3
	07.09.2016	10,5	10,0	9,4	9,0	11,6	10,5	9,8	9,8
	16.12.2016	15,3	11,2	10,4	8,7	16,6	11,4	9,2	8,9
	03.05.2017	13,1	11,8	9,9	9,4	14,3	12,0	9,7	9,2
HF-30-2	05.07.2016	11,3	11,2	10,8	11,0	10,8	11,0	10,8	10,3
	07.09.2016	12,4	11,9	11,2	10,9	12,3	11,7	11,5	10,9
	16.12.2016	18,0	16,6	17,0	12,6	19,2	16,2	12,6	9,4
	03.05.2017	14,6	14,4	13,2	12,5	14,7	14,4	13,2	11,9
HE-30-2	05.07.2016	10,0	10,1	10,2	10,2	10,3	9,3	10,6	10,1
	07.09.2016	10,7	10,1	10,0	9,8	11,2	9,5	10,3	9,7
	16.12.2016	15,3	11,4	11,3	9,2	17,1	10,9	10,8	9,2
	03.05.2017	12,9	11,7	10,1	9,6	13,6	10,9	10,8	9,5
HF-20-2	05.07.2016	11,7	11,9	11,1	13,3	10,8	11,6	11,3	13,5
	07.09.2016	13,3	12,8	11,7	12,9	12,9	12,0	12,8	12,3
	16.12.2016	19,5	17,9	17,8	12,9	18,1	16,8	13,8	12,2
	03.05.2017	15,2	15,1	13,6	13,6	14,3	15,1	13,9	13,6
HE-20-2	05.07.2016	10,2	9,9	10,2	9,7	10,2	10,0	10,2	9,8
	07.09.2016	10,7	10,2	10,0	9,5	10,7	9,8	9,6	9,2
	16.12.2016	15,1	11,9	11,4	8,5	15,9	12,6	11,2	10,2
	03.05.2017	12,9	11,6	10,1	9,0	13,1	11,5	9,9	9,7
IHE-40-2	05.07.2016	10,5	10,3	9,6	9,5	9,9	9,7	9,5	9,7
	07.09.2016	11,3	10,4	9,4	8,5	11,4	10,5	9,5	8,5
	16.12.2016	17,1	12,3	10,6	x 8,1	16,0	11,7	9,8	x 9,1
	03.05.2017	14,0	12,5	10,0		12,9	11,5	9,6	

Probe	Datum	RE-10	RE-20	RE-40	RE-60	LE-10	LE-20	LE-40	LE-60
HYEF1-2	05.07.2016	10,2	10,0	10,0	9,6	9,8	9,9	9,5	9,4
	07.09.2016	11,0	10,5	10,1	9,2	10,1	9,6	9,2	8,6
	16.12.2016	17,3	12,5	10,6	9,0	14,4	10,9	9,8	7,6
	03.04.2017	13,7	12,9	11,1	9,7	12,2	11,1	9,7	9,1
HYEF2-2	05.07.2016	10,9	10,7	10,3	10,7	10,9	10,6	10,2	10,4
	07.09.2016	11,5	10,9	10,3	10,2	11,3	10,5	9,8	9,3
	16.12.2016	17,0	13,9	10,8	9,9	17,6	13,5	11,0	10,1
	03.05.2017	13,2	12,4	11,8	11,2	13,5	12,4	11,4	10,6
HYEF3-2	05.07.2016	9,7	9,4	9,5	9,7	10,5	9,9	10,5	9,8
	07.09.2016	11,1	10,3	9,9	9,8	11,8	10,3	10,3	9,4
	16.12.2016	18,2	13,4	10,4	9,7	16,7	11,9	11,2	9,2
	03.05.2017	13,5	12,8	10,6	10,3	14,0	12,2	11,0	9,3
Probe	Datum	RF-10	RF-20	RF-40	RF-60	LF-10	LF-20	LF-40	LF-60
HYEF1-2	05.07.2016	10,7	10,5	10,6	9,8	12,0	11,8	11,5	10,9
	07.09.2016	11,9	11,5	11,0	9,9	13,0	10,2	10,7	10,3
	16.12.2016	18,5	15,7	13,1	10,2	19,9	17,0	13,8	10,5
	03.05.2017	14,6	13,7	13,2	12,1	15,5	15,2	12,5	12,3
HYEF2-2	05.07.2016	10,3	10,8	11,0	10,4	10,7	11,0	10,5	10,1
	07.09.2016	10,0	11,3	10,9	10,0	11,2	11,1	11,1	10,2
	16.12.2016	16,0	15,4	11,4	10,3	18,3	15,3	12,1	8,4
	03.05.2017	11,8	13,2	12,3	10,8	13,0	13,5	11,7	9,4
HYEF3-2	05.07.2016	10,7	10,8	11,4	11,0	11,3	10,8	10,8	10,3
	07.09.2016	12,1	11,4	11,0	10,7	12,1	11,5	10,9	10,2
	16.12.2016	18,6	15,1	12,2	9,6	17,9	14,3	12,1	9,6
	03.05.2017	14,0	13,4	11,6	10,9	13,8	13,3	12,0	11,0

Probe	Datum	R-10	R-20	R-40	R-60	L-10	L-20	L-40	L-60
HF-40-3	05.07.2016	11,4	12,1	11,6	10,8	11,6	11,8	11,5	10,8
	07.09.2016	9,4	10,8	10,6	10,3	8,5	9,9	10,3	11,0
	16.12.2016	6,8	6,9	8,5	9,1	7,3	7,0	7,9	9,2
	03.05.2017	4,6	5,8	7,3	8,2	4,3	5,3	6,7	9,6
	05.07.2016	9,7	10,5	10,2	9,7	10,8	11,0	10,8	10,2

Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung Projekt 2015-04 | Feuchteinduzierte Spannungen und Delaminierungen in Brettschichtholz

HE-40-3	07.09.2016	7,3	8,2	8,8	9,3	8,0	9,2	9,7	10,1
	16.12.2016	3,7	5,0	5,4	6,6	5,0	7,1	7,1	8,8
	03.05.2017	3,8	4,4	5,6	7,5	4,2	4,4	5,1	8,5
HF-30-3	05.07.2016	11,8	12,4	12,1	11,1	11,6	11,3	11,3	10,5
	07.09.2016	9,5	10,3	10,9	11,0	8,3	9,3	9,8	9,4
	16.12.2016	6,8	8,1	8,6	10,7	5,1	6,8	6,6	9,5
	03.05.2017	5,0	5,5	8,6	10,0	4,5	5,1	6,6	9,1
HE-30-3	05.07.2016	9,9	10,1	9,7	9,7	9,7	10,4	10,5	9,0
	07.09.2016	6,9	8,4	9,1	9,4	6,9	8,2	9,0	8,6
	16.12.2016	4,3	4,6	5,4	8,5	4,0	4,5	6,6	7,2
	03.05.2017	4,0	4,7	7,6	8,6	4,0	4,4	6,0	7,1
HF-20-3	05.07.2016	12,0	12,1	11,7	11,9	10,3	12,1	12,2	11,6
	07.09.2016	8,8	9,8	10,8	11,5	9,5	10,3	11,2	11,5
	16.12.2016	5,7	7,2	8,0	10,6	6,7	9,3	9,8	10,6
	03.05.2017	4,0	4,9	7,9	10,0	4,7	6,1	8,6	9,8
HE-20-3	05.07.2016	10,0	10,5	10,1	9,7	10,0	10,5	10,4	9,5
	07.09.2016	6,9	8,4	8,6	9,4	6,9	8,4	8,8	9,0
	16.12.2016	6,2	7,0	7,8	8,5	6,0	6,5	7,3	8,4
	03.05.2017	4,1	4,9	6,6	8,5	4,2	4,4	5,9	7,8
IHE-40-3	05.07.2016	9,8	10,4	10,0	9,4	10,4	10,3	10,1	8,6
	07.09.2016	7,3	8,2	8,0	8,8	6,6	7,6	8,6	8,6
	16.12.2016	4,7	5,1	5,2	8,2	5,2	5,3	7,4	8,0
	03.05.2017	3,3	4,1	4,0	7,6	4,0	4,5	5,4	7,6

Probe	Datum	RE-10	RE-20	RE-40	RE-60	LE-10	LE-20	LE-40	LE-60
HYEF1-3	05.07.2016	10,2	10,4	10,4	9,6	10,4	10,2	10,2	10,2
	07.09.2016	8,3	9,0	9,4	9,1	8,0	9,0	9,5	9,8
	16.12.2016	6,8	7,0	8,7	8,7	5,8	7,8	9,0	9,5
	03.05.2017	5,0	5,0	6,6	7,8	4,4	5,2	7,6	8,6
HYEF2-3	05.07.2016	10,9	10,7	10,7	10,1	10,2	10,6	10,0	9,7
	07.09.2016	7,8	8,8	9,3	9,2	6,8	8,2	8,6	9,5
	16.12.2016	5,5	5,3	7,9	8,1	5,6	5,0	6,2	8,5
	03.05.2017	4,2	4,4	6,7	7,4	3,8	3,9	4,6	7,8
HYEF3-3	05.07.2016	9,8	9,6	9,6	10,2	11,1	11,1	11,4	11,2
	07.09.2016	8,0	8,2	8,6	9,3	8,2	9,1	9,8	10,4
	16.12.2016	7,6	7,1	7,8	7,9	4,5	4,9	8,8	9,0
	03.05.2017	4,1	4,0	4,6	6,3	4,4	5,1	6,6	8,3
Probe	Datum	RF-10	RF-20	RF-40	RF-60	LF-10	LF-20	LF-40	LF-60
HYEF1-3	05.07.2016	10,8	11,3	11,1	10,8	10,5	11,7	11,5	9,7
	07.09.2016	7,8	9,5	9,3	8,9	9,8	9,3	9,6	9,2
	16.12.2016	7,5	7,3	6,0	8,9	4,7	4,2	4,2	6,3
	03.05.2017	5,1	4,7	5,1	6,1	4,6	4,8	4,6	5,4
HYEF2-3	05.07.2016	9,7	11,0	11,4	9,8	11,0	11,0	10,8	10,5
	07.09.2016	6,4	8,6	9,6	9,2	7,4	8,8	9,5	9,6
	16.12.2016	4,0	4,8	4,2	6,7	4,6	6,4	6,4	8,3
	03.05.2017	4,3	4,4	5,1	5,9	4,3	4,6	5,0	6,4
HYEF3-3	05.07.2016	11,0	11,5	11,0	10,8	11,3	11,7	11,6	10,8
	07.09.2016	8,4	8,6	8,8	10,4	8,1	9,3	9,6	10,2
	16.12.2016	5,7	5,7	6,5	9,5	7,2	7,3	8,6	9,0
	03.05.2017	4,5	4,5	4,6	6,9	4,9	5,0	5,4	6,8

8.5.2. Querschnitte und Delaminationen



Abbildung 91: Aufbauten HF-40-3 (oben), HE-40-3 (Mitte) und HYE2-40-3 (unten)

8.5.2.1. Versuchsreihe 2

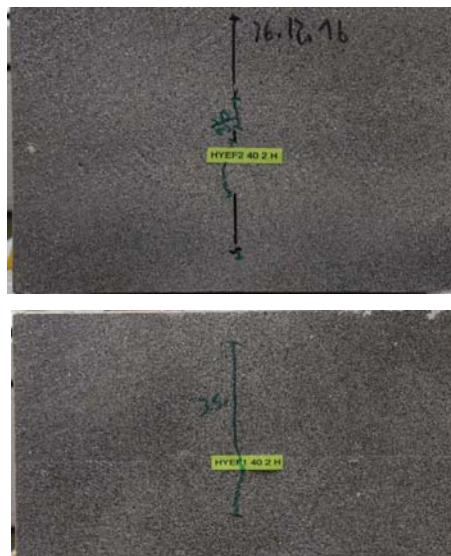


Abbildung B.9: Delamination der Probe HYEF2-40-3.

8.5.2.2. Versuchsreihe 3

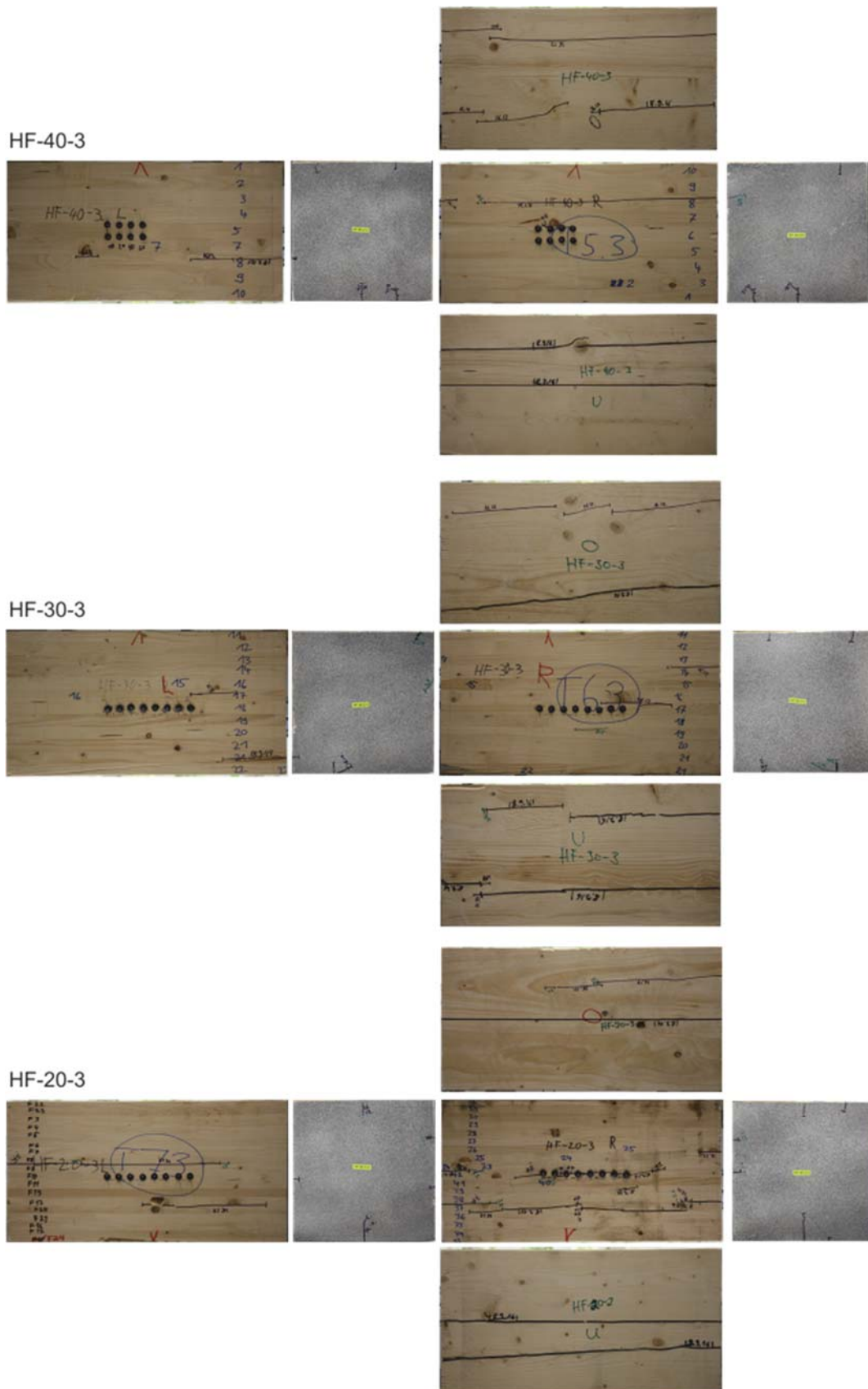
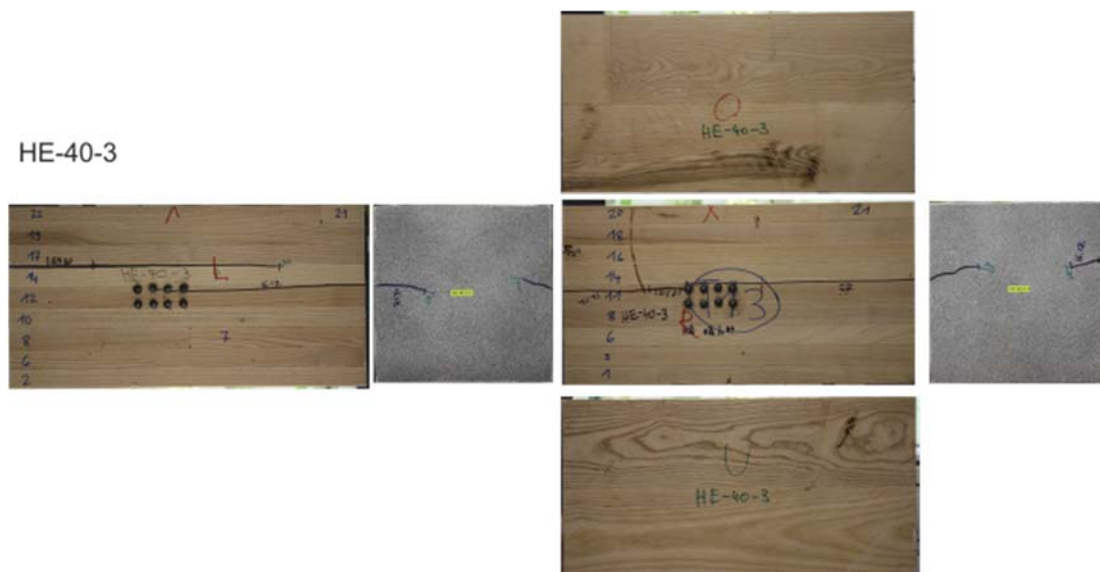
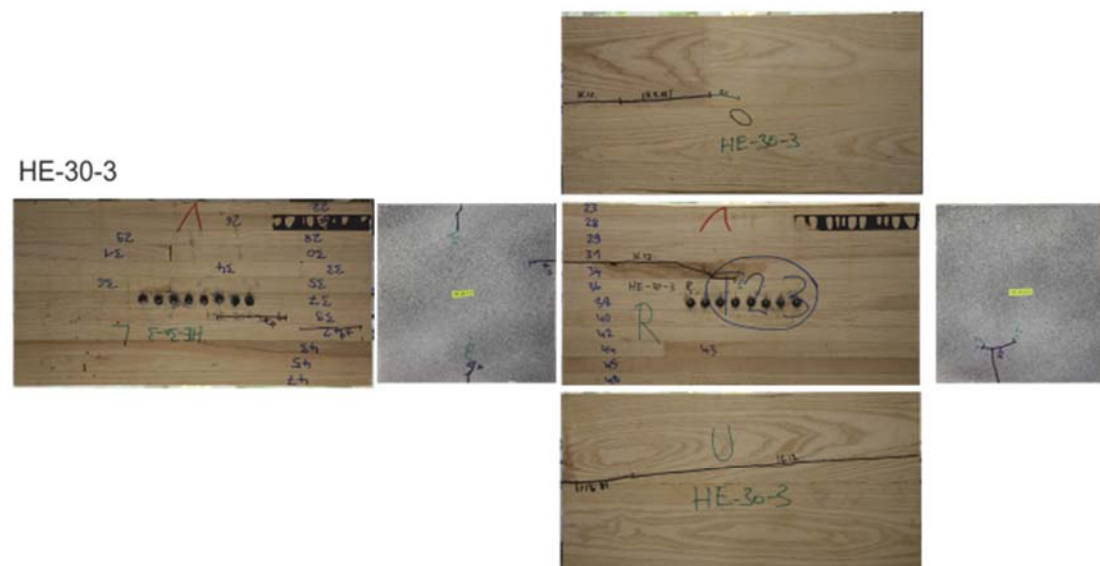


Abbildung 92: Schädigungsentwicklung in homogenen Fichteproben mit 40,30,20mm Lamellen im Trockenschrank.

HE-40-3



HE-30-3



HE-20-3



Abbildung 93: Schädigungsentwicklung in homogenen Escheproben mit 40,30,20mm Lamellen im Trockenschrank.

HYEF1-40-3



HYEF2-40-3



HYEF3-40-3

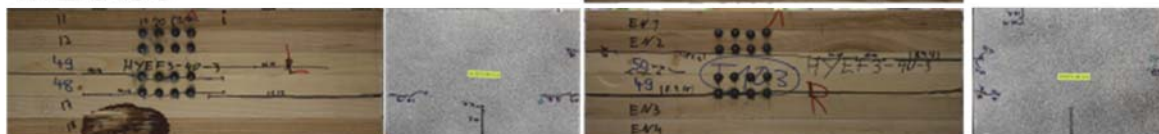


Abbildung 94: Schädigungsentwicklung in hybriden Fichte/Escheproben mit 40mm Lamellen im Trockenschrank.

IHE-40-3

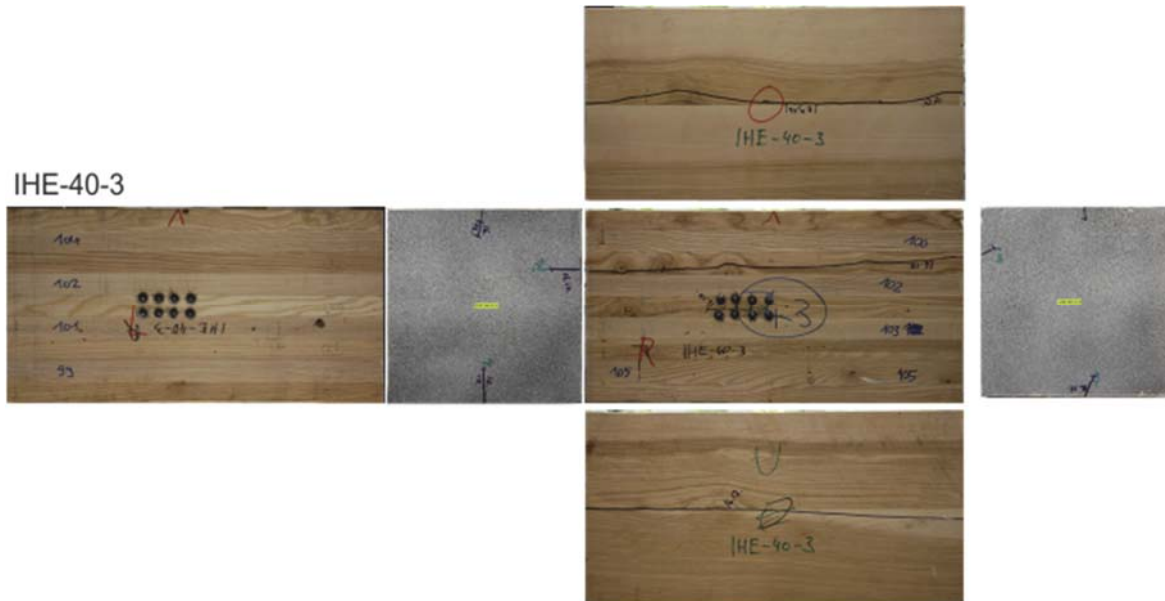


Abbildung 95: Schädigungsentwicklung in inhomogenen Eschenproben mit 40mm Lamellen im Trockenschrank.

8.5.3. Spannungsprofile der Delamiantionsproben

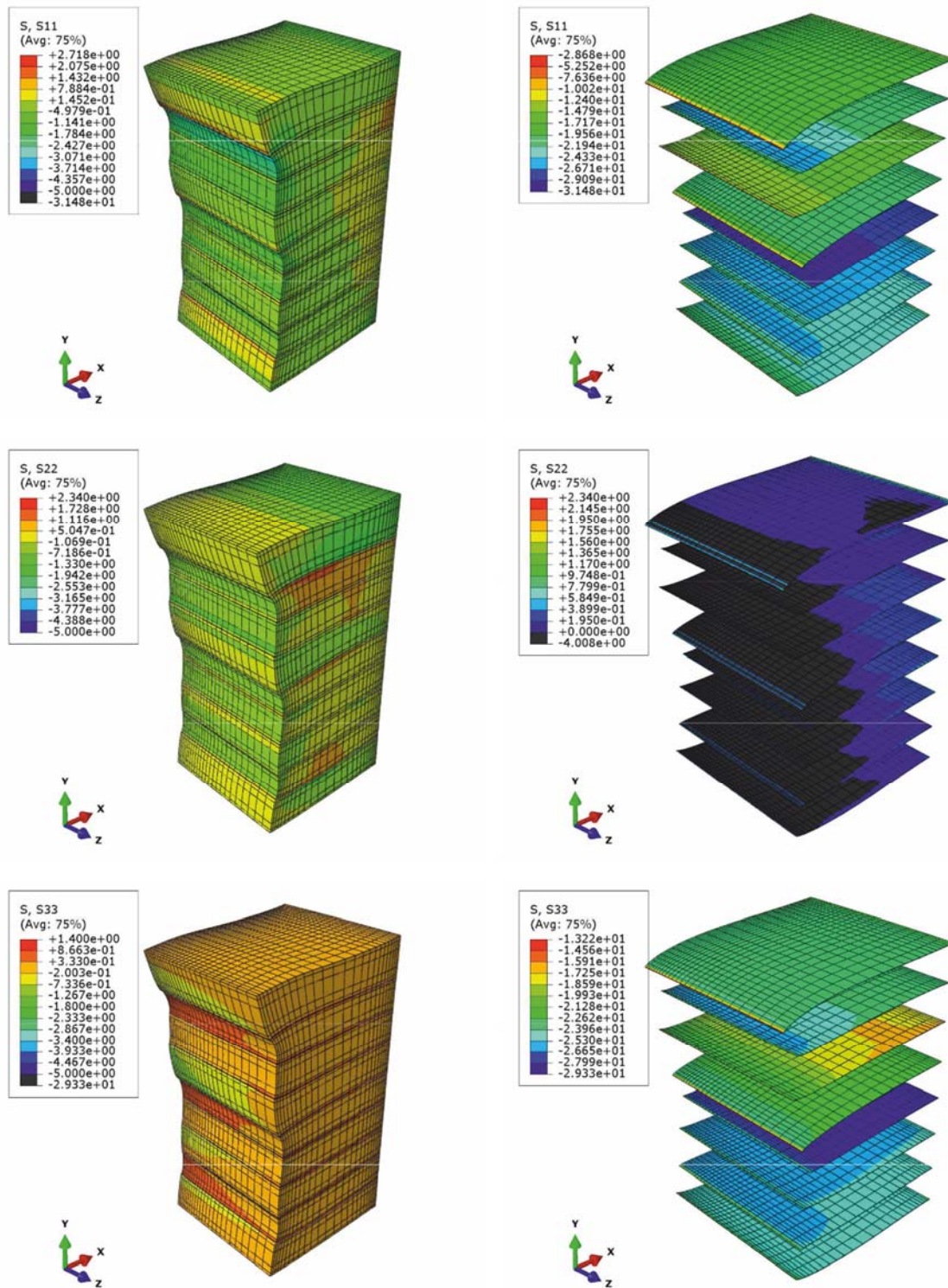


Abbildung 96: Spannungen der Probe HE40-1 zum Zeitpunkt $t=7238h$. Die Deformationen sind mit einem Überhöhungsfaktor von 57.8 dargestellt.

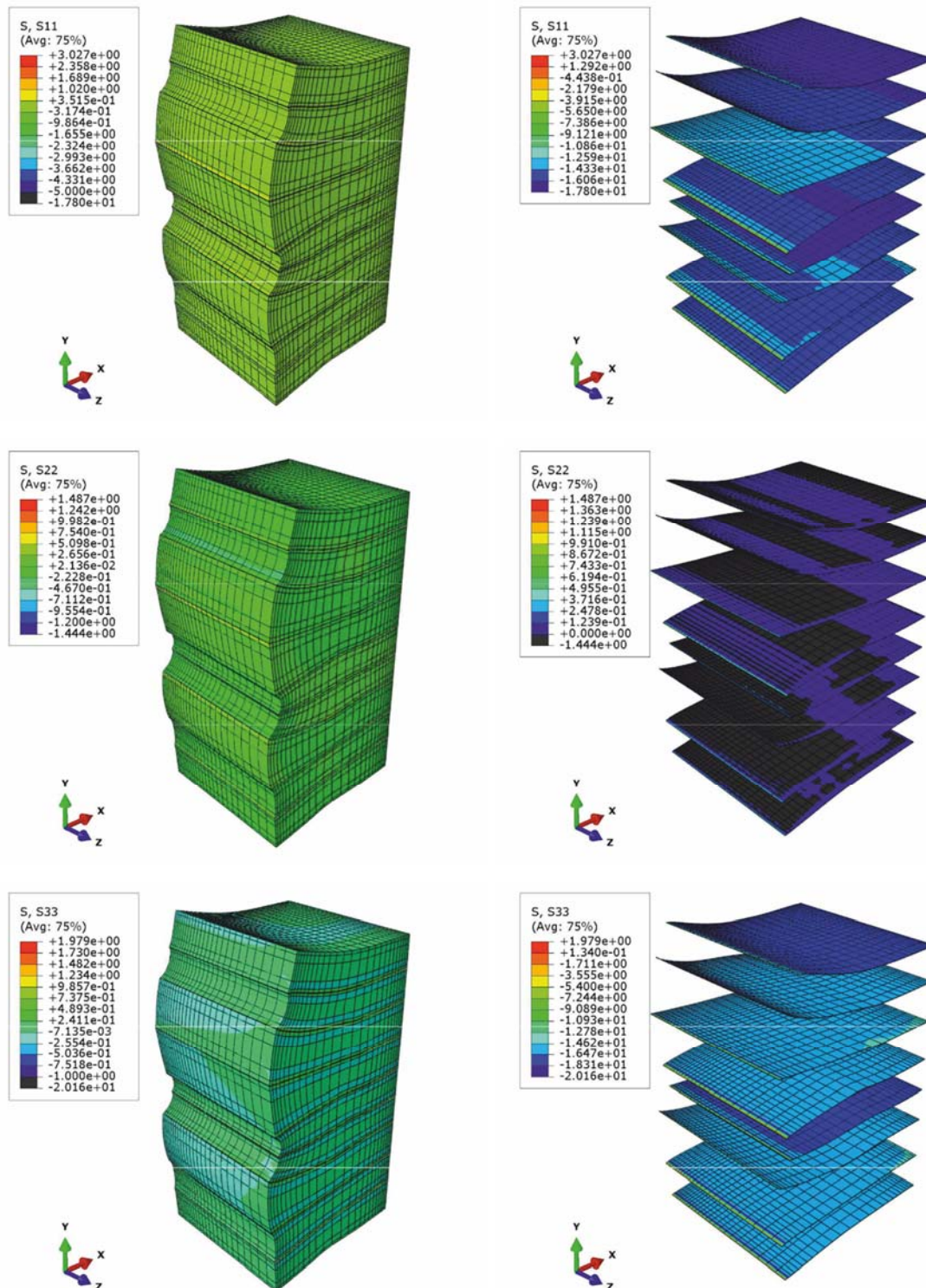


Abbildung 97: Spannungen der Probe HF40-1 zum Zeitpunkt $t=7238h$. Die Deformationen sind mit einem Überhöhungsfaktor von 222.6 dargestellt.

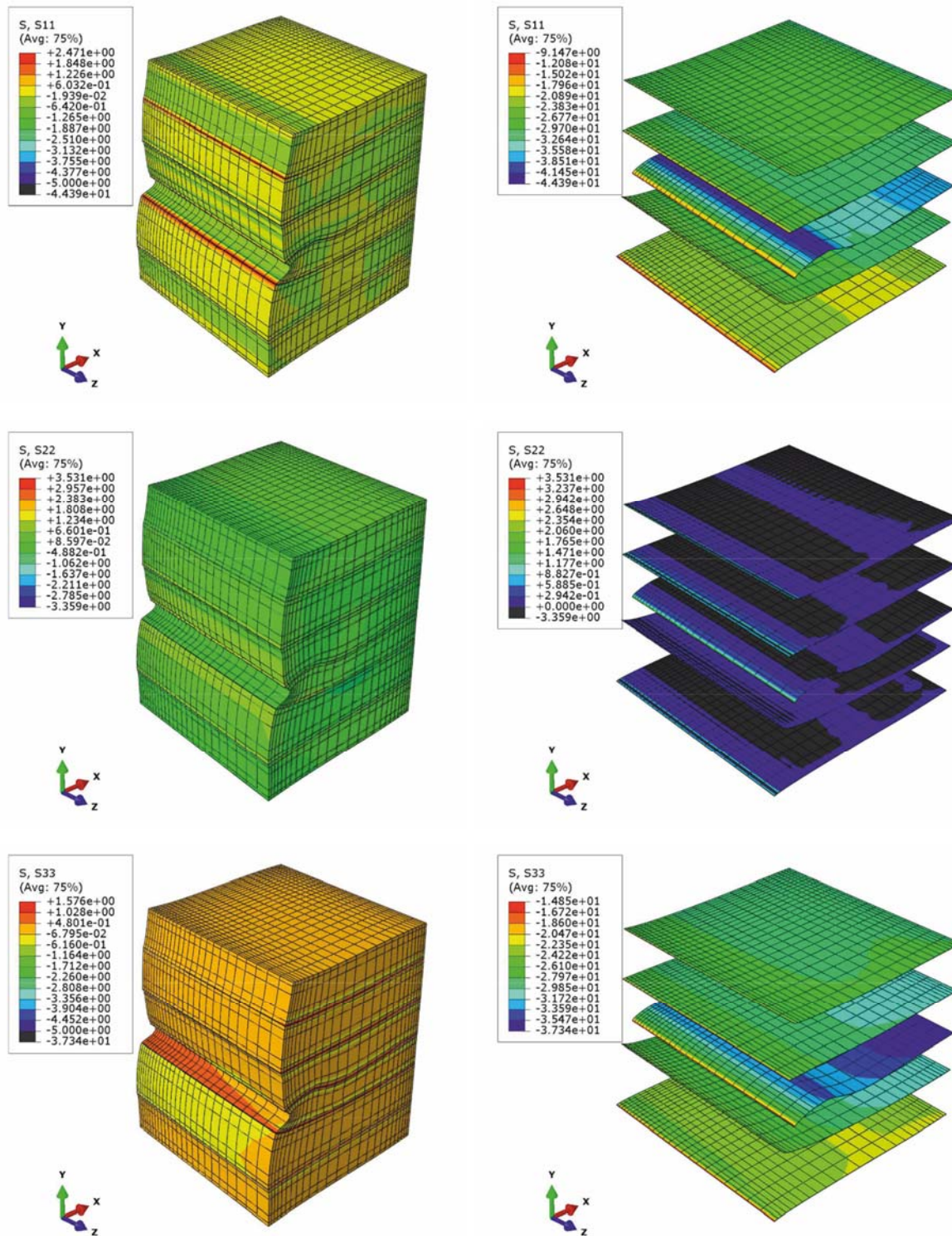


Abbildung 98: Spannungen der Probe HYE2-1 zum Zeitpunkt t=7238h. Die Deformationen sind mit einem Überhöhungsfaktor von 77.9 dargestellt.

Tabelle 41: Maximale und minimale Spannungen der Proben der Versuchsreihe 1 und 3.

Proben	Richtung	max. Spannung [N/mm ²]	min. Spannung [N/mm ²]
HF-40-1	S11	3,03	-17,80
	S22	1,49	-1,44
	S33	1,98	-20,16
HE-40-1	S11	2,72	-31,48
	S22	2,34	-4,01
	S33	1,40	-29,33
HF-30-1	S11	4,59	-23,98
	S22	1,69	-1,52
	S33	2,37	-22,02
HE-30-1	S11	5,46	-60,31
	S22	6,32	-2,66
	S33	2,78	-47,02
HF-20-1	S11	2,65	-33,53
	S22	2,28	-1,37
	S33	1,96	-26,82
HE-20-1	S11	2,26	-31,91
	S22	2,14	-2,80
	S33	2,08	-30,90
IHE-40-1	S11	2,69	-34,93
	S22	3,93	-4,05
	S33	3,15	-31,57
HYEF1-40-1	S11	2,96	-50,81
	S22	3,57	-2,50
	S33	1,82	-38,77
HYEF2-40-1	S11	2,47	-44,39
	S22	3,53	-3,36
	S33	1,58	-37,34
HF-40-3	S11	6,58	-70,92
	S22	8,76	-3,89
	S33	32,81	-27,75
HE-40-3	S11	15,05	-62,24
	S22	18,84	-7,56
	S33	19,95	-38,82
HF-30-3	S11	11,06	-72,47
	S22	6,12	-3,56
	S33	33,91	-28,01
HE-30-3	S11	18,39	-69,48
	S22	20,94	-5,66
	S33	17,38	-45,00
HF-20-3	S11	19,39	-62,05
	S22	9,22	-3,79
	S33	35,79	-26,86
HE-20-3	S11	12,44	-60,90
	S22	14,40	-4,01
	S33	22,91	-40,91
IHE-40-3	S11	13,09	-70,12
	S22	17,07	-3,43
	S33	19,19	-28,14
HYEF1-40-3	S11	10,85	-97,03
	S22	13,60	-5,93
	S33	20,87	-42,15
HYEF2-40-3	S11	5,73	-68,53
	S22	12,75	-4,75
	S33	21,00	-39,93

8.5.4. Optimierungsergebnisse mit alternativer Zielfunktion

Tabelle 42: Zusammenfassung der Gewichtungsfaktoren und Ergebnisse der Optimierungen mit der maximalen Spannung als Zielgrösse.

Faktoren (a, b, c)	Parameter	Optimum	max. Spannung [N/mm ²]	Masse [kg]	Höhe [mm]	Zeit [s]
0,33 0,33 0,33	(2, 4, 30.30)	86.82	17,70	4,19	241,2	78887
0,45 0,20 0,35	(2, 4, 30.08)	93.24	17,65	4,18	241,3	81307
0,60 0,20 0,20	(0, 8, 20.00)	58.83	9,87	3,55	261	64440