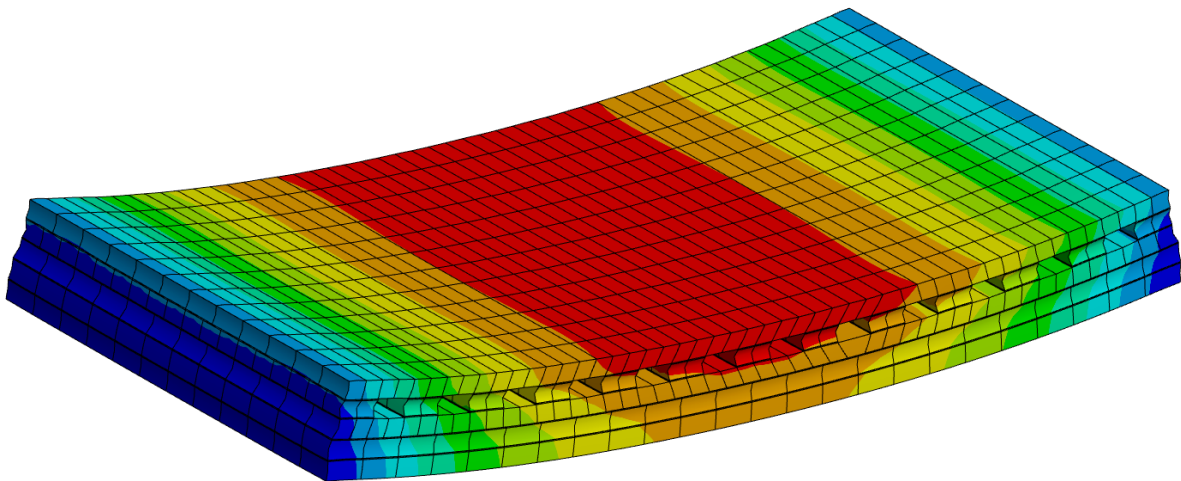


## **Verformungsverhalten von thermisch aktiviertem Brettsperrholz unter nutzungsbedingten Feuchtigkeitsänderungen**

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades **Master of Science** an der Ingenieurfacultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München.



<b>Lehrstuhl</b>	Technische Universität München Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
<b>Verfasser</b>	David Fochler
<b>Betreuer</b>	Matthias Arnold, M.Sc.
<b>Eingereicht am</b>	31. März 2021, in München

## **Kurzfassung „Verformungsverhalten von thermisch aktiviertem Brettspertholz unter nutzungsbedingten Feuchtigkeitsänderungen“**

Im Rahmen des Forschungsprojektes InnoCrossLam werden thermisch aktivierbare Brettspertholz-Elemente entwickelt. Um die tragenden Holzbauteile als Flächenheiz- bzw. -kühlsysteme verwenden zu können, durchströmt vorkonditionierte Luft die integrierten Kanäle. Je nachdem, welche klimatischen Bedingungen dabei herrschen, erfährt das Holz eine Befeuchtung oder Trocknung. Dies resultiert wiederum in einer entsprechenden Quell- oder Schwindverformung. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit diesen Verformungsverhalten, sowie den dadurch entstehenden Rissen, welche die Funktionsfähigkeit der thermischen Aktivierung gefährden.

Zunächst wurde eine experimentelle Untersuchung unterschiedlicher klimatischer Bedingungen an fünf multifunktionalen Prüfkörpertypen und einer Referenzserie durchgeführt. Die dabei aufgezeichneten Messwerte zeigen, dass die Bauteile das theoretische Verhalten widerspiegeln, und dass der Heizbetrieb zu Schwindrissen in der Decklage führen kann.

Um weitergehende Betrachtungen zu ermöglichen, wird ein Finite-Elemente-Modell mit dem Programm ANSYS Workbench entwickelt. Zur Validierung der erstellten Simulationen werden die klimatischen Bedingungen des Experiments angewendet. Der Vergleich der numerischen Berechnung mit den gemessenen Feuchtigkeitsverteilungen, Verformungen und Rissbildungen bestätigt die akzeptable Darstellung der Wirklichkeit durch das Modell.

Im Anschluss daran werden die Auswirkungen weiterer Klimata auf vier der sechs Prüfkörpertypen simuliert. Im Gegensatz zu den experimentellen Untersuchungen erfolgt eine Unterscheidung zwischen den Bedingungen in den Luftkanälen zu denen in der Umgebung. Durch entsprechende Kombinationen ist die Simulation eines zum einen normalen und zum anderen extremen Heiz- bzw. Kühlbetriebes, sowie einem Heiz- und Kühlszenario unter extrem trockenem bzw. feuchtem Raumklima, möglich. Des Weiteren wird die reale Strömungsgeschwindigkeit in den Luftkanälen bei einer praktischen Nutzung berücksichtigt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die raumseitigen Lagen einen maßgeblichen Einfluss auf das Verformungsverhalten haben. So schwinden und quellen die Serien, deren Decklagen aus Weißtannen-Lamellen bestehen, stärker als jene, deren äußerste Schicht eine dreilagige Massivholzplatte ist. Die vorwiegende Krümmung des Bauteils orientiert sich stets an der Ausrichtung der Decklage. Die eigentliche Problematik ist jedoch die Bildung von Rissen, da sie die Luftdichtheit und somit die Funktionsfähigkeit der thermischen Aktivierung gefährden. Bereits der normale Heizbetrieb führt zu einem Überschreiten der Querkzugfestigkeiten an der Innenseite der Decklagen. In der Durchführung von Extrembedingungen sind Spannungen zu beobachten, die auf starke Rissbildung an der Innenseite und teilweise auch an der Außenseite der Decklagen schließen lassen. Dieses Verhalten zeigen alle betrachteten Prüfkörpertypen. Die Untersuchungen schließen jedoch die Serie M-4 aus, da deren Prüfkörpertyp keine Decklage aufweist. Diesem Umstand verdankt sie eine insgesamt geringe Verformung sowie das Ausbleiben von Rissen. Ein vielversprechender Forschungsansatz für die Zukunft ist daher die Weiterentwicklung dieser Serie mit Decklagen, welche Alternativen zu Holzwerkstoffen darstellen.

## **Abstract „ Deformation behavior of thermally activated cross laminated timber under service-related moisture changes “**

As part of the InnoCrossLam research project thermally activated cross laminated timber elements are developed. To be able to use the load-bearing wooden components as surface heating or cooling systems, preconditioned air flows through the integrated channels. Depending on the prevailing climatic conditions, the wood is either moistened or dried. This in turn results in a corresponding swelling or shrinkage deformation. The present thesis deals with these deformations and the resulting cracks, which endanger the functionality of the thermal activation.

First, an experimental investigation of different climatic conditions was carried out on five series of multifunctional specimens and one reference series. The recorded measurements show that the components reflect the theoretical behaviour and that the heating operation can lead to shrinkage cracks in the top layer.

To enable further considerations, a finite element model is developed using the program ANSYS Workbench. The climatic conditions of the experiment are used to validate the simulations. The comparison of the numerical calculations with the measured moisture distributions, deformations and crack formations confirms the acceptable representation of the reality by the model.

Subsequently, the effects of further climates are calculated for four of the six specimens. In contrast to the experimental investigations, a distinction is made between the conditions in the air ducts and those in the environment. The simulation of a normal and an extreme heating or cooling operation, as well as a heating and cooling scenario under an extremely dry or humid room climate, is possible through corresponding combinations. Furthermore, the air velocity in the air ducts during real use is taken into account.

The results show that the top layers have a significant influence on the deformation behaviour. Thus, the series whose front layers consist of silver fir shrink and swell more than those whose top layer is a solid wood panel. The dominant curvature of the component is always oriented to the alignment of the top layer. However, the real problem is the formation of cracks, as they endanger the air tightness and thus the functionality of the thermal activation. Even the normal heating operation leads to the exceeding of the transverse tensile strengths on the inside of the front layers. With the implementation of extreme conditions, stresses can be observed that indicate strong cracking on the inside and partly also on the outside of the top layers. This behaviour is shown by all types of specimens considered. The investigations exclude the series M-4 because its test specimens have no covering layer. This circumstance is responsible for the overall low deformation and the absence of cracks. A promising research approach for the future is therefore the further development of this series with top layers, which represent an alternative to wooden materials.

## Symbole und Abkürzungen

### Lateinische Großbuchstaben

$C_1, C_2, C_3$	Formfaktoren des Klebstoff-Diffusionskoeffizienten	[m <sup>2</sup> /s] / [-]
$D$	Diffusionskoeffizient	[m <sup>2</sup> /s]
$D_{adh}$	Diffusionskoeffizient des Klebstoffes	[m <sup>2</sup> /s]
$D_b$	Diffusionskoeffizient für gebundenes Wasser in den Zellwänden	[m <sup>2</sup> /s]
$D_L$	Diffusionskoeffizient in longitudinaler Richtung	[m <sup>2</sup> /s]
$D_R$	Diffusionskoeffizient in radialer Richtung	[m <sup>2</sup> /s]
$D_T$	Diffusionskoeffizient in tangentialer Richtung	[m <sup>2</sup> /s]
$D_v$	Diffusionskoeffizient des Wasserdampfes in der Luft	[m <sup>2</sup> /s]
$J$	Teilchenstrom	[kg/m <sup>2</sup> s]
$S$	Oberflächenemissionskoeffizient	[m/s]
$S_K$	Oberflächenemissionskoeffizient im Luftkanal	[m/s]
$S_O$	Oberflächenemissionskoeffizient an der Sichtoberfläche	[m/s]
$T$	Temperatur	[K]

### Lateinische Kleinbuchstaben

$b_{15}$	Berechnete Holzfeuchtigkeit in angegebener Tiefe in Millimeter	[%]
$b_{z2}$	Berechneter Stich in z-Richtung der Verkrümmung im angegebenen Messpunkt	[mm]
$c$	Stoffmengenkonzentration	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\dot{c}$	Sorptionsrate	[kg/m <sup>3</sup> s]
$c_b$	Feuchtigkeitskonzentration des gebundenen Wassers	[kg/m <sup>3</sup> ]
$c_D$	Wasserdampfkonzentration	[kg/m <sup>3</sup> ]
$c_S$	Wasserdampfsättigungskonzentration	[kg/m <sup>3</sup> ]

$c_v$	Feuchtigkeitskonzentration im Wasserdampf	[kg/m <sup>3</sup> ]
$c_\rho$	Spezifische Wärmekapazität	[Ws/kgK]
$f_{t,90,NH}$	Querzugfestigkeit des Nadelholzes	[MPa]
$f_{t,90,SWP\_12}$	Querzugfestigkeit der Oberfläche der 12 mm starken Massivholzplatte	[MPa]
$f_{t,90,SWP\_19}$	Querzugfestigkeit der Oberfläche der 19 mm starken Massivholzplatte	[MPa]
$f_{t,rad}$	Querzugfestigkeit in radialer Richtung	[MPa]
$f_{t,tan}$	Querzugfestigkeit in tangentialer Richtung	[MPa]
$h$	Wärmeübergangskoeffizient	[W/m <sup>2</sup> K]
$h_K$	Wärmeübergangskoeffizient im Luftkanal	[W/m <sup>2</sup> K]
$l$	Abmessung eines Bauteils: Länge, Breite oder Höhe	[m]
$m_0$	Masse des Holzes im darrtrockenen Zustand	[kg]
$m_{15}$	Messwert der Holzfeuchtigkeit in angegebener Tiefe in Millimeter	[%]
$m_u$	Masse des Holzes vor dem Trocknen	[kg]
$n$	Normalenvektor	[-]
$p_1, p_2$	Dampfdruck	[hPa]
$p_D$	Wasserdampfpartialdruck	[hPa]
$p_S$	Wasserdampfsättigungsdruck	[hPa]
$r$	Porenradius	[µm]
$u$	Holzfeuchtigkeit	[%]
$u_{air}$	Ausgleichsfeuchte in Abhängigkeit zur relativen Luftfeuchtigkeit	[-]
$u_{surf}$	Holzfeuchtigkeit an der Bauteiloberfläche	[-]
$w_{z2}$	Gemessener Stich in z-Richtung der Verkrümmung im angegebenen Messpunkt	[mm]

*Griechische Buchstaben*

$\alpha$	Temperaturleitfähigkeit	[m <sup>2</sup> /s]
$\alpha$	differentielles Quellmaß	[%/% $\Delta u$ ]
$\alpha_{\perp}$	Quellmaß senkrecht zur Plattenebene	[%/% $\Delta u$ ]
$\alpha_{\parallel}$	Quellmaß in Plattenebene	[%/% $\Delta u$ ]
$\beta$	differentielles Schwindmaß	[%/% $\Delta u$ ]
$\Delta l_{Q,S}$	Längenänderung eines Bauteils infolge Quellens oder Schwindens	[m]
$\Delta u$	Holzfeuchtigkeitsänderung	[%]
$\varepsilon_{Q,S}$	Dehnung infolge Quellens oder Schwindens	[%]
$\theta$	Lufttemperatur	[°C]
$\theta$	Randwinkel	[°]
$\theta_s$	Taupunkttemperatur	[°C]
$\vartheta_1, \vartheta_2$	Temperatur	[K]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]
$\rho$	Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_t$	Berechnete Zugspannung quer zur Faser	[MPa]
$\sigma_{t,90}$	Querzugspannungen	[MPa]
$\sigma_{c,90}$	Querdruckspannungen	[MPa]
$\varphi$	relative Luftfeuchtigkeit	[%]
$\varphi_1, \varphi_2$	Feuchtekonzentration	[%]

### Mathematische Operatoren

$\nabla$	Nabla-Operator; Differentiation in alle drei Raumrichtungen x, y, z	
$\frac{\partial c}{\partial x}$	Konzentrationsgradient in x-Richtung	[kg/m <sup>4</sup> ]
$\frac{\partial c}{\partial t}$	Veränderung der Konzentration c über die Zeit t	[kg/m <sup>3</sup> s]
$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$	Krümmung des Konzentrationsfeldes in x-Richtung, gilt entsprechend für y und z	[kg/m <sup>5</sup> ]
$\frac{\partial T}{\partial t}$	Veränderung der Temperatur T über die Zeit t	[W/m <sup>3</sup> s]
$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$	Krümmung des Temperaturfeldes in x-Richtung, gilt entsprechend für y und z	[W/m <sup>5</sup> ]

### Koordinatensysteme

x, y, z	kartesisches Koordinatensystem x – Hauptrichtung des Bauteils, längs zur Faser y – Nebenrichtung des Bauteils, quer zur Faser z – Dicke des Bauteils
L, R, T	orthotropes Koordinatensystem L – Longitudinale Richtung, entlang der Stamm- oder Faserrichtung R – Radiale Richtung, entlang des Radius der Jahrringe T – Tangentiale Richtung, entlang der Tangente der Jahrringe

### Abkürzungen

1K-PUR	Einkomponenten-Polyurethan-Klebstoff
BSP	Brettsperrholz
CLT	Cross laminated timber, englisch für Brettsperrholz
FEM	Finite-Elemente-Methode

InnoCrossLam	Innovative Solutions for Cross Laminated Timber Structures
M	Multifunktional
NH	Nadelholz
NKL	Nutzungsklasse
O	Orthogonal
rel. LF.	Relative Luftfeuchtigkeit
SWP	Solid Wood Panel, englisch für Massivholzplatte
V, (V)	Gehinderte Verformung, bezogen auf Prüfkörper
X-Lam	Cross laminated timber, englisch für Brettsperrholz



## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	10
1.1	Einordnung des Themas .....	10
1.1.1	Forschungsprojekt InnoCrossLam .....	10
1.1.2	Thermische Aktivierung zur Raumklimakonditionierung.....	11
1.2	Ziel und Methodik der Arbeit.....	12
2	Stand des Wissens und der Forschung .....	14
2.1	Anatomie des Holzes.....	14
2.1.1	Makrostruktur.....	14
2.1.2	Mikroskopischer Aufbau .....	15
2.1.3	Submikroskopischer Aufbau .....	16
2.2	Bauphysikalische Begriffe und Definitionen bezüglich Feuchte .....	18
2.2.1	Relative Luftfeuchtigkeit.....	18
2.2.2	Taupunkttemperatur .....	18
2.2.3	Holzfeuchtigkeit .....	19
2.3	Feuchtigkeitstransport in Holz .....	20
2.3.1	Wassertransport in porösen Materialien.....	20
2.3.2	Sorption und Desorption .....	20
2.3.3	Fick'sche Diffusion.....	22
2.3.4	Non-Fickian Verhalten von Holz.....	25
2.3.5	Transport von flüssigem Wasser.....	28
2.4	Feuchteinduzierte Prozesse und Verhalten von Holz.....	29
2.4.1	Quellen und Schwinden.....	29
2.4.2	Feuchteinduzierte Spannungen im Holz .....	31

2.5	Aufbau von Brettsperrholz und Verhalten gegenüber Feuchtigkeit .....	32
2.5.1	Definition und Fertigungsprozess.....	32
2.5.2	Feuchtigkeitstransport in Brettsperrholz.....	33
2.5.3	Feuchteinduzierte Verformungen und Spannungen von Brettsperrholz .....	34
2.6	Thermisch aktiviertes Brettsperrholz.....	35
3	Experimentelle Untersuchungen.....	38
3.1	Aufbau und Herstellung der Prüfkörper.....	38
3.2	Versuchsdurchführung .....	41
3.3	Ergebnisse .....	44
3.3.1	Holzfeuchtigkeit und Verformung.....	44
3.3.2	Rissbildung.....	53
4	Finite-Elemente-Berechnung .....	58
4.1	Methodik.....	58
4.1.1	Aufbau des Modells .....	58
4.1.2	Geometrie und Netzgenerierung.....	59
4.1.3	Materialkennwerte und Eingabeparameter .....	61
4.1.4	Beschreibung der verwendeten Analyse-Tools .....	64
4.2	Validierung des Modells .....	66
4.2.1	Berechnete Holzfeuchtigkeitsverteilung .....	66
4.2.2	Vergleich der resultierenden Verformungen.....	79
4.2.3	Maximale Spannungen und Ableitung der Rissbildung .....	85
4.2.4	Diskussion der Berechnungen .....	89
5	Verhalten unter normalen und extremen Nutzungsbedingungen .....	92
5.1	Anpassungen des Finite-Elemente-Modells.....	92

5.2	Ergebnisse .....	94
5.2.1	Holzfeuchtigkeitsverteilung .....	94
5.2.2	Feuchteinduzierte Verformungen.....	97
5.2.3	Spannungen und Risse .....	101
5.3	Diskussion.....	106
6	Zusammenfassung und Ausblick .....	108
6.1	Ergebnisse und Fazit.....	108
6.2	Ausblick und Forschungsbedarf.....	110
7	Literaturverzeichnis .....	111
8	Abbildungsverzeichnis .....	117
9	Tabellenverzeichnis.....	123
10	Anhang.....	124

# 1 Einleitung

## 1.1 Einordnung des Themas

### 1.1.1 Forschungsprojekt InnoCrossLam

Während Holz eines der ältesten Baumaterialien der Menschheitsgeschichte ist, handelt es sich bei Brettsperrholz (BSP) um einen vergleichsweise jungen Werkstoff. Die ersten Entwürfe, Konzepte und Patente zu BSP wurden mit dem Beginn der 1990er Jahre in Fachzeitschriften vorgestellt. Innerhalb des folgenden Jahrzehnts wurden darauf aufbauend Prototypen und Zulassungen entwickelt. Mit dem Anfang der 2000er Jahre bewährte sich BSP bei kleineren Projekten und fand infolge dessen auch immer häufiger Verwendung in größeren Bauvorhaben (Gustafsson et al., 2019). Heutzutage ist BSP ein etabliertes Produkt, welches den Bau der ersten Hochhäuser aus Holz ermöglicht hatte (Kaufmann, Krötsch, & Winter, 2017). Die nachgefragte Menge und die Produktion von BSP wächst jährlich, wie Abbildung 1.1 zeigt.

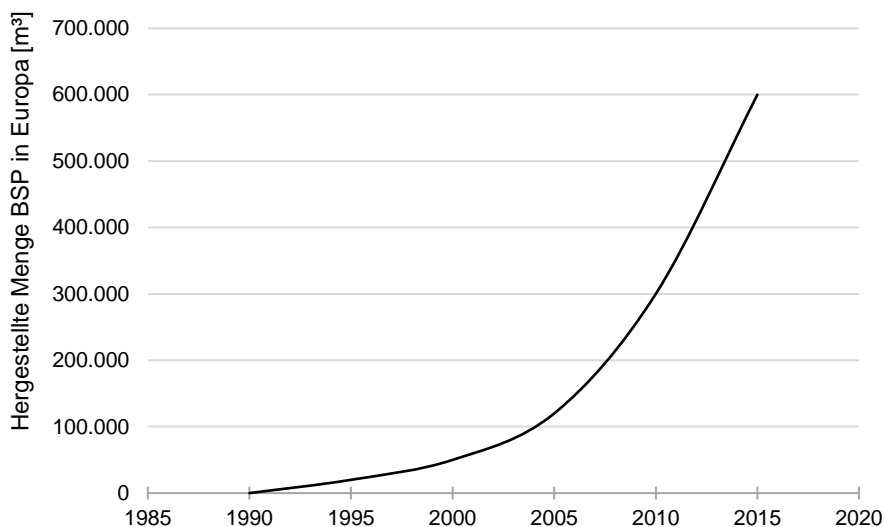


Abbildung 1.1: Entwicklung der Brettsperrholzproduktion in Europa (Gustafsson et al., 2019)

Um die Einsatz- und Optimierungsmöglichkeiten von BSP weiterzuentwickeln, wurde das Forschungsprojekt „Innovative Solutions for Cross Laminated Timber Structures“ (InnoCrossLam) ins Leben gerufen. Dessen Ziel ist es aus der bewährten, aber vergleichsweise simplen, Holzplatte ein auch in Zukunft wettbewerbsfähiges Produkt zu entwickeln (Azinović et al., 2020). In diesem Rahmen untersuchen fünf europäische Universitäten und mehrere Vertreter der Bauwirtschaft komplexe Anwendungsmöglichkeiten, für welche es bisher keine Lösungen aus BSP oder Holz gibt. Das Ziel ist es zu jeder Thematik wissenschaftlich fundierte Grundlagen zu schaffen, anhand derer Bemessungsregeln abgeleitet werden (Azinović, 2019). Diese sollen im weiteren Verlauf zu neuen Normen und Richtlinien ausgearbeitet werden können. Durch Experimente, numerische Simulationen,

theoretische Erarbeitung und Modellierungen werden von den Universitäten folgende Themengebiete behandelt (Azinović, 2019):

- Numerische und mechanische Untersuchung von Struktur und Eigenschaften der Komponenten und Verbindungen
- Statischer Entwurf weitgespannter BSP-Elemente
- Entwicklung von BSP-Balken unter punktueller Belastung
- Materialverhalten und Spannungs-Singularitäten
- Verhalten von BSP-Systemen unter seismischen Belastungen
- Entwicklung von BSP-Wänden mit großen Öffnungen
- Untersuchung punktgelagerter BSP-Platten
- Thermische Aktivierung von BSP

An der Technischen Universität München führt der Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion die Forschung zur thermischen Aktivierung von Brettsperrholz durch. Im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtungen werden hierbei folgende Aspekte untersucht (Arnold, 2020):

- Mechanischer Widerstand und Stabilität
- Verhalten im Brandfall
- Hygiene, Gesundheit & Umwelt
- Sicherheit und Zugänglichkeit im Gebrauch
- Schallschutz
- Energieeinsparung und Wärmespeicherung
- Nachhaltiger Verbrauch von Ressourcen

Als Teil der Mechanik und Stabilität wird auch die Formbeständigkeit, also das Verformungsverhalten unter Feuchtigkeitsänderung, betrachtet.

### 1.1.2 Thermische Aktivierung zur Raumklimakonditionierung

Eine Gebäudenutzung unter thermisch behaglichen Bedingungen erfordert, vor allem in den nördlichen Breitengraden, die geregelte Zufuhr von Heizwärme. Systeme zur Beheizung bestehen meist aus einer Vielzahl an Komponenten, wie der Wärmegewinnung, dem Transport und der Übergabe am Zielort. Entsprechend lassen sich Heizsysteme nach verschiedensten Gesichtspunkten kategorisieren, z.B. nach der Zentralität, der Regelungstechnik oder dem Wärmeträgermedium (Krimmling, Deutschmann, Preuß, & Renner, 2014). Eine weitere Unterteilung ist die der Raumheizungseinrichtungen, mit welchen die Raumlufttemperatur üblicherweise temperiert wird, in freie und baukörperintegrierte Heizflächen. Bei den freien Heizflächen handelt es sich um Heizkörper, welche innerhalb eines Raumes angeordnet sind und durch Konvektion (Konvektoren und Radiatoren) oder Strahlung (Plattenheizkörper und Deckenstrahlplatten) die Wärme übertragen (Krimmling et al., 2014). Die baukörperintegrierten Heizkörper hingegen sind in der Regel über die Fläche gesamter Bauteile

angeordnet, weshalb sie auch ‚Flächenheizungen‘ genannt werden. Dabei findet die Wärmeübertragung maßgeblich über Strahlungsaustausch statt. Bei der Fußboden-, Wandflächen- und Deckenheizung befinden sich die Heizungsrohre stets im nichttragenden Aufbau, z.B. im Estrich, im Lehmputz oder in der Deckenabhängung (Binsfeld, 2019). Davon abzugrenzen sind die thermoaktiven Bauteile, auch ‚thermische Bauteilaktivierung‘ oder ‚thermisch aktivierte Bauteilsysteme‘ genannt. Darunter werden alle raumabschließenden Bauteile verstanden, die durch aktive interne Temperierung zur Raumklimakonditionierung verwendet werden. Die Einbindung der thermischen Speichermasse führt dazu, dass die Bauteile gleichzeitig als aktive Wärmeübertragungsfläche und als passiver thermischer Speicher dienen (Mindrup, 2020). Die thermische Bauteilaktivierung weist, wie alle Raumheizeinrichtungen, sowohl Vor- als auch Nachteile auf, welche in Tabelle 1.1 zusammenfasst sind. Der aktuelle Stand der Technik sind Systeme zur Aktivierung von Betonkernen. Jedoch wurde die Machbarkeit von thermisch aktivierten Massivholzelementen durch zwei Forschungsprojekte und der Dissertation von Mindrup (2020) nachgewiesen, siehe Kapitel 2.6. Auf den dort gewonnen Erkenntnissen bauen die Untersuchungen im Rahmen der Forschungsinitiative InnoCrossLam und der vorliegenden Arbeit auf.

Tabelle 1.1: Vor- und Nachteile von thermisch aktivierten Bauteilen als Heizkörper (Binsfeld, 2019)

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gleichmäßiges Temperaturprofil über die Raumhöhe mit milder Strahlungswärme → angenehmes Raumklima</li> <li>• Große Heizflächen → lediglich geringe Oberflächentemperaturen erforderlich</li> <li>• Niedrige Vorlauftemperaturen → umweltfreundlicher und nachhaltiger Einsatz von Energien möglich</li> <li>• Keine Heizkörper im Rauminnen → Platzersparnis</li> <li>• Wärmestrahlende Flächen erhöhen Empfindungstemperatur → günstige raumlufthygienische Verhältnisse &amp; Energieeinsparung</li> <li>• Kühlung mit gleichem System ebenfalls möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Träge Systeme → schlecht regelbar</li> <li>• Erhöhte Kosten durch Koordination, Montage und Überwachung beim Bau</li> <li>• Eingeschränkte Änderungsmöglichkeiten der Wärmeleitung oder der Raumaufteilung</li> <li>• Schlechte Reparaturmöglichkeiten</li> </ul>

## 1.2 Ziel und Methodik der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist ein Teil des Forschungsprojektes InnoCrossLam. Im Zuge dieses Vorhabens werden die Auswirkungen einer thermischen Aktivierung auf die BSP-Elemente selbst untersucht. Denn die thermische Bauteilaktivierung von Massivholz erfolgt über eingefräste Kanäle innerhalb des Querschnittes, welche von temperierter Luft durchströmt werden. Da während einer

Heizperiode die durchströmende Luft warm und trocken ist, führt das zu einer Trocknung des Holzes von innen heraus. Umgekehrt ist während einer Kühlperiode die Lufttemperatur innerhalb des Querschnittes niedrig und die relative Feuchtigkeit hoch, was in einer Befeuchtung des Holzes resultiert. In beiden Fällen finden also Feuchtewechsel im Holz statt. Damit einher geht in der Regel eine Quell- oder Schwindverformung, die bis zur Rissbildung führen kann. Demnach stellt sich bei der Entwicklung thermisch aktivierter Massivholzelemente im Rahmen von InnoCrossLam die folgende Frage: Wie verformt sich thermisch aktiviertes Brettsperrholz unter nutzungsbedingten Feuchtigkeitsänderungen und welche Auswirkungen hat dies für die Funktionsfähigkeit als Heiz- und Kühlsystem? Das Ziel der Thesis ist es, unter zur Hilfenahme der Finite-Elemente-Methode (FEM), diese Fragestellung zu beantworten. Das dafür gewählte methodische Vorgehen wird nachfolgend dargelegt. Im Anschluss an die thematische Einführung fasst das zweite Kapitel den aktuellen Stand des Wissens und der Forschung zusammen. Hierzu werden die Grundlagen der bauphysikalischen Feuchtigkeitstransportvorgänge erläutert, sowie die theoretischen Auswirkungen von Feuchtigkeitsänderungen auf Holz und BSP beschrieben. Das dritte Kapitel erläutert den Aufbau und die Durchführung der experimentellen Untersuchungen von sechs Serien mit je drei Prüfkörpern. Diese wurden in einer Klimakammer unterschiedlichen Randbedingungen ausgesetzt. Dabei durchliefen die Versuchsobjekte unter anderem je eine Phase, welche den Heiz- bzw. Kühlbetrieb durch eine thermische Aktivierung simuliert. Währenddessen wurde in regelmäßigen Abständen die Holzfeuchtigkeit über den Querschnitt und die Verformung der Elemente gemessen, sowie einmal die Rissbildung in der Sichtoberfläche überprüft. Alle Ergebnisse werden in Form von Diagrammen dargestellt und analysiert. Auf der Basis dieser Untersuchungen wird in Kapitel 4 die numerische Simulation entwickelt. Dabei wird zuerst das erstellte Modell erklärt und die durchgeführten Berechnungen dargelegt. Um die Plausibilität der Ergebnisse zu überprüfen werden die Randbedingungen aus dem Laborversuch angesetzt und die berechneten Ergebnissen mit den Gemessenen verglichen. Das validierte Rechenmodell wird im fünften Kapitel dazu verwendet weitere Umgebungs- und Randbedingungen zu testen. So werden unterschiedliche Klimata angewendet, um mögliche Einbau- und Nutzungszustände, sowie Extremwertbedingungen, realistisch darzustellen. Anhand der Ergebnisse wird die Eignung und das Verbesserungspotential für eine baupraktische Verwendung analysiert. Zum Abschluss werden in Kapitel 6 alle Erkenntnisse zusammengefasst, kritisch hinterfragt und ein Ausblick auf den zukünftigen Forschungsbedarf gegeben.

## 2 Stand des Wissens und der Forschung

### 2.1 Anatomie des Holzes

#### 2.1.1 Makrostruktur

Für alle nachfolgenden Betrachtungen wird ein orthotropes Koordinatensystem für Holz festgelegt. Denn Holz ist ein anisotroper Werkstoff, dessen Eigenschaften nahezu alle von der betrachteten Richtung abhängig sind (Neroth & Vollenschaar, 2011). Aufgrund des zylindrischen Aufbaus von Baumstämmen besitzt Holz drei Hauptrichtungen, die vereinfacht als senkrecht zueinander angenommen werden können. Wie in Abbildung 2.1 dargestellt, verläuft dabei die longitudinale Achse entlang der Längsrichtung des Stammes. Die radiale Richtung entspricht dem Radius und die tangentielle Achse der Tangente der Jahrringe.

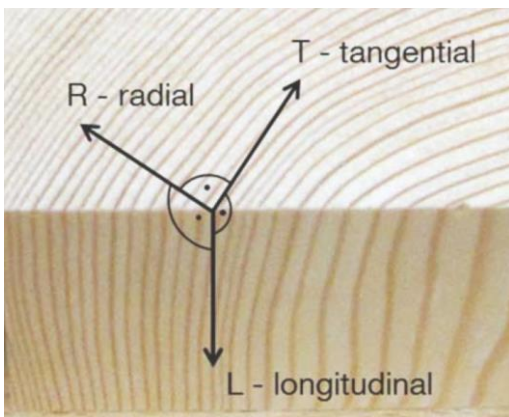


Abbildung 2.1: Holzprobe mit Kennzeichnung der drei anatomischen Hauptrichtungen (Schaffrath, 2015)

Der Holzkörper eines Baumes muss die drei Hauptfunktionen – Festigkeit der Struktur, Wasserleitung und Nährstoffspeicherung – erfüllen. Die entsprechenden Aufgaben werden von den unterschiedlichen Gewebearten übernommen, welche sich hinsichtlich Aufbau, Anordnung, Größe und Form mit bloßem Auge oder einer Lupe erkennen lassen. Diese Strukturmerkmale ergeben die für jede Holzart spezifischen Texturen bzw. Zeichnungen (Wagenführ, 1999). Anhand eines Querschnittes durch den Stamm, wie er in Abbildung 2.2 gezeigt ist, werden die makroskopischen Bestandteile und der strukturelle Aufbau des Holzkörpers kurz erklärt. Im Zentrum des Stammes befindet sich das Mark, welches im jungen Baum zur Wasserleitung und -speicherung dient. Jedoch stirbt das Markgewebe der meisten Holzarten nach wenigen Jahren ab und wird zum sogenannten Kernholz. Dieses besitzt fortan keine lebenden Zellen mehr und beteiligt sich auch nicht mehr an der Wasserleitung. Durch einen sehr geringen Feuchtegehalt und eine meist dunkle Färbung lässt es sich optisch erkennen und ermöglicht eine Unterscheidung im Stammquerschnitt und zwischen den Holzarten (Wagenführ, 1999). Umgeben wird das Kernholz von dem helleren Splintholz. Dabei handelt es sich um lebende Zellen, die eine aktive Wasserleitung betreiben und Reservestoffe enthalten. Das Kambium befindet sich zwischen der Borke und dem Splintholz und ist für das bloße Auge nicht



sichtbar. Durch Zellteilung bewirkt das Kambium das Wachstum des Holzkörpers und der Rinde. Diese Fähigkeit behält es bis zum Absterben des Baumes bei. Unterbrochen wird das Wachstum lediglich durch Ruhepausen, die je nach Baumart und Standort aus Kältephasen, Trocken- oder Regenzeiten resultieren können. In Breitengraden mit winterlicher Vegetationsruhe entstehen daher sogenannte Jahrringe (Neroth & Vollenschaar, 2011). Diese lassen sich untergliedern in Früh- und Spätholz, da sich die Zellen im Laufe der Vegetationsperiode unterschiedlich ausbilden. Das Frühholz entsteht zu Beginn der Vegetationsperiode und ermöglicht einen raschen Wasser- und Nährstofftransport. Die Zellen sind dünnwandig und besitzen große Durchmesser. Im Verlauf dieser Periode ändert sich das Gewebe hin zum Spätholz. Dieses dient vorwiegend zur Stabilisierung und der Festigkeit des Holzes, weshalb die Zellen dicke Wände und entsprechend kleine Hohlräume besitzen. Bei Nadelhölzern hat das Spätholz eine dunklere Färbung als das Frühholz. (Neroth & Vollenschaar, 2011) Vom Mark in Richtung Rinde verlaufen die Holzstrahlen, welche dem radialen Transport und der Speicherung von Nährstoffen dienen. Die Rinde setzt sich aus dem Bast (lebende Innenrinde) und der Borke (abgestorbene Außenrinde) zusammen (Wagenführ, 1999).

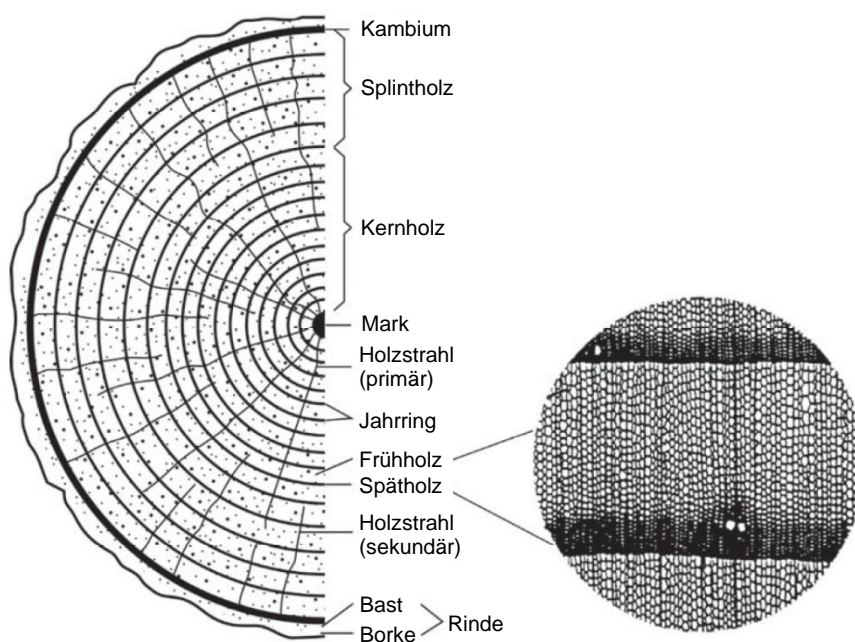


Abbildung 2.2: Schematischer Nadelholz-Querschnitt (Neroth & Vollenschaar, 2011)

### 2.1.2 Mikroskopischer Aufbau

Holz ist ein Mikroverbundwerkstoff, dessen verschiedenen Zelltypen und Gewebe mit einem Mikroskop erkennbar sind (Wagenführ, 1999). Bei der Betrachtung des strukturellen Aufbaus muss zwischen Nadel- und Laubholz differenziert werden. Die Nadelhölzer sind relativ einfach aufgebaut. Sie besitzen lediglich zwei wesentliche Zelltypen: Tracheiden und Parenchymzellen. Die Tracheiden

sind die Urform der Holzzellen und machen etwa 90 bis 95 % des Holzkörpers aus (Wagenführ, 1999). Sie verlaufen hauptsächlich in longitudinaler Richtung und sind wenige Millimeter lang. Im Frühholz haben die schlauchförmigen Tracheiden einen großen radialen Durchmesser und dünne Zellwände, während im Spätholz die Durchmesser abnehmen und die Zellwandstärke zunimmt. Entsprechend unterscheiden sich die Funktionen der Zellen, wie Tabelle 2.1 zu entnehmen ist. Die Parenchymzellen bilden vorrangig die Holzstrahlen und führen radial vom Holzkern zur Borke (Wagenführ & Scholz, 2018). Im Kreuzungsfeld von Längstracheiden und Holzstrahlen bilden sich sogenannte Tüpfel aus. Dabei handelt es sich um Verbindungsstellen, welche die Übergabe von Wasser und Nährstoffen zwischen den Zellen ermöglichen (Wagenführ & Scholz, 2018).

Laubholzarten haben einen vergleichsweise komplizierteren Aufbau. Neben den Tracheiden und den Holzstrahlparenchymen kommen dort noch weitere Zellelemente und Gewebe hinzu. Die Gefäße, auch Tracheen oder Poren genannt, sind rohrförmige Zellen mit einer Länge von bis zu zwei Metern, die axial im Stamm verlaufen (Wagenführ & Scholz, 2018). Sie bilden ein netzförmiges Gefäßsystem und dienen der Wasserleitung. Ein wichtiges Merkmal ist die Anordnung dieser Poren, die sich je nach Holzart in ringporig, halbringporig oder zerstreutporig einteilen lässt (Neroth & Vollenschaar, 2011). Die Festigkeitsfunktion übernehmen bei Laubhölzern hauptsächlich die sogenannten Libriformfasern. Dabei handelt es sich um langgestreckte, axial verlaufende Zellen mit dicken Wänden. Bei den meisten Laubholzarten besitzen die Fasern einen Masseanteil von insgesamt 50 bis 60 % (Wagenführ, 1999). Wie bei den Nadelhölzern sind auch bei den Laubhölzern die Tüpfel für die Übergänge zwischen den verschiedenen Zellen verantwortlich (Wagenführ, 1999).

Tabelle 2.1: Funktionen der Holzzellen in Nadel- und Laubhölzern (Wagenführ, 1999)

Funktion	Nadelholz	Laubholz
Festigung	Spätholztracheiden	Libriformfasern & Fasertracheiden
Wasserleitung	Frühholztracheiden	Gefäße & Tracheiden
Speicherung	Holzstrahlparenchym	Holzstrahlparenchym

### 2.1.3 Submikroskopischer Aufbau

Wie zuvor beschrieben besteht ein Baumstamm aus einem Geflecht verschiedener Zelltypen. In Abbildung 2.3 ist der typische Aufbau einer einzelnen Zelle dargestellt. Das Zentrum bildet dabei ein Hohlraum, das sogenannte Lumen, welches der Wasserleitung oder der Speicherung von Nährstoffen dient (Wagenführ & Scholz, 2018). Umgeben wird dieses von den mehrschichtigen Zellwänden. Dabei hat jede einzelne Wand eine spezifische Aufgabe bezüglich der Festigkeitsbildung des Holzes in Abhängigkeit von seiner chemischen Zusammensetzung. So bestehen die Mittellamelle und die Primärwand vor allem aus dem Molekül Lignin und sorgen damit für Steifigkeit und Druckfestigkeit, während die Sekundär- und Tertiärwand maßgeblich aus Cellulose bestehen und den Zugkräften

entgegenwirken (Isopp, 2012; Wagenführ, 1999). Je nach Aufgabe eines Zelltyps sind die einzelnen Bestandteile einer Zelle entsprechend stark ausgeprägt.

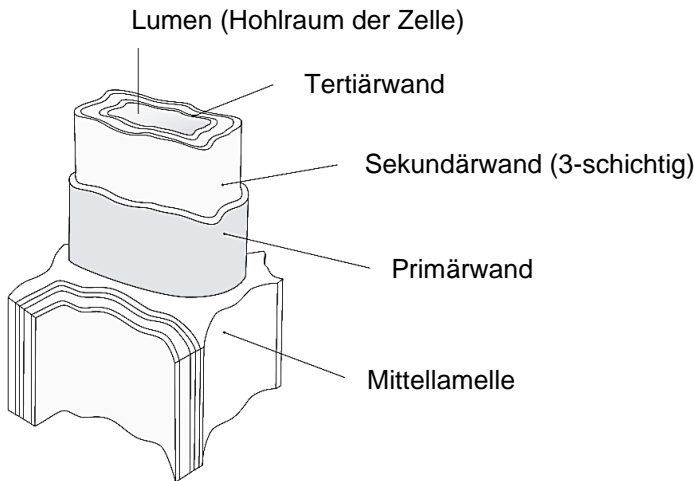


Abbildung 2.3: Aufbau einer Holz-Zelle (Isopp, 2012)

Einen detaillierten Aufbau der Zellwände zeigt Abbildung 2.4. Dabei bilden Molekülketten durch Gitterstrukturen sogenannte Micellen. Durch Bündelungen der Micellen entstehen Mikrofibrillen und dann Makrofibrillen, wodurch wiederum die Zellwände entstehen. Im Zusammenhang mit dem Feuchtetransport, siehe Kapitel 2.3, sind vor allem die Hohlräume, die bei der Bündelung zu Mikro- und Makrofibrillen entstehen, wichtig. Diese werden auch als intermicellare und interfibrillare Räume bezeichnet (Wagenführ & Scholz, 2018).

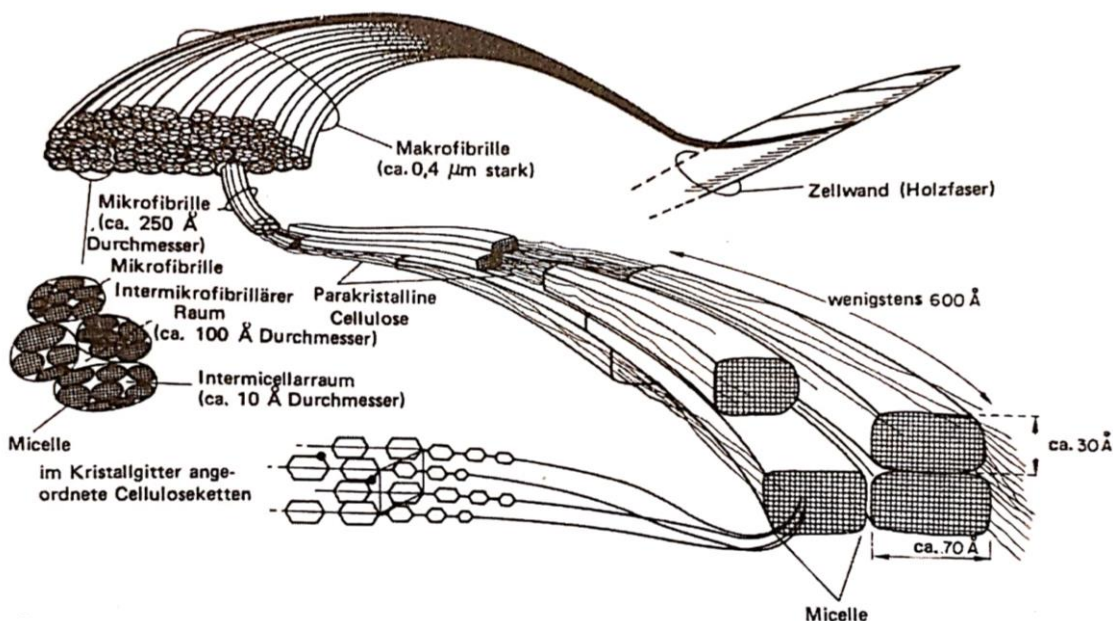


Abbildung 2.4: Molekulare und fibrillare Zusammensetzung der Zellwände (Wagenführ & Scholz, 2018)

## 2.2 Bauphysikalische Begriffe und Definitionen bezüglich Feuchte

### 2.2.1 Relative Luftfeuchtigkeit

Der Gehalt von Wasserdampf in der Luft wird angegeben durch das dimensionslose Verhältnis zwischen dem Wasserdampfpartialdruck  $p_D$  und dem Wasserdampf-sättigungsdruck  $p_S$ . Alternativ kann auch die Wasserdampfkonzentration  $c_D$  mit der Wasserdampf-sättigungskonzentration  $c_S$  verglichen werden (Willems, Schild, & Stricker, 2018). Üblicherweise wird das Ergebnis in Prozent angegeben.

$$\varphi = \frac{p_D}{p_S} = \frac{c_D}{c_S} \quad (2.1)$$

mit

$\varphi$	Relative Luftfeuchtigkeit [%]
$p_D$	Wasserdampfpartialdruck [hPa]
$p_S$	Wasserdampf-sättigungsdruck [hPa]
$c_D$	Wasserdampfkonzentration [kg/m <sup>3</sup> ]
$c_S$	Wasserdampf-sättigungskonzentration [kg/m <sup>3</sup> ]

### 2.2.2 Taupunkttemperatur

Sowohl die Wasserdampfdrücke als auch die Konzentrationen, welche die relative Luftfeuchte definieren, sind temperaturabhängig. Dabei gilt: je höher die Lufttemperatur ist, umso mehr Wasserdampf kann die Luft aufnehmen. Folglich führt bei gleichbleibender Wasserdampfmenge eine Erwärmung der Luft zum Sinken und eine Abkühlung zum Steigen der relativen Feuchtigkeit. Die Temperatur, bei welcher durch Abkühlung eine relative Luftfeuchtigkeit von 100 % erreicht wird, wird Taupunkttemperatur genannt. An diesem Punkt wird also die Wasserdampf-sättigungskonzentration  $c_S$ , bzw. der Wasserdampf-sättigungsdruck  $p_S$ , erreicht. Eine weitere Abkühlung der feuchten Luft führt zu einem Phasenwechsel von gasförmig zu flüssig, bei welchem die überschüssige Feuchtigkeit in Form von Tauwasser ausfällt (Willems et al., 2018). Die Taupunkttemperatur kann mit Gleichung (2.2) berechnet oder aus Tabellen, bzw. Diagrammen, abgelesen werden (Willems et al., 2018).

$$\theta_S = \left( \frac{\varphi}{100} \right)^{\frac{1}{8,02}} \cdot (109,8 + \theta) - 109,8 \quad (2.2)$$

mit

$\theta_S$	Taupunkttemperatur [°C]
------------	-------------------------

$\theta$	Lufttemperatur [°C]
$\varphi$	Relative Luftfeuchtigkeit [%]

### 2.2.3 Holzfeuchtigkeit

Die Holzfeuchtigkeit  $u$  gibt gemäß DIN EN 13183-1 den Massenanteil des enthaltenen Wassers an der Trockenmasse an. Der Feuchtegehalt wird üblicherweise in Prozent angegeben.

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} \quad (2.3)$$

mit

$u$	Holzfeuchtigkeit [%]
$m_u$	Masse des Holzes vor dem Trocknen [kg]
$m_0$	Masse des Holzes im darrtrockenen Zustand [kg]

Die Holzfeuchte ist von erheblicher Bedeutung, denn durch sie werden annähernd alle Eigenschaften des Holzes maßgeblich beeinflusst. So führt eine zunehmende Holzfeuchtigkeit beispielsweise zu einer sinkenden Festigkeit, einer steigenden Wärmeleitfähigkeit und einer erhöhten Anfälligkeit für Pilzbefall. Generell können drei Grenzzustände der Holzfeuchtigkeit unterschieden werden (Niemz & Sonderegger, 2017):

- *Darrtrocken* ist Holz, in dessen Innerem kein Wasser vorhanden ist, es gilt:  $u = 0 \%$
- *Fasersättigung* ist ein für jede Holzart spezifischer Bereich, dessen gesamte Zellwände mit gebundenem Wasser gefüllt sind, jedoch noch kein freies Wasser in den Lumen vorhanden ist. Je nach Holzart tritt dies bei  $u = 22 \%$  bis  $35 \%$  auf.
- *Wassersättigung* bedeutet, dass alle Möglichkeiten Wasser innerhalb des Holzes aufzunehmen maximal gefüllt sind, es gilt:  $u = 100\%$ .

Anhand der genannten Bereiche wird ‚gebundenes Wasser‘ als der Anteil unterhalb und ‚freies Wasser‘ als Anteil oberhalb des Fasersättigungsbereichs definiert (Niemz & Sonderegger, 2017). Die Holzfeuchtigkeit ist nicht zwangsläufig konstant oder gleichmäßig innerhalb eines Prüfkörpers. Durch instationäre Randbedingungen und Inhomogenitäten herrscht im baupraktischen Fall stets eine ungleichmäßige Feuchtigkeitsverteilung über dem Querschnitt (Neuhaus, 2017).

## 2.3 Feuchtigkeitstransport in Holz

### 2.3.1 Wassertransport in porösen Materialien

Holz ist durch seinen zellularen Aufbau mit vielen Hohlräumen, ein poröses Material. Das allgemein anerkannte Baustoffmodell von Rose (1963) besagt, dass sich die Durchfeuchtung eines porösen Baustoffes in sechs Stadien unterteilt, siehe Abbildung 2.5. Dringt Wasserdampf in die Pore eines sehr trockenen Baustoffes ein (A), dann werden die Wassermoleküle an den Porenwänden absorbiert und nicht weiter transportiert. Sobald sich ein ausreichend dicker Wasserfilm in den Poren gebildet hat und mit der relativen Feuchtigkeit der Porenluft im Gleichgewicht steht (B), kann der Wasserdampf hindurch diffundieren. Wird weiter Feuchtigkeit zugeführt, dann füllen sich zuerst die Porenengpässe durch Kapillarkondensation mit flüssigem Wasser (C). Im darauffolgenden Stadium (D) wächst die Sorbatschicht an den Porenwänden so weit an, dass in den Porenerweiterungen sowohl Flüssig- als auch Dampftransport stattfindet. Entwickelt sich die Situation weiter, so herrscht in Stadium (E) bereits ausschließlich ein Flüssigtransport. In der letzten Phase (F) ist die Pore vollständig mit Wasser gefüllt und keine Luft mehr vorhanden. (Häupl et al., 2017; Rose, 1963) In umgekehrter Reihenfolge verläuft der Vorgang einer Trocknung.

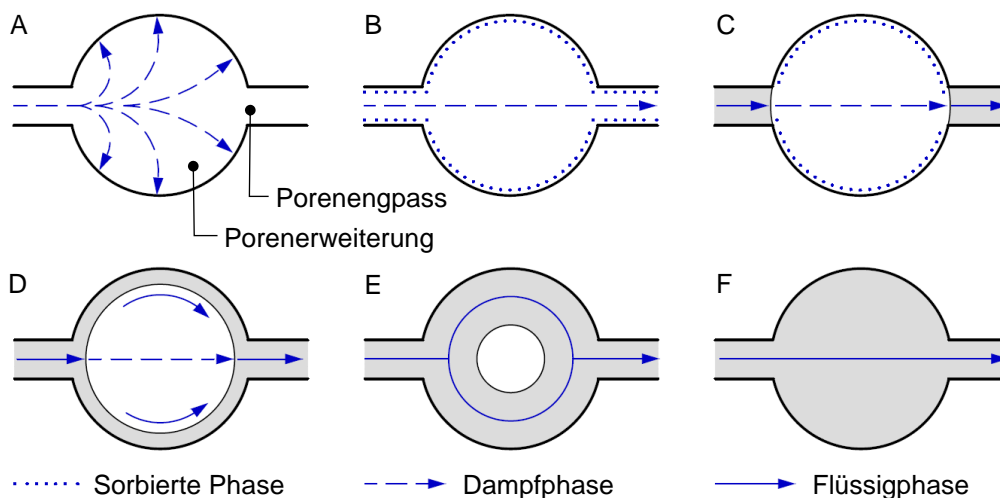


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der fortschreitenden Wassereinlagerung in einer Baustoffpore bei steigendem Wassergehalt (Häupl et al., 2017)

### 2.3.2 Sorption und Desorption

Holz ist ein kapillarporöses Material und besitzt daher eine große spezifische innere Oberfläche (Wagenführ & Scholz, 2018). Bis zum Fasersättigungsbereich ist Holz hygroskopisch. Das bedeutet, es nimmt, wie zuvor beschrieben, Wasser aus der Luftfeuchtigkeit auf und bindet dieses an der Porenwandung. Dieser Vorgang wird Sorption genannt. Das treibende Potenzial ist hierbei die



relative Luftfeuchtigkeit (Willems et al., 2018). Folglich führt eine steigende Feuchtigkeit zu einer Zunahme und eine sinkende relative Luftfeuchtigkeit zu einer Abnahme der Molekülschichtdicke. Letzteres wird als Desorption bezeichnet. Der Sorptionsvorgang kann, wie in Abbildung 2.6 dargestellt, in drei Phasen unterteilt werden, die jeweils durch einen Prozess bestimmt werden (Niemz & Sonderegger, 2017):

- *Chemisorption*:  $0 \% \leq u < 6 \%$ , Wassermoleküle werden über Wasserstoffbrücken an den Cellulose-Skeletten gebunden.
- *Physiosorption* (physikalische Adsorption):  $6 \% \leq u < 15 \%$ , Anlagerung durch van-der-Waals-Kräfte
- *Kapillarkondensation*:  $15 \% \leq u < \text{Fasersättigung}$ , Kondensation des Wassers in den Kapillaren und Niederschlag auf die Oberfläche. Mit steigender Feuchtigkeit Eindringen der Moleküle in intermicellare und interfibrillare Hohlräume

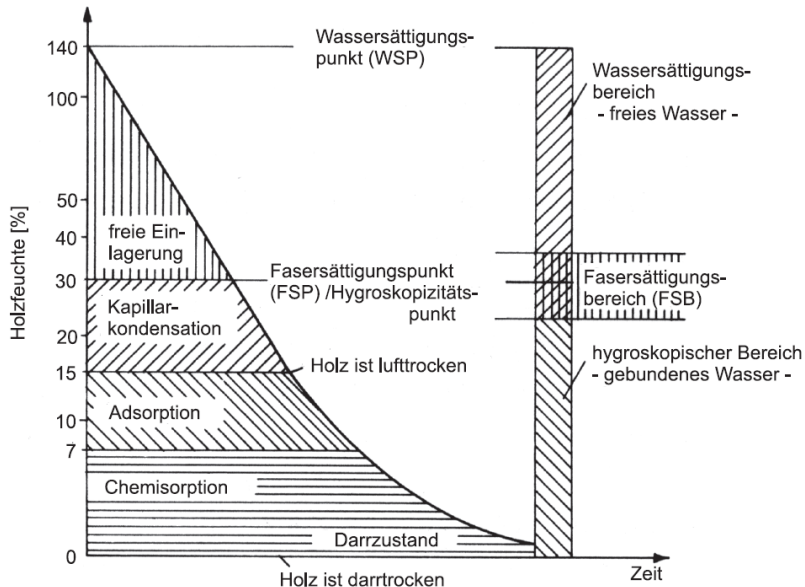


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung der Bindungsformen des Wassers in Holz (Niemz & Sonderegger, 2017)

Die Holzfeuchtigkeit nimmt durch Sorption und Desorption so weit zu oder ab bis sich ein Gleichgewicht mit der Umgebung einstellt. Dieser Zustand wird Ausgleichsfeuchtigkeit oder Gleichgewichtsfeuchte genannt und durch die relative Luftfeuchtigkeit, die Temperatur, den Luftdruck und den chemischen sowie strukturellen Aufbau der Holzart beeinflusst (Niemz & Sonderegger, 2017). Diese Abhängigkeit lässt sich graphisch über Sorptionsisothermen, wie in Abbildung 2.7, darstellen. Durch diese kann von einer relativen Luftfeuchtigkeit auf die Gleichgewichtsfeuchte bzw. den entsprechenden Feuchtigkeitsgehalt geschlossen werden, ohne die jeweiligen Transportmechanismen berücksichtigen zu müssen (Willems et al., 2018). Charakteristisch für Holz sind die S-förmigen Isothermen der Feuchteaufnahme und -abgabe, die aufgrund des Hysterese-Effekts nicht deckungsgleich zueinander sind. Dies ist durch Unterschiede des Wasseraufnahme- und -abgabeverhaltens der Poren

begründet und führt dazu, dass die Ausgleichsfeuchte bei Desorption stets in etwa 1 bis 2 % höher ist als bei Adsorption (Wagenführ & Scholz, 2018; Willems et al., 2018).

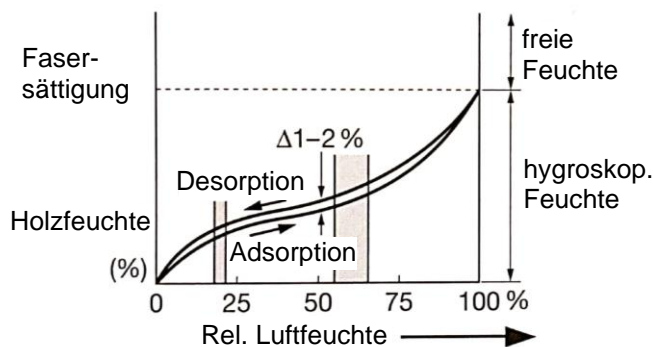


Abbildung 2.7: Sorptionsisotherme mit Hysterese-Effekt (Wagenführ & Scholz, 2018)

### 2.3.3 Fick'sche Diffusion

Moleküle können sich durch gasförmige, flüssige und feste Stoffe ohne die Einwirkung einer äußeren Kraft bewegen. Dieser Vorgang wird als Diffusion bezeichnet und ist definiert als ein Teilchentransport zwischen Bereichen unterschiedlicher Teilchendichte durch thermische Bewegung. Für Wasserdampf bedeutet dies einen Transport von Wassermolekülen im Gasgemisch der Luft infolge eines Feuchtekonzentrationsunterschieds bzw. einer Wasserdampfpartialdruckdifferenz. Dabei diffundieren die Teilchen von einem höheren Potential hin zu einem niedrigeren (Willems, Dinter, & Schild, 2006). Für einen stationären Fall und bei gleichbleibender Temperatur lässt sich der Diffusionsvorgang durch das erste Fick'sche Gesetz beschreiben:

$$J = -D\nabla c = -D \left( \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial c}{\partial y} + \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (2.4)$$

mit

- $J$  Teilchenstromdichte [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ]
- $D$  Diffusionskoeffizient [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
- $c$  Stoffmengenkonzentration [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $\nabla$  Nabla-Operator; Differentiation in alle drei Raumrichtungen x, y, z
- $\frac{\partial c}{\partial x}$  Konzentrationsgradient in x-Richtung [ $\text{kg}/\text{m}^4$ ]; gilt entsprechend für y und z

Das negative Vorzeichen ergibt sich aus dem Umstand, dass die Diffusion stets in Richtung des geringsten Potentials verläuft und somit entgegen einer zunehmenden Konzentration. Bei realen



Feuchtetransportvorgängen herrschen jedoch nahezu immer instationäre Verhältnisse vor, also zeitlich und räumlich veränderliche Gradienten. Basierend auf dem ersten Fick'schen Gesetz lässt sich eine instationäre Diffusion durch das zweite Fick'sche Gesetz, auch Fick'sche Differentialgleichung genannt, ausdrücken:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla(D\nabla c) = D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (2.5)$$

mit

$\frac{\partial c}{\partial t}$  Veränderung der Konzentration  $c$  über die Zeit  $t$  [kg/m<sup>3</sup>s]

$D$  Diffusionskoeffizient [m<sup>2</sup>/s]

$\nabla$  Nabla-Operator; Differentiation in alle drei Raumrichtungen  $x, y, z$

$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$  Krümmung des Konzentrationsfeldes in  $x$ -Richtung [kg/m<sup>5</sup>]; gilt entsprechend für  $y$  und  $z$

Um das treibende Potential für den Diffusionsprozess auszudrücken gibt es diverse Möglichkeiten. In dieser Arbeit wird der Transportvorgang nicht durch die Änderung der Konzentration  $c$  berechnet, sondern über den Gradienten der Holzfeuchtigkeit  $u$ . Entsprechend wird die Fick'sche Differentialgleichung zu der nachstehenden Gleichung (2.6) umformuliert.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla(D\nabla u) = D \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.6)$$

Der Übergang der Diffusion zwischen einem Bauteil und der umgebenden Luft weist einen Widerstand auf. Dieser resultiert aus der Differenz zwischen der vorhandenen Oberflächenfeuchtigkeit  $u_{surf}$  und der sich bei Annahme eines konstanten Klimas einstellenden Ausgleichsfeuchtigkeit  $u_{air}$ . Unter zur Hilfenahme des Oberflächenemissionskoeffizienten  $S$  kann der Übergang des Feuchtetransportes an der Grenzschicht nach Rosen (1978) und Avramidis und Siau (1987) durch nachfolgende Gleichung ausgedrückt werden. Dabei ist der Oberflächenemissionskoeffizient abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit der Luft. Je schneller sich die Luft an der Oberfläche entlang bewegt, umso größer ist der Oberflächenemissionskoeffizient und umso mehr Feuchtigkeit kann übertragen werden.

$$n \cdot J = S \cdot (u_{air} - u_{surf}) \quad (2.7)$$

mit

$J$	Teilchenstrom [kg/m <sup>2</sup> s]
$n$	Normalenvektor [-]
$S$	Oberflächenemissionskoeffizient [m/s]
$u_{air}$	Ausgleichsfeuchte in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit [-]
$u_{surf}$	Holzfeuchtigkeit an der Bauteiloberfläche [-]

Während  $u_{surf}$  die Holzfeuchtigkeit an der Bauteiloberfläche ist, ist  $u_{air}$  die Ausgleichsfeuchte, welche sich aufgrund der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur einstellt. Gemäß Avramidis (1989) kann  $u_{air}$  mit nachfolgender Gleichung berechnet werden:

$$u_{air} = 0,01 \cdot \left( \frac{-T \cdot \ln(1 - \varphi)}{0,13 \cdot \left(1 - \frac{T}{647,1}\right)^{-6,46}} \right)^{\frac{1}{110 \cdot T^{-0,75}}} \quad (2.8)$$

mit

$u_{air}$	Ausgleichsfeuchte des Holzes [-]
$T$	Temperatur [K]
$\varphi$	Relative Luftfeuchtigkeit [-]

Die Grundlage für die vorgestellten Gleichungen sind die Fourier'schen Gesetze. Denn für die Leitung von Wärme durch einen Stoff stellte Fourier (1822) die zwei nach ihm benannten, heute noch gültigen Gesetze auf (Crank, 1976). Demnach ist die Wärmeleitung ein Transportprozess aufgrund eines vorliegenden Gradienten, wie anhand der Fourier'schen Differentialgleichung in Gleichung (2.9) zu erkennen ist. Fick (1855) erkannte die Analogie zur Diffusion und übertrug die mathematische Beschreibung in die beiden bereits gezeigten Gesetze, siehe Gleichungen (2.4) und (2.5) (Crank, 1976). Dieser Zusammenhang wird in Kapitel 4 zur Hilfe genommen, weshalb die Tabelle 2.2 die Gesetze der Wärmeleitung und Diffusion gegenübergestellt.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\alpha \nabla T) = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.9)$$

mit

$\frac{\partial T}{\partial t}$	Veränderung der Temperatur T über die Zeit t [W/m <sup>3</sup> s]
$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$	Krümmung des Temperaturfeldes in x-Richtung [W/m <sup>5</sup> ]; gilt entsprechend für y und z
$\alpha$	Temperaturleitfähigkeit [m <sup>2</sup> /s]

Dabei ist die Temperaturleitfähigkeit  $\alpha$  definiert als:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \tag{2.10}$$

mit

- $\alpha$  Temperaturleitfähigkeit [m<sup>2</sup>/s]
- $\lambda$  Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
- $\rho$  Rohdichte [kg/m<sup>3</sup>]
- $c_p$  Spezifische Wärmekapazität [Ws/kgK]

Tabelle 2.2: Gegenüberstellung der mathematischen Beschreibung von Wärmeleitung und Diffusion (Schaffrath, 2015)

Transportprozess	(Wasserdampf-) Diffusion (Gl. 2.5)	Wärmeleitung (Gl. 2.9)
Ablaufende Bewegung	Massestrom [kg/m <sup>3</sup> s]	Wärmestrom [W/m <sup>3</sup> s]
Treibendes Potential	Feuchtigkeitskonzentrationsgefälle $\Delta c$ bzw. Holzfeuchtigkeitsdifferenzen $\Delta u$	Temperaturgradient $\Delta T$
Einfluss des Materials berücksichtigt durch	Diffusionskoeffizient D [m <sup>2</sup> /s]	Temperaturleitfähigkeit $\alpha$ [m <sup>2</sup> /s]
Übergangswiderstand ausgedrückt durch	Oberflächenemissionskoeffizient S [m/s]	Wärmeübergangskoeffizient h [W/m <sup>2</sup> K]

### 2.3.4 Non-Fickian Verhalten von Holz

Die mathematische Beschreibung der Diffusion über die beiden Fick'schen Gesetze setzt ein homogenes Material voraus, bei welchem sich ein proportionales Verhältnis zwischen dem Konzentrationsgefälle und dem Diffusionsstrom einstellt. Wadsö (1994) hat nachgewiesen, dass das einfache Fick'sche Modell aufgrund der Inhomogenität und Anisotropie für Holz nicht zutreffend ist. Daher wird das Diffusionsverhalten von Holz auch mit dem Begriff „non-Fickian“ charakterisiert. Bis heute gibt es kontroverse Auseinandersetzungen darüber, welche Eigenschaften und Vorgänge genau für dieses Verhalten eine Rolle spielen (Schaffrath, 2015). Entsprechend wurden diverse mathematische Modelle veröffentlicht, die jedoch bisher alle keine allgemeingültigen Lösungen liefern.

Eines dieser Modelle ist beispielsweise das von Frandsen, Damkilde und Svensson (2007) vorgestellte „multi-Fickian“ Modell, bei welchem es sich um eine Erweiterung bereits vorhandener Ansätze handelt. Demnach besteht der Diffusionsvorgang aus zwei parallel ablaufenden Prozessen, siehe Abbildung 2.8. Einerseits findet Dampfdiffusion durch die Zelllumen und Tüpfel statt, andererseits

diffundiert die Feuchtigkeit als gebundenes Wasser durch die Zellwände. Die Ad- und Desorption sorgen dabei für eine Kopplung der beiden Vorgänge. Bei niedriger relativer Luftfeuchtigkeit ist die Diffusion des gebundenen Wassers ein langsamer Prozess und die Wasserdampfdiffusion dominiert. Mit steigender relativer Luftfeuchtigkeit nimmt die Bedeutung der Diffusion des gebundenen Wassers zu und die der Dampfdiffusion ab. (Dvinskikh, Henriksson, Mendicino, Fortino, & Toratti, 2011) Um dieses Verhältnis mathematisch darzustellen, werden die Diffusionsvorgänge des gebundenen Wassers und des Wasserdampfes getrennt voneinander betrachtet. Die multi-Fickian Gleichungen nach Frandsen et al. (2007) sind nachfolgend in Abhängigkeit von der Feuchtigkeitskonzentration angegeben.

$$\frac{\partial c_b}{\partial t} = \nabla(D_b \cdot \nabla c_b) + \dot{c} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial c_v}{\partial t} = \nabla(D_v \cdot \nabla c_v) - \dot{c} \quad (2.12)$$

mit

- $D_b$  Diffusionskoeffizient für gebundenes Wasser in den Zellwänden [m<sup>2</sup>/s]
- $D_v$  Diffusionskoeffizient des Wasserdampfes in der Luft [m<sup>2</sup>/s]
- $c_b$  Feuchtigkeitskonzentration des gebundenen Wassers [kg/m<sup>3</sup>]
- $c_v$  Feuchtigkeitskonzentration des Wasserdampfes [kg/m<sup>3</sup>]
- $\dot{c}$  Sorptionsrate [kg/m<sup>3</sup>s]

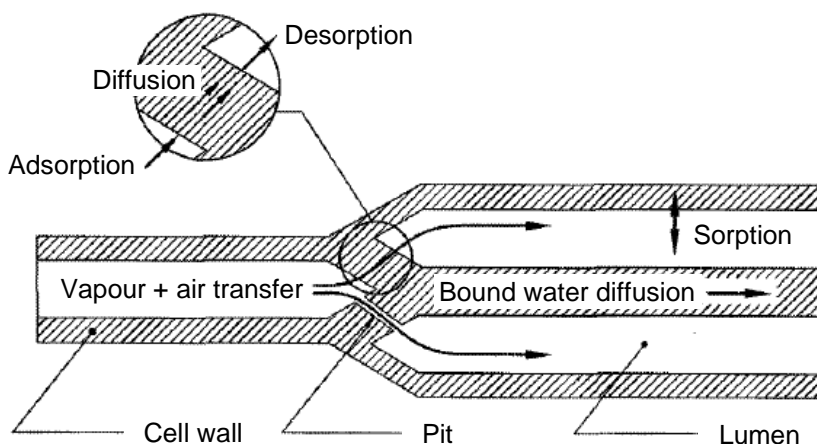


Abbildung 2.8: Feuchtigkeitstransport nach dem multi-Fickian Modell (Krabbenhoft & Damkilde, 2004)

Das multi-Fickian Modell eignet sich, um das non-Fickian Verhalten abzubilden. Außerdem kann die Güte des Modells durch die Implementierung von Hysterese-Effekten weiter verbessert werden (Frandsen & Svensson, 2007; Frandsen, Svensson, & Damkilde, 2007). Jedoch ist die Einbindung

in eine numerische Simulation aufwändig und eine Vielzahl an speziellen Materialkennwerten sind erforderlich. Da letztere lediglich über umfangreiche Versuche zu ermitteln sind, wird in dieser Thesis nicht weiter Bezug auf das multi-Fickian Modell genommen.

In der vorliegenden Arbeit wird ein einfacherer Ansatz auf Grundlage der Fick'schen Differentialgleichung (2.6) gewählt. Hierbei wird die Diffusion durch das Holz lediglich in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes beschrieben, ohne näher auf die unterschiedlichen Transportvorgänge einzugehen. Die richtungsabhängigen Diffusionskoeffizienten und der Oberflächenemissionskoeffizient werden nicht als konstante Werte, sondern als Funktionen eingesetzt. Dafür wird der folgende Ausdruck für den Diffusionskoeffizienten in radiale und tangentialer Richtung gemäß Gereke (2009) verwendet:

$$D_R(u) = D_T(u) = 8,0 \cdot 10^{-11} \cdot e^{4u} \quad (2.13)$$

mit

$D_R$	Diffusionskoeffizient in radialer Richtung [m <sup>2</sup> /s]
$D_T$	Diffusionskoeffizient in tangentialer Richtung [m <sup>2</sup> /s]
$u$	Holzfeuchtigkeit [-]

Für den Diffusionskoeffizient in longitudinaler Richtung wird gemäß Florisson (2020) ein konstanter Wert von  $D_L = 5,28 \cdot 10^{-9} \frac{m^2}{s}$  angenommen. Der Oberflächenemissionskoeffizient  $S$  ist wiederum eine Funktion der Holzfeuchtigkeit und wird für eine freie Konvektion gemäß der Definition von Hanhijärvi (1995) berechnet:

$$S(u) = 3,2 \cdot 10^{-8} \cdot e^{4u} \quad (2.14)$$

mit

$S$	Oberflächenemissionskoeffizient [m/s]
$u$	Holzfeuchtigkeit [-]

Wie von Hanhijärvi (1995) dargelegt, führt die Abhängigkeit der Diffusionskoeffizienten und des Oberflächenemissionskoeffizienten des Feuchtigkeitsgehalts dazu, dass die Fick'sche Differentialgleichung (2.6) nichtlinear wird. Allerdings sind die Änderungen sowohl von  $u$  als auch von  $D(u)$  zwischen den Iterationen äußerst klein. Daher kann  $D(u)$  während eines einzelnen Zeitschritts als konstant angenommen werden, und eine lineare Lösung der Gleichung ist mit akzeptablen Ergebnissen möglich (Fortino, Mirianon, & Toratti, 2009). Auch bei diesem Modell zur Berücksichtigung des non-Fickian Verhaltens handelt es sich also lediglich um eine grobe Annäherung an die realen Randbedingungen. Zudem werden hierbei keine Hysterese-Effekte berücksichtigt. Jedoch ist eine

Erweiterung des Modells um eine Komponente für zeitabhängiges Verhalten möglich, siehe Gereke (2009).

### 2.3.5 Transport von flüssigem Wasser

Bei den Untersuchungen in dieser Arbeit werden ausschließlich Feuchtigkeitsbereiche betrachtet, in welchen kein flüssiges Wasser auftritt. Der Vollständigkeit halber werden jedoch nachfolgend auch die Transportvorgänge der Oberflächendiffusion und der Kapillarleitung kurz zusammengefasst. Freies Wasser tritt in den Zellen auf, sobald der Fasersättigungsbereich von Holz überschritten wird. Wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, bildet sich zunächst ein Sorbatfilm an der Porenwandung, der mit zunehmender Luftfeuchte wächst. Ab einer relativen Luftfeuchte von 50 – 60 % erreicht der Wasserfilm eine Dicke, bei welcher die Bindung der äußersten Wassermoleküle so schwach ist, dass eine Bewegung, die sogenannte Oberflächendiffusion, möglich wird (Willems et al., 2006). Die Wassermoleküle werden dabei immer dorthin transportiert, wo die Feuchtigkeit geringer, bzw. die Sorbatschicht dünner ist. Somit ist die relative Luftfeuchtigkeit das treibende Potential für die Bewegung. Da die Oberflächendiffusion bei teilgefüllten Poren stattfindet, überlagert sich der Prozess mit dem der Wasserdampfdiffusion (Willems et al., 2006). Dadurch können zwei Situationen entstehen, wie sie in Abbildung 2.9 gezeigt sind. Im Fall A herrschen isotherme Umgebungsbedingungen, das heißt eine konstante Temperatur  $\vartheta_1 = \vartheta_2$ , und die Wasserdampfdiffusion verläuft entlang des Dampfdruckgefälles von  $p_1$  nach  $p_2$ , bzw. entlang des Feuchtekonzentrationsgefälles von  $\varphi_1$  nach  $\varphi_2$ . Da die relative Luftfeuchtigkeit auf der Seite 1 höher ist, ist dort auch der Sorbatfilm dicker und somit die Oberflächendiffusion stärker als auf der Seite 2. Entsprechend verläuft die Oberflächendiffusion in die Richtung des dünneren Sorbatfilms und somit in Richtung der Dampfdiffusion. Treten jedoch nichtisotherme Randbedingungen auf, wie im Fall B, mit einem Temperaturgradient  $\vartheta_2 < \vartheta_1$ , so folgt daraus für den Dampfdruck ein Gefälle von  $p_1$  nach  $p_2$  und für die relative Luftfeuchtigkeit von  $\varphi_2$  nach  $\varphi_1$ . Der Diffusionsstrom verläuft dem Druckgefälle entsprechend von Seite 1 nach 2 während die relative Feuchte bei geringerer Temperatur auf der Seite 2 höher ist. An der Stelle der höchsten Luftfeuchtigkeit ist die Sorbatschicht und folglich auch die Oberflächendiffusion am ausgeprägtesten. Da die Oberflächendiffusion in Richtung des dünneren Sorbatfilms stattfindet, ist diese entgegengesetzt zur Dampfdiffusion.

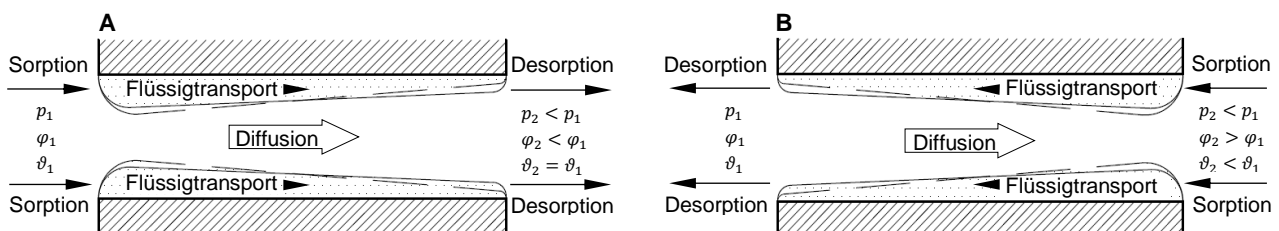


Abbildung 2.9: Modell für den überlagerten Flüssig- und Dampftransport im Porenraum eines hygroskopischen Baustoffes bei (A) isothermen und (B) nichtisothermen Randbedingungen (Krus, 1995)

Die Kapillarleitung tritt in röhrenartigen Poren auf, deren Querschnitt vollständig mit Wasser gefüllt ist, und unterstützt im lebenden Baum die Wasserleitung. Denn der Effekt kann zum Wassertransport entgegen der Schwerkraft führen, ohne dem Einwirken äußerer Kräfte. Maßgeblich sind hierfür die Oberflächenspannung des Wasserspiegels, der Porenradius und die Benetzbarkeit der Oberfläche (Willems et al., 2018). In Abbildung 2.10 sind die beiden möglichen Kapillaritätserscheinungen im Vergleich zu einer freien Wasseroberfläche skizziert. Bei hydrophilen Materialien wie Holz ist die Oberfläche der Poren gut benetzbar, weshalb sich ein konkav gekrümmter Wasserspiegel ausbildet und die Flüssigkeit in die Kapillaren gezogen wird. Die Steighöhe  $h_k$  ist umso größer, je kleiner der Porenradius  $r$  und der Randwinkel  $\theta$  sind. Hydrophobe Oberflächen mit schlechter Benetzbarkeit weisen dagegen einen umgekehrten Effekt auf, also einen tieferen Wasserstand in den Kapillaren verglichen mit einem freien Wasserspiegel (Willems et al., 2018). Eine direkte Aufnahme von Wasser durch Kapillarleitung findet nur bei Wasserlagerung oder Starkregen statt und ist daher für die vorliegende Arbeit nicht relevant.

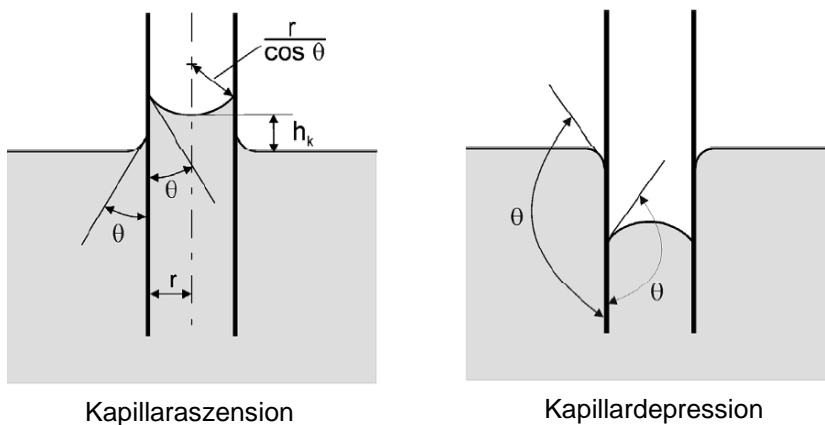


Abbildung 2.10: Kapillaritätserscheinung und Ausbildung des Randwinkels  $\theta$  in Kapillarporen mit Porenradius  $r$  (Willems et al., 2018)

## 2.4 Feuchteinduzierte Prozesse und Verhalten von Holz

### 2.4.1 Quellen und Schwinden

Im hygroskopischen Bereich des Holzes wird Wasser durch Sorption in den intermicellaren und interfibrillaren Hohlräumen der Zellwände angelagert, siehe Kapitel 2.3.2. Dadurch dehnen sich die Zellwände und die Wabenstruktur aus und führen so zu einer Volumenvergrößerung des gesamten Materials (Niemz & Sonderegger, 2017). Dieser Vorgang wird als Quellen bezeichnet und endet, wenn keine Moleküle mehr in der Zellwand gebunden werden können, also mit der Fasersättigung. Entsprechend umgekehrt verhält es sich bei einer Desorption. Die Trocknung des Holzes führt zu einer Volumenkontraktion, dem sogenannten Schwinden (Niemz & Sonderegger, 2017). Wie ausgeprägt das Quell- und Schwindverhalten ist, hängt einerseits von der betrachteten Holzart ab, und



andererseits, aufgrund des anisotropen Aufbaus, von der orthotropen Richtung. Durch die Veränderung der Zellwandstärke findet das Quellen und Schwinden vor allem quer zur Faser, in radialer und tangentialer, jedoch kaum in longitudinaler Richtung statt (Trübswetter, 2009). Aus mehreren Gründen, wie z.B. der Begrenzung durch die Holzstrahlen, ist die Verformung in Radialrichtung etwa halb so groß wie diejenige in Tangentialrichtung (Niemz & Sonderegger, 2017). Die Größe der Verformung wird ausgedrückt über das holzartenspezifische Quellmaß  $\alpha$  und Schwindmaß  $\beta$ . Dabei werden die Längen- oder Volumenänderungen in Prozent je Prozent Holzfeuchteänderung  $\Delta u$  angegeben. Die Annahme eines konstanten Wertes über den gesamten hygroskopischen Bereich ist für die niedrigsten und höheren Holzfeuchtebereiche nicht zutreffend, liegt jedoch im baupraktischen Sinne auf der sicheren Seite (Keylwerth, 1962). Die Effekte von Quellen und Schwinden besitzen die gleiche Größenordnung und sind als eine elastische, also reversible, Verformung zu betrachten (Neuhaus, 2017). Die Dehnung eines Bauteils infolge von Quellen oder Schwinden lässt sich mit der folgenden Gleichung (2.15) berechnen. Entsprechend kann die tatsächliche Längenänderung einer Bauteilabmessung gemäß Gleichung (2.16) ausgedrückt werden.

$$\varepsilon_{Q,S} = \alpha \cdot \Delta u \quad (2.15)$$

$$\Delta l_{Q,S} = \alpha \cdot \Delta u \cdot l = \varepsilon_{Q,S} \cdot l \quad (2.16)$$

mit

- $\varepsilon_{Q,S}$  Dehnung infolge Quellens oder Schwindens [%]
- $\alpha$  Quellmaß, ggf. Schwindmaß  $\beta$ , in der betrachteten orthotropen Richtung [%/% $\Delta u$ ]
- $\Delta u$  Holzfeuchteänderung [%]
- $\Delta l_{Q,S}$  Längenänderung eines Bauteils infolge Quellens oder Schwindens [m]
- $l$  Abmessung eines Bauteils: Länge, Breite oder Höhe [m]

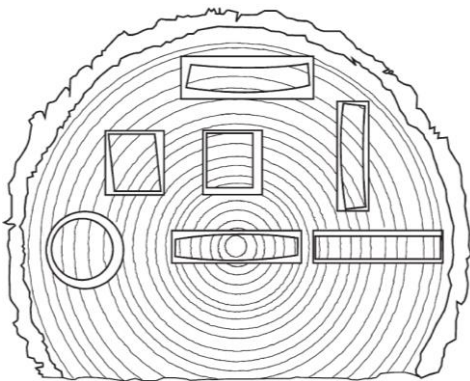


Abbildung 2.11: Verformung schwindender kleinformatiger Holzprofile gemäß ihrer Lage im Stammquerschnitt (Häupl et al., 2017)



Da bei der Berechnung von Quell- und Schwindvorgängen in der Regel die genaue Einbaurichtung der Holzquerschnitte nicht vorhergesagt werden kann, wird die Bemessung mit dem Mittelwert aus dem radialen und tangentialen Quell- bzw. Schwindmaß durchgeführt. Die Folgen des inhomogenen Verformungsverhaltens lassen sich, vor allem für das Schwinden, in Darstellungen wie Abbildung 2.11 veranschaulichen. Für das Bauwesen sind vor allem große Verzerrungen und Wölbungen problematisch. Um unkontrollierte Verformungen zu vermeiden, werden Holzbauteile in der Regel technisch auf eine spezifische Feuchtigkeit getrocknet, welche der Ausgleichsfeuchte der späteren Einbausituation entspricht (Trübswetter, 2009).

#### 2.4.2 Feuchteinduzierte Spannungen im Holz

Werden die Quell- und Schwindverformungen eines Materials behindert, dann entstehen Spannungen innerhalb des Körpers. Für den Werkstoff Holz gibt es mehrere Aspekte, die eine Hinderung der Dehnungen verursachen. Ein zentraler Punkt ist hierbei das anisotrope Verhalten, da die hygri-sche Dehnung in tangentialer Richtung durch die etwa halb so ausgeprägte, radiale Verformung beschränkt wird (Häupl et al., 2017). Zudem sorgt der inhomogene Aufbau des Querschnitts für ein sehr diverses Verhalten. So quillt Spätholz durch die ausgeprägten Zellwände stärker als Frühholz und erzeugt somit Spannungen im Kontaktbereich (Wagenführ & Scholz, 2018). Des Weiteren ist die Feuchtigkeit nicht immer gleichmäßig über den gesamten Querschnitt verteilt. Bei Veränderungen der umgebenden Randbedingungen sind stets zuerst die äußeren Schichten betroffen (Niemz & Sonderegger, 2017). Dadurch entstehen Differenzen zwischen den inneren und äußeren Bereichen, aus welchen wiederum Eigenspannungen resultieren. Abbildung 2.12 zeigt, wie eine beispielhafte Probe mit zunächst gleichmäßiger Feuchteverteilung eine negative Holzfeuchtedifferenz erfährt. Es trocknen zuerst die äußeren Querschnittsteile, sodass in diesen Bereichen Querzugspannungen  $\sigma_{t,90}$  entstehen. Entsprechend herrschen im Inneren Querdruckspannungen  $\sigma_{c,90}$  (Neuhaus, 2017). Je größer und schneller die Veränderung der Umgebungsbedingungen stattfindet, umso größer sind auch die Holzfeuchtedifferenzen innerhalb des Querschnitts, und entsprechend groß werden die inneren Spannungen.

Über dies kann die Einbausituation zu Hinderungen der Verformungen führen, wie zum Beispiel Auflagersituationen, aus denen wiederum Spannungen resultieren (Wagenführ & Scholz, 2018). Folglich führen Feuchtigkeitsänderungen im Holzquerschnitt immer zu inneren Spannungen. Überschreiten diese Spannungen die Festigkeiten des Holzes, beispielsweise durch zu rasches Trocknen, dann kommt es zu plastischen Verformungen des Materials. Im Falle des Schwindens bedeutet dies einen Abbau der Zugspannungen durch Rissbildung, den sogenannte Schwindrissen. Da die tangentiale Richtung das größte Schwindmaß aufweist, entstehen die Risse in der Regel senkrecht dazu. Entsprechend verlaufen die Risse in Faserlängsrichtung, während die Einschnitte in radiale Richtung weisen.

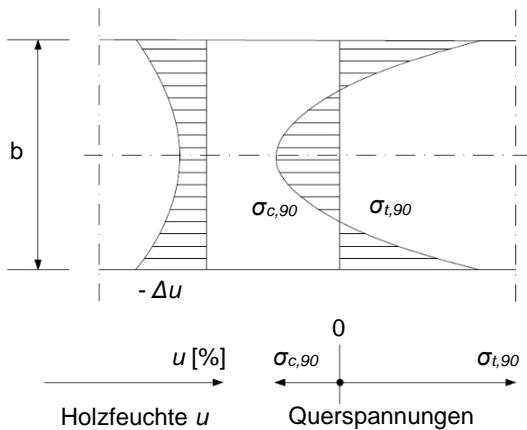


Abbildung 2.12: Qualitative Eigenspannungsverteilung (Querzugspannungen  $\sigma_{t,90}$  und Querdruckspannungen  $\sigma_{c,90}$ ) über die Breite  $b$  eines Holzquerschnitts bei negativer Feuchtedifferenz  $\Delta u$  % (Neuhaus, 2017)

## 2.5 Aufbau von Brettsperrholz und Verhalten gegenüber Feuchtigkeit

### 2.5.1 Definition und Fertigungsprozess

Brettsperrholz (BSP) ist ein flächiger Vollholzwerkstoff und wird auch als Massivholz, oder im Englischen als ‚cross laminated timber‘ (CLT; X-Lam), bezeichnet. Die mehrschichtigen Elemente bestehen aus mindestens drei miteinander verklebten Brettlagen. In ihnen liegen die Bretter parallel zur Elementebene und sind symmetrisch zur Mittellage angeordnet, siehe Abbildung 2.13. Folglich weist Brettsperrholz in der Regel eine ungerade Anzahl an Schichten auf. Die Dicke der einzelnen Lamellenlagen können variieren und auch der Einsatz bestimmter Holzwerkstoffe, wie z.B. OSB oder Furnierschichtholz, ist möglich (Neuhaus, 2017). BSP-Elemente werden im Bauwesen eingesetzt, um Scheiben- und Plattenbeanspruchungen abzutragen.



Abbildung 2.13: Drei- und Fünflagige Brettsperrholzelemente (Gustafsson et al., 2019)

Die Herstellung von BSP-Elementen erfolgt werkseitig durch einen maschinellen Prozess, wie ihn Abbildung 2.14 zeigt. Dafür wird das Vollholz zuerst technisch getrocknet (A) und im Anschluss

maschinell in die entsprechenden Festigkeitsklassen sortiert (B). Im nächsten Schritt (C) werden ggf. Fehl- und Schwachstellen entfernt und alle Bretter der Länge nach durch Keilzinkenstöße miteinander verbunden. Die Lamellen werden dann gehobelt und zugeschnitten. Daraufhin werden die Bretter in Lagen ausgelegt und der Leim aufgetragen, bevor die nächste Lage um 90° gedreht aufgebracht wird (D). Für die Aushärtung des Klebers (E) ist ein Pressdruck notwendig, welcher entweder hydraulisch oder durch ein Vakuumverfahren erzeugt wird. Zum Schluss wird das Bauteil durch CNC-Maschinen abgebunden (F). (Gustafsson et al., 2019; Mestek, Werther, & Winter, 2016) Durch das Lamellieren erreicht das BSP eine erhöhte Festigkeit sowie eine reduzierte Streuung der Eigenschaften gegenüber nativem Holz (Niemz & Sonderegger, 2017).

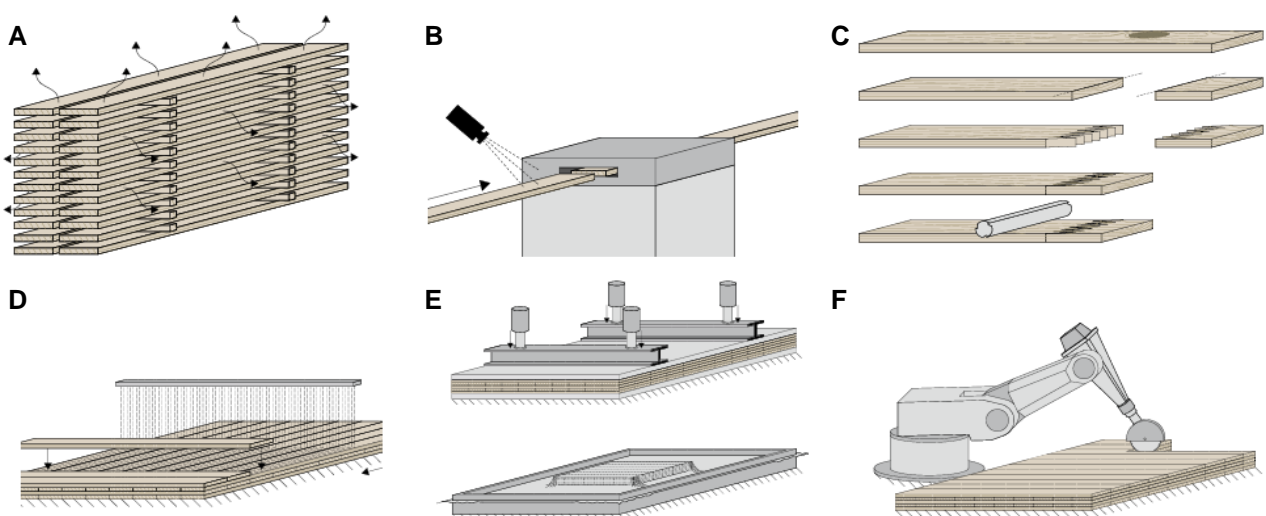


Abbildung 2.14: Herstellungsprozess von Brettsperrholz (Mestek et al., 2016)

Derzeit ist für die Verwendung von BSP in Deutschland eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder eine europäisch technische Zulassung des Produktes notwendig. Die Bemessung von BSP-Elementen ist anhand der jeweiligen Zulassung und der DIN EN 1995-1-1:2010 mit dem zugehörigen Nationalen Anhang möglich. Allerdings beinhaltet die Norm bisher keine spezifischen Angaben zu BSP. Mit der Einführung der DIN EN 1995-1-1:2022 wird der bisherige Eurocode 5 unter anderem um spezifische Brettsperrholz-Bemessungsregeln erweitert (Dietsch et al., 2018).

### 2.5.2 Feuchtigkeitstransport in Brettsperrholz

Das für die Herstellung von BSP verwendete Holz wird zuvor technisch getrocknet. Daher hat BSP beim Einbau in ein Gebäude einen Feuchtegehalt von etwa 5 - 15 % (Wagenführ & Scholz, 2018). Gemäß den Zulassungen Z-9.1-555 und ETA-20/0023 darf BSP lediglich für Beanspruchungen in den Nutzungsklassen (NKL) 1 oder 2, also in Innenräumen oder überdachten, nicht der Witterung ausgesetzten, Verhältnissen verwendet werden. Die Ausgleichfeuchte von BSP für NKL 1 liegt bei 5 – 15 % und für NKL 2 bei 10 - 20 % (Albert, 2014). Demnach erfahren BSP-Elemente üblicherweise

keine starken Feuchtigkeitswechsel (Niemz & Sonderegger, 2017). BSP besteht zu überwiegenden Teilen aus Vollholz und ist somit ebenfalls ein poröses, hygroskopisches Material, welches, über die in Kapitel 2.3 beschriebenen Vorgänge, Feuchtigkeit aufnimmt und transportiert (Neuhaus, 2017). Bei Holzwerkstoffen spielt jedoch auch immer der Klebstoff eine wichtige Rolle. Zur Verklebung von BSP-Elementen können verschiedene Arten von Klebstoffen verwendet werden. Allen gemeinsam ist jedoch, dass sie einen signifikant kleineren Diffusionskoeffizienten besitzen als Holz (Sonderegger et al., 2010). Deshalb dürfen die Klebstoffe, trotz ihrer dünnen Schichtdicke von lediglich etwa 0,1 mm, bei Betrachtungen des Feuchtetransportes, nicht vernachlässigt werden. Die in Kapitel 3 untersuchten BSP-Elemente wurden mit einem Einkomponenten-Polyurethan-Klebstoff (1K-PUR) verklebt (Arnold, Dietsch, & Winter, 2021). Diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie mit der Feuchtigkeit der Luft oder des Bauteiles reagieren und vergleichsweise schnell (innerhalb weniger Stunden) aushärten (Dunky & Niemz, 2002). Für BSP-Elemente wurde von Gereke et al. (2010) folgende Gleichung für den Diffusionskoeffizient von 1K-PUR Klebstoffen ermittelt:

$$D_{adh}(u) = C_1 \cdot u^{-C_2} + C_3 \quad (2.17)$$

mit

$D_{adh}$	Diffusionskoeffizient des Klebstoffes [m <sup>2</sup> /s]
$u$	Feuchtigkeitsgehalt [-]
$C_1$	= $9,17 \cdot 10^{-12}$ [m <sup>2</sup> /s], Formfaktor
$C_2$	= 0,51 [-], Formfaktor
$C_3$	= $-2,39 \cdot 10^{-12}$ [m <sup>2</sup> /s], Formfaktor

### 2.5.3 Feuchteinduzierte Verformungen und Spannungen von Brettspertholz

Feuchtigkeitsänderungen innerhalb des BSP führen zu einer entsprechenden Quell- oder Schwindverformung der Holzbretter, siehe Kapitel 2.4.1. Allerdings sperren die kreuzweise Anordnung der Lamellen und die starre, flächige Verklebung die Dehnungen. Innerhalb der Plattenebene verhindert die geringe longitudinale Verformbarkeit der einen Lamellen die große radiale bzw. tangentielle Verformung der anderen (Neuhaus, 2017). Das gilt sowohl für das Quellen als auch für das Schwinden. Dehnungen senkrecht zur Plattenebene werden quasi nicht gehindert. Daraus ergeben sich nach DIN EN 1995-1-1/NA die Rechenwerte für das Quell- und Schwindmaß von ganzen BSP-Elementen senkrecht zur Plattenebene zu  $\alpha_{\perp} = 0,25 \text{ \%}/\% \Delta u$  und in Plattenebene zu  $\alpha_{\parallel} = 0,02 \text{ \%}/\% \Delta u$ . Wird ein Bauteil am freien Quellen oder Schwinden gehindert, entstehen innere Spannungen, welche bei Überschreiten der Festigkeiten zur plastischen Verformung, also zu Rissen, führen. Bei BSP-Elementen sind davon vor allem die Querlagen betroffen (Dunky & Niemz, 2002). Bei ihnen wird das wesentlich größere Verformungspotential stets durch zwei senkrecht dazu verklebte Lagen gesperrt. Bei entsprechend extremen klimatischen Randbedingungen treten in diesen Querlagen Zugspan-

nungen quer zur Faser auf, die in parallel zur Faserrichtung verlaufenden Rissen enden (Wagenführ & Scholz, 2018).

Abgesehen von Feuchteänderungen, die zu Dicken- und Längenquellung führen, kommt es zu Verformungen und Spannungen, wenn Holzwerkstoffe einem Differenzklima ausgesetzt sind. Liegt auf einer Seite eine höhere Feuchtigkeit als auf der anderen Seite an, so verursacht dieser Umstand unterschiedliche Ausgleichsfeuchten und demzufolge ein differenziertes Quellen oder Schwinden der Schichten. Die Folge ist eine Krümmung des gesamten Bauteils. Abhängig von der Plattendicke, der Symmetrie des Aufbaus, der Faserorientierung bzw. der Jahrringlage und der herrschenden Gleichgewichtsfeuchte bietet BSP einen Widerstand gegen die klimabedingten Formänderungen, welcher als Formbeständigkeit bezeichnet wird (Wagenführ & Scholz, 2018). Insofern ist die Formbeständigkeit von asymmetrisch aufgebauten Massivholzelementen vergleichsweise gering.

## 2.6 Thermisch aktiviertes Brettsperrholz

Bei thermisch aktiviertem Massivholz handelt es sich um eine Weiterentwicklung des standardisierten BSP. Das Ziel ist es, die Elemente um ein integriertes Heiz- und Kühlsystem zu erweitern, welches zur Raumklimakonditionierung verwendet werden kann. Neben der thermischen Leistung des Systems sollen jedoch die brand-, schall-, feuchte- und wärmeschutz- sowie tragwerksrelevanten Eigenschaften des Brettsperrholzes weiterhin gegeben sein (Mindrup, 2020). Marktreife Produkte gibt es bisher noch nicht, allerdings wird an verschiedenen Möglichkeiten, Parametern und Einsatzbereichen geforscht. Die beiden nachfolgenden Ansätze unterscheiden sich bereits darin, welches Medium für die Wärmeübertragung innerhalb des Bauteils verwendet wird.

Das Forschungsprojekt „Massivholzplatten mit Funktionselementen in der Mittellage“ untersuchte die Möglichkeiten einer thermischen Aktivierung von dreilagigen Holzscheiben (Gecks & Plagge, 2015). Dabei wurden wasserführende Rohrleitungen, wie bei vergleichbaren Systemen in Stahlbeton-Bauweise, in die Mittellage eingeklebt. In den darauffolgenden Untersuchungen wurden die Einflüsse verschiedener Parameter überprüft und Verbesserungsmöglichkeiten entwickelt. Die Umsetzbarkeit von thermisch aktivierbaren Massivholzelementen zur Heizung und Kühlung von Räumen wurde nachgewiesen (Gecks & Plagge, 2015).

Bei der Forschungsinitiative „Dynamisch thermisch-hygrisches Verhalten von Massivbaukonstruktionen: Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex für Gebäude aus Mauerwerk und thermisch aktivierbare Massivholzelemente“ wurde die Machbarkeit von Systemen mit Luft als Trägermedium untersucht (Kornadt et al., 2019). Die in diesem Rahmen durchgeführten Forschungen an fünfplagigem BSP dienten als Grundlage für die Dissertation von Mindrup (2020), welche zudem weitere Versuchsergebnisse und tiefere Untersuchungen mit einbezog. Hier wurde Wasser als Medium für die Wärmeübertragung bewusst ausgeschlossen. Die Begründung hierfür liegt vor allem in dem hohen Schadensrisiko, mit welchem Wasserleitungen in einem tragenden Holzbauteil verbunden sind. Indes würden sowohl die Herstellung als auch eine materialreine Trennung am Lebenszyklusende erheblich erschwert. Die Luftkanäle hingegen sind lediglich Ausfräsungen einer bestimmten Lage des BSP und stellen keine große Herausforderung für die bestehenden maschinellen

Fertigungsanlagen dar (Mindrup, 2020). Für die Entwicklung dieser Elemente wurden ausschließlich Wandscheiben untersucht. Denn im Vergleich zu Deckenheizungen, lässt sich mit Wandelementen im Heiz- und ebenso im Kühlbetrieb ein angenehmes Raumklima erzeugen (Binsfeld, 2019). Zudem erfordert eine effiziente Herstellung dieser neuartigen BSP-Elemente ein gewisses Maß an Standardisierung. Letzteres ist mit Wandelscheiben einfacher umzusetzen als mit Deckenplatten (Mindrup, 2020). Aus den Forschungen ergibt sich, dass die beste Leistung des Heiz- bzw. Kühlsystems erzielt wird, wenn sich die Luftkanäle in der zweiten Ebene und nicht in der Mittellage des fünfplagigen Elements befinden (Mindrup, 2020). Entsprechend ist die Heizleistung am größten, wenn die BSP-Wand keine weiteren Bekleidungen besitzt, sondern als Sichtoberfläche ausgeführt wird. Voraussetzung hierfür ist jedoch die Luftdichtheit der Decklage. Infolgedessen muss sie entweder aus mehrschichtigen Holzwerkstoffplatten oder schmalseitenverklebten Brettern bestehen. Durch die Anordnung der Luftkanäle in Form einer Doppelharfe wird eine bestmögliche Durchströmung des Bauteils erreicht. Auf diese Weise lassen sich eine gleichmäßige Luftverteilung und eine baupraktisch sinnvoll umsetzbare Installation der Gebäudetechnik kombinieren (Mindrup, 2020). Die Heiz- bzw. Kühlwirkung entsteht, indem temperierte Luft durch die Kanäle geführt wird. Entsprechend ist die Leistung des Systems, im Rahmen gewisser Grenzwerte, von der Lufttemperatur abhängig. Die minimale Lufttemperatur im Kühlbetrieb muss über der Taupunkttemperatur (hier 16 °C) liegen, um das Entstehen von freiem Wasser und das daraus resultierende Risiko von Schädigungen innerhalb der Konstruktion zu vermeiden. Der Heizbetrieb sollte vor allem die herrschenden Randbedingungen berücksichtigen, damit extreme Umgebungsklimata mit relativen Luftfeuchten von weniger als 30 %, nicht zu einer Austrocknung und der Entstehung von Schwindrissen führen (Mindrup, 2020). Unter Einhaltung der genannten Punkte konnte die Machbarkeit von thermisch aktivierbaren Brettsper Holz, wie in Abbildung 2.15 dargestellt, nachgewiesen werden (Kornadt et al., 2019; Mindrup, 2020). Die Forschungen im Rahmen von InnoCrossLam und der vorliegenden Arbeit knüpfen an die von Kornadt et al. (2019) und Mindrup (2020) gewonnenen Erkenntnisse an.



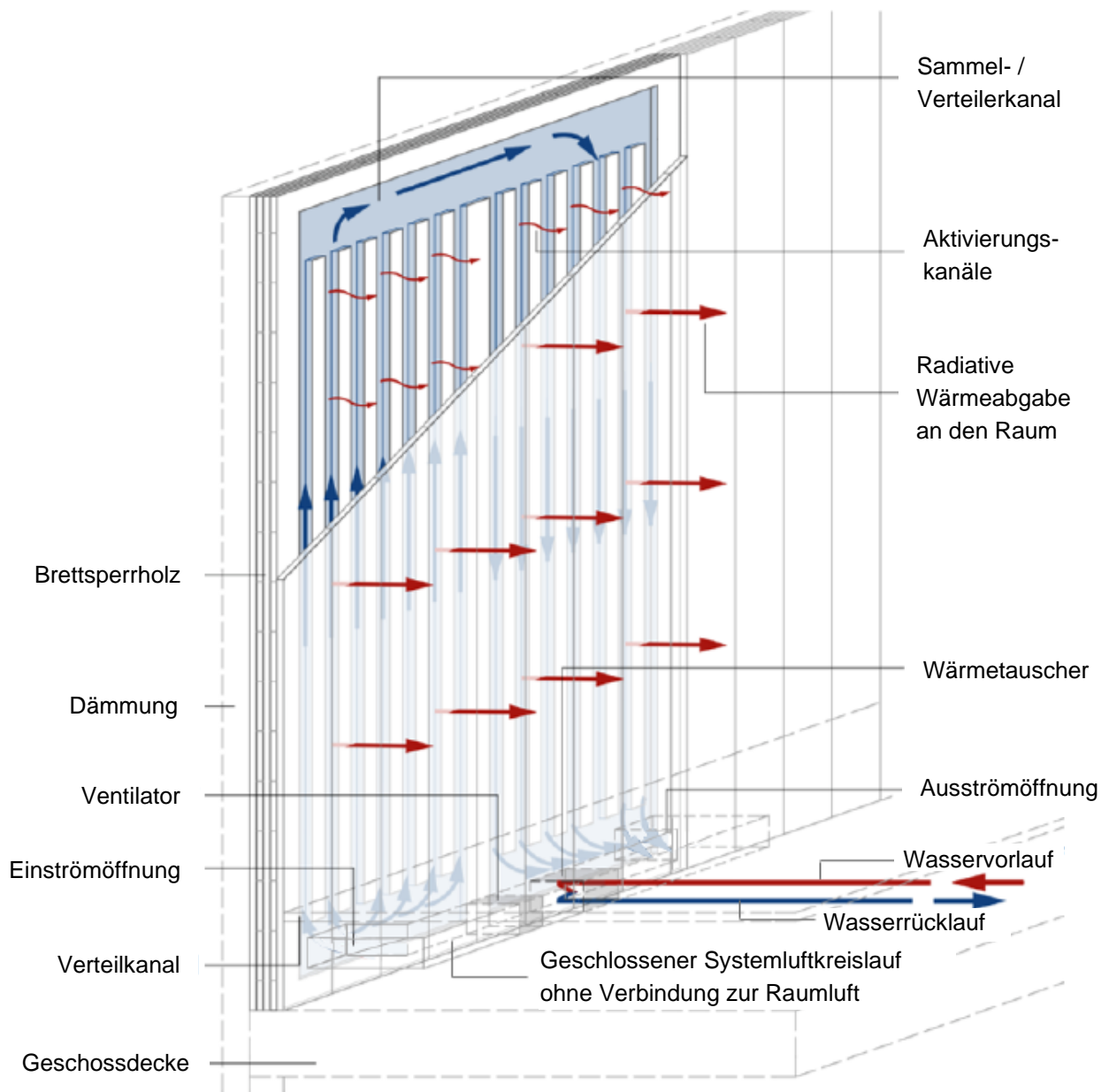


Abbildung 2.15: Schema eines luftführenden thermisch aktivierten Massivholzelements (Mindrup, 2020)

### 3 Experimentelle Untersuchungen

#### 3.1 Aufbau und Herstellung der Prüfkörper

Die Untersuchungen der Feuchtigkeitsänderungen und des Verformungsverhaltens thermisch aktivierten Brettsperrholzes wurden an sechs verschiedenen Serien mit je drei Prüfkörpern durchgeführt. Alle Elemente besitzen eine Länge von 1.000 mm und eine Höhe von 500 mm. Hierbei sind die Luftkanäle stets in einem 40 mm Raster angeordnet und deren Tiefe entspricht immer genau einer Lage, also 20 mm (Arnold et al., 2021). Die Serien unterscheiden sich im Aufbau und in den verwendeten Materialien, wie nachfolgend erläutert wird.

Die Prüfkörper der Serie M-1-n\_100/5\_5-NH\_g (kurz: M-1) sind BSP-Elemente, bestehend aus fünf kreuzweise angeordneten Lagen mit je 20 mm Stärke. Die thermische Aktivierung erfolgt über die Luftkanäle, welche von der Raumseite aus in die zweiten Lage eingefräst wurden, siehe Abbildung 3.1. Für die Lamellen wird Nadelholz der Festigkeitsklasse C24 verwendet. Die vier äußeren Lagen sind aus europäischer Fichte (*Picea abies*) gefertigt, während die Decklage aus Weißtanne (*Abies alba*) besteht (Arnold et al., 2021). Die Faserrichtung jener Decklage verläuft vertikal und somit parallel zu den Luftkanälen. Um die Luftdichtheit der Kanäle herzustellen, sind die Lamellen der Decklage gemäß DIN EN 12775 an den Schmalseiten ebenfalls verklebt. Die beschriebenen Prüfkörper stellen somit die naheliegendste Möglichkeit dar, BSP zu multifunktionalen Elementen weiter zu entwickeln und entsprechen dem von Mindrup (2020) verwendeten Prototypen B.

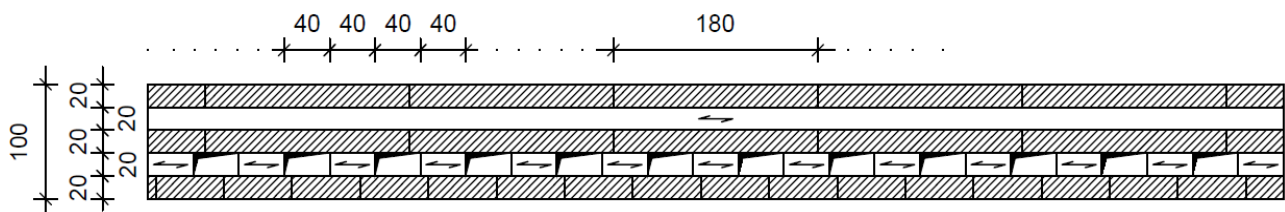


Abbildung 3.1: Querschnitt durch die Prüfkörper der Serie M-1 (Arnold et al., 2021)

Die Serie M-2-n\_99/5\_5-SWP\_g (kurz: M-2) ist ähnlich zur Serie M-1. Jedoch wird mit diesen Elementen der Einfluss einer Massivholzplatte als Decklage untersucht. Entsprechend ist der Aufbau, die Anordnung, die Orientierung und die Holzart der äußeren vier Lagen identisch zur Serie M-1. Lediglich die Deckschicht besteht hier aus einer 19 mm dicken dreilagigen Massivholzplatte (SWP/3 gemäß DIN EN 13353), wie sie auch Abbildung 3.2 darstellt (Arnold et al., 2021).

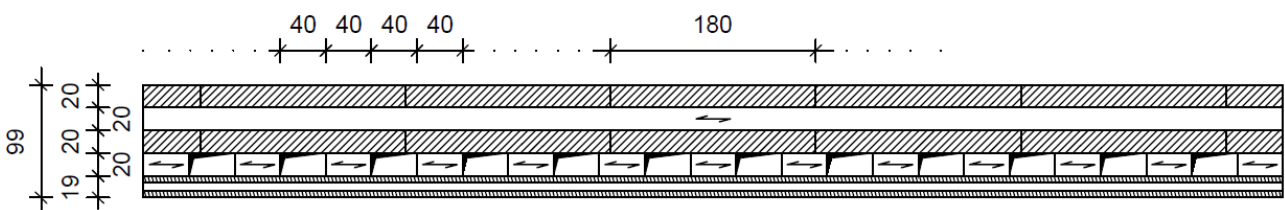


Abbildung 3.2: Querschnitt durch die Prüfkörper der Serie M-2 (Arnold et al., 2021)



Mit den Prüfkörpern der Serie M-3-n\_100/5\_5-NH90\_g (kurz: M-3) werden auf Basis der Elemente aus Serie M-1 die Auswirkungen einer um 90° gedrehten Decklage untersucht. Um die vertikale Tragrichtung beizubehalten bleibt das dreilagige BSP-Element auf der Außenseite unverändert und lediglich die Lamellenorientierung der Decklage, sowie die der Luftkanalebene werden gedreht, siehe Abbildung 3.3. Folglich weisen die Lamellen der Luftkanalebene in die gleiche Richtung wie diejenigen in der Mittellage. Die Faserrichtung der schmalseitenverklebten Weißtannen-Decklage verläuft entsprechend horizontal und somit senkrecht zu den Luftkanälen.

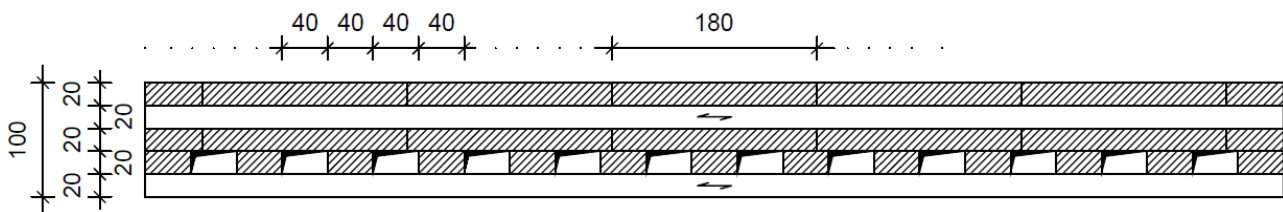


Abbildung 3.3: Querschnitt durch die Prüfkörper der Serie M-3 (Arnold et al., 2021)

Bei der Serie M-4-n\_100/5\_5-NHd\_g (kurz: M-4) handelt es sich ebenfalls um fünflagige BSP-Elemente, wie sie in Abbildung 3.4 dargestellt sind. Alle Schichten bestehen aus Fichte. Allerdings entfällt in dieser Serie die Abdeckung der Luftkanäle zum Raum hin durch eine weitere Ebene. Ziel ist es mit diesen Prüfkörpern das Verhalten des Holzes zu untersuchen, unter Verwendung von Decklagenmaterialien, die keinen Einfluss auf die Verformungen nehmen. Zudem kann diese Serie in gewissem Maße als Referenz herangezogen werden, da hier der Einfluss der Decklagen auf das Verhalten der verschiedenen Elementtypen erkennbar wird. Im Unterschied zu den oben beschriebenen Serien sind bei diesen Prüfkörpern vier ungestörte Lamellenlagen auf der Außenseite der Luftkanäle vorhanden.

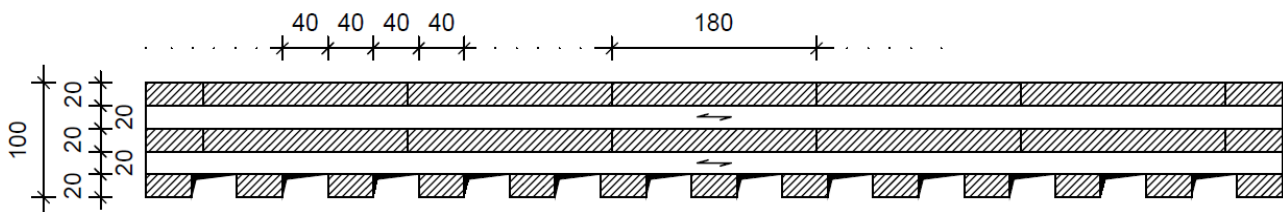


Abbildung 3.4: Querschnitt durch die Prüfkörper der Serie M-4 (Arnold et al., 2021)

Die Serie M-5-n\_112/6\_6-SWP\_g (kurz: M-5) ist die logische Weiterentwicklung der Serie M-4. Diese Reihe stellt den Fall dar, dass für die zuvor beschriebenen Elemente ein Holzwerkstoff als Decklage gewählt wird. Dieser wird verklebt und muss folglich bei den Verhaltensuntersuchungen berücksichtigt werden. Durch die Ergänzung einer dreilagigen Massivholzplatte (SWP/3 gemäß DIN EN 13353) entstehen sechslagige Elemente, wie sie in Abbildung 3.5 dargestellt sind. Die Dreischichtplatten sind, im Vergleich zur Serie M-2, lediglich 12 mm stark.

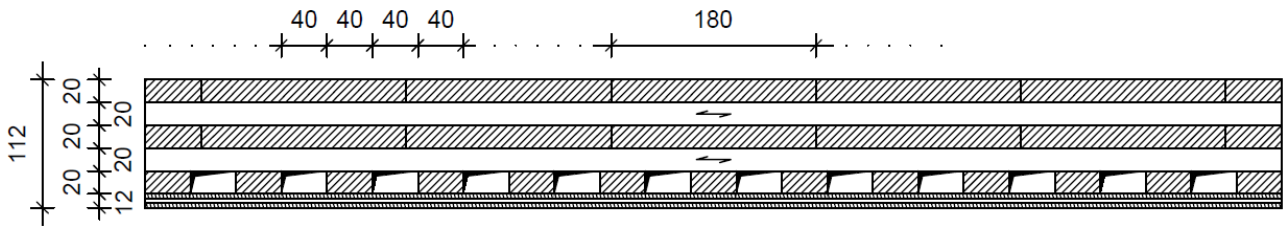


Abbildung 3.5: Querschnitt durch die Prüfkörper der Serie M-5 (Arnold et al., 2021)

Als Referenz zu den Serien aus multifunktionalem BSP dient die Serie O-1-n\_100/5\_0/90\_g (kurz: O-1). Die orthogonal angeordneten Lamellen aus Fichte ergeben fünflagige Elemente, wie sie standardmäßig im Holzbau eingesetzt werden, siehe Abbildung 3.6. Die Faserrichtung der Decklagen und die Haupttragrichtung der Prüfkörper sind vertikal ausgerichtet.

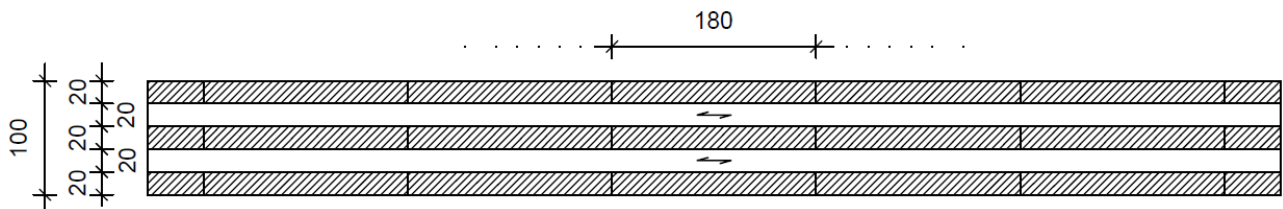


Abbildung 3.6: Querschnitt durch die Prüfkörper der Serie O-1 (Arnold et al., 2021)

Die Herstellung aller Prüfkörper erfolgte anhand geltenden bauaufsichtlichen Zulassungen bzw. europäisch technischer Zulassung. Die Keilzinkenverbindungen der Lamellen wurde mit einem 1K-PUR Klebstoff Typ 1 nach DIN EN 301 gemäß Z-9.1-711 ausgeführt. Die Fertigung der multifunktionalen Elemente fand zweigeteilt statt. Einerseits wurden die drei bzw. vier ungestörten orthogonalen Lagen eines Bauteils anhand ETA-20/0023 erstellt. Zum Anderen erfolgte die Produktion der Decklagen, gemäß Z-9.1-555, als zweilagige Platte, in welche sodann die Luftkanäle eingefräst wurden. Um aus diesen beiden getrennten Teilen die oben beschriebenen multifunktionalen BSP-Elemente herzustellen, wurden sie durch einen weiteren 1K-PUR Klebstoff Typ 1 nach DIN EN 301, mit der Zulassung Z-9.1-691, verbunden. (Arnold et al., 2021)



Abbildung 3.7: Vorbereitung der Prüfkörper mit diffusionsdichter Aluminiumfolie und Verformungsbehinderung

Zur Vorbereitung der Versuchsdurchführung wurden alle 18 Prüfkörper mit diffusionsdichter Aluminiumfolie abgeklebt, sodass lediglich die Oberfläche der Decklagen und die Luftkanäle in direktem Kontakt zur Außenluft stehen. Dies simuliert den eingebauten Zustand, bei welchem alle weiteren Flächen durch andere Materialien bedeckt sind. Um auch mechanische Einschränkungen im Einbauzustand zu berücksichtigen wird in jeder Serie jeweils ein Prüfkörper an seiner Verformung gehindert. Die Abbildung 3.7 zeigt, wie dies über drei angeschraubte Kanthölzer umgesetzt wurde. Nachfolgend werden die an der Verformung gehinderten Prüfkörper durch ein „(V)“ gekennzeichnet.

### 3.2 Versuchsdurchführung

Das Ziel des Versuches war die Untersuchung des Prüfkörperverhaltens bei Feuchtigkeitsänderungen. Derartige Feuchtwechsel finden bei der angestrebten thermischen Aktivierung über den Kontakt zur angrenzenden Luft, also über Diffusion, statt. Um kontrollierte Umgebungsbedingungen sicher zu stellen, wurden die Versuchsobjekte in einer Klimakammer positioniert, siehe Abbildung 3.8, und dort verschiedenen Klimata ausgesetzt.



Abbildung 3.8: Anordnung der Prüfkörper in der Klimakammer

Über einen Zeitraum von 208 Tagen wurden fünf unterschiedliche klimatische Phasen angewendet, welche in Tabelle 3.1 zusammengefasst sind. Im Zeitraum vor dem Versuchsbeginn kam es bei den Prüfkörpern zu unbeabsichtigten Veränderung der Holzfeuchtigkeit. Eine große Streuung der Anfangsfeuchte führt jedoch zu ungleichmäßigen Ergebnissen (Trübswetter, 2009). Daher hat der Versuch mit zwei Stabilisierungsphasen begonnen, während derer die Holzfeuchtigkeit in einen einheitlichen Bereich von etwa 12 % gebracht werden sollte. Im Anschluss daran wurde eine Heizphase eingeleitet, um den kritischen Trocknungs- und Schwindvorgang zu erfassen. Darauf folgte eine vergleichsweise kurze Übergangsphase, welche einen extremen Kühlbetrieb mit tiefen Temperaturen und hoher relativer Luftfeuchtigkeit simulierte. Zuletzt wurde in der fünften Phase eine normale Kühlung angelegt. Für diese wurde entsprechend die Temperaturen erhöht und die Luftfeuchtigkeit

in einen moderaten Bereich eingestellt. Aufgrund eines Defektes an der Klimakammer musste der Versuch danach abgebrochen werden.

Tabelle 3.1: Die fünf klimatischen Phasen der experimentellen Untersuchung

Nr.	Phase	Zeitraum (Anzahl der Tage)	Mittleres Klima
1	Stabilisierungsphase 1	06.05. – 18.06.2020 (43 Tage)	19,5 °C, 80 % rel. LF.
2	Stabilisierungsphase 2	19.06. – 31.07.2020 (43 Tage)	19,5 °C, 70 % rel. LF.
3	Heizphase	01.08. – 22.09.2020 (53 Tage)	39,0 °C, 40 % rel. LF.
4	Übergangsphase	23.09. – 18.10.2020 (26 Tage)	2,6 °C, 63 % rel. LF.
5	Kühlphase	19.10. – 30.11.2020 (43 Tage)	12,2 °C, 47 % rel. LF.

Um die genauen Bedingungen zu ermitteln, welchen die Prüfkörper ausgesetzt waren, wurde innerhalb der Klimakammer ein HOBO Datenlogger platziert. Über ihn erfolgte in regelmäßigen Abständen die Aufzeichnung der herrschenden Temperaturen und relativen Luftfeuchtigkeiten, welche als Mittelwert über zwölf Stunden gespeichert wurden. Anhand dieser Daten ergibt sich die Darstellung der Klimadaten in Abbildung 3.9.

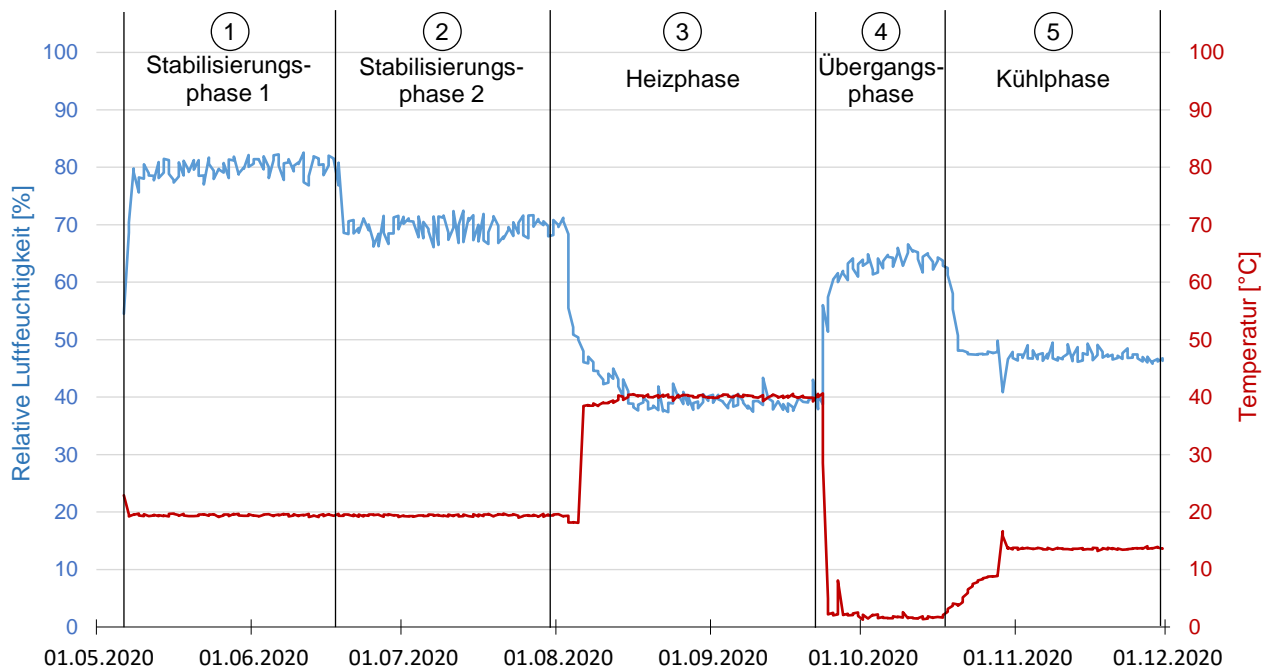


Abbildung 3.9: Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur über den gesamten Versuchszeitraum

Im Rahmen der Bachelor Thesis von Forster (2020) wurde der Versuch mit verschiedenen Messungen der Prüfkörper begleitet. Vor allem während der Heizphase erfolgten die Aufzeichnungen in

vergleichsweise engen und regelmäßigen Intervallen. Eine Übersicht der durchgeführten Ortstermine kann der Tabelle A.1 im Anhang und die dabei festgestellten Werte können Forster (2020) entnommen werden. Die Lage der verschiedenen Messpunkte wird durch die Abbildung 3.10 veranschaulicht.

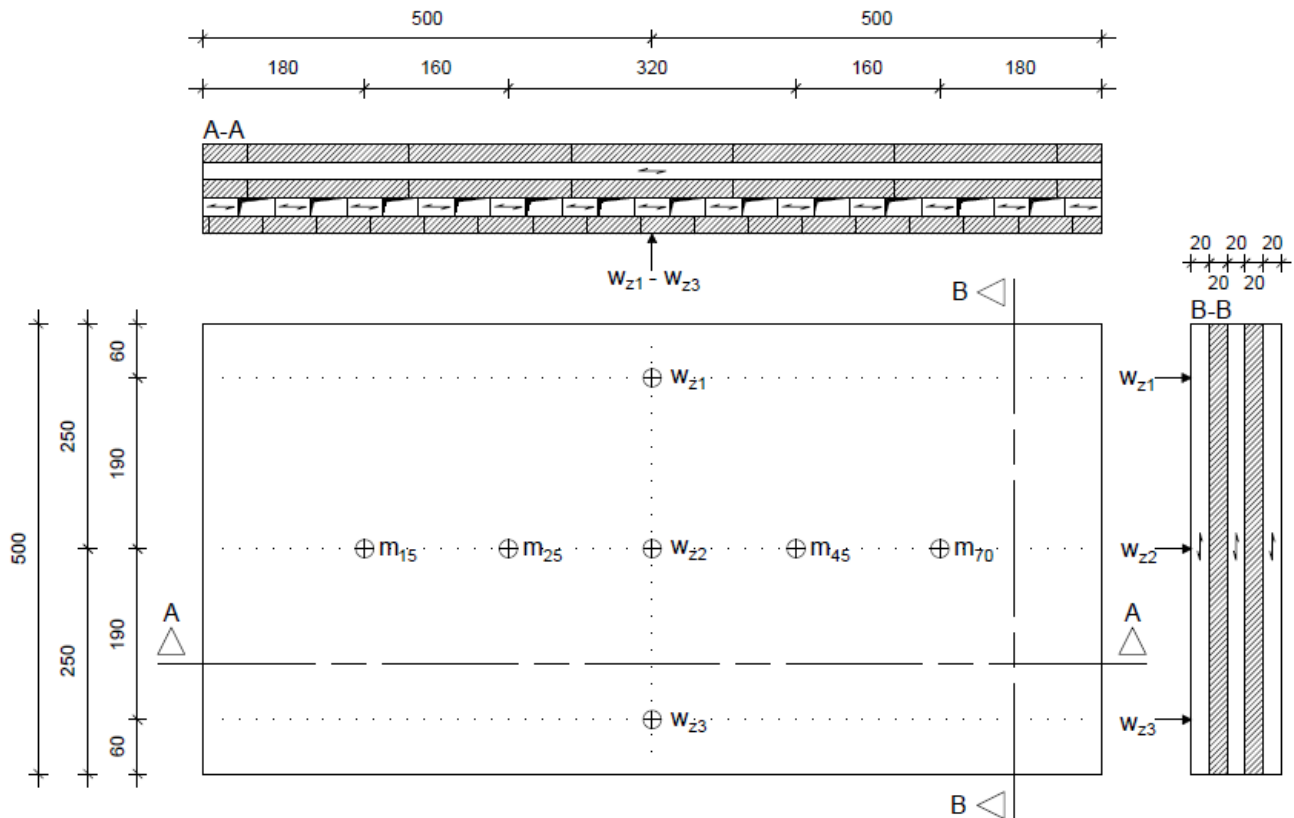


Abbildung 3.10: Schema zur Anordnung der Messpunkte (Arnold, 2020)

Die Holzfeuchtigkeit wurde nach dem Widerstands-Messprinzip, mit Hilfe eines entsprechenden Gerätes (GANN Hydromette HT 65) und Einsteck-Elektrodenpaaren, ermittelt (Forster, 2020). Die Messung erfolgte an vier Punkten  $m$  in 15, 25, 45 und 70 mm Tiefe, ausgehend von der Sichtoberfläche. Da vor allem die Reaktionen auf die Feuchtigkeitsänderungen von Interesse sind, wurden zudem die Verformungen aufgezeichnet. Gemäß Kapitel 2.5 war die erwartete Formänderung hauptsächlich eine Krümmung der Prüfkörper. Um dies quantifizieren zu können, wurde der Stich der gebogenen Oberfläche ermittelt. Dafür wurde eine spezielle Messlatte horizontal an die Prüfkörper angelegt, sodass die daran befestigte Nadel genau im jeweiligen Messpunkt  $w$  lag, siehe Abbildung 3.10. Die Strecke, welche die Nadel von der Messlatte bis zur Holzoberfläche ausfahren konnte, entspricht dem Stich und wurde von einer Messuhr abgelesen. In Abbildung 3.11 ist die Messrichtung und die Definition der Vorzeichen dargestellt. Dabei entspricht ein positiver Wert, bezogen auf einen unverformten Körper, einer Verkrümmung, welche beim Schwinden entsteht, und ein negativer Wert stellt eine Quellung dar. Aus Symmetriegründen muss die Verformung in den Punkten  $w_{z1}$  und  $w_{z3}$



identisch sein, weshalb der Stich stets nur in den Punkten  $w_{z2}$  und  $w_{z3}$  gemessen wurde. Mit der Verformungsmessung wurde zum Ende der Phase 2 begonnen.

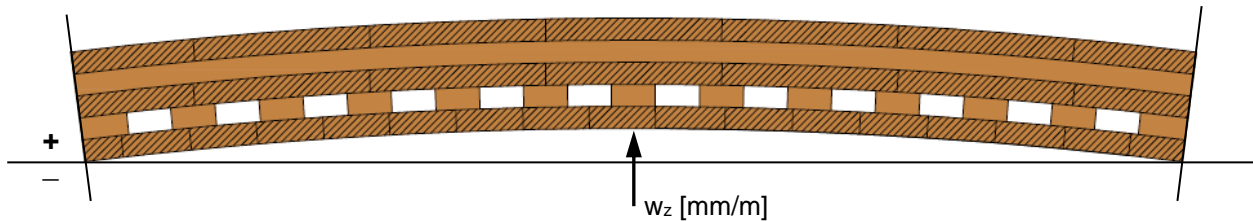


Abbildung 3.11: Skizze zur Messung der Verformung über den Stich der Krümmung (Arnold, 2020)

Des Weiteren erfolgte am Ende der Heizphase eine handnahe und visuelle Untersuchung der Prüfkörper auf Risse. Zu diesem Zweck wurde bereits vor dem Versuchsbeginn ein Raster von 10 cm x 10 cm auf die Holzoberfläche gezeichnet, wie Abbildung 3.12 beispielhaft zeigt.



Abbildung 3.12: Vorbereitung des Prüfkörpers M-2-3 (V) mit aufgezeichnetem Raster und Einsteck-Elektrodenpaaren

### 3.3 Ergebnisse

#### 3.3.1 Holzfeuchtigkeit und Verformung

Die nachfolgend dargestellten Holzfeuchtigkeiten sind stets Durchschnittswerte, die anhand der drei Prüfkörper pro Serie erstellt wurden. Bei den Verformungen werden die Ergebnisse der beiden freien Prüfkörper gemittelt und die des Gehinderten separat betrachtet. Zudem werden die Verformungsmessungen vom 07.09.2020 nicht einbezogen, da diese bei allen Körpern zu Abweichungen führen, die lediglich durch einen Messfehler erklärbar sind.

Die Abbildung 3.13 zeigt, dass die Holzfeuchtigkeit bei Serie M-1 während der ersten Phase einen Anstieg erfährt. Im Laufe der Phase 2 nimmt die Feuchtigkeit jedoch wieder leicht ab und liegt zum Ende hin in einem Bereich von 11,4 bis 13,7 %. Der Tiefpunkt am 03.07.20 ist, aufgrund der Gleichförmigkeit über alle Tiefen des Querschnittes, ein Messfehler. Die erste Messung der Verformung zeigt, dass die Bauteile nach der zweiten Phase gequollen sind. In der anschließenden Heizphase fällt die Holzfeuchtigkeit in  $m_{15}$ ,  $m_{25}$  und  $m_{45}$  stark ab, bevor sie sich der Ausgleichsfeuchte annähert. Diesem Verlauf folgt  $m_{70}$  nicht, sondern weist über die gesamte Heizphase eher eine lineare Abnahme auf. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass die Messungen das träge Verhalten einer Schicht darstellen, welche nicht in direktem Kontakt mit der Luft steht. Mit der Trocknung, von durchschnittlich 12,2 auf etwa 5,8 %, geht direkt eine Schwindverformung einher, welche sich durch einen Anstieg von über 8,0 mm in  $w_{z2}$  und  $w_{z3}$  ausdrückt. In den Bereichen, in welchen sich die Holzfeuchtigkeit kaum ändert, bleibt auch die Verformung nahezu konstant. Mit der Phase 4 erfolgt eine Befeuchtung, die nach einem steilen Anstieg zu einer relativ einheitlichen Holzfeuchtigkeit innerhalb des Querschnitts führt. Diese scheint sich daraufhin erneut einer Gleichgewichtsfeuchte anzunähern und ändert sich bis zum Ende der fünften Phase nur unwesentlich. Folglich quillt der Prüfkörper bis etwa zum unverformten Zustand und verharrt dort, da bei einheitlicher Holzfeuchteverteilung keine Krümmung entsteht. Die Verformung des gehinderten Elementes folgt dem Verlauf der freien Prüfkörper, jedoch in weniger ausgeprägter Form. Die gemessenen Werte  $w_{z2}$  und  $w_{z3}$  sind für die Bauteile ohne als auch für diejenigen mit Hinderung stets nahezu identisch.

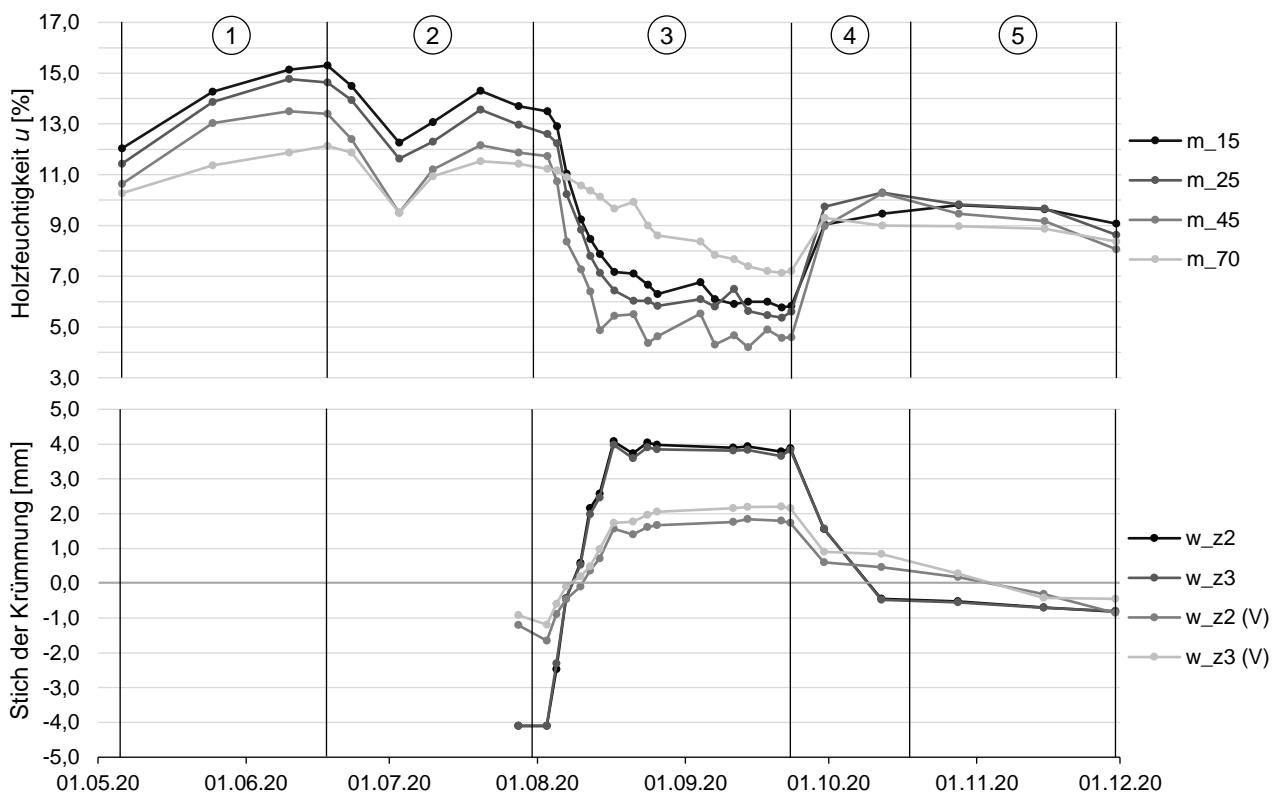


Abbildung 3.13: Gemessene Holzfeuchtigkeiten und Stiche der Krümmungen der Serie M-1 im zeitlichen Verlauf der experimentellen Untersuchung

In der Serie M-2 steigen die Holzfeuchtigkeiten in allen Tiefen gleichermaßen über die erste Phase hinweg an, bevor sie im Verlauf der Phase 2 einen leichten Abfall aufweisen und an dessen Ende bei durchschnittlich 11,6 % liegen. Während der Heizphase fallen die Holzfeuchtigkeiten der raumseitigen Lagen steil ab und nähern sich der Ausgleichsfeuchte an, während  $m_{70}$  eine nahezu lineare Trocknung aufweist. Zum Ende der dritten Phase liegt die Holzfeuchte des Querschnittes im Bereich zwischen 5,0 und 7,8 %. Die Folge der starken Trocknung ist ein steiler Anstieg der Verformung von -0,5 mm auf etwa 1,0 mm. Im Anschluss daran ändert sich die Verformung kaum. Die auftretenden Schwankungen resultieren aus Messungenauigkeiten. In der vierten Phase werden die Prüfkörper schnell befeuchtet, bis sie ein Niveau von etwa 9,3 % erreichen und dieses nahezu konstant bis zum Versuchsende halten. Lediglich die Feuchtigkeit der Decklage nimmt mit dem Übergang zu Phase 5 nochmals zu. Die Verformung infolge der Befeuchtung ist erwartungsgemäß ein Quellen bis knapp über den nicht gekrümmten Zustand hinaus. Bis zum Ende des Versuchs nähern sich die Bauteile noch weiter dem Ausgangszustand an. Insgesamt liegen die Verformungen der freien und des gehinderten Prüfkörpers stets annähernd im selben Bereich, wobei die freien Elemente ein minimal ausgeprägteres Verhalten zeigen.

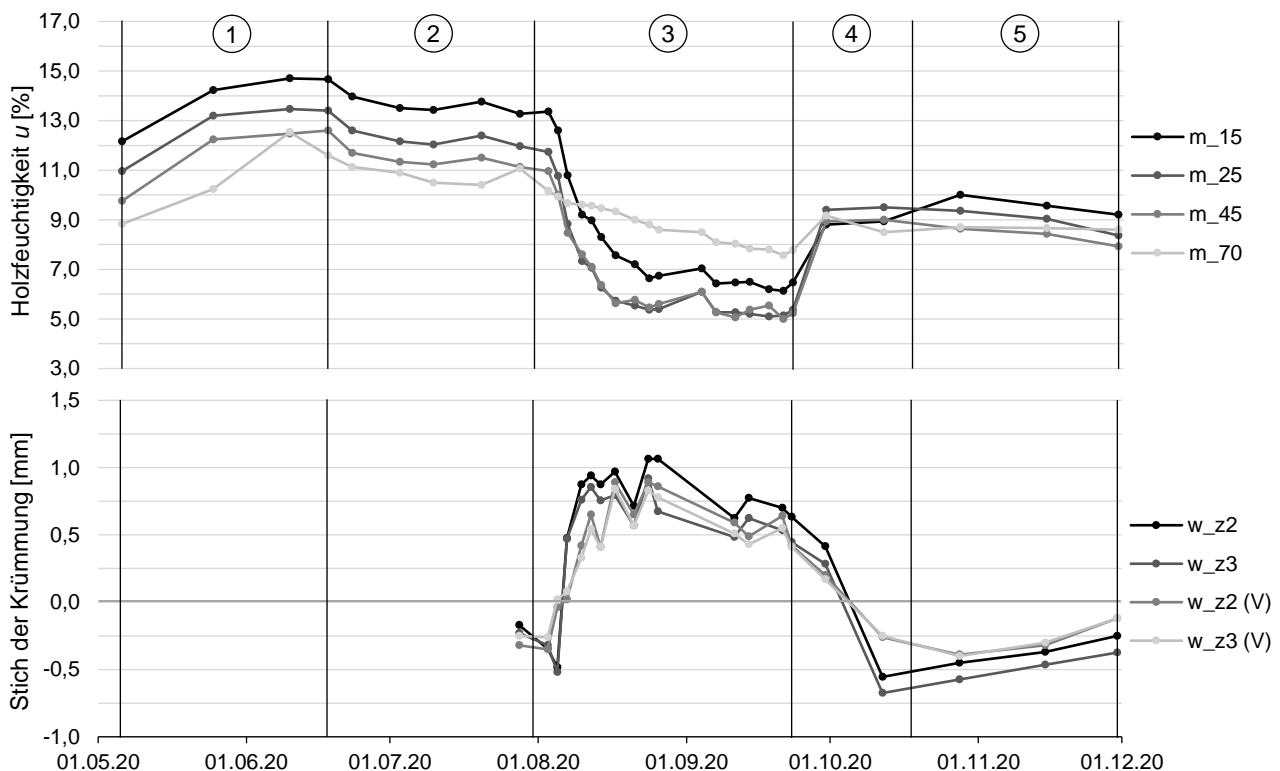


Abbildung 3.14: Gemessene Holzfeuchtigkeiten und Stiche der Krümmungen der Serie M-2 im zeitlichen Verlauf der experimentellen Untersuchung

Die Holzfeuchtigkeiten der Serie M-3 steigen durch das Klima der ersten Phase durchschnittlich um 3,3 % an, bevor sie im Verlauf von Phase 2 über alle Tiefen eine leichte Abnahme zeigen und zum Ende hin einen Durchschnitt von 12,4 % ergeben. In der Heizphase fallen die Feuchtigkeiten der raumseitigen Schichten steil ab und nähern sich der Gleichgewichtsfeuchte an, während  $m_{70}$  eine



nahezu lineare Trocknung aufweist. Zum Ende der dritten Phase liegt die Holzfeuchtigkeit des Querschnittes in einem Bereich von 5,0 bis 7,1 %. Das Resultat der starken Trocknung ist ein steiler Anstieg der Verformung von -1,0 auf etwa 0,5 mm. Im Anschluss daran kehrt sich die Verformung jedoch wieder um und fällt bis zu einem Wert von ca. -0,4 mm am Ende der Heizphase zurück. Der Grund hierfür scheint im Verlauf der Feuchtigkeitsgradienten zu liegen. Da die drei raumseitigen Lagen eine nahezu identische Holzfeuchtigkeit aufweisen, bieten sie keinen Anlass zur Krümmung. Durch die lineare Annäherung der äußeren Lagen reduziert sich die Differenz über den gesamten Querschnitt weiter, sodass die vorhandene Krümmung trotz anhaltendem Heizbetrieb nachlässt. Folglich handelt es sich hier nicht um eine Quellverformung, denn diese würde eine Befeuchtung erfordern. Eine Quellung geht mit dem Klima der Phase 4 einher. Hier steigt die Holzfeuchtigkeit stark an, bevor sie sich bis zum Versuchsende nur noch unwesentlich ändert. Die Verformung infolge der Befeuchtung ist eine Quellung. Bis dahin lagen die Verformungen der freien und des gehinderten Prüfkörpers stets im annähernd selben Bereich. Während jedoch die Krümmung der ungehinderten Elemente gemäß des Feuchtigkeitsverlaufes nahezu konstant bleiben, steigt die Verformung des gehinderten Prüfkörpers um mehr als 0,5 mm an, bevor sie wieder abfällt.

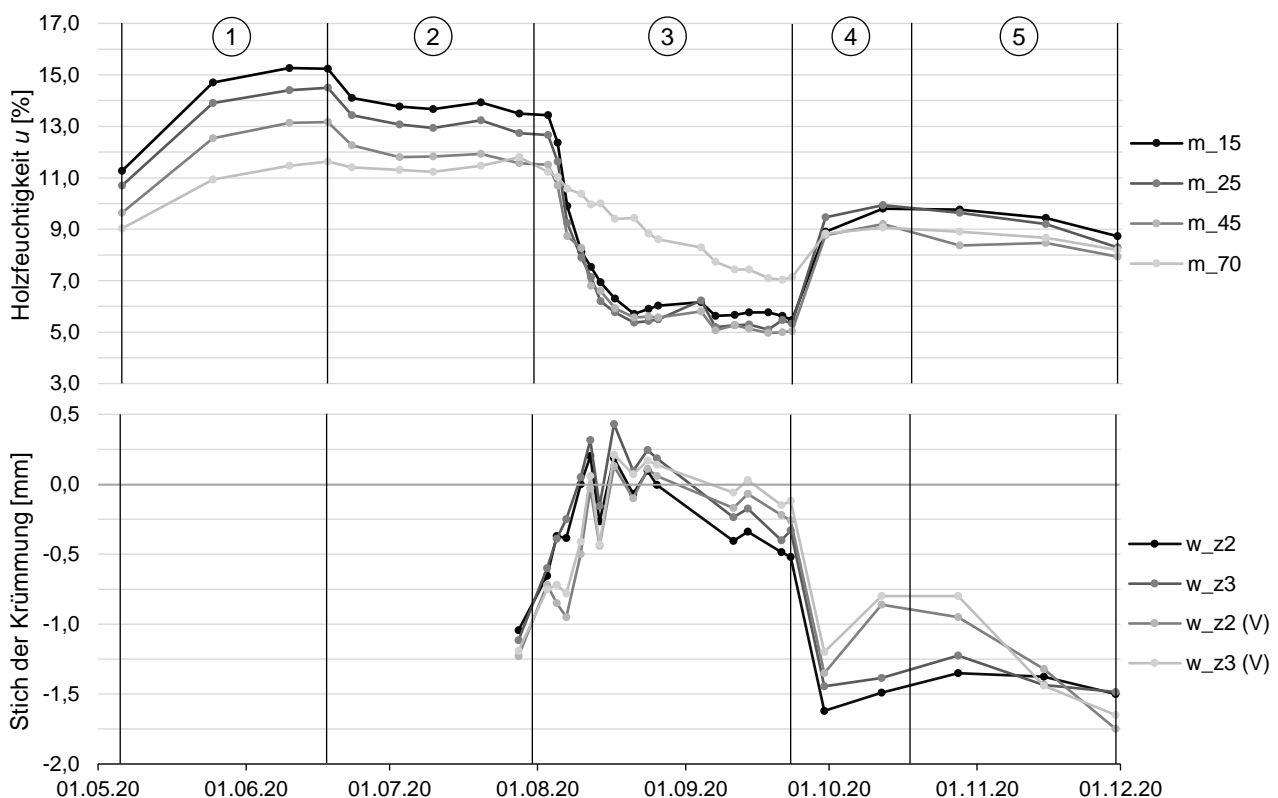


Abbildung 3.15: Gemessene Holzfeuchtigkeiten und Stiche der Krümmungen der Serie M-3 im zeitlichen Verlauf der experimentellen Untersuchung

Bei der Serie M-4 ist der besondere Aufbau der Prüfkörper zu beachten. Allerdings verlaufen die Holzfeuchtigkeiten in den beiden Stabilisierungsphasen sehr ähnlich zu den drei zuvor beschriebenen Serien und liegen am Ende der zweiten Phase bei einem Durchschnitt von 11,3 %. Mit der

Heizphase setzt die Trocknung ein, bei welcher  $m_{15}$  und  $m_{25}$  den typisch fallenden Verlauf aufzeigen. Anders verhalten sich jedoch  $m_{45}$  und  $m_{70}$ . Sie messen die Feuchtigkeit in Lagen, die keinen direkten Luftkontakt besitzen. Je tiefer der Messpunkt liegt, umso träger verläuft die Trocknung und desto linearer und flacher ist das Gefälle der Holzfeuchtigkeit. Am Ende der dritten Phase ist der Querschnitt auf einen Bereich von 5,0 bis 8,0 % getrocknet. Eine relativ starke Verformung als Reaktion auf die Trocknung bleibt jedoch aus und ist auf das Fehlen einer durchlaufenden Decklage zurückzuführen. Trotzdem erfolgt über den Zeitraum der Heizphase eine Schwindverformung von etwa 1,0 mm. Die auftretenden Schwankungen resultieren nicht aus den Feuchtigkeitsverläufen und werden daher auf Messungenauigkeiten zurückgeführt. Die schnelle Befeuchtung in der vierten Phase führt auch bei diesen Prüfkörpern zu einer sehr einheitlichen Feuchtigkeitsverteilung über den Querschnitt, welche bis zum Versuchsende leicht abnimmt. Die Verformung infolge der Befeuchtung ist eine Quellung. Bis dahin lag das Verhalten der freien und des gehinderten Prüfkörpers stets nah beieinander. Während jedoch die Krümmung der ungehinderten Elemente gemäß des Feuchtigkeitsverlaufes nahezu konstant bleiben, fällt die Verformung des gehinderten Prüfkörpers in Phase 5 um über 1,0 mm.

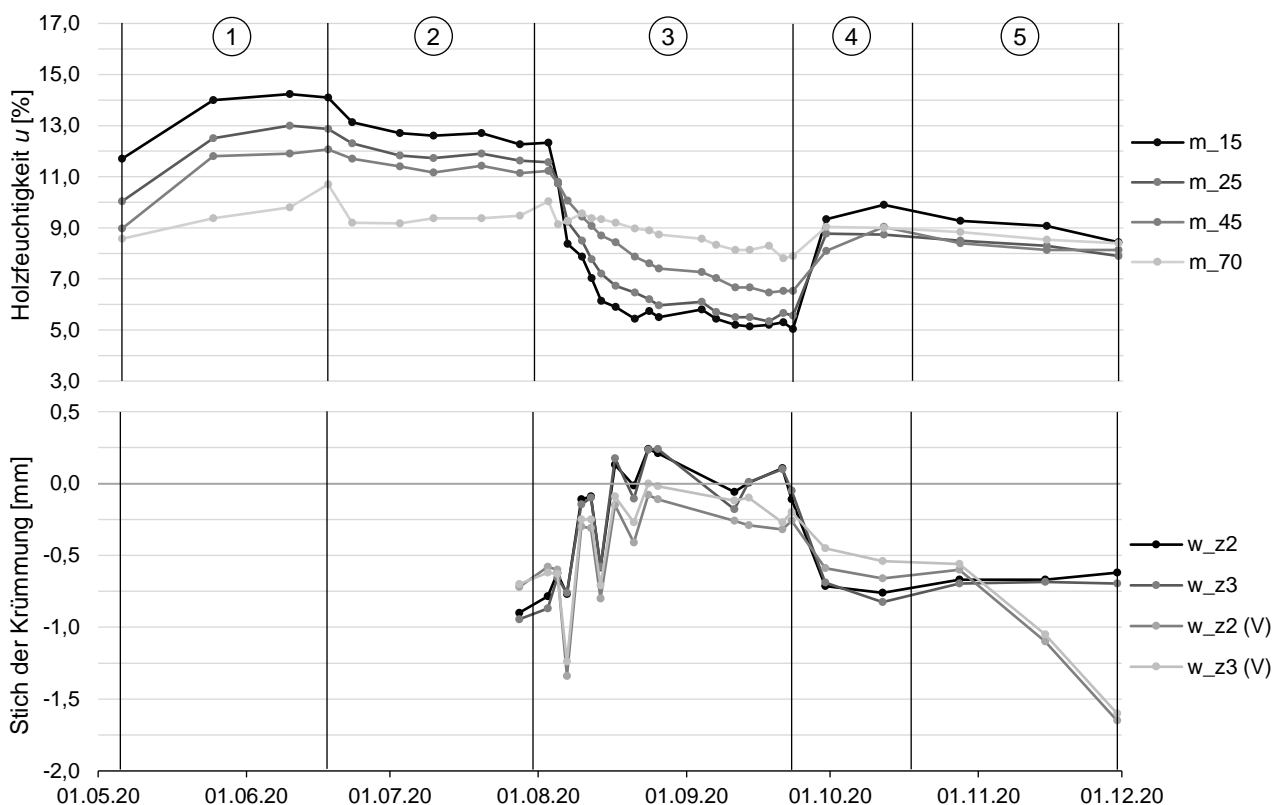


Abbildung 3.16: Gemessene Holzfeuchtigkeiten und Stiche der Krümmungen der Serie M-4 im zeitlichen Verlauf der experimentellen Untersuchung

Da die Prüfkörper der Serie M-5 eine lediglich 12 mm starke Deckplatte besitzen, wird an den Punkten  $m_{15}$  und  $m_{25}$  die Holzfeuchtigkeit in derselben Lage gemessen. Daher sind die entsprechenden Verläufe stets nahezu identisch. Während der ersten Phase steigen die Holzfeuchtigkeiten in allen

Tiefen gleichermaßen an, bevor sie im Verlauf von Phase 2 insgesamt leicht abfallen und am Ende der Stabilisierungsphase bei durchschnittlich 12,0 % liegen. Der Einbruch am 03.07.20 wird, wie bei Serie M-1, aufgrund des einheitlichen Verhaltens über alle Tiefen als Messfehler angesehen. Während der Heizphase fallen die Holzfeuchtigkeiten der raumseitigen Schichten steil ab und nähern sich der Ausgleichsfeuchte an. Während  $m_{15}$ ,  $m_{25}$  und  $m_{45}$  zum Ende der dritten Phase eine Feuchte von etwa 5,5 % aufweisen, fällt  $m_{70}$  durch eine nahezu linearen Verlauf lediglich auf 7,7 % ab. Die Folge der starken Trocknung ist eine ausgeprägte Schwindverformung von -1,6 auf etwa 0,6 mm. Die auftretenden Schwankungen resultieren nicht aus den Feuchtigkeitsverläufen und werden daher auf Messungenauigkeiten zurückgeführt. Im Anschluss geht aufgrund der sinkenden Feuchtigkeitsdifferenz zu  $m_{70}$  die Krümmung wieder leicht zurück. Der steile Anstieg der Holzfeuchtigkeiten in Phase 4 zeigt eine schnelle Befeuchtung der Bauteile, die sich danach an die Ausgleichsfeuchte annähern. In der fünften Phase folgt nochmals eine leichte Abnahme der Feuchtigkeit. Die Verformung infolge der Befeuchtung ist erwartungsgemäß das Quellen der Prüfkörper. Dieser Zustand wird eine Zeit lang nahezu konstant beibehalten, bevor die Krümmung ohne einen aus dem Feuchtigkeitsverlauf resultierenden Grund in Phase 5 weiter zunimmt. Insgesamt liegen die Verformungen der freien und des gehinderten Prüfkörpers stets im annähernd selben Bereich, wobei die Ungehinderten ein etwas ausgeprägteres Verhalten zeigen.

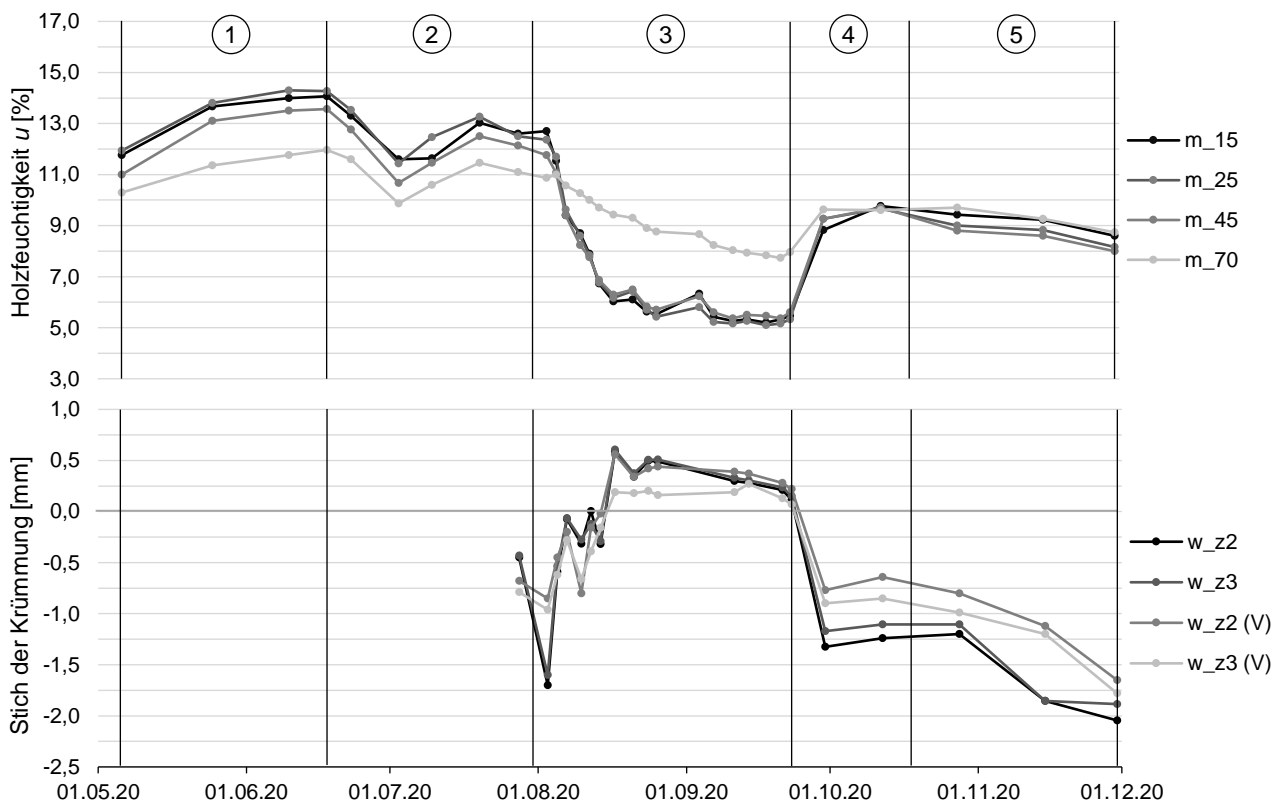


Abbildung 3.17: Gemessene Holzfeuchtigkeiten und Stiche der Krümmungen der Serie M-5 im zeitlichen Verlauf der experimentellen Untersuchung

Die Serie O-1 dient als Referenz und stellt ein ungestörtes BSP-Element ohne Luftkanäle dar. Folglich wirken sich Änderungen der klimatischen Bedingungen nur von außen auf das Bauteil aus und deren Einfluss wird mit zunehmender Tiefe immer schwächer. Während  $m_{15}$  klar den sich ändernden äußeren Einwirkungen folgt, sind  $m_{25}$  und  $m_{45}$  weitaus weniger ausgeprägt, siehe Abbildung 3.18. Bei Betrachtung von  $m_{70}$  fällt auf, dass in dessen Tiefe die Feuchtigkeit über den gesamten Zeitraum hinweg nahezu konstant im Bereich zwischen 9,0 und 11,5 % bleibt. Die Trocknung der Decklage während der Heizphase, von 12,0 auf 6,1 %, spiegelt sich deutlich in der Schwindverformung der ungehinderten Prüfkörper wider. Zugleich nimmt der Stich in  $w_{z2}$  und  $w_{z3}$  über die gesamte Heizphase von etwa -0,4 auf 1,2 mm zu. Die Befeuchtung in der vierten Phase hat lediglich eine schwache Quellverformung zur Folge, bevor sowohl Holzfeuchtigkeit als auch Krümmung bis zum Ende der Phase 5 quasi konstant bleiben. Der gehinderte Prüfkörper zeigt, aufgrund der Aussteifung auf der Rückseite, dieses Verhalten nicht. Zu sehen ist dies anhand einer über den betrachteten Zeitraum geringen Änderung der Verformung um maximal 0,5 mm, wobei die Schwankungen aufgrund von Messungenauigkeiten nicht berücksichtigt werden.

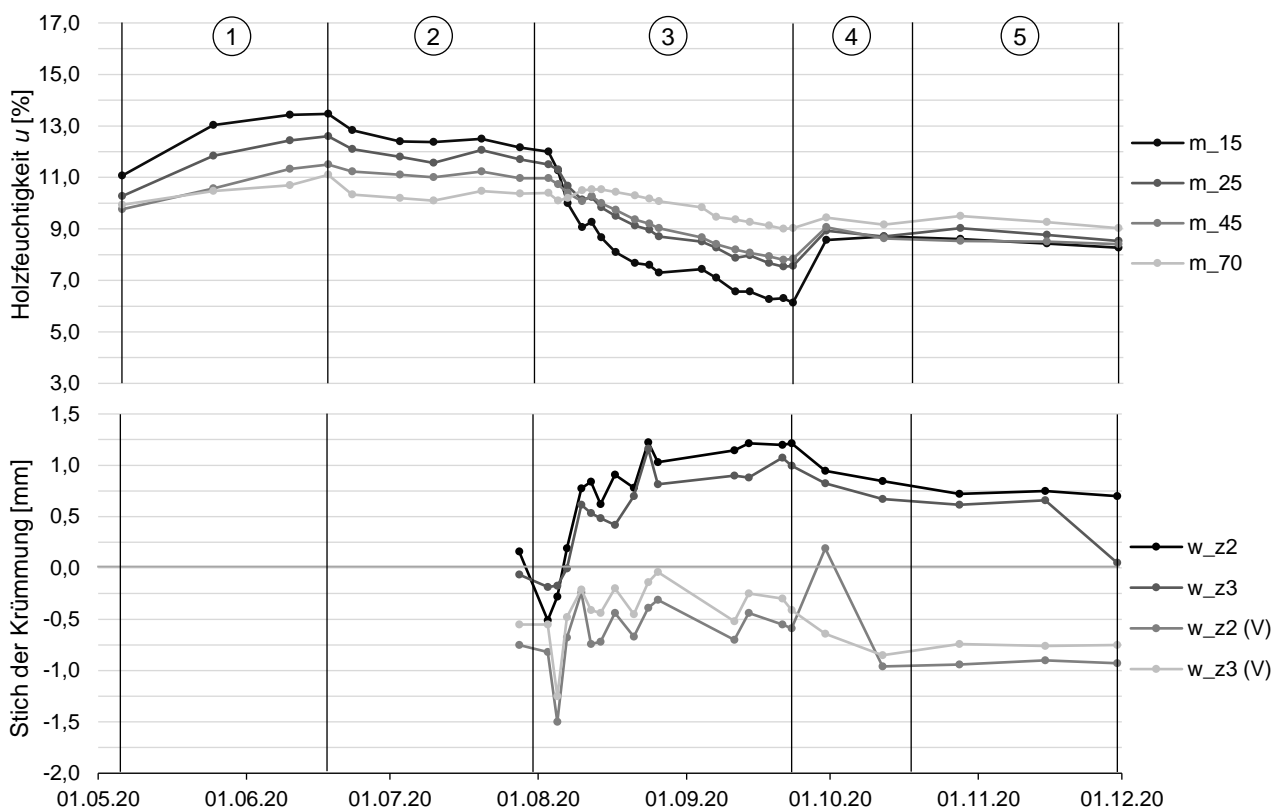


Abbildung 3.18: Gemessene Holzfeuchtigkeiten und Stiche der Krümmungen der Serie O-1 im zeitlichen Verlauf der experimentellen Untersuchung

Um die verschiedenen Serien direkt miteinander vergleichen zu können, sind in Abbildung 3.19 die Feuchtigkeitsverläufe  $m_{15}$  sowie die Verformungen in  $w_{z2}$  und  $w_{z2}$  (V) aller sechs Prüfkörpertypen dargestellt. Anhand dessen lässt sich erkennen, dass die Holzfeuchtigkeitsänderungen der Serie O-1 am kleinsten sind. Während Phasen der Befeuchtung ist die Referenzserie stets die unterste und

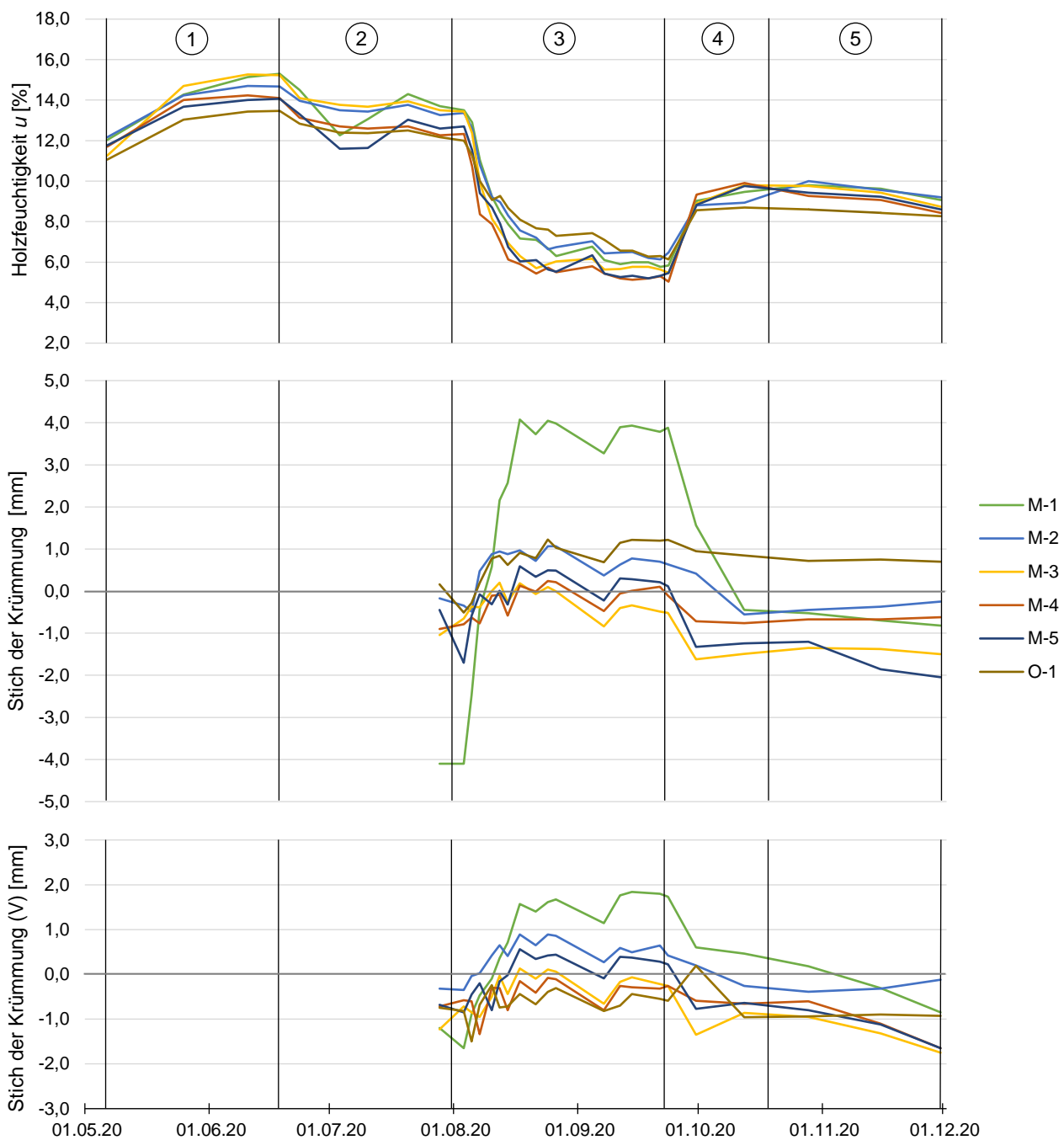


Abbildung 3.19: Vergleich der sechs Serien hinsichtlich der Holzfeuchtigkeit in  $m_{15}$  (oben) sowie dem Stich der Krümmung am freien Prüfkörper in  $w_{z2}$  (mittig) und am Gehinderten in  $w_{z2}$  (V) (unten)

im Laufe der Heizphase die oberste Kurve. Folglich führen die Luftkanäle bei den multifunktionalen Elementen tatsächlich zu einer stärkeren Trocknung, bzw. Befeuchtung, des Holzes, als dies bei den Standardelementen der Fall ist. Am ausgeprägtesten ist dieses Verhalten bei den Serien M-1

und M-3, also jenen Prüfkörpern, die eine Decklage aus Weißtanne besitzen. Diese Ausprägung der Feuchtigkeitsverläufe aufgrund der Decklagen lässt sich jedoch nicht direkt auf die Verformungen übertragen. Denn die Krümmung eines Bauteils hängt, wie zuvor beschrieben, stark mit der Feuchteverteilung über den gesamten Querschnitt zusammen. Allerdings ist auch bei der Verformung  $w_{z2}$  die Serie M-1 am auffälligsten, da die gemessenen Werte um ein Vielfaches größer sind als jene der anderen Prüfkörpertypen. Der Grund hierfür ist die Decklage aus Nadelholz-Brettern mit vertikaler Faserrichtung, welche die maximale Schwindverformung in die gemessene Richtung hervorruft. Im Vergleich dazu zeigt die Serie M-3 eine deutlich geringere Krümmung, denn hier sind die Weißtannen-Lamellen horizontal angeordnet. Folglich sind die Verformungen über die Höhe des Bauteiles am größten, was jedoch durch die Messungen nicht abgebildet wird. Auch die Serien M-2 und M-5 verkrümmen sich weniger stark, da ihre Massivholzplatten als Decklagen deutlich geringere Quell- und Schwindmaße aufweisen. Zudem sind die sechslagigen Prüfkörper der Serie M-5 steifer als der fünfplagige Aufbau der anderen Serien, sodass die Verformungen entsprechend geringer sind. Lediglich die Serie M-4 weist eine noch kleinere Verformung auf, was sich mit dem gänzlichen Fehlen einer Decklage begründen lässt. Ähnlich verhält es sich mit den gehinderten Verformungen in  $w_{z2}$  (V). Prinzipiell stellt sich dort dasselbe Bild dar, nur mit geringeren Krümmungen. In diesem Vergleich zeigt der Prüfkörper O-1-3 (V) die geringste Verformung. Insgesamt lassen die sechs Verläufe der gehinderten Prüfkörper deutlich erkennen, dass die angebrachten Kanthölzer eine Verformung der Elemente nicht gänzlich verhindern, sondern diese lediglich einschränken.

Bei der Betrachtung der Holzfeuchtigkeiten in Abbildung 3.19 fällt auf, dass sich die Verläufe in jeder Phase an einen spezifischen Wert annähern. Dabei handelt es sich um die Ausgleichsfeuchte, welche sich aus der herrschenden Umgebungstemperatur und relativen Luftfeuchtigkeit ergibt und theoretisch über die Gleichung (2.8) berechnet werden kann. Anhand der Klimadaten aus Abbildung 3.9 wurde diese Ausgleichsfeuchte  $u_{ber}$  für jeden Zeitschritt ermittelt und als Verlauf in der Abbildung 3.20 dargestellt. Ebenfalls abgebildet sind die  $m_{15}$ -Werte der verschiedenen Prüfkörper, da diese stets am stärksten den Umgebungsbedingungen ausgesetzt und somit der tatsächlichen Ausgleichsfeuchte des Holzes am nächsten sind. Im direkten Vergleich zeigt sich jedoch, dass die berechnete Gleichgewichtsfeuchte nicht mit den Messwerten übereinstimmen. Ursächlich hierfür ist, dass die berechneten Werte teilweise um mehrere Prozent Holzfeuchtigkeit über- oder unterschritten werden. Da die Ausgleichsfeuchte von zentraler Wichtigkeit für die Modellierung in den Kapiteln 4 und 5 ist, werden hier geeignetere Werte festgelegt. Dazu wird ein Durchschnittswert für jede Klimaphase gebildet. In diesen geht der jeweils letzte Messwert aller Serien der entsprechenden Phase ein. Das resultierende Mittel wird für die jeweilige Phase als konstant angenommen. Somit ergeben sich die in Abbildung 3.20 dargestellten Gleichgewichtsfeuchten für die

- Phase 1:  $u_{air} = 14,5 \%$ ,
- Phase 2:  $u_{air} = 12,9 \%$ ,
- Phase 3:  $u_{air} = 5,7 \%$ ,
- Phase 4:  $u_{air} = 9,4 \%$  und
- Phase 5:  $u_{air} = 8,7 \%$ .

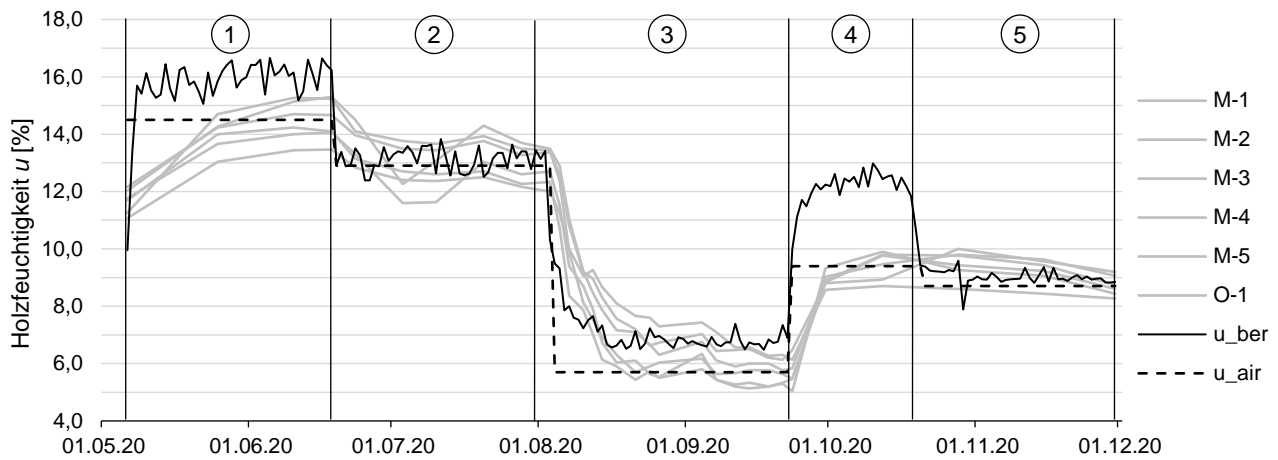


Abbildung 3.20: Darstellung der Ausgleichsfeuchtigkeit im Vergleich zum Verlauf der Holzfeuchtigkeit in  $m_{15}$  der untersuchten Prüfkörper

### 3.3.2 Rissbildung

Die beiden frei verformbaren Prüfkörper M-1-1 und M-1-2 der Serie M-1 wiesen keine Risse auf. Zusammen mit den zuvor dokumentierten Beobachtungen kann daraus geschlossen werden, dass dieser Prüfkörpertyp große Verformungen zulässt, ohne zu reißen. Demzufolge weist die Decklage aus Weißtanne eine hohe Zugfestigkeit auf. Zu beachten ist, dass der Prüfkörper M-1-3 (V) durch die angeschraubten Kanthölzer an der Verformung gehindert wurde. Aufgrund dieser Behinderung sind Spannungen entstanden, welche die Zugfestigkeit überschritten haben. Das Ergebnis ist die Öffnung einer Brettstoßfuge an zwei Stellen mit einer Breite von 0,15 mm im mittleren Bereich des Bauteils. Die Einfärbungen in Abbildung 3.21 machen die mittig über einem der Luftkanäle verlaufenden Risse sichtbar.



Abbildung 3.21: Prüfkörper M-1-3 (V) nach der Heizphase, mit angezeichneten Rissen und farblicher Markierung der Luftkanäle



Bei Serie M-2 waren die Prüfkörper M-2-1 und M-2-2 frei verformbar. Nach der Heizphase waren an M-2-1 keine Risse festzustellen. In der Massivholzplatte des Bauteils M-2-2 sind zwei Risse mit einer Rissweite von 0,1 und 0,15 mm vorhanden. Abbildung 3.22 zeigt die eingezeichneten Risse. Zu erkennen ist, dass diese längs zur Faser der Decklage verlaufen und eher außen liegen. Die Markierung der Luftkanäle lässt erkennen, dass sich Riss 1 genau an der Kante eines Luftkanals befindet, während Riss 2 mittig über einem anderen Kanal verläuft.



Abbildung 3.22: Prüfkörper M-2-2 nach der Heizphase, mit angezeichneten Rissen und farblicher Markierung der Luftkanäle

Der an der Verformung gehinderte Prüfkörper M-2-3 (V) ist ebenfalls gerissen. Hier liegt der 0,2 mm breite Riss im äußeren Bereich des Elements und dabei, wie die farbliche Markierung in Abbildung 3.23 zeigt, am Rand eines Luftkanals. Aus den auftretenden Rissen kann gefolgert werden, dass bei der Serie M-2 die Spannungen in den äußeren Bereichen maximal sind. Des Weiteren müssen die auftretenden Zugspannungen etwa im Bereich der maximalen Festigkeiten liegen, da M-2-2 gerissen ist, während M-2-1 bei gleichen Bedingungen keine Risse aufweist.



Abbildung 3.23: Prüfkörper M-2-3 (V) nach der Heizphase, mit angezeichneten Rissen und farblicher Markierung der Luftkanäle

Alle Prüfkörper der Serie M-3 wiesen Risse in der Decklage auf. Am frei verformbaren Element M-3-1 ist nach der Heizphase ein 0,35 mm breiter Riss vorhanden. Auch an den Versuchsobjekt M-3-2 wird die Decklage von einem 0,35 mm breiten Riss in der Mitte durchzogen. In Abbildung 3.24 ist zu erkennen, dass sich zusätzlich an zwei Stellen die Lamellenstöße der Decklage geöffnet haben. Die Öffnungen verlaufen in der Mitte des Bauteils und sind etwa 0,15 und 0,55 mm breit.





Abbildung 3.24: Prüfkörper M-3-1 (links) und M-3-2 (rechts) nach der Heizphase, mit angezeichnetem Riss und farblicher Markierung der Luftkanäle

Auch der gehinderte Prüfkörper M-3-3 (V) ist an zwei Stellen gerissen (Rissweiten: 0,2 und 0,4 mm) und hat eine geöffnete Lamellenstoßfuge (Öffnungsbreite: 0,7 mm), siehe Abbildung 3.25. Bei allen drei Prüfkörpern verlaufen die Risse horizontal, entlang der Faserrichtung, und kreuzen dabei eine Vielzahl an Luftkanälen. Durch die Ausrichtung der Lamellen wirkt das maximale Schwindmaß hier in vertikale Richtung, ungehindert durch die Kanthölzer. Insofern weisen alle drei Prüfkörper ähnliche Schädigungen auf.

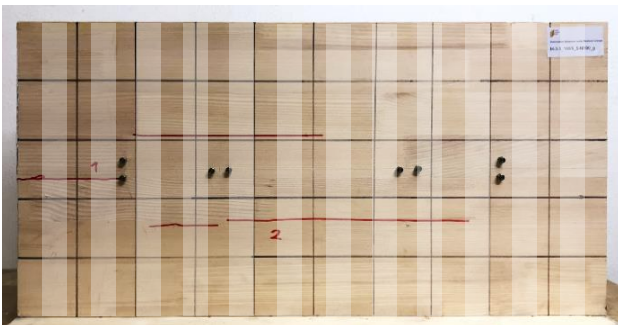


Abbildung 3.25: Prüfkörper M-3-3 (V) nach der Heizphase, mit angezeichneten Rissen und farblicher Markierung der Luftkanäle

An keinem Prüfkörper der Serie M-4, weder frei noch eingeschränkt verformbar, wurden Risse im sichtbaren Bereich festgestellt. Der Grund hierfür liegt in der fehlenden, bzw. nicht durchlaufenden, Decklage. Die Fräsungen der Lamellen, welche die Luftkanäle bilden, sorgen dafür, dass sich das verbleibende Holz quer zur Faser frei verformen kann. Aufgrund der geringen Breiten sind die Schwindverformungen und somit die Zugspannungen relativ klein.

Bei Serie M-5 waren die Prüfkörper M-5-2 und M-5-3 frei verformbar. Nach der Heizphase wies das Versuchsobjekt M-5-3 keine Risse auf. Indes sind in der Massivholzplatte des Prüfkörpers M-5-2 zwei Risse mit Rissweiten von 0,25 und 0,55 mm vorhanden. Abbildung 3.26 zeigt die markierten Risse, die einen Verlauf längs zur Faser in der Mitte des Bauteils erkennen lassen. Riss 1 befindet sich an der Kante eines Luftkanals, während Riss 2 genau zwischen zwei Kanälen liegt. Da lediglich

einer der beiden freien Prüfkörper gerissen ist, wird gefolgert, dass die dort entstehenden Zugspannungen etwa im Bereich der vorhandenen Zugfestigkeit liegen müssen.

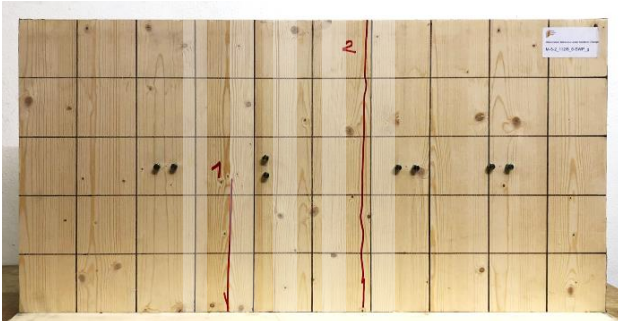


Abbildung 3.26: Prüfkörper M-5-2 nach der Heizphase, mit angezeichneten Rissen und farblicher Markierung der Luftkanäle

Der an der Verformung gehinderte Prüfkörper M-5-1 (V) wies zum Zeitpunkt der Prüfung keine Risse auf. Folglich scheinen die Maßnahmen zur Einschränkung der Verformungen keinen maßgebenden Einfluss auf den Prüfkörper ausgeübt zu haben. Theoretisch führt die Hinderung zu einer höheren Spannung, welche hier jedoch nicht die Zugfestigkeit erreicht hat. Da die Verformungen des eingeschränkten Prüfkörpers nahezu identisch denen der freien Elemente sind, vor allem im Zeitraum der Heizphase, wird erwartet, dass auch die Querspannung im Grenzbereich der Zugfestigkeit liegt.

Alle drei Prüfkörper der Serie O-1 sind mehrfach gerissen. Die Abbildung 3.27 zeigt das Versuchsobjekt O-1-1, welches insgesamt sieben Risse mit bis zu 1,6 mm Breite aufweist. Weiter sind alle Brettstoßfugen bis zu 1,2 mm weit geöffnet. Bei O-1-2 verhält es sich ähnlich. Hier sind ebenfalls alle Lamellenstoßfugen mit Breiten von 0,1 bis 1,2 mm geöffnet. Zudem sind fünf Risse mit Weiten von 0,4 bis 1,4 mm zu finden.



Abbildung 3.27: Prüfkörper O-1-1 (links) und O-1-2 (rechts) nach der Heizphase, mit angezeichnetem Riss und farblicher Markierung der Luftkanäle

Auch in dem gehinderten Prüfkörper O-1-3 (V), dargestellt in Abbildung 3.28, wurden die auftretenden Spannungen über einen 1,0 mm breiten Riss und der Öffnung aller Lamellenfugen um 0,9 mm, abgebaut. Die Risse sind bei allen Objekten über den gesamten Prüfkörper verteilt, wobei die

höchste Dichte in der Mitte auftritt. Die große Anzahl an Risse weist darauf hin, dass hohe Zugspannungen durch die Trocknung entstanden sind. Die Öffnung der Brettstoßfugen ist darauf zurückzuführen, dass hier keine Schmalseitenverklebung der Decklage vorhanden ist und stellt somit die normale Schwindverformung der Bretter dar.



*Abbildung 3.28: Prüfkörper O-1-3 (V) nach der Heizphase, mit angezeichneten Rissen*

In Bezug auf das zu untersuchende Thema sind vor allem bei den multifunktionalen Elementen weniger die Breiten der Risse relevant als deren Tiefe und die Tatsache, ob die Luftdichtheit der Kanäle noch gegeben ist. Jedoch liegen hierzu keine Aussagen oder Messungen vor.

## 4 Finite-Elemente-Berechnung

### 4.1 Methodik

#### 4.1.1 Aufbau des Modells

Die Berechnung des feuchteinduzierten Verhaltens von thermisch aktivierbaren Massivholzelementen erfolgt mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM). Als Umgebung und Oberfläche für die numerische Berechnung dient die Software ANSYS Workbench, in der Version Academic Student 2020 R2 (ANSYS Inc., 2020). Die einzelnen Schritte zur Berechnung von Transportphänomenen, Verformungen und Spannungen werden jeweils durch spezielle Analysensysteme gelöst. Da das Programm keine explizites Simulationsverfahren besitzt, um Feuchtigkeitstransporte abzubilden, wird auf die Analogie der Diffusion zur Wärmeleitung und Konvektion zurückgegriffen. Die Gleichungen nach Fick und Fourier beruhen auf denselben physikalischen Prinzipien, siehe Kapitel 2.3.3, daher wird der Feuchtigkeitstransport nachfolgend als eine Wärmediffusion dargestellt. Deswegen müssen die feuchtespezifischen Eingangs- und Materialkennwerte in die äquivalenten wärmetechnischen Parameter umgerechnet werden. Anhand dieser führt das Programm seine Berechnungen für den Wärmetransport durch. Das Resultat ist folglich eine Temperaturverteilung über den betrachteten Körper. Durch die eingangs getroffenen Anpassungen handelt es sich bei dem Ergebnis jedoch um eine Holzfeuchtigkeitsverteilung. Weitere Umrechnungen sind dafür nicht notwendig, denn es gilt: 1,0 °C entspricht 1,0 % Holzfeuchtigkeit.

Die allgemein notwendigen Berechnungsschritte, um mit Hilfe der numerischen Simulation das Verformungsverhalten unter Feuchtigkeitsänderungen festzustellen, zeigt das Schema in Abbildung 4.1. Dabei greifen miteinander verknüpfte Analysensysteme stets auf dieselben Materialdaten, Geometrie und allgemeinen Modelleigenschaften, wie Koordinatensystem und Vernetzung, zu. Begonnen wird in Modul A mit einer thermisch-stationären Berechnung. Dadurch werden die Anfangswerte für das zu untersuchende Objekt festgelegt. Die Lösung wird an Modul B weitergegeben und dort als Startwert für die thermisch-transiente Analyse verwendet. Das Resultat ist die Feuchtigkeitsverteilung innerhalb des betrachteten Körpers. Anhand dessen berechnet die statisch-mechanische Simulation C zum einen die auftretenden Verformungen und zum anderen die entstehenden Spannungen.

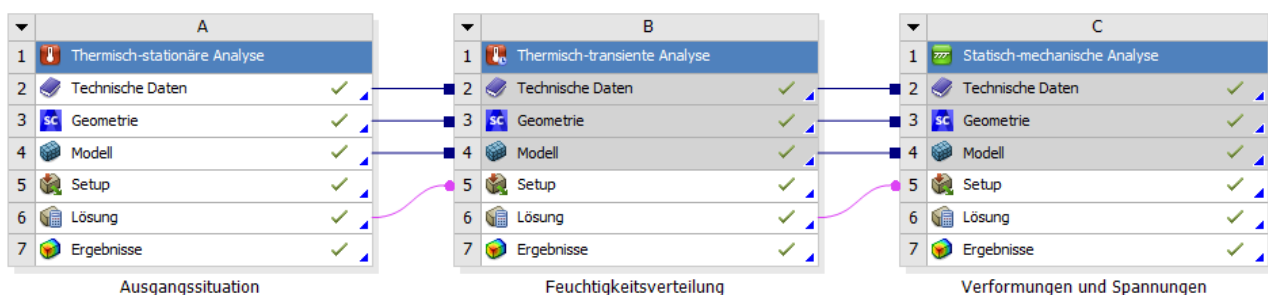


Abbildung 4.1: Allgemeines Projektschema zur Berechnung des Verformungsverhaltens bei Feuchtigkeitsänderungen

Um den Aufbau und die gewählten Einstellungen des Modells zu validieren, wird der Versuch aus Kapitel 3 modelliert und die Ergebnisse der Berechnung in Abschnitt 4.2 mit den Messungen verglichen. Die Nachmodellierung der experimentellen Untersuchung funktioniert nach dem oben beschriebenen Prinzip. Allerdings folgt hier auf die thermisch-stationäre Ausgangssituation nicht eine, sondern fünf thermisch transiente Berechnungen, wie Abbildung 4.2 am Beispiel der Serie M-1 zeigt. Jede Analyse entspricht genau einer der fünf Phasen, welche die Prüfkörper in der Klimakammer durchlaufen haben. Die jeweiligen Ergebnisse werden stets an die darauffolgende Phase weitergegeben, wo sie wiederum als Startwerte dienen. Zudem werden die resultierenden Feuchtigkeitsverteilungen aller Phase an je zwei statisch-mechanische Analysen übergeben. Die Erste berechnet das Verhalten eines freien und die Zweite das eines gehinderten Prüfkörpers. Grundsätzlich ist die Modellierung auch ohne die Unterteilung in einzelne Phasen möglich, allerdings ist es auf diese Weise einfacher die einzelnen Parameter in spezifischen Berechnungsschritten zu verändern.

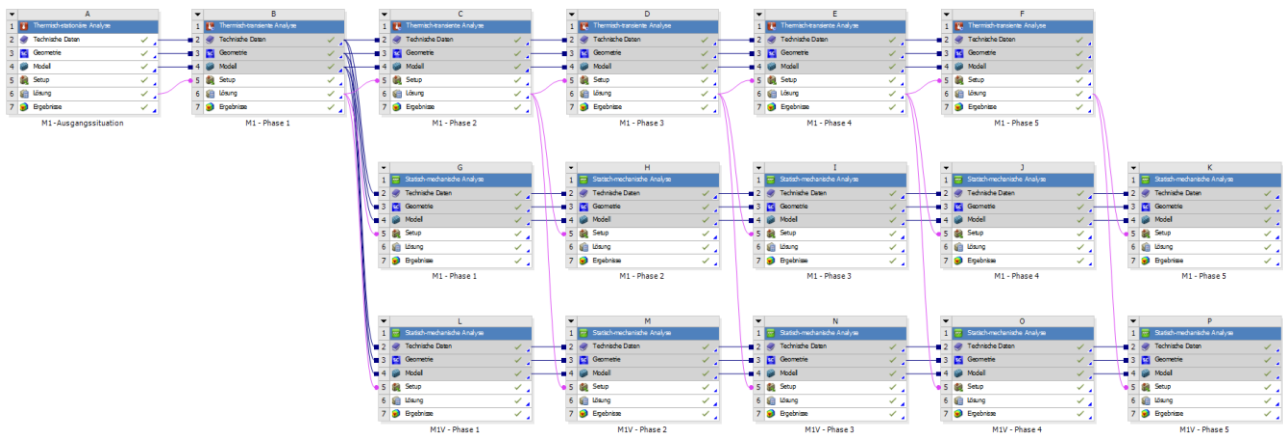


Abbildung 4.2: Projektschema zur Nachmodellierung der experimentellen Untersuchungen der Prüfkörperserie M-1

Die folgenden Abschnitte erläutern wie das Modell eingestellt wurde, um die experimentellen Untersuchungen nach zu modellieren.

#### 4.1.2 Geometrie und Netzgenerierung

Die Geometrie, an welcher die FE-Berechnungen durchgeführt werden, liegt hier als dreidimensionales Modell des jeweiligen Prüfkörpers vor. Jede Lage des BSP wird durch eine Platte mit homogenen Materialeigenschaften dargestellt. Somit erfolgt keine Unterteilung in einzelne Bretter oder in die Schichten der Massivholzplatten. Die Anisotropie der Werkstoffe spiegelt sich in der Definition lokaler Koordinatensysteme wider. Hierzu wird die orthotrope Ausrichtung des Holzes vereinfacht mit dem kartesischen Koordinatensystem in ANSYS gleichgesetzt, indem folgendes gilt:

- X-Koordinate = Longitudinale Richtung → Längs zur Faser



- Y-Koordinate = Radiale Richtung → Quer zur Faser
- Z-Koordinate = Tangentiale Richtung → Quer zur Faser

Aufgrund seines hohen Diffusionswiderstandes ist der Klebstoff nicht zu vernachlässigen. Im Verhältnis zu den Holzwerkstoffen ist die reale Klebstoffdicke (0,1 mm, gemäß Z-9.1-691) jedoch zu schmal für die Modellierung, und wird daher mit einer Stärke von 1,0 mm berücksichtigt.

Die Generierung des Netzes erfolgt nach dem Standardverfahren von ANSYS. Lediglich bei der Serie M-5 werden weitere Einstellungen vorgenommen, um auf der Oberfläche der Decklage eine geregelte Anordnung der Knoten zu erstellen. Für alle Prüfkörpertypen wird dabei die ‚Auflösung‘ der Elementgröße derart optimiert, dass eine Berechnung mit der gegebenen Lizenz gerade möglich ist. Daraus ergibt sich eine Vernetzung, bei welcher die Kanten in der Regel eine Länge von 20 bis 30 mm haben und somit die Höhe einer normalen Lage des Prüfkörpers darstellen. Folglich wird die Breite eines Luftkanals stets durch zwei Elemente gebildet, siehe Abbildung 4.3.

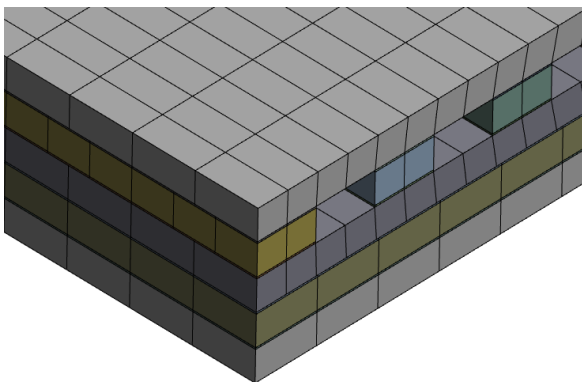


Abbildung 4.3: Generiertes Netz der Serie M-1 für die Berechnungen in Kapitel 4.2 und 5.2

Nachdem die beschriebenen Analysen der Kapitel 4 und 5 abgeschlossen waren, konnten noch die Auswirkungen eines feineren Netzes überprüft werden. Dafür wurde am Modell der Serie M-1 in der Decklage ein Netz generiert, bei welchem die Elementgröße lediglich 10 mm beträgt. Somit wird die Höhe der Decklage über zwei und die Breite eines Luftkanals über vier Elemente gebildet. Eine Veranschaulichung dieser Vernetzung ist in Abbildung 4.4 gezeigt.

Die Ergebnisse der Berechnungen mit dem Standardnetz und dem feinmaschigeren Netz wurden stichprobenartig miteinander verglichen. Daraus geht hervor, dass die Unterschiede sowohl bei den Holzfeuchtigkeitsverteilungen als auch bei den Verformungen meist vernachlässigbar klein sind. Allerdings folgt durch die höhere Anzahl an Knoten beim engeren Netz ein realistischerer Verlauf der berechneten Spannungen über den Querschnitt. Für die Simulationen, wie sie in Kapitel 4.2 bzw. 5.2 durchgeführt werden, stellen die Abbildung A.1 und A.2 im Anhang den Vergleich graphisch dar. Anhand jener drei Diagramme ist festzustellen, dass die Verläufe beider Varianten der Vernetzung annähernd gleich sind. Die geringere Elementgröße führt lediglich zu einer leichten Zu- oder Abnahme der Spannungen in den Tiefpunkten, die Maximalwerte verändern sich jedoch kaum. Folglich bleiben alle nachfolgend getroffenen Aussagen in ihrer Gültigkeit bestehen.

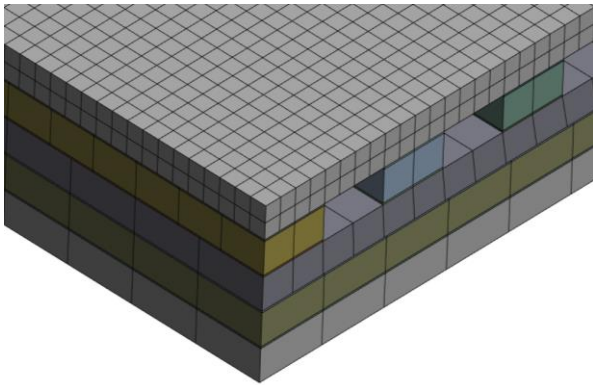


Abbildung 4.4: Feinmaschige Vernetzung in der Decklage der Serie M-1

#### 4.1.3 Materialkennwerte und Eingabeparameter

Die Finite-Elemente-Methode ist ein Näherungsverfahren, mit welchem eine absolute Genauigkeit nicht erreicht werden kann (Gebhardt, 2014). Der Grad der Übereinstimmung und die Qualität der Ergebnisse hängen vor allem von der akkuraten Wahl der Eingangsparameter ab (Schaffrath, 2015). In der vorliegenden Arbeit stellen die feuchtetechnischen Kennwerte – der Diffusionskoeffizient und der Oberflächenemissionskoeffizient – die wichtigsten Parameter dar, da diese die Holzfeuchtigkeitsverteilung innerhalb der Bauteile maßgeblich beeinflussen. Diese konnten nicht durch Versuche ermittelt werden, weshalb zwangsläufig auf Literaturangaben zurückgegriffen werden musste. Demzufolge werden für die Materialien Fichte und Weißtanne sowie für die Massivholzplatten die gleichen Diffusionskoeffizienten verwendet. Gemäß Abschnitt 2.3.4 wird der Diffusionskoeffizient in radiale und tangentialer Richtung über die Gleichung (2.13) berechnet. Bei der Nachmodellierung des gemessenen Verhaltens ergab sich, dass über die nachstehende, speziell angepasste Formel eine höhere Übereinstimmung mit der Realität erreicht wird.

$$D_R(u) = D_T(u) = 8,0 \cdot 10^{-11} \cdot e^{4u} + 3,55 \cdot 10^{-10} \quad (4.1)$$

mit

- $D_R$  Diffusionskoeffizient in radialer Richtung [ $m^2/s$ ]
- $D_T$  Diffusionskoeffizient in tangentialer Richtung [ $m^2/s$ ]
- $u$  Holzfeuchtigkeit [-]

Für die Diffusion in longitudinaler Richtung wird der konstante Wert von  $D_L = 5,28 \cdot 10^{-9} \frac{m^2}{s}$  aus Kapitel 2.3.4 übernommen. Des Weiteren erfährt die Gleichung (2.17) für den Diffusionskoeffizienten der Verklebung hier Verwendung. Aufgrund der angepassten Klebstoffdicke im Modell mit 1,0 mm,



muss der Diffusionswiderstand angeglichen werden. Um einen zehnfach kleineren Widerstand zu erzielen, wird der Diffusionskoeffizient mit den Faktor 10 erweitert.

$$D_{adh}(u) = (9,17 \cdot 10^{-12} \cdot u^{-0,51} - 2,39 \cdot 10^{-12}) \cdot 10 \quad (4.2)$$

mit

$D_{adh}$  Diffusionskoeffizient des Klebstoffes [m<sup>2</sup>/s]

$u$  Feuchtigkeitsgehalt [-]

Da die Berechnung der Diffusionsvorgänge in ANSYS über die Wärmeleitung erfolgt, müssen die feuchtespezifischen Parameter in die äquivalenten temperaturbezogenen Kennwert umgewandelt werden. Für die Diffusionskoeffizienten ist dies die Temperaturleitfähigkeit  $\alpha$ , siehe Kapitel 2.3.3. Die Temperaturleitfähigkeit lässt sich indes in ANSYS nicht als eigener Materialwert eingeben. Deshalb wird mit dem Diffusionskoeffizient durch Gleichung (4.3) eine Wärmeleitfähigkeit ermittelt, welche in das Programm eingetragen werden kann. Dort wird dann anhand der Gleichung (2.10) die entsprechende Temperaturleitfähigkeit berechnet. Dieses Verfahren wird für alle Diffusionskoeffizienten angewendet.

$$\lambda = D \cdot \rho \cdot c_p \quad (4.3)$$

mit

$\lambda$  Wärmeleitfähigkeit [W/mK]

$D$  Diffusionskoeffizient [m<sup>2</sup>/s]

$c_p$  Spezifische Wärmekapazität [Ws/kgK]

$\rho$  Rohdichte [kg/m<sup>3</sup>]

Obwohl zwischen den Oberflächenemissionskoeffizienten von Fichte, Weißtanne und Massivholzplatte nicht unterschieden wird, ist dennoch die Konvektion nicht an allen Stellen des Prüfkörpers gleich. Wie bereits in Abschnitt 2.3.3 beschrieben, hängt der Oberflächenemissionskoeffizient von der herrschenden Luftgeschwindigkeit ab. Für die Bedingungen in der Klimakammer wird eine freie Konvektion angenommen. Somit ist die Berechnung des Koeffizienten  $S_o$  nach Gleichung (2.14) für die Sichtoberfläche der Decklage zutreffend. Es wird angenommen, dass während der experimentellen Untersuchung die Strömungsgeschwindigkeit in den Luftkanälen schneller als in der Umgebung war, da die Berechnungsergebnisse die beste Annäherung an die Messwerte liefern, wenn für den Oberflächenemissionskoeffizient im Luftkanal  $S_K$  der Faktor 2,5 berücksichtigt wird.

$$S_K(u) = (3,2 \cdot 10^{-8} \cdot e^{4u}) \cdot 2,5 \quad (4.4)$$

mit

$S_K$  Oberflächenemissionskoeffizient im Luftkanal [m/s]

$u$  Holzfeuchtigkeit [-]

Wie zuvor die Diffusionskoeffizienten müssen auch die beiden Oberflächenemissionskoeffizienten von Koeffizienten des Feuchtigkeitstransportes in jene des Wärmetransportes umgewandelt werden. Gemäß Kapitel 2.3.3 ist das Äquivalent hierfür der Wärmeübergangskoeffizient  $h$ . Die Umrechnung geschieht über die nachfolgende Gleichung.

$$h = S \cdot \rho \cdot c_\rho \quad (4.5)$$

mit

$h$  Wärmeübergangskoeffizient [W/m<sup>2</sup>K]

$S$  Oberflächenemissionskoeffizient [m/s]

$c_\rho$  Spezifische Wärmekapazität [Ws/kgK]

$\rho$  Rohdichte [kg/m<sup>3</sup>]

Für die thermisch-transienten Berechnungen durch ANSYS muss eine ‚Umgebungstemperatur‘ als äußere Randbedingung angegeben werden. Im feuchtetechnischen Sinne handelt es sich um die jeweils herrschende Ausgleichsfeuchte, die sich aus den klimatischen Bedingungen ergibt. Wie bereits in Kapitel 3.3.1 analysiert wurde, stimmt die Berechnung der Gleichgewichtsfeuchte über die Gleichung (2.8) nicht ausreichend genau mit den Messwerten überein. Somit werden die fünf dort gewählten Konstanten für die FE-Berechnungen aller Serien verwendet, ohne zwischen den verschiedenen Materialien zu unterscheiden.

Des Weiteren sind für die Modellierung der Verformungen und Spannungen mechanische Kennwerte erforderlich. Zu allen Materialien muss für jede Raumrichtung das Quellmaß, der Elastizitätsmodul, der Schubmodul und die Querdehnzahl bekannt sein. Das Quellmaß entspricht dem ‚Koeffizient der thermischen Ausdehnung‘ in der Software. Zudem müssen Rohdichten und die spezifische Wärmekapazitäten festgelegt werden. Um dabei keine Genauigkeit vorzutauschen, die bei der Verwendung von Literaturwerten nicht gegeben ist, wurde für die mechanischen Kenngrößen auf die Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit verzichtet. Die genauen Zahlenwerte, welche in ANSYS für die verschiedenen Kennwerte und Materialien festgelegt wurden, sind den Tabellen A.2 bis A.4 im Anhang zu entnehmen. Es wird nicht zwischen den Materialien Fichte und Weißtanne unterschieden, da für beide Nadelhölzern in der Literatur meist identische Zahlenwerte angegeben sind (Halász & Scheer, 1986; Neuhaus, 2017; Niemz & Sonderegger, 2017).

#### 4.1.4 Beschreibung der verwendeten Analyse-Tools

Die Implementierung der vorhandenen Ausgangssituation erfolgt über die thermisch-stationäre Analyse, das bedeutet ohne Berücksichtigung eines zeitlichen Verlaufs. Zu diesem Zweck werden die jeweiligen Holzfeuchtigkeiten über sogenannte ‚Temperaturfelder‘ festgelegt, wobei die verwendeten Werte den Messungen vom 06.05.2020 entsprechen. Jeder Lage wird eine tatsächlich in dieser Schicht gemessene, konstante Holzfeuchtigkeit zugewiesen. Existieren für einzelne Lamellen kein Messwerte, so werden ingenieurtechnische Annahmen getroffen. Durch die Lösung des Analyse-schrittes werden die eingetragenen Feuchtigkeiten angewendet. Ein Beispiel für die resultierende Feuchtigkeitsverteilung, welche als Startwert für die folgenden Berechnungen dient, ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

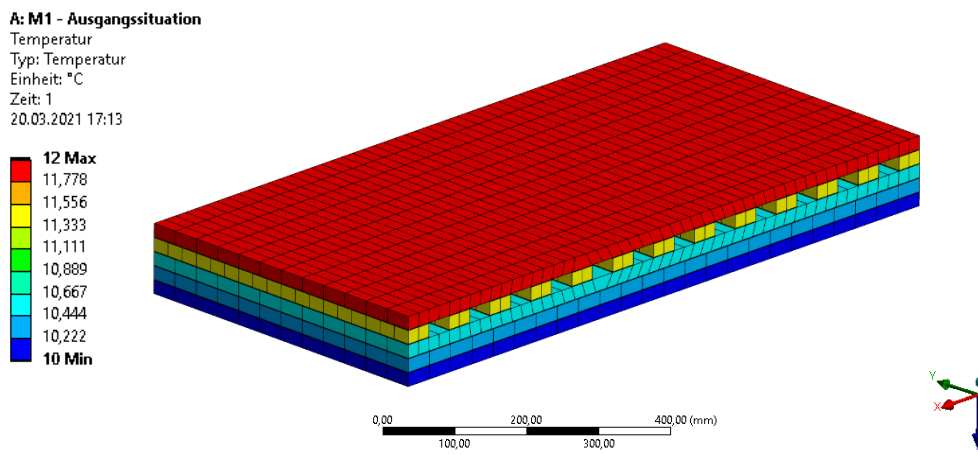


Abbildung 4.5: Berechnete Holzfeuchtigkeitsverteilung in [%] der Prüfkörperserie M-1 am 06.05.2020 als Ausgangssituation

Für die Simulation der Feuchtigkeitsverteilung innerhalb des Bauteils während den Klimaphasen wird die thermisch-transiente Berechnung verwendet. Als Anfangswert der Analyse dient das Ergebnis der Ausgangssituation bzw. das der jeweils vorangegangenen Phase. Da es sich diesbezüglich um ein instationäres Verfahren handelt, spielt vor allem die Zeit, die stets in Sekunden angegeben wird, eine große Rolle. Bei der Nachmodellierung entspricht eine thermisch-transiente Berechnung immer genau einer Phase der experimentellen Untersuchung. Das Analyse-Tool führt die Transportvorgänge im Inneren des Bauteils automatisch durch. Dies kann lediglich über die Materialkennwerte und die äußeren Randbedingungen beeinflusst werden. Letztere werden durch den Übergang zwischen Umgebung und dem Bauteil in Form von Konvektion angegeben. Demzufolge ist es notwendig für die Serien M-1, M-2, M-3 und M-5 zwei Konvektionen zu definieren, da gemäß Kapitel 4.1.3 an der Sichtoberfläche andere Oberflächenemissionskoeffizienten herrschen als in den Luftkanälen. Entsprechend werden diese als ‚Wärmeübergangskoeffizienten‘ eingetragen und die Konvektionen auf die jeweiligen Flächen angewendet. Für beide Konvektionen werden als ‚Umgebungstemperaturen‘ die in Abschnitt 3.3.1 festgelegten Ausgleichsfeuchten benutzt. In Abbildung 3.20 ist zu erkennen, dass während des Versuchs in den Phasen 3 und 5 die klimatischen Bedingungen nicht direkt zu Beginn der Phase, sondern erst nach einer leichten Verzögerung gewechselt haben. Dies

wird über eine zeitabhängige Definition der Ausgleichsfeuchten eingestellt. Das Ergebnis ist eine Holzfeuchteverteilung über den Querschnitt zu einem beliebig festgelegten Zeitpunkt. Die jeweiligen Resultate werden exportiert und die Feuchtigkeit in der Mitte des Prüfkörpers über dessen gesamten Tiefe hinweg betrachtet.

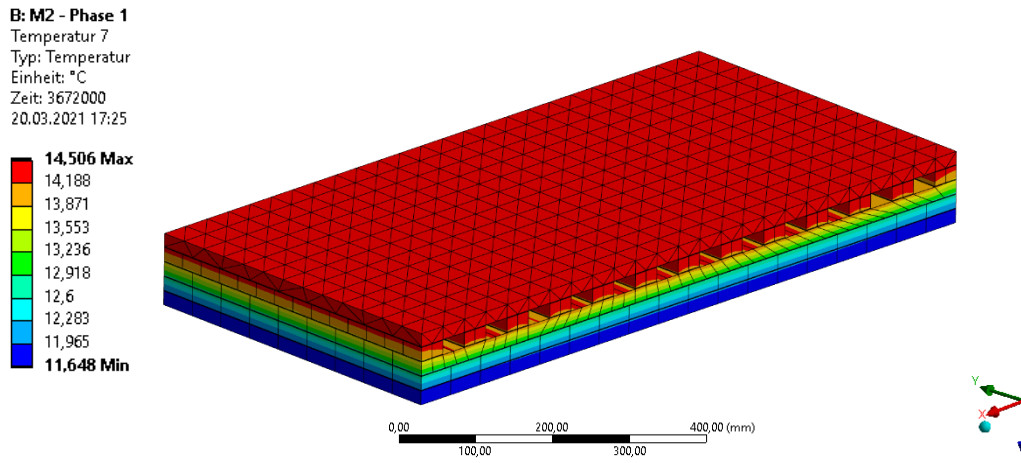


Abbildung 4.6: Berechnete Holzfeuchteverteilung in [%] der Prüfkörperserie M-2 am 18.06.2020, dem Ende der Phase 1

Die statisch-mechanische Analyse ist ein stationäres Verfahren, welches ausgehend vom unverformten Zustand über die Feuchteverteilung das Quellen oder Schwinden berechnet. Daher muss eine Referenzfeuchtigkeit  $u_{Ref}$  in Form der sogenannten ‚Umgebungstemperatur‘ festgelegt werden, bei der das Bauteil vollständig unverformt ist. Da hierzu keine gesicherten Angaben vorliegen, wurde dieser Wert für jeden Prüfkörper iterativ angenähert. Die Referenzfeuchten betragen demnach für die

- Serie M-1:  $u_{Ref} = 7,3 \%$ ,
- Serie M-2:  $u_{Ref} = 7,4 \%$ ,
- Serie M-3:  $u_{Ref} = 12,0 \%$ ,
- Serie M-4:  $u_{Ref} = 7,3 \%$ ,
- Serie M-5:  $u_{Ref} = 6,5 \%$  und
- Serie O-1:  $u_{Ref} = 9,0 \%$ .

Damit die statische Berechnung möglich ist, muss des Weiteren eine Lagerung definiert sein. Dies wird über eine ‚externe Verschiebung‘ ermöglicht, welche keine Verschiebungen oder Verdrehungen aber eine freie Verformung zulässt.

Um die an der Verformung gehinderten Prüfkörper ebenfalls abbilden zu können, wird zu jeder Phase eine zweite statisch-mechanische Analyse erstellt, welche in allen Einstellungen identisch ist und sich lediglich durch ein zusätzliches Element auszeichnet, mit dem die Verformungshinderung modelliert wird. Hierzu wird auf der rückseitigen Fläche eine ‚elastische Lagerung‘ eingestellt. Eine gute Näherung zur Wirkung der drei Kanthölzer ergibt sich bei einer Steifigkeit von 0,5 MPa. Die

Lösung des Analyse-Tools liefert Resultate zur Gesamtverformung, zur Verformung in z-Richtung und zu den Spannungen, jeweils zu spezifischen Zeitpunkten. Diese Ergebnisse werden exportiert und ausgewertet, siehe Abschnitt 4.2.2 und 4.2.3.

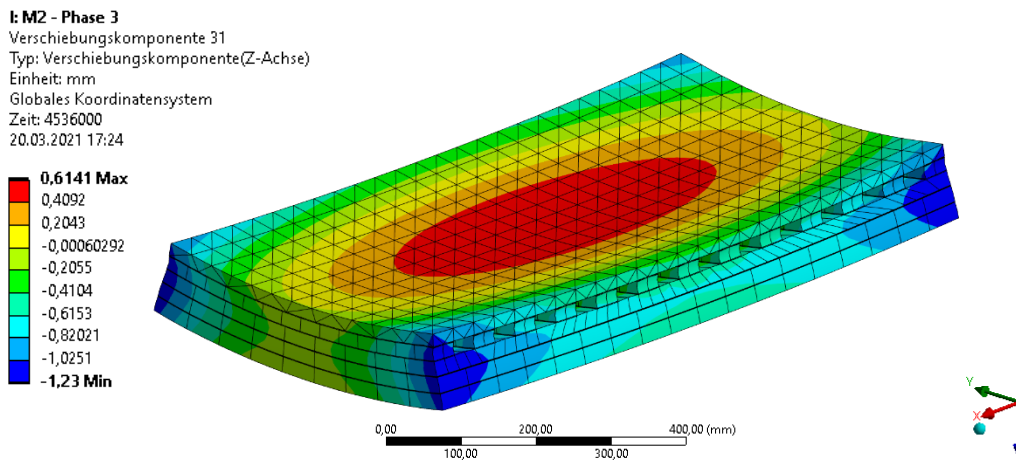


Abbildung 4.7: Berechnete Verformung in z-Richtung in [mm] (23-fache Überhöhung) des freien Prüfkörpers der Serie M-2 am 23.09.2020, dem Ende der dritten Phase

Es ist zu beachten, dass bei den durchgeführten Finite-Elemente-Berechnungen ein linear-elastisches Materialverhalten angenommen wird. Folglich werden weder viskoelastisch noch plastische Verformungen oder Risse dargestellt. Auch rheologische und mechano-sorptive Verhaltensweisen finden keine Berücksichtigung. Diese Vernachlässigungen führen dazu, dass die resultierenden Spannungen und Verformungen gegebenenfalls überschätzt werden (Schaffrath, 2015). Somit sind die Ergebnisse der statisch-mechanischen Analyse vor allem qualitative Beschreibungen des feuchteinduzierten Verhaltens von thermisch aktiviertem BSP.

## 4.2 Validierung des Modells

### 4.2.1 Berechnete Holzfeuchtigkeitsverteilung

Nachfolgend wird überprüft mit welcher Genauigkeit das FE-Modell die Realität abbildet. Hierzu werden die Messungen aus der experimentellen Untersuchung herangezogen und mit den berechneten Feuchtigkeitsverteilungen verglichen. Zunächst wird die Holzfeuchtigkeit über die Querschnittstiefe betrachtet, wobei die dargestellten Zeitpunkte jeweils den Enden der Phasen 1, 3 und 5 entsprechen. Die graue Einfärbung markiert die Lage der Luftkanäle. Des Weiteren wird der Feuchtigkeitsverlauf über die Zeit in den Tiefen von 15, 25, 45 und 70 mm analysiert, wobei am modellierten Körper die Klebstoffschichten von je 1,0 mm zu berücksichtigen sind. Die Berechnungen werden zu insgesamt 46 Zeitpunkten ausgewertet, welche zum einen den 31 Messungen entsprechen und zum anderen sinnvolle Zeitschritte von durchschnittlich vier bis fünf Tagen erzeugen. Bei den aufgeführten Abweichungen handelt es sich stets um absolute Abweichungen in Prozent Holzfeuchtigkeit.

Für die Serie M-1 zeigt Abbildung 4.8 die Feuchtigkeitsverteilungen über den Querschnitt. Ersichtlich wird die Konstanz der Holzfeuchte in der Decklage. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sie auf beiden Seiten im Kontakt mit der Umgebungsluft steht und demzufolge in jeder Tiefe durchgehend der Ausgleichsfeuchtigkeit entspricht. In der Betrachtung der Feuchtigkeitsverteilung über den gesamten Querschnitt wird die Zeitabhängigkeit des Diffusionsvorgangs deutlich, da mit zunehmendem Abstand zur Oberfläche die notwendige Dauer zum Abschließen des Transportvorgangs steigt. Das hat zur Folge, dass zum Ende der Phasen 1 und 3 die Gleichgewichtsfeuchte nicht überall im Bauteil erreicht wird. Somit folgt die Simulation dem gemessenen Verhalten. Die Berechnung aus Phase 1 weisen eine durchschnittliche Abweichung von 0,6 % zu den Messwerten auf. In Phase 3 ist lediglich zu  $m_{45}$  mit einer Differenz von 2,1 % ein großer Fehler festzustellen. Dieser wird jedoch akzeptiert, da der berechnete Verlauf insgesamt eine geeignete Näherung darstellt. Die Holzfeuchte in Phase 5 erreicht über den gesamten Querschnitt die Ausgleichsfeuchtigkeit von 8,7 % und entspricht damit in etwa den Messwerten.

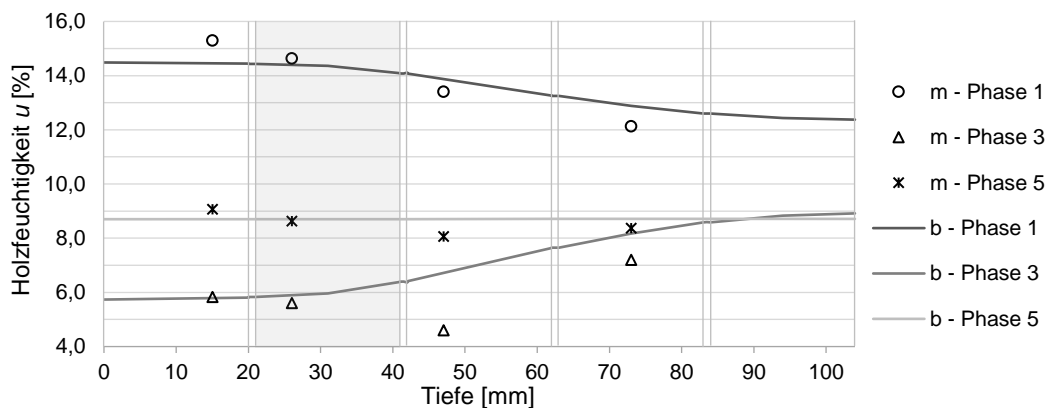


Abbildung 4.8: Berechnete Holzfeuchtigkeit  $b$  über den Querschnitt der Serie M-1 im Vergleich zu den Messungen  $m$  der experimentellen Untersuchungen zum Ende der Phasen 1, 3 und 5

Die Berechnungen der Holzfeuchtigkeit im zeitlichen Verlauf der fünf Phasen sind in Abbildung 4.9 anhand von vier Diagrammen dargestellt. Der Graph  $b_{15}$  zeigt, dass sich bei einem Wechsel der Umgebungsbedingungen die Decklage stets rasch an die neue Ausgleichsfeuchte annähert. Ist diese erreicht, so ändert sich die Holzfeuchtigkeit bis zum Ende der Phase nicht mehr, denn die Gleichgewichtsfeuchten in Kapitel 3.3.1 wurden als Konstanten festgelegt. Da es sich bei den gewählten Ausgleichsfeuchten um Mittelwerte handelt, sind Abweichungen zwischen dem berechneten und gemessenen Verhalten unvermeidbar. Das Resultat sind Berechnungen, die vor allem in den Phasen 1 bis 3 unterhalb der Messwerte liegen. Über den gesamten Zeitraum ergibt sich so für  $b_{15}$  ein durchschnittlicher Fehler von 0,8 %. Die Berechnungen in 25 mm Tiefe weisen dagegen in den ersten drei Phasen eine hohe Übereinstimmung mit den Messungen auf. Indes ist die Befuchtung in Phase 4 weniger ausgeprägt als in der Realität, da bei 9,4 % bereits die Ausgleichsfeuchte erreicht wird. Um den Gleichgewichtszustand zu erreichen, sinkt die berechnete Holzfeuchtigkeit auch in Phase 5 nochmals leicht. Während die Ergebnisse  $b_{25}$  eine mittlere Abweichung von lediglich 0,6 % ergeben, beträgt der Fehler von  $b_{45}$  im Schnitt 1,7 %. Der Grund hierfür liegt vor allem

4. Finite-Elemente-Berechnung

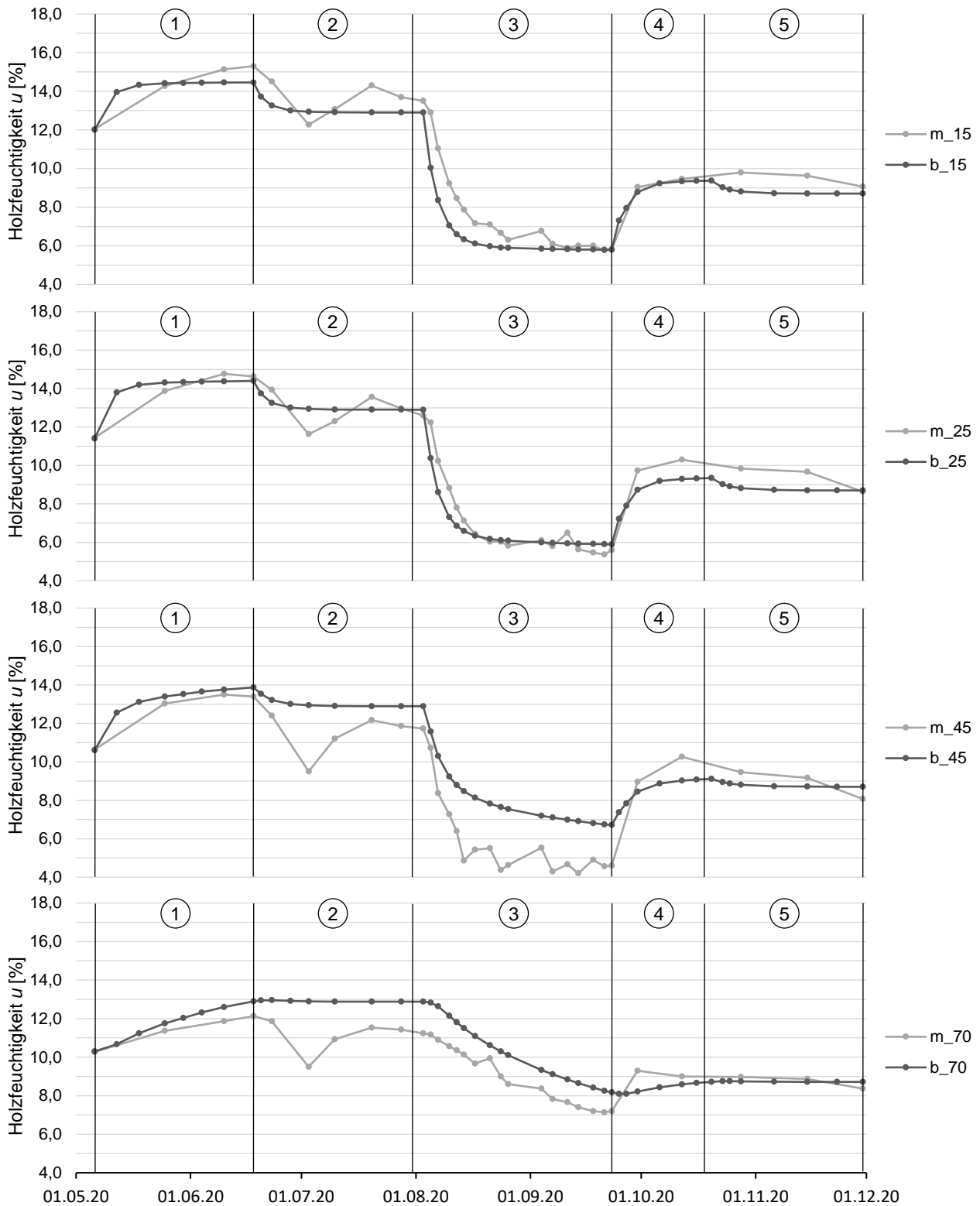


Abbildung 4.9: Vergleich der FE-Berechnungen b mit den Messergebnissen m der Serie M-1 in den Tiefen 15, 25, 45 und 70 mm



im Verhalten während der Heizphase. Obwohl währenddessen eine große Differenz zu den Messwerten vorliegt, wurde bereits anhand von Abbildung 4.8 ersichtlich, dass der berechnete Verlauf akzeptabel ist. Für die Tiefe von 70 mm liefert das Modell in Phase 1 eine gute Näherung. Innerhalb der zweiten Phase herrscht jedoch eine Ausgleichsfeuchte von 12,9 %, weshalb die berechnete Feuchtigkeit nicht wie im praktischen Versuch fällt, sondern nahezu konstant bleibt. In der anschließenden Heizphase zeigt die Berechnung ein dem realen Versuch sehr ähnliches Verhalten, ist allerdings durchgehend 1,3 % zu feucht. Aufgrund der bereits höheren Feuchtigkeit führt die Befeuchtung in Phase 4 zu keiner starken Reaktion. Zudem wird die Gleichgewichtsfeuchte bereits zu Beginn der Kühlphase erreicht, sodass  $b_{70}$  sich ab diesem Zeitpunkt nicht mehr verändert.

Die Ergebnisse der modellierten Holzfeuchtigkeitsverteilung sind bei der Serie M-2 jenen der Serie M-1 sehr ähnlich. Der Grund hierfür liegt in der nahezu gleichen Geometrie, sowie in den identischen feuchtespezifischen Materialkennwerten und Randbedingungen. Daher wird nicht weiter auf den Verlauf der verschiedenen Graphen eingegangen, sondern hauptsächlich die Übereinstimmung mit den Messwerten beschrieben. Die Holzfeuchtigkeitsverteilungen über den Querschnitt sind in Abbildung 4.10 dargestellt. Es zeigt sich, dass zum Ende der ersten Phase das berechnete Verhalten maximal um 1,0 % von den Messwerten abweicht. Auch nach der Heizphase wird, trotz der Differenz von 1,5 % zu  $m_{45}$ , eine gute Näherung erzielt. Mit dem Erreichen der Ausgleichsfeuchtigkeit in allen Tiefen bis zum Ende der fünften Phase, ergibt sich ein durchschnittlicher Fehler von lediglich 0,4 %.

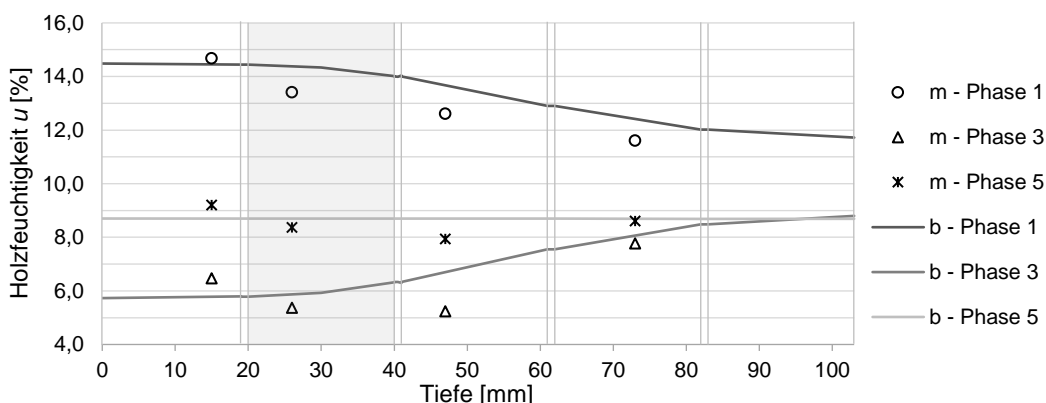


Abbildung 4.10: Berechnete Holzfeuchtigkeit  $b$  über den Querschnitt der Serie M-1 im Vergleich zu den Messungen  $m$  der experimentellen Untersuchungen zum Ende der Phasen 1, 3 und 5

Die zeitabhängigen Verläufe der Holzfeuchtigkeiten in 15, 25, 45 und 70 mm Tiefe zeigt die Abbildung 4.11. Aus ihr wird ersichtlich, dass die berechnete Holzfeuchte in der Decklage dem realen Verhalten nahekommt, dieses jedoch nicht vollständig trifft. Der gewählten Ausgleichsfeuchtigkeit ist es geschuldet, dass  $b_{15}$  in fast allen Phasen knapp unter den Messwerten bleibt. Aufgrund der etwas größeren Differenzen während des Trocknungsgefälles ergibt sich ein durchschnittlicher Fehler von 0,9 %. Mit einer mittleren Abweichung von 0,6 % stellt  $b_{25}$  dahingegen die bessere Näherung dar. Der Grund hierfür liegt in der realitätsnahen Trocknung durch die Heizphase. Allerdings führt die Ausgleichsfeuchtigkeit in 25 mm Tiefe während den Phasen 1 bis 3 zu einer Überschreitung der gemessenen Feuchten. Die Ergebnisse für  $b_{45}$  weisen in der ersten, zweiten und vor allem in der

4. Finite-Elemente-Berechnung

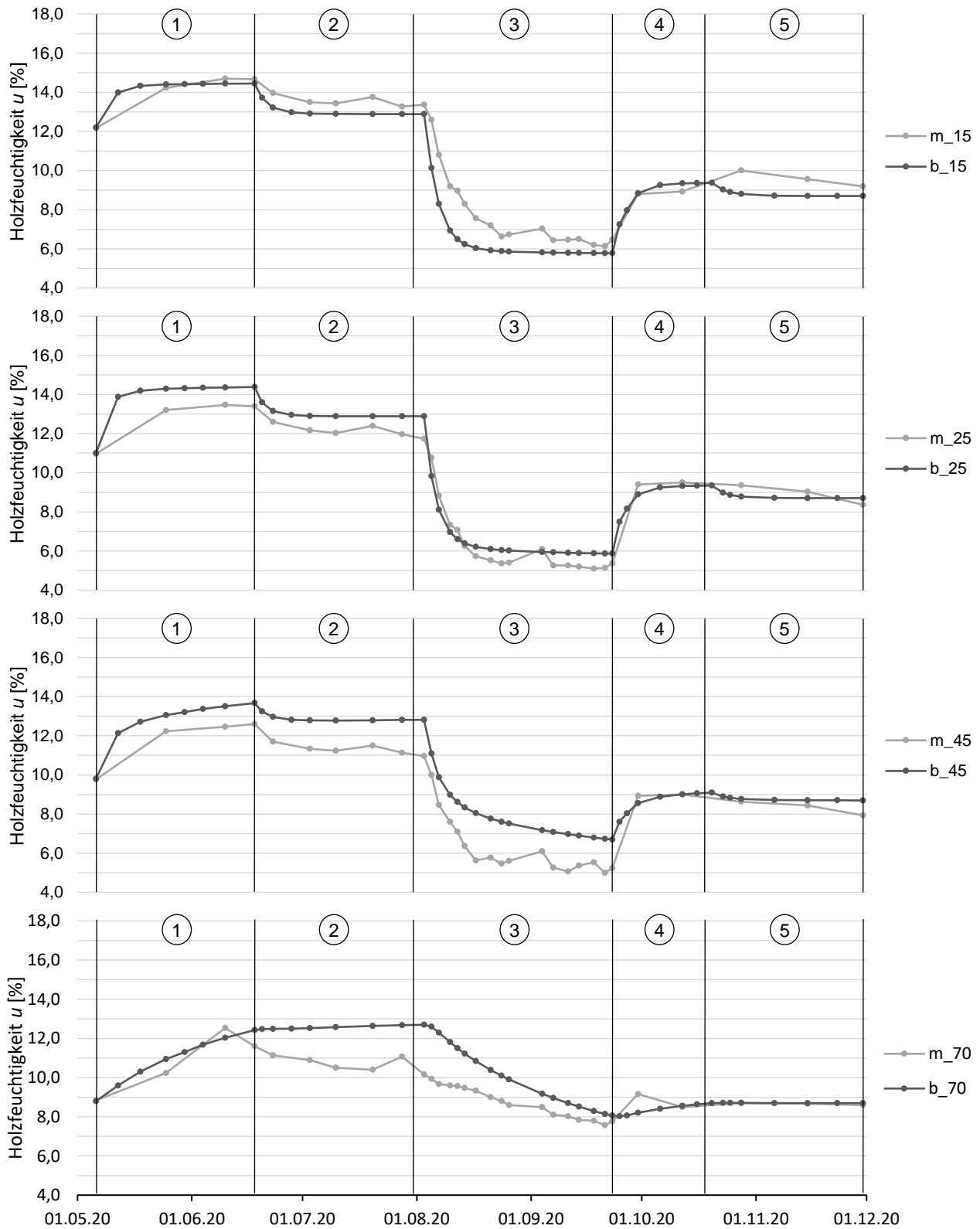


Abbildung 4.11: Vergleich der FE-Berechnungen b mit den Messergebnissen m der Serie M-2 in den Tiefen 15, 25, 45 und 70 mm

dritten Phase Abweichungen von bis zu 2,4 % auf, welche akzeptabel sind, da – wie bereits anhand von Abbildung 4.10 beschrieben wurde – die Verteilung über den Querschnitt insgesamt sinnvoll ist. Die berechnete Feuchtigkeit von  $b_{70}$  zeigt in der ersten Phase eine hohe Übereinstimmung mit dem praktischen Versuch. Die Berechnung folgt stets der Ausgleichsfeuchtigkeit und bleibt daher in Phase 2 auf dem erreichten Feuchtigkeitsniveau, anstatt wie in der experimentellen Untersuchung eine Trocknung zu erfahren. Im Verlauf der Heizphase nähert sich  $b_{70}$  wieder diesen Messungen an und stimmt in den meisten Zeitpunkten der vierten und fünften Phase mit ihnen annähernd überein. Während des gesamten Versuchs ergibt sich eine mittlere Differenz von 1,2 % zu  $m_{70}$ .

In den Berechnungen der Serie M-3 sind die feuchtespezifischen Materialparameter identisch mit den bereits beschriebenen Modellen. Einzig die Orientierung der beiden raumseitigen Lagen unterscheidet dieses Modell von der Serie M-1. Daher sind die Ergebnisse ebenfalls sehr ähnlich zu den vorangegangenen Serien, weshalb im Folgenden hauptsächlich die Abweichungen zu den Messwerten betrachtet werden. Die Abbildung 4.12 zeigt die berechnete Feuchtigkeitsverteilung über den Querschnitt und die entsprechend vorliegenden Messwerte. Daraus folgt, dass zum Ende der ersten Phase der simulierte und der tatsächlich gemessene Feuchtigkeitsverlauf im Schnitt 0,5 % auseinander liegen. Nach der Heizphase ist das Modell insgesamt nicht so weit getrocknet wie die realen Versuchsobjekte, sodass es bei  $m_{45}$  zur maximalen Differenz von 1,9 % kommt. Die Berechnungen sind dennoch akzeptabel, da der gesamte Verlauf stimmig und die Abweichung zu den anderen Messpunkten geringer ist. Auch diese Serie erzielt durch das Erreichen der Ausgleichsfeuchte am Ende der fünften Phase in jeder Tiefe eine gute Näherung.

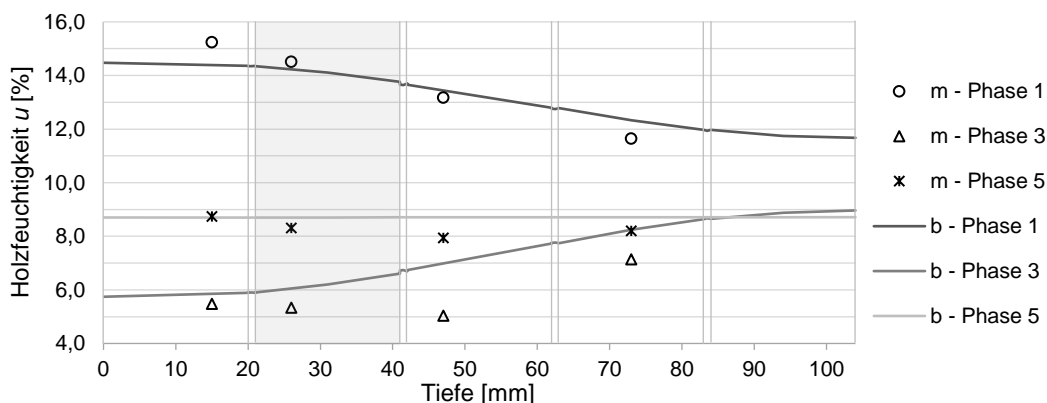


Abbildung 4.12: Berechnete Holzfeuchtigkeit  $b$  über den Querschnitt der Serie M-3 im Vergleich zu den Messungen  $m$  der experimentellen Untersuchungen zum Ende der Phasen 1, 3 und 5

Die Simulation wird in Abbildung 4.13 mit den Prüfkörpern aus der Klimakammer, hinsichtlich ihres zeitabhängigen Verhaltens, verglichen. Die berechnete Holzfeuchtigkeit der Decklage liegt in sämtlichen Phasen unterhalb der Messwerte. Dies ist auf die Annahme der Ausgleichsfeuchtigkeiten zurück zu führen, welche andererseits in der Heizphase äußerst zutreffend ist. Somit beträgt der durchschnittliche Fehler der Berechnung zu  $m_{15}$  lediglich 0,5 %. Aufgrund der Luftkanäle folgt auch die Feuchtigkeit in 25 mm Tiefe dem Gleichgewichtszustand. So stimmen die ersten beiden Phasen mit den Messungen annähernd überein. Die Ausgleichsfeuchte in den Phasen 3 bis 5 hingegen führten

4. Finite-Elemente-Berechnung

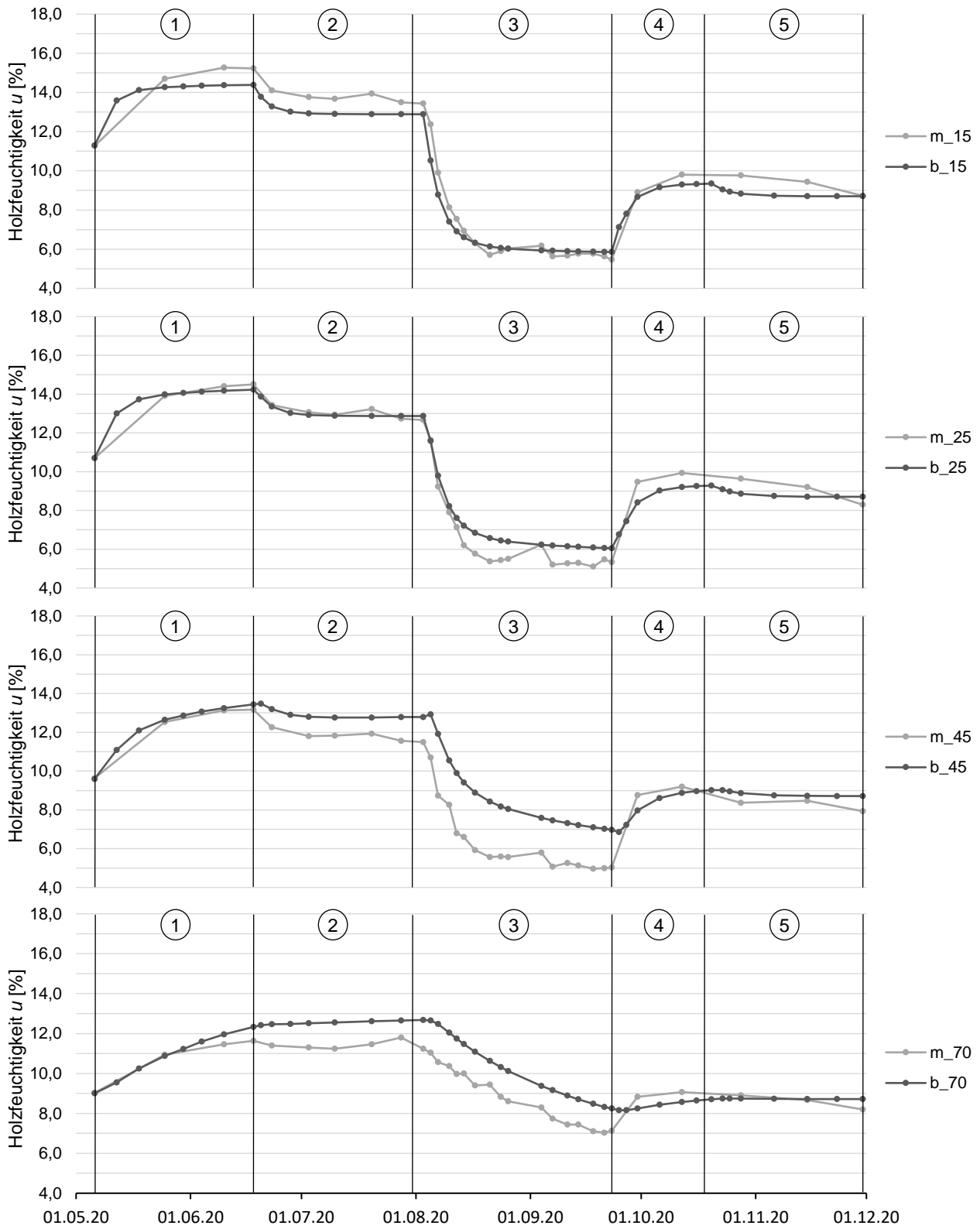


Abbildung 4.13: Vergleich der FE-Berechnungen b mit den Messergebnissen m der Serie M-3 in den Tiefen 15, 25, 45 und 70 mm

zu den typischen Fehlern, welche hier maximal 1,2 % betragen. Erheblich größere Abweichungen weist  $b_{45}$  während der Heizphase mit Differenzen von bis zu 3,2 % auf. Die Berechnungen werden jedoch mit den Ausführungen zu Abbildung 4.12 als hinreichend genau befunden. Der Verlauf von  $b_{70}$  zeigt infolge der Stabilisierungsphasen ein etwa 1,0 % höheres Feuchtigkeitsniveau als während des realen Versuchs, welches über die Heizphase hinweg beibehalten wird und sich erst durch eine ausbleibende Reaktion auf die Befeuchtung in Phase 4 ausgleicht. Der Gleichgewichtszustand wird bereits zu Beginn der fünften Phase erreicht und die Holzfeuchtigkeit bleibt bis zum Ende konstant.

Die Auswirkungen der fehlenden Decklage bei Serie M-4 sind anhand von Abbildung 4.14 ersichtlich. Zu erkennen sind die Feuchtigkeitsänderungen, die bereits in der Luftkanalebene beginnen, aber erst in der Mitte des Querschnitts am größten sind. Dabei fällt auf, dass sich die Feuchtigkeit in der tiefsten Schicht von der ersten bis zum Ende der fünften Phase kaum ändert. Die Ergebnisse der Berechnung weichen in Phase 1 im Durchschnitt lediglich 0,2 % von den Messungen ab. Anders verhält es sich in der dritten Phase, in welcher die Simulation den richtigen Verlauf zeigt, jedoch stets 1,5 bis 1,9 % zu feucht ist. Das Erreichen der Ausgleichsfeuchtigkeit zum Ende der fünften Phase stellt dahingegen, mit einem mittleren Fehler von 0,4 %, eine zutreffende Annäherung dar.

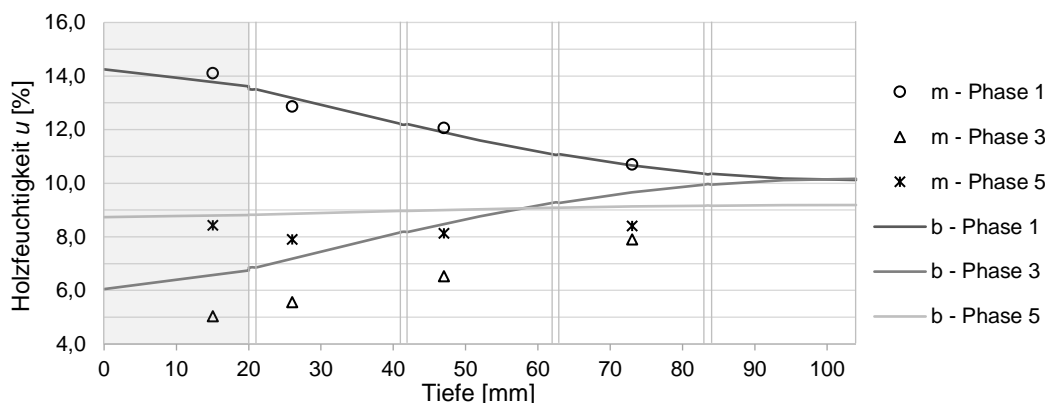


Abbildung 4.14: Berechnete Holzfeuchtigkeit  $b$  über den Querschnitt der Serie M-4 im Vergleich zu den Messungen  $m$  der experimentellen Untersuchungen zum Ende der Phasen 1, 3 und 5

Die zuvor beschriebenen Differenzen zwischen den Berechnungen und den Messwerten der dritten Phase ist ebenso in den Feuchtigkeitsverläufen über den Versuchszeitraum zu erkennen, siehe Abbildung 4.15. Abgesehen davon wird über die Annäherung an die Gleichgewichtsfeuchte in 15 mm Tiefe eine hohe Übereinstimmung mit den Messwerten der ersten und letzten beiden Phasen erreicht. Der mittlere Fehler über den gesamten Zeitraum ergibt sich zu 0,8 %. Der verbleibende Querschnitt zeigt ein relativ einheitliches Verhalten, dessen Abweichungen jedoch mit zunehmender Tiefe ebenso ausgeprägter werden. So entsprechen die Berechnungen der ersten Phase stets den Messwerten. Die Simulation in Phase 2 erfährt jedoch nicht dieselbe Trocknung wie die realen Prüfkörper, da die Ausgleichsfeuchte bei 12,9 % liegt, was eher zu einer Befeuchtung führt, wie sie vor allem  $b_{70}$  zeigt. Während der Heizphase ist das Verhalten ähnlich dem der realen Prüfkörper, wohingegen der Fehler eher zu- als abnimmt. Aufgrund des erhöhten Feuchtigkeitsniveaus resultiert die Befeuchtung

4. Finite-Elemente-Berechnung

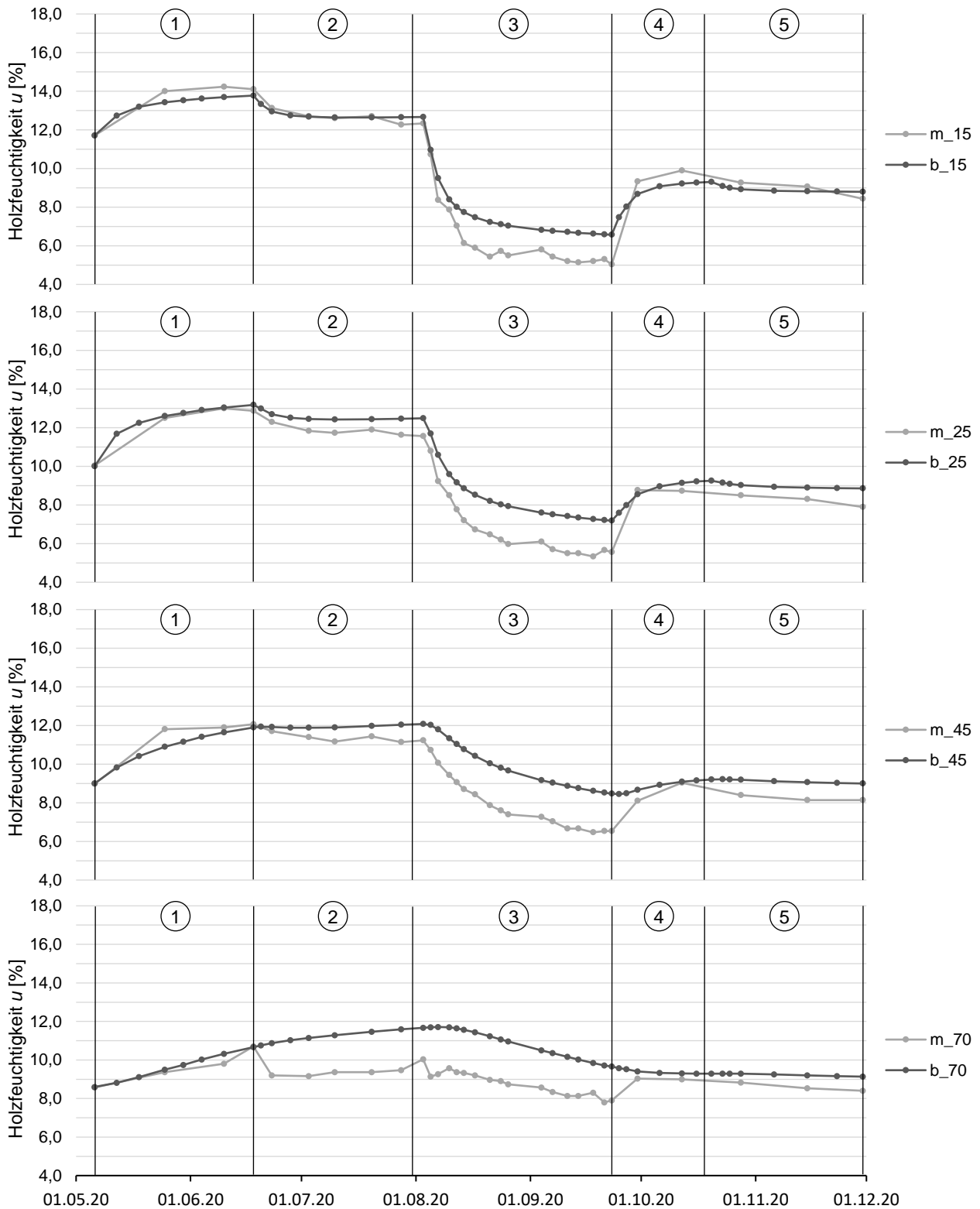


Abbildung 4.15: Vergleich der FE-Berechnungen b mit den Messergebnissen m der Serie M-4 in den Tiefen 15, 25, 45 und 70 mm

in Phase 4 in einer vergleichsweise schwachen Reaktion. In der Kühlphase wird der Gleichgewichtszustand in etwa erreicht und die berechnete Feuchtigkeit bleibt bis zum Ende nahezu in gleichbleibendem Abstand zu den Messungen.

Die Abbildung 4.16 stellt die berechneten Holzfeuchteverteilungen über den sechslagigen Querschnitt der Serie M-5 dar. Es zeigt sich, dass die Feuchtigkeit zu allen drei betrachteten Zeitpunkten über die 12 mm starke Decklage hinweg konstant ist. Änderungen treten erst mit zunehmender Querschnittstiefe auf. Dieses Verhalten ergibt bis zum Ende der ersten Phase eine Abweichung zu den Messwerten von durchschnittlich 0,2 %. Diese Prüfkörpertypen weisen in den Ergebnissen der dritten Phase ebenfalls eine bis zu 1,8 % höhere Feuchtigkeit auf als während des Versuchs. Da sowohl der allgemeine Verlauf stimmig ist als auch die übrigen Abweichungen geringer sind, ist die Berechnung akzeptabel. Am Ende der Phase 5 entspricht die Feuchtigkeit im Modell in jeder Tiefe, mit im Schnitt 0,5 % über den Messwerten, annähernd der gewählten Gleichgewichtsfeuchte.

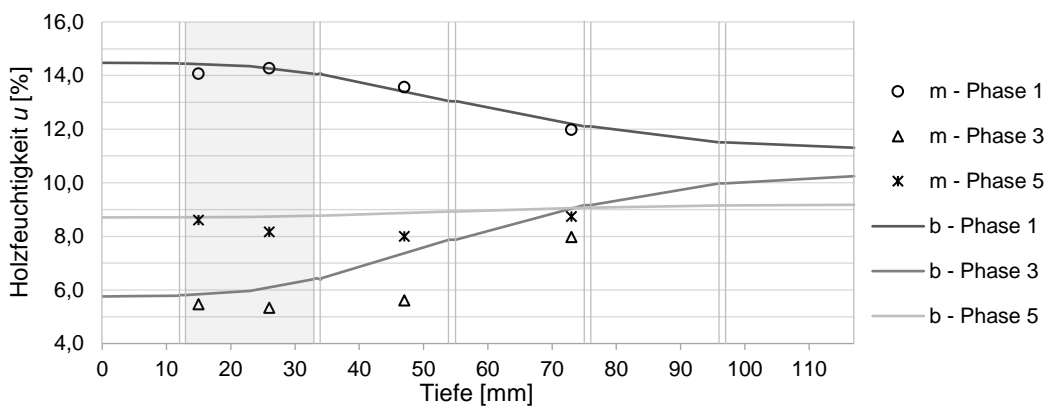


Abbildung 4.16: Berechnete Holzfeuchtigkeit  $b$  über den Querschnitt der Serie M-5 im Vergleich zu den Messungen  $m$  der experimentellen Untersuchungen zum Ende der Phasen 1, 3 und 5

Bei der Betrachtung der Holzfeuchtigkeit über die fünf Klimaphasen in Abbildung 4.17 finden sowohl die Messungen als auch die Berechnungen der Tiefen 15 und 25 mm in der gleichen Lage statt. Da  $b_{15}$  und  $b_{25}$  in jeder Phase die entsprechende Ausgleichsfeuchte erreichen, sind auch die Abweichungen zu den Messwerten jeweils anhand dieser zu begründen. Die Differenzen sind, abgesehen von der Heizphase, äußerst gering, sodass die mittlere Abweichung in beiden Tiefen lediglich 0,6 % beträgt. Ähnlich ist das Verhalten von  $b_{45}$ , welches aber in der dritten Phase Fehler von bis zu 2,6 % aufweist. Den vorangegangenen Ausführungen ist die Akzeptanz dieser Abweichungen zu entnehmen. Für die Tiefe von 70 mm berechnet die Simulation einen Feuchtigkeitsverlauf, welcher jenen der Serie M-1 bis M-3 ähnelt. Aufgrund derselben Ausgleichsfeuchte trocknet in der zweiten Phase auch hier das Modell nicht, sodass sich die höhere Feuchtigkeit erst in Phase 4 ausgleicht und in Phase 5 wieder eine gute Näherung darstellt.



4. Finite-Elemente-Berechnung

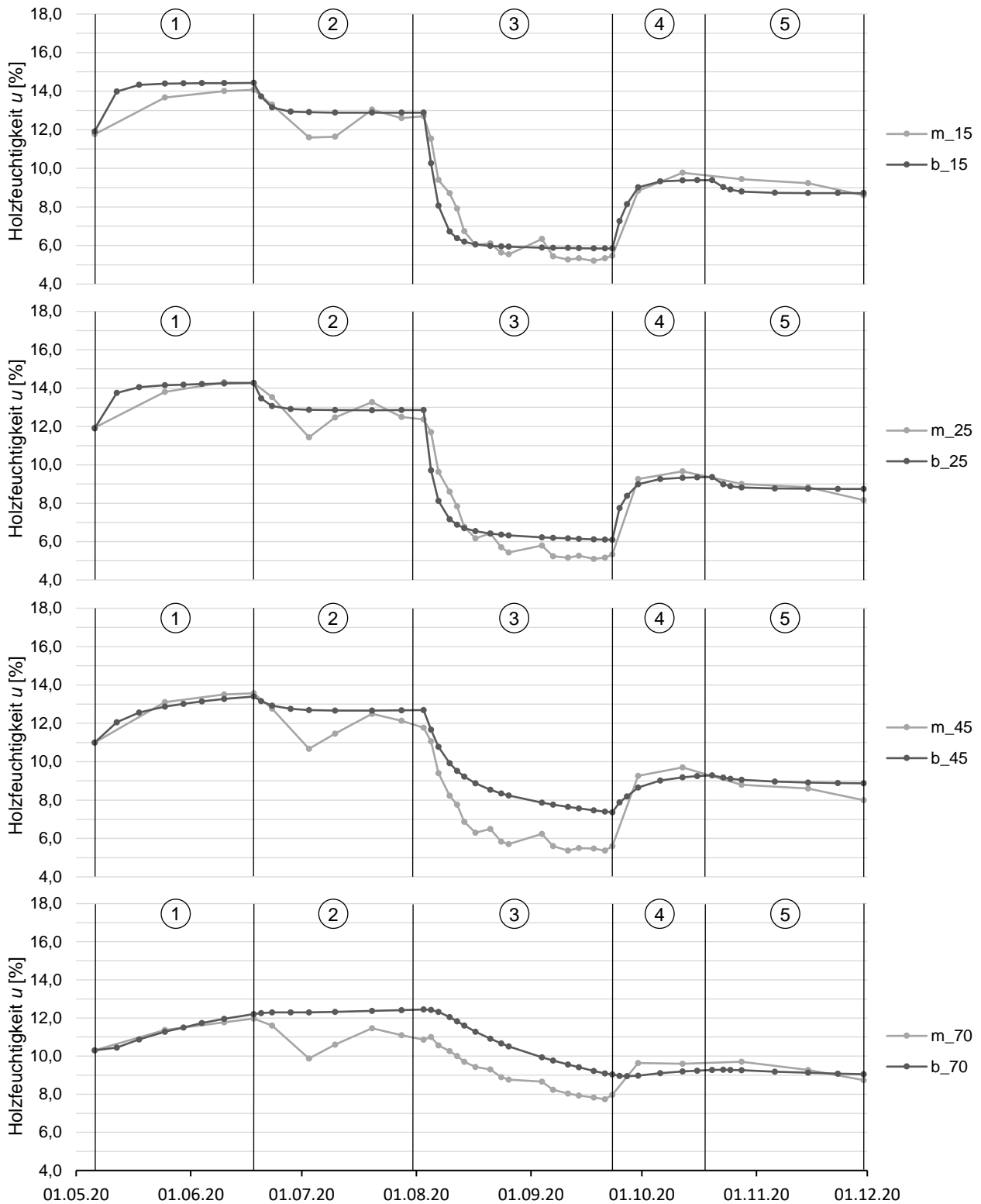


Abbildung 4.17: Vergleich der FE-Berechnungen b mit den Messergebnissen m der Serie M-5 in den Tiefen 15, 25, 45 und 70 mm

Die Prüfkörper der Serie O-1 dienen als Referenz und besitzen keine Luftkanäle, was sich auch in der Feuchtigkeitsverteilung über den Querschnitt widerspiegelt, siehe Abbildung 4.18. Im Vergleich zu den multifunktionalen Elementen ist der Verlauf in den drei gewählten Zeitpunkten nicht S-förmig, sondern nur einfach gekrümmt. Die Berechnungen stimmen in der ersten Phase, bei einem durchschnittlichen Fehler von 0,2 %, mit den Messungen überein. Von der zu hohen Feuchtigkeit während der Heizphase ist auch die Serie O-1 betroffen, in der die Abweichungen in einem Bereich von 0,8 bis 1,7 % liegen. Da keine offensichtlichen Fehler an der Berechnung zu erkennen sind, wird dieses Ergebnis wie bei den vorangegangenen Serien akzeptiert. Durch das Fehlen von Luftkanälen innerhalb des Körpers wird zudem am Ende der letzten Phase die Ausgleichsfeuchtigkeit nicht im gesamten Querschnitt erreicht. In der vierten und fünften Lage befindet sich die Holzfeuchte über dem Gleichgewichtszustand und somit auch im Schnitt 0,8 % über den Messwerten.

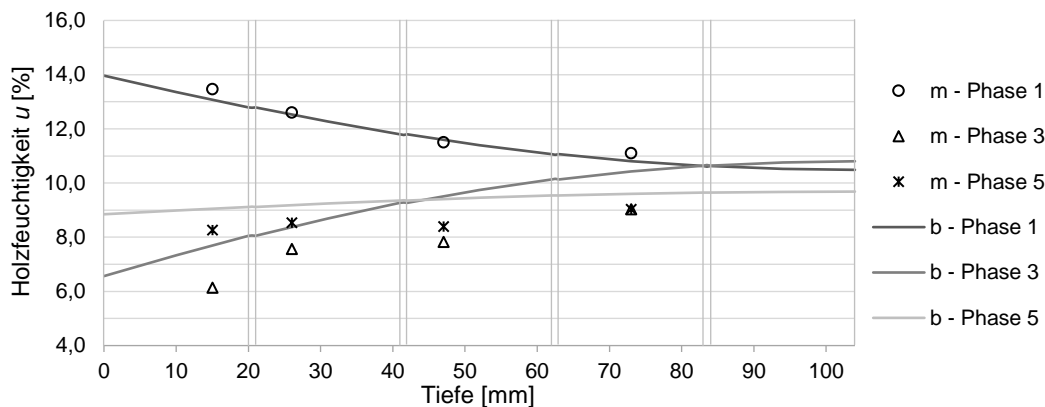


Abbildung 4.18: Berechnete Holzfeuchtigkeit  $b$  über den Querschnitt der Serie O-1 im Vergleich zu den Messungen  $m$  der experimentellen Untersuchungen zum Ende der Phasen 1, 3 und 5

In den zeitlichen Verläufen, wie sie Abbildung 4.19 zu entnehmen sind, zeigen die Holzfeuchtigkeiten erneut die Abweichungen in der dritten Phase. Durch das Fehlen der Luftkanäle erreicht die Feuchte in 15 mm Tiefe gemäß der Berechnung in keiner Phase die Ausgleichsfeuchtigkeit. Während in den Stabilisierungsphasen noch das Niveau der Messwerte erreicht wird, ist vor allem die Trocknung in der Heizphase weniger ausgeprägt als im Versuch. Der entstandene Fehler setzt sich bis zum Ende der fünften Phase fort. Im Mittel ergibt sich so eine Abweichung von 0,8 %. Die übrigen drei Diagramme zeigen das prinzipiell gleiche Verhalten von  $b_{25}$ ,  $b_{45}$  und  $b_{70}$ . Alle drei weisen in Phase 1 eine nahezu perfekte Übereinstimmung der Berechnungen mit den Messungen auf. Dagegen erfährt das Modell während der zweiten Phase keine Änderungen, bzw. eine leichte Befeuchtung, jedoch keine Trocknung, wie sie die realen Prüfkörper aufweisen. Dies ist wie zuvor stets der Gleichgewichtsfeuchte geschuldet. In der Heizphase zeigen die Berechnungen dasselbe Verhalten wie die Messungen, lediglich in einem feuchteren Zustand. Folglich fällt die Befeuchtung in Phase 4 nur gering aus. Im Laufe der Kühlphase finden kaum noch Änderungen statt, obwohl der Gleichgewichtszustand noch nicht erreicht ist. Das lässt sich mit dem Vorliegen einer vergleichsweise geringen Gradienten begründen und entspricht dem Verhalten, welches die Messwerte dokumentieren. Insgesamt ergeben sich die Fehler im Durchschnitt für  $b_{25}$  zu 0,6 %, für  $b_{45}$  zu 1,1 % und für  $b_{70}$  zu 1,0 %.

4. Finite-Elemente-Berechnung

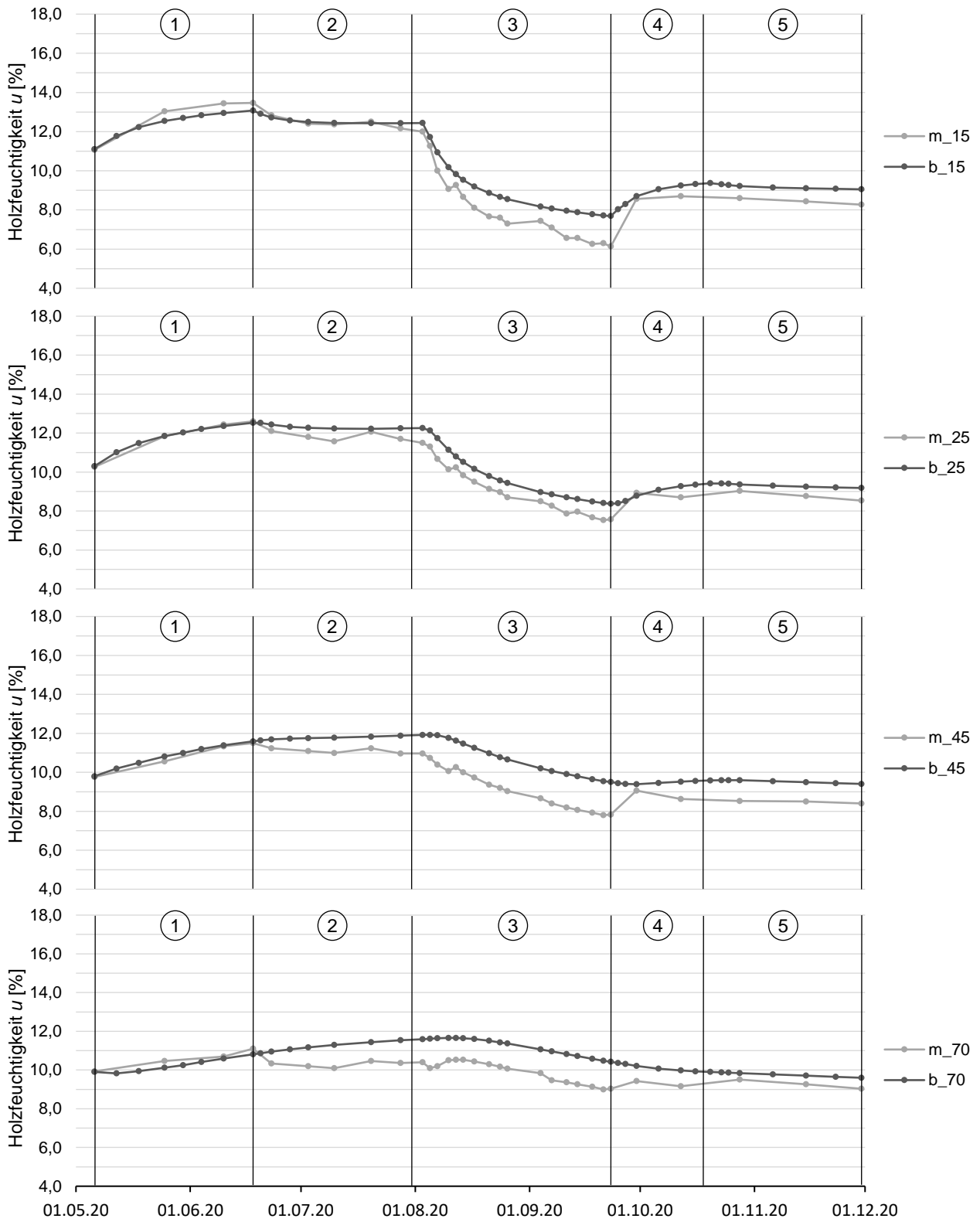


Abbildung 4.19: Vergleich der FE-Berechnungen b mit den Messergebnissen m der Serie O-1 in den Tiefen 15, 25, 45 und 70 mm

#### 4.2.2 Vergleich der resultierenden Verformungen

Die Ergebnisse der Verformungsberechnung werden nachfolgend mit den Messungen der experimentellen Untersuchung verglichen. Wie bereits in Kapitel 3.3.1 beschrieben wurde, sind die Ergebnisse von  $w_{z2}$  und  $w_{z3}$  sowohl am freien als auch am gehinderten Prüfkörper, meist nahezu identisch. Die Berechnungen unterscheiden sich um wenige Hundertstelmmillimeter, weshalb in diesen Ausführungen lediglich die Messungen  $w_{z2}$  und  $w_{z2}$  (V) zusammen mit den entsprechenden Berechnungen  $b_{z2}$  und  $b_{z2}$  (V) dargestellt werden. Die Messungen der Verformung wurden im Versuchsablauf erst zum 28.07.2020 begonnen, sodass insgesamt 23 Messpunkte vorliegen. Die Auswertung finden zu denselben 46 Zeitpunkten statt, wie sie bei der Feuchtigkeitsverteilung vorgenommen wurden, und decken somit alle fünf Phasen ab.

Die berechnete Verformung des freien und gehinderten Modells der Serie M-1 ist in Abbildung 4.20 dargestellt. Diese Ergebnisse beruhen auf der Annahme, dass das Bauteil bei einer einheitlichen Holzfeuchtigkeit von 7,3 % absolut unverformt ist. Da die Prüfkörper in der ersten Phase eine Befuchtung auf bis zu 14,5 % erfahren, reagiert das freie Modell mit einer Quellverformung. Es resultiert ein Stich von maximal -8,15 mm. Die Trocknung in der zweiten Stabilisierungsphase führt zu einer Abnahme der Quellung auf -5,04 mm, womit sie etwa 1,0 mm vom Messwert abweicht. In der anschließenden Heizphase folgt auf die Trocknung auch eine direkte Schwindverformung, deren

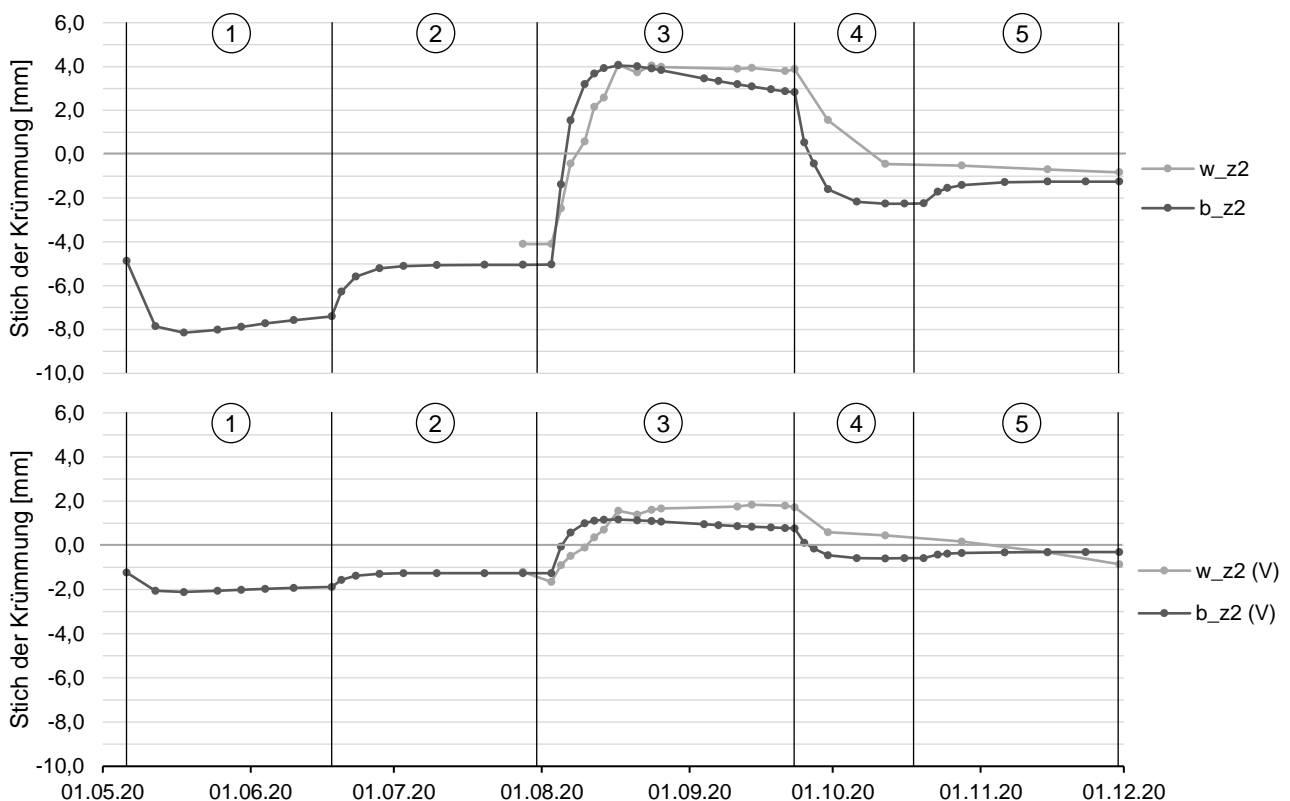


Abbildung 4.20: Vergleich der Verformungsberechnungen  $b$  mit den Messergebnissen  $w$  der Serie M-1 für den freien (oben) und gehinderten (unten) Prüfkörper

Maximum sowohl in der Berechnung als auch in der Messung bei 4,1 mm liegt. Die Unterschiede in der Steigung sind das Resultat der verschiedenen schnellen Feuchtigkeitsänderungen, siehe Abbildung 4.9. Während die Messwerte bis zum Ende der Heizphase auf etwa diesem Niveau verharren, weist die Berechnung ein leichtes Gefälle auf, welches auf die sinkenden Feuchtigkeitsgradienten innerhalb des Bauteils durch die anhaltende Trocknung zurückzuführen ist. Die anschließende Befeuchtung in der vierten Phase führt in der Simulation zu einer erheblich ausgeprägten Quellung über das der experimentellen Untersuchung hinaus. Durch die Kühlphase nähert sich das Modell wieder den Messwerten an, da die Prüfkörper im Versuch keine weiteren Verformungen aufwiesen. Im Durchschnitt weicht  $b_{z2}$  von  $w_{z2}$  um 1,07 mm ab. Verglichen mit der freien Berechnung zeigt das gehinderte Modell stets das gleiche Verformungsverhalten, allerdings stets mit einem Stich, der etwa ein Viertel des uneingeschränkten Bauteils beträgt. Der resultierende Krümmungsverlauf besitzt einige Differenzen zu den Messungen, welche eine mittlere Abweichung von 0,67 mm ergeben.

Für die Serie M-2 wurde als Referenzfeuchtigkeit 7,4 % gewählt. Es resultieren für  $b_{z2}$  und  $b_{z2}$  (V) die in Abbildung 4.21 dargestellten Verläufe. In beiden Fällen weisen die Stabilisierungsphasen zuerst eine Quellverformung auf, welche im Anschluss zurückgeht und zum Ende im Bereich der ersten Messungen liegt. Für das freie Modell stimmen die Berechnungen während der gesamten Heizphase annähernd mit den Messwerten überein. Auch  $b_{z2}$  (V) stellt eine gute Näherung dar und ist stets weniger als 0,4 mm von dem entsprechenden Prüfkörper entfernt. Für beide Berechnungen gilt, dass

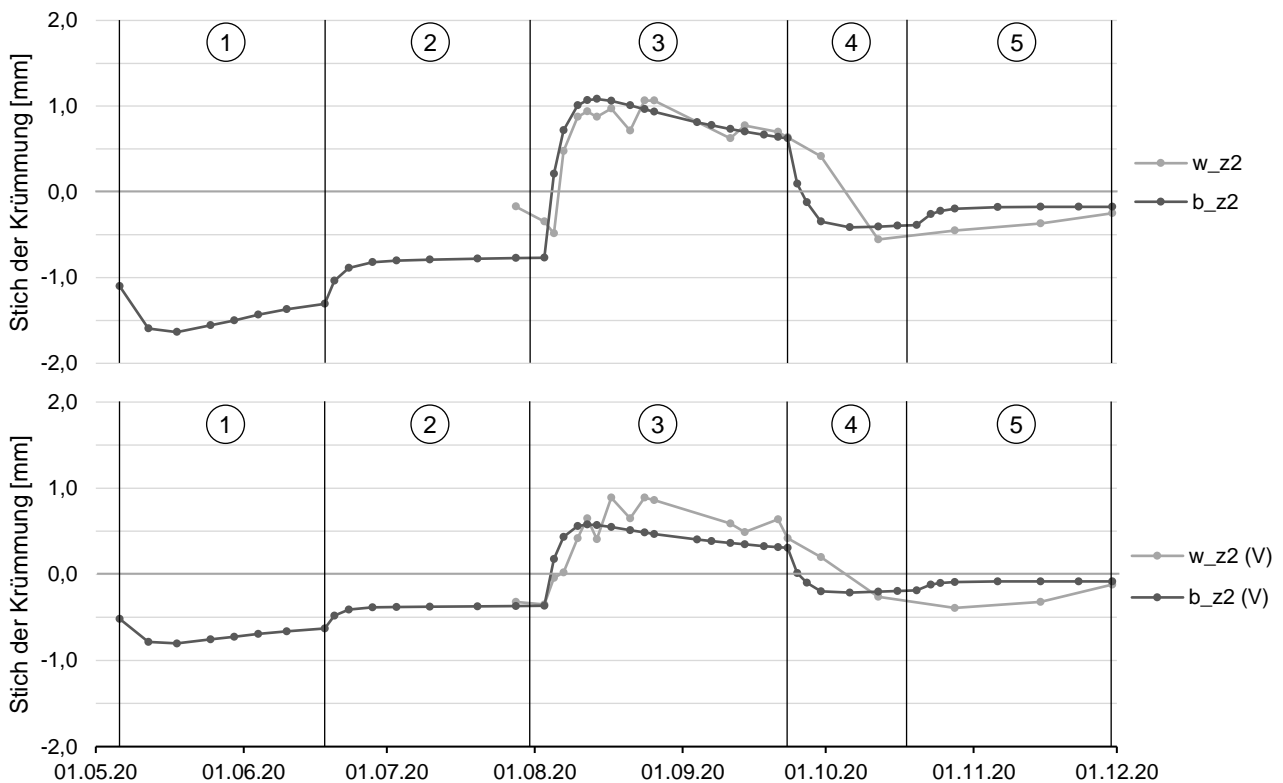


Abbildung 4.21: Vergleich der Verformungsberechnungen  $b$  mit den Messergebnissen  $w$  der Serie M-2 für den freien (oben) und gehinderten (unten) Prüfkörper

sie in den Phasen 4 und 5 ein etwas zu ausgeprägtes Verhalten zeigen. Allerdings nähern sich die Ergebnisse zum Ende jeder Phase wieder an die Messwerte an. Somit weist  $b_{z2}$  eine durchschnittliche Abweichung von 0,24 mm und  $b_{z2}$  (V) von 0,21 mm auf.

Die Berechnungen der freien und gehinderten Verformung für die Serie M-3 sind in den Diagrammen der Abbildung 4.22 dargestellt. Die Holzfeuchtigkeit für den unverformten Zustand wurde auf 12,0 % festgelegt. Zusammen mit der Feuchtigkeitsverteilung aus Abbildung 4.13 folgt ein starkes Quellen zu Beginn der ersten Phase. Trotz gleichbleibender Holzfeuchtigkeit reduziert sich der Stich von -1,77 auf -0,46 mm bis zum Ende der Phase 1. Durch die leichte Trocknung in der zweiten Phase stellt sich im Modell über den gesamten Querschnitt eine Feuchtigkeit ein, die annähernd dem unverformten Zustand entspricht. Dies spiegelt sich im Stich wider, der lediglich eine geringe Krümmung aufweist. Diese berechnete Verformung weicht von den Messungen der freien Prüfkörper um 0,85 mm und von denen der Gehinderten um 0,77 mm ab. Durch die eintretende Schwindverformung zu Beginn der Heizphase nimmt dieser Fehler weiter zu. Die Berechnungen nähern sich jedoch durch einen nahezu linearen Rückgang und der Umkehr der Krümmungen wieder an die Messungen an. Dieses Verhalten, das umgekehrt auch in der ersten Phase auftritt, kann auf die Orientierung der Decklage und der damit einher gehenden Verformung über die Bauteilhöhe zurückgeführt werden. In der anschließenden vierten und fünften Phase stellt  $b_{z2}$  die reale Näherung gut dar. Das Modell der gehinderten Verformung zeigt, wenn auch weniger ausgeprägt, denselben Verlauf. Dadurch wird

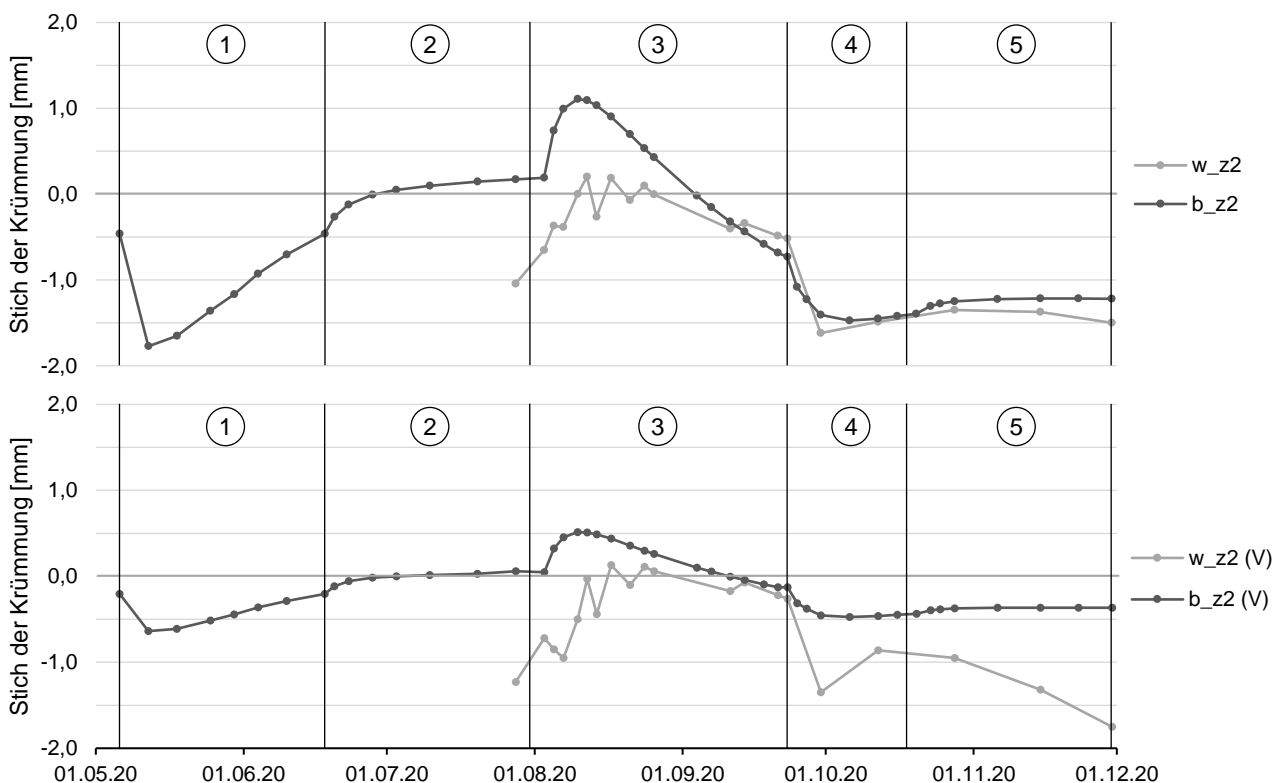


Abbildung 4.22: Vergleich der Verformungsberechnungen  $b$  mit den Messergebnissen  $w$  der Serie M-3 für den freien (oben) und gehinderten (unten) Prüfkörper

die gemessene Krümmung während der Heizphase nachempfunden, zu dessen Ende eine gute Übereinstimmung erreicht wird. Der reale Prüfkörper zeigt in den letzten beiden Phasen ein Verhalten, welches nicht der Theorie entspricht und somit nicht von der Berechnung abgebildet wird. Über den gesamten Zeitraum ergibt sich ein mittlerer Fehler von 0,58 mm für  $b_{z2}$  und von 0,65 mm für  $w_{z2}$  (V).

Für die Serie M-4 sind die Ergebnisse der Verformungsberechnungen in Abbildung 4.23 veranschaulicht. Als Referenzfeuchtigkeit wurde 7,3 % gewählt. Folglich stellen die ersten beiden Phasen eine Befeuchtung des Holzes dar, welches sich in der entsprechend zu- und abnehmenden Quellverformung zeigt. Die Berechnungen des freien Modells stimmen im Zeitraum der Heizphase annähernd mit den Messungen im Versuch überein. Die stattfindende Schwindverformung dauert bis zum Ende der dritten Phase an. Anders verhält es sich in der Übergangsphase, während der die Befeuchtung, im Gegensatz zum ausgeprägten Verlauf von  $w_{z2}$ , im Modell lediglich zu einem mäßigen Quellen führt. In der anschließenden Kühlphase zeigen beide Graphen nahezu keine Veränderungen, sodass  $b_{z2}$  insgesamt einen mittleren Fehler von 0,26 mm aufweist. Das Modell der gehinderten Verformung zeigt dagegen größere Abweichungen. Bereits zu Beginn der dritten Phase ergibt sich aus den Berechnungen ein nahezu ungekrümmter Zustand, wohingegen die Messungen eine gequollene Ausgangssituation belegen. Diese Differenz bleibt bis zum Ende der Heizphase mit einer nahezu unveränderlichen Größe bestehen. Da die Feuchtigkeit über den Querschnitt in den Phasen 4

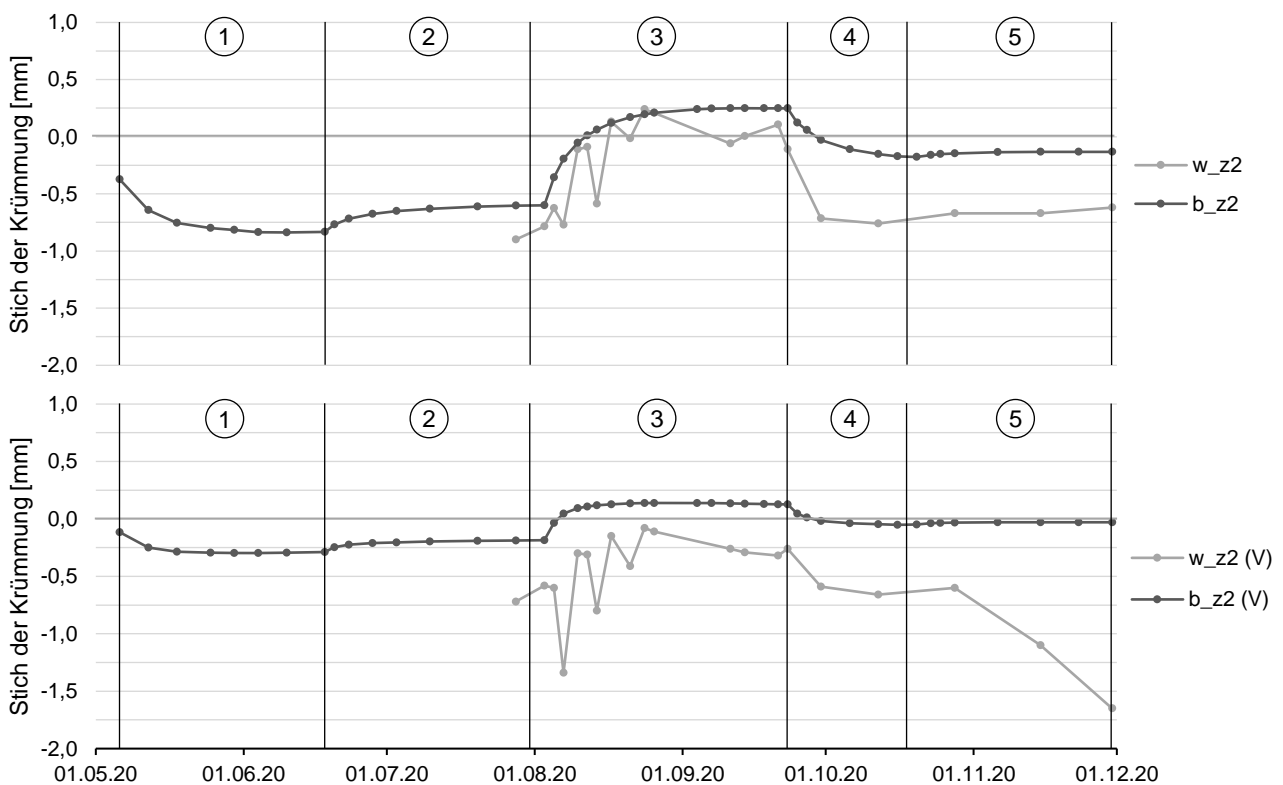


Abbildung 4.23: Vergleich der Verformungsberechnungen  $b$  mit den Messergebnissen  $w$  der Serie M-4 für den freien (oben) und gehinderten (unten) Prüfkörper



und 5 immer einheitlicher wird, geht auch die Krümmung und somit der Stich  $b_{z2}$  (V) gegen Null. Folglich wird das Verhalten von  $w_{z2}$  (V) in den beiden letzten Phasen nicht durch die Berechnungen abgebildet. Als Resultat ergibt sich für das gehinderte Modell ein durchschnittlicher Fehler von 0,46 mm.

Für eine Referenzfeuchtigkeit von 6,5 % ergeben die Berechnungen der Serie M-5 die in Abbildung 4.24 dargestellten Verformungen. Nach dem typischen Verlauf in den ersten beiden Phasen besitzt sowohl das freie als auch das gehinderte Modell etwa denselben Verformungszustand wie die entsprechenden Prüfkörper im Versuch. Bei der Betrachtung von  $b_{z2}$  zeigt sich in der Heizphase eine Schwindverformung, die lediglich wenige Zehntelmillimeter größer ist, als aus den Messungen geschlossen werden kann. Da die Verformung sich streng anhand der Feuchtigkeitsverteilung berechnet, nähert sich  $b_{z2}$  in den Phasen 4 und 5 über Quellen und Schwinden dem ungekrümmten Zustand an. Obwohl die Feuchtigkeiten der Prüfkörper während der experimentellen Untersuchungen dafür keinen Anlass zeigen, folgt  $w_{z2}$  diesem Verhalten in den letzten beiden Phasen nicht. Deshalb ergibt sich ein mittlerer Fehler von  $b_{z2}$  zu 0,78 mm. Dasselbe gilt auch für den Vergleich der gehinderten Verformung. Hier spiegelt der berechnete Stich in der Heizphase, nach anfänglichen Differenzen, nahezu exakt die Messungen wider. Auch hier zeigt der Prüfkörper während der vierten und fünften Phase in der experimentellen Untersuchung ein gänzlich anderes Verhalten als die theoretische Berechnung  $b_{z2}$  (V) ermittelt. Unter der Berücksichtigung aller vorhandener Messungen ergibt sich so eine durchschnittliche Abweichung von 0,48 mm.

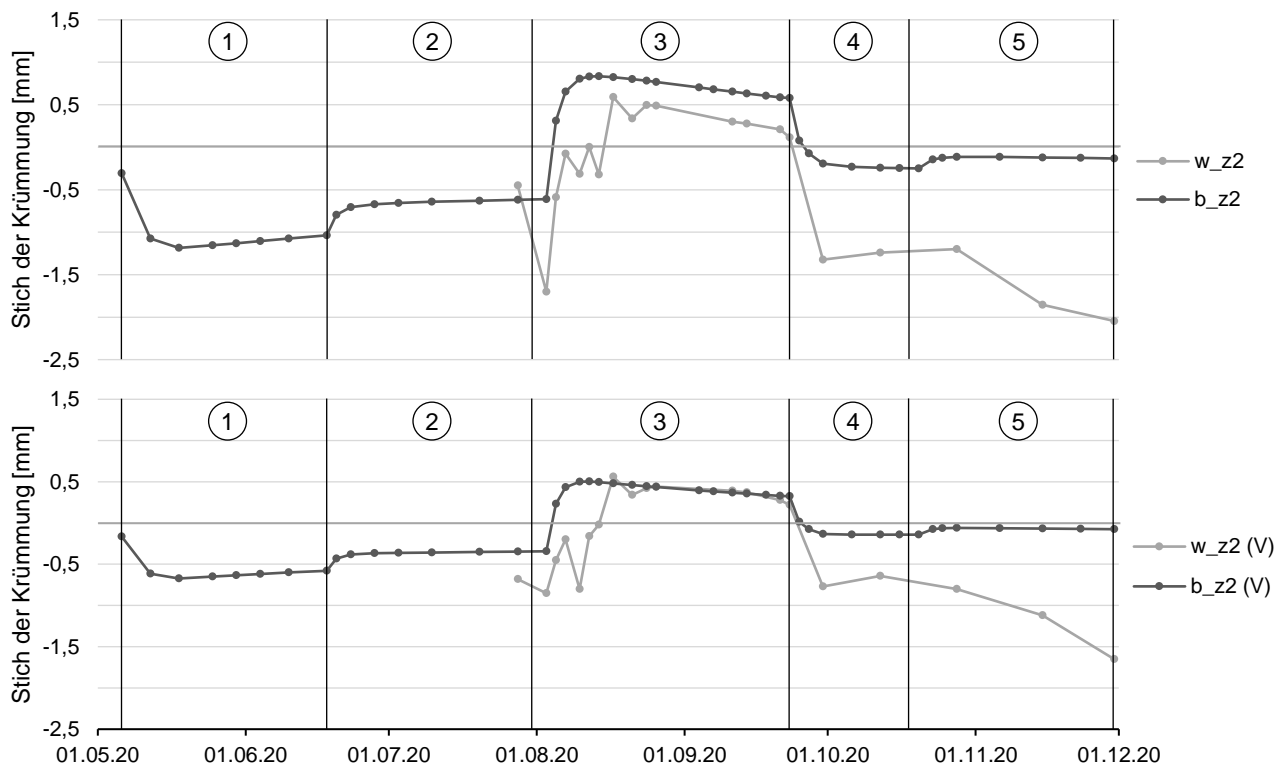


Abbildung 4.24: Vergleich der Verformungsberechnungen  $b$  mit den Messergebnissen  $w$  der Serie M-5 für den freien (oben) und gehinderten (unten) Prüfkörper

Die Berechnungen der Referenzserie O-1 wurden mit einer Holzfeuchtigkeit des unverformten Zustandes von 9,0 % durchgeführt und sind in Abbildung 4.25 dargestellt. Wie auch bei den vorangegangenen Serien zeigt sich hier in den beiden Stabilisierungsphasen erst eine Zu- und im Anschluss eine Abnahme der Quellverformung. Daraus folgt für die freie und gehinderte Modellierung je eine Krümmung, die vor der dritten Phase etwa im Bereich der Messwerte liegt. Die darauffolgende Trocknung führt bei  $b_{z2}$  zu einem ausgeprägterem Schwindverhalten als bei  $w_{z2}$ , sodass am Ende der Heizphase ein 0,60 mm größerer Stich vorliegt. Entsprechend geht es mit der freien Verformung in der vierten Phase weiter, da die Befeuchtung im Vergleich zu den realen Prüfkörpern zu einer stärkeren Quellung führt, welche bis zum Versuchsende beibehalten wird. Im Durchschnitt weicht der berechnete Stich 0,52 mm von der jeweiligen Messung ab. Wie bisher zeigt auch hier die Berechnung der gehinderten Verformung in reduziertem Ausmaß dasselbe Verhalten, weshalb bei  $b_{z2}$  (V) in der Heizphase eine Schwindverformung folgt. In der experimentellen Untersuchung verhielten die Kanthölzer eine derartige Krümmung nahezu vollständig. Auch durch das leichte Quellen in Phase 4 gelingt die Annäherung an die Messungen nicht, sodass sich eine mittlere Abweichung von 1,00 mm über den gesamten Versuchszeitraum ergibt.

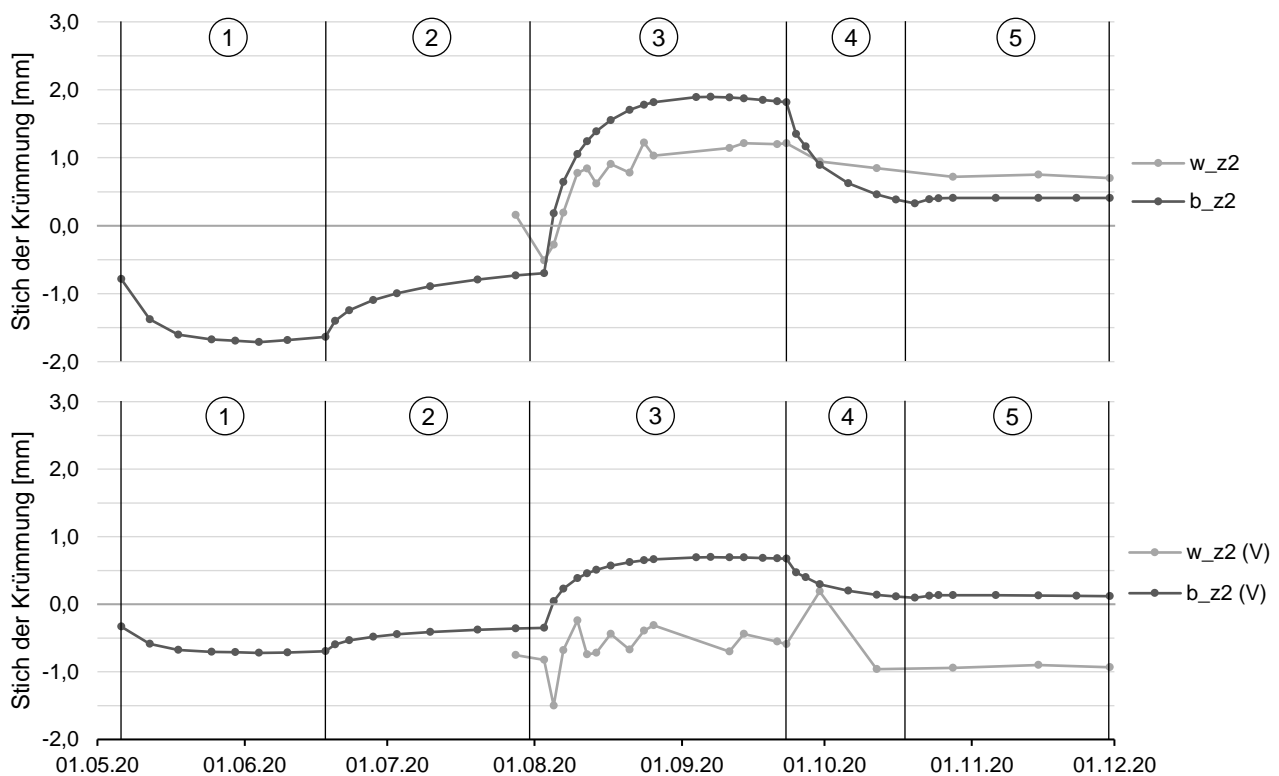


Abbildung 4.25: Vergleich der Verformungsberechnungen  $b$  mit den Messergebnissen  $w$  der Serie O-1 für den freien (oben) und gehinderten (unten) Prüfkörper

### 4.2.3 Maximale Spannungen und Ableitung der Rissbildung

Mit dem statisch-mechanische Analyse-Tool können keine Risse modelliert werden, weshalb die dargestellten Ergebnisse einen ungerissenen Zustand zeigen. Gemäß Kapitel 2.4.2 entstehen Risse, sobald die auftretenden Zugspannungen die entsprechenden Zugfestigkeiten überschreiten. Niemz und Sonderegger (2017) geben für die Zugfestigkeit von Fichte unter radialer Belastung  $f_{t,rad} = 3,96$  MPa und in tangentialer Richtung  $f_{t,tan} = 3,07$  MPa an. Da die Orientierung der einzelnen Lamellen nicht im Detail bekannt ist, wird für die Decklagen aus Fichte und Weißtanne eine mittlere Querkzugfestigkeit von  $f_{t,90,NH} = 3,5$  MPa festgelegt. Die Zugfestigkeit an der Oberfläche der Massivholzplatten ist nicht bekannt. Deshalb werden die Festigkeiten der Serien M-2 und M-5 aus dem Verhalten der Prüfkörper bei der experimentellen Untersuchung abgeleitet. Im Folgenden werden die maximal auftretenden Zugspannungen quer zur Faser während der Heizphase betrachtet und auf zu erwartende Rissbildungen untersucht.

Die maximale Querkzugspannung an der Sichtoberfläche der Serie M-1 tritt am 21.08.2020 auf. Dies entspricht dem Zeitpunkt der maximalen Trocknung in der Decklage. In Abbildung 4.26 sind die Spannungsverläufe über die Breite des Elements dargestellt. Die Lage der Luftkanäle wird dabei durch die graue Einfärbung markiert. Zu erkennen ist, dass die Zugspannungen der gehinderten Verformung größer als die der freien Bauteile sind. Mit einer maximalen Spannung von  $\sigma_{t,90,max} = 2,23$  MPa bleibt die Berechnung am freien Prüfkörper unterhalb der angenommenen Zugfestigkeit, sodass keine Risse entstehen. Am gehinderten Modell treten Spannungen von bis zu  $\sigma_{t,90,max,(V)} = 3,62$  MPa auf, womit der festgelegte Wert von  $f_{t,90,NH} = 3,5$  MPa überschritten wird, was wiederum das Auftreten von Rissen bedeutet. Beide Schlussfolgerungen entsprechen den Ergebnissen der experimentellen Untersuchung. Die entstehenden Spannungen sind jeweils in der Mitte maximal, wobei Spannungsspitzen stets zwischen den Luftkanälen oder an deren Rändern auftreten. Auch im praktischen Versuch lagen die Risse in der Bauteilmitte, jedoch wurde in Kapitel 3.3.2 festgestellt, dass sich die tatsächlich vorhandenen Risse über einem Luftkanal gebildet haben. Ein möglicher Grund hierfür könnte sein, dass es sich bei der betroffenen Lamellenstoßfuge um eine Schwachstelle handelte.

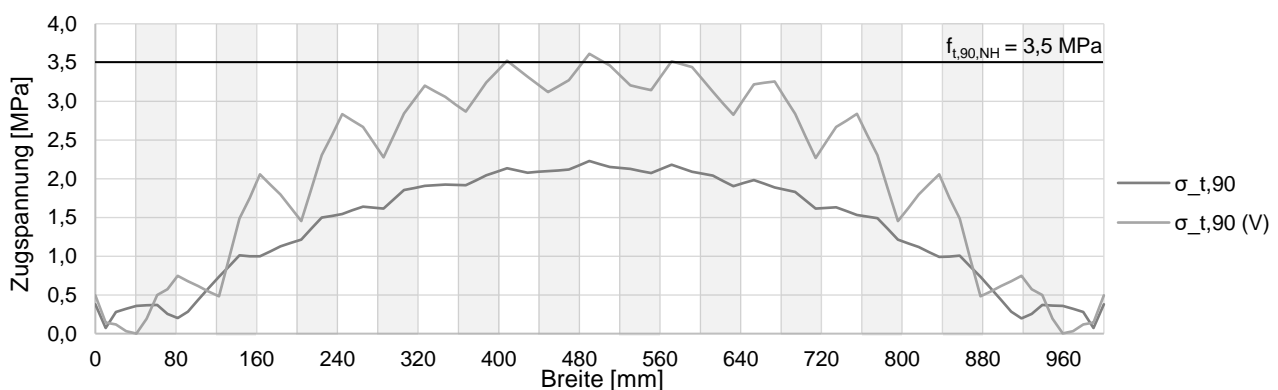


Abbildung 4.26: Berechnete Zugspannungen der Serie M-1 am 21.08.2020 über die Breite des Prüfkörpers; mit farblicher Markierung der Luftkanäle sowie der Querkzugfestigkeit

Für die Prüfkörper der Serie M-2 sind die Ergebnisse der Spannungsberechnung in Abbildung 4.27 dargestellt. An der Oberfläche des freien Prüfkörpers treten die größten Zugspannungen am 10.08.2020 auf, jene des gehinderten Modells am 14.08.2020. Beide Zeitpunkte liegen kurz vor dem Erreichen der maximalen Trocknung in der Decklage. In der Mitte des freien Prüfkörpers weist die Simulation Zugspannungen von bis zu  $\sigma_{t,90,max} = 0,46$  MPa auf. Während der experimentellen Untersuchung wurde festgestellt, dass von den beiden freien Prüfkörpern nur einer gerissen ist und die auftretenden Zugspannungen somit im Grenzbereich der Festigkeiten liegen. Daraus wird abgeleitet, dass die maximale Querszugfestigkeit an der Oberfläche der 19 mm starken Massivholzplatte  $f_{t,90,SWP_{19}} = 0,4$  MPa beträgt. Dieser Wert entspricht auch der charakteristischen Zugfestigkeit von Nadelhölzern quer zur Faser (Neroth & Vollenschaar, 2011). Die Hinderung der Verformung führt zu einer maximalen Spannung von  $\sigma_{t,90,max,(V)} = 2,89$  MPa und überschreitet somit die Festigkeit. Wie die experimentelle Untersuchung bestätigt, ist das Resultat die Entstehung von Rissen. In der Berechnung treten die höchsten Spannungen in der Mitte auf, während sich jedoch die Risse an den Prüfkörpern M-2-2 und M-2-3 (V) in den äußeren Bereichen gebildet haben.

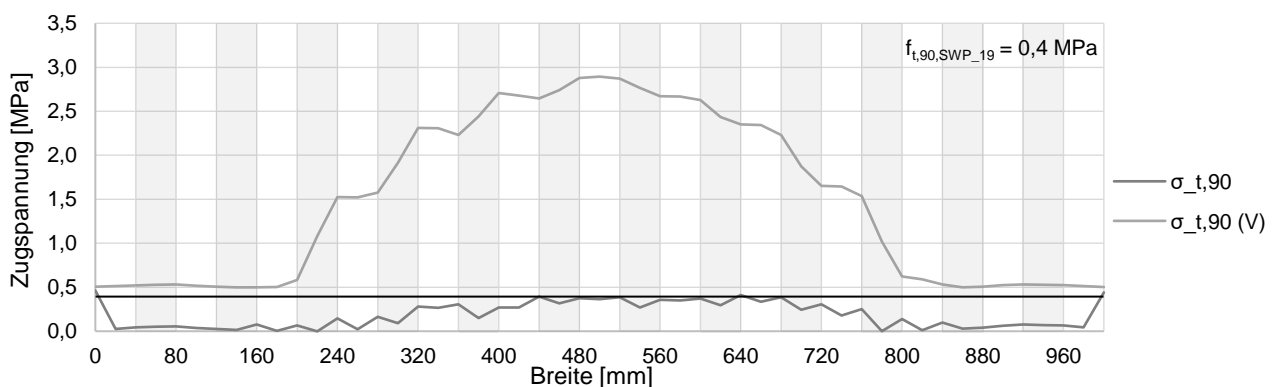


Abbildung 4.27: Berechnete Zugspannungen der Serie M-2 am 10.08.2020 ( $\sigma_{t,90}$ ) und 14.08.2020 ( $\sigma_{t,90}$  (V)) über die Breite des Prüfkörpers; mit farblicher Markierung der Luftkanäle sowie der Querszugfestigkeit

In Serie M-3 ist die Faserrichtung der Decklage in horizontaler Richtung orientiert. Folglich verlaufen die für die Rissbildung kritischen Zugspannungen vertikal und somit parallel zu den Luftkanälen. Die maximalen Spannungen ergeben sich zum Ende der Heizphase am 23.09.2020, einhergehend mit dem Erreichen der stärksten Trocknung der Decklagen. Sie sind in Abbildung 4.28 über die Höhe des Elementes dargestellt. Mit einer Zugspannung von bis zu  $\sigma_{t,90,max} = 9,19$  MPa am freien Prüfkörper und bis zu  $\sigma_{t,90,max,(V)} = 9,59$  MPa am Gehinderten, überschreiten die Berechnungen die Festigkeit von  $f_{t,90,NH} = 3,5$  MPa deutlich. Das Resultat ist die Bildung von Rissen. Dies entspricht den Beobachtungen aus Kapitel 3.3.2. Ebenso deckt sich die mittige Lage der auftretenden Risse mit den Hochpunkten der Berechnungen.

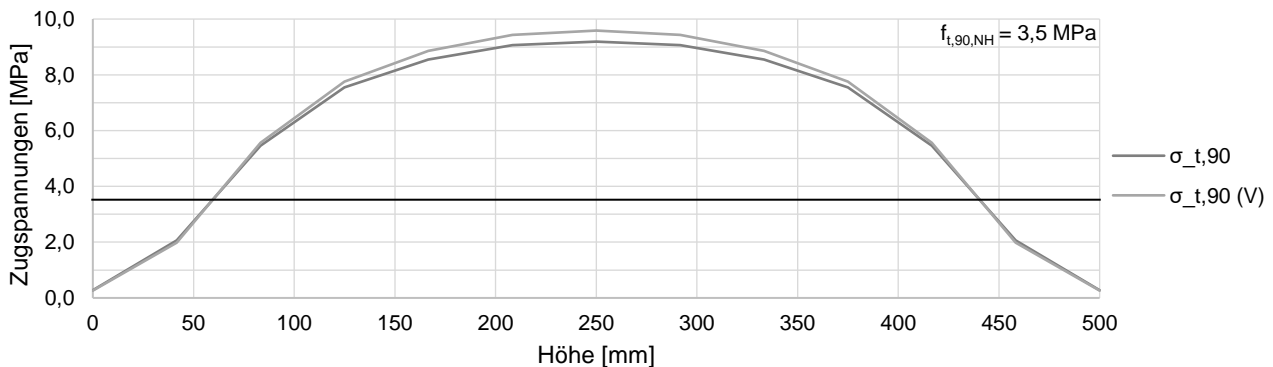


Abbildung 4.28: Berechnete Zugspannungen der Serie M-3 am 23.09.2020 über die Höhe des Prüfkörpers; mit Markierung der Querszugfestigkeit

Die maximale Zugspannung in der äußersten Lage der Serie M-4 treten bereits am 05.08.2020 auf, nahezu direkt zu Beginn der Heizphase. Die Ursache hierfür liegt in der entstehenden Feuchtigkeitsgradienten über die Querschnittstiefe, die sich mit anhaltender Trocknung immer weiter reduziert. Da die raumseitige Lage die Aussparungen für die Luftkanäle aufweist, sind keine durchlaufenden Spannungen möglich, wie Abbildung 4.29 zeigt. Daraus folgen einzelne Spannungsspitzen, welche am freien und gehinderten Modell nahezu deckungsgleich sind. Die entstehenden Maxima von  $\sigma_{t,90,max} = 2,50$  MPa sind geringer als die Zugfestigkeit von  $f_{t,90,NH} = 3,5$  MPa, sodass theoretisch keine Risse auftreten. Diese Schlussfolgerung stimmt mit den Ergebnissen der visuellen Prüfung aus Abschnitt 3.3.2 überein.

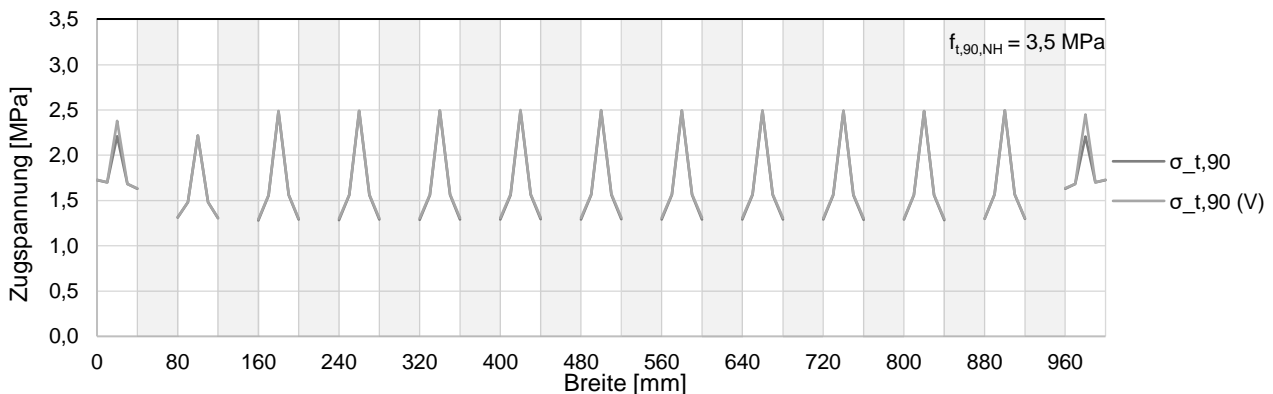


Abbildung 4.29: Berechnete Zugspannungen der Serie M-4 am 05.08.2020 über die Breite des Prüfkörpers; mit farblicher Markierung der Luftkanäle sowie der Querszugfestigkeit

Die Decklage der Serie M-5 erreicht in der Simulation die geringste Holzfeuchtigkeit in etwa am 10.08.2020. Zu diesem Zeitpunkt ist die Schwindverformung und folglich auch die Zugspannung an der Oberfläche maximal. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigt die Abbildung 4.30. Aus ihnen geht hervor, dass bei einer freien Verformung Spannungen von bis zu  $\sigma_{t,90,max} = 2,43$  MPa erreicht werden. Im praktischen Versuch wies nach der Heizphase lediglich einer der beiden freien Prüfkörper Risse auf. Die Schlussfolgerung ist wie zuvor, dass die auftretenden Spannungen somit dem

Grenzbereich der Festigkeit entsprechen müssen. Daher wird  $f_{t,90,SWP\_12} = 2,4 \text{ MPa}$  als die Querkzugfestigkeit an der Oberfläche der 12 mm starken Massivholzplatte festgelegt. Allerdings ist dieser Wert um ein Sechsfaches größer als jene Festigkeit der Serie M-2. Des Weiteren passt das Verhalten des gehinderten Modells nicht zu der Zugfestigkeit von  $f_{t,90,SWP\_12} = 2,4 \text{ MPa}$ . Für das eingeschränkte Element ergeben sich rechnerisch Zugspannungen von bis zu  $\sigma_{t,90,max,(V)} = 4,51 \text{ MPa}$  und dennoch weist der reale Prüfkörper keine Risse auf. Ein möglicher Grund hierfür könnte sein, dass die Kanthölzer im Versuch nicht die theoretische Wirkung entfaltet haben, demzufolge das Bauteil nicht die angenommenen Zugspannungen erfahren hat und daher keine Risse zeigt. Dafür spricht, dass die Verformungen  $w_{z2}$  und  $w_{z2} (V)$  in Abbildung 3.17 nahezu identisch sind. Auch wenn die Nachmodellierungen der Krümmungen in Abbildung 4.24 gute Resultate ergaben, ist doch zu erkennen, dass die theoretische Verformungshinderung durchaus einen abmildernden Einfluss auf die Krümmung hat. Die berechneten Spannungsspitzen, die zu den Rissen führen können, treten in der Mitte des Bauteils und zwischen den Luftkanälen auf. Das Rissbild am Prüfkörper M-5-2 stimmt damit überein.

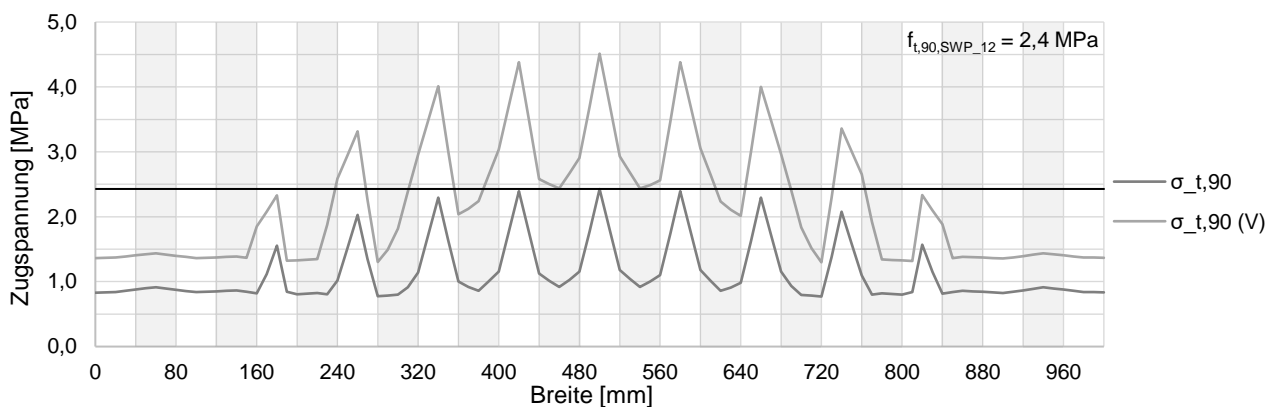


Abbildung 4.30: Berechnete Zugspannungen der Serie M-5 am 10.08.2020 über die Breite des Prüfkörpers; mit farblicher Markierung der Luftkanäle sowie der Querkzugfestigkeit

Die berechneten Spannungen der Serie O-1 sind in Abbildung 4.31 dargestellt. Da die Trocknung der Decklage bis zum Ende der Heizphase am 23.09.2020 andauert, sind dort die Zugspannungen am größten. Die Berechnung des freien Modells ergibt eine maximale Zugspannung von  $\sigma_{t,90,max} = 4,42 \text{ MPa}$ . Die Hinderung der Verformung führt dabei zu einem Maximum von  $\sigma_{t,90,max,(V)} = 4,80 \text{ MPa}$ . In beiden Fällen wird die Querkzugfestigkeit von  $f_{t,90,NH} = 3,5 \text{ MPa}$  überschritten, sodass in der Theorie Risse auftreten. Die Abbildungen 3.27 und 3.28 bestätigen die Berechnungen sowohl im Vorkommen als auch in der Lage der Risse.

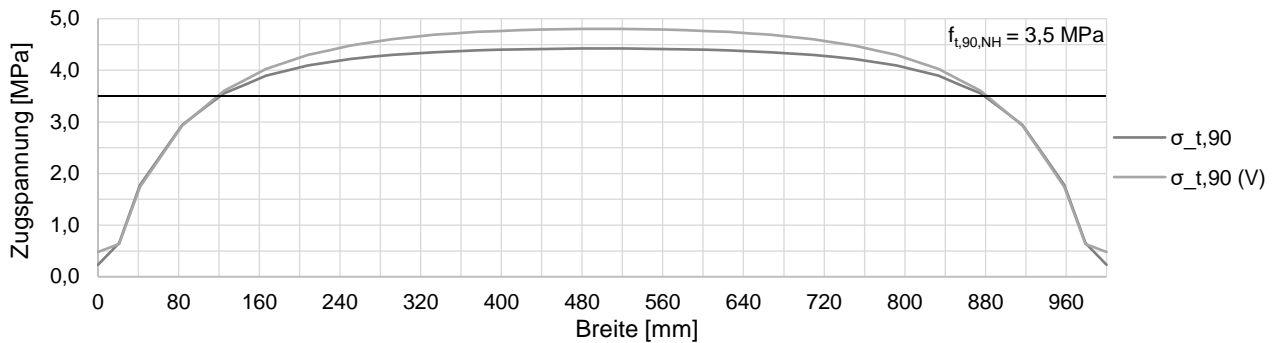


Abbildung 4.31: Berechnete Zugspannungen der Serie O-1 am 23.09.2020 über die Breite des Prüfkörpers; mit Markierung der Querkzugfestigkeit

#### 4.2.4 Diskussion der Berechnungen

Die absoluten Fehler aus dem Vergleich der Feuchtigkeitsverläufe sind in Tabelle 4.1 als Durchschnittswerte für alle Serien zusammengefasst. Zu erkennen ist, dass sich das Mittel der gesamten Abweichungen für jede Serien im Bereich zwischen 0,9 und 1,2 % befindet. Von zentralem Einfluss auf die Holzfeuchtigkeiten, und somit auf die Differenzen, ist die Ausgleichsfeuchtigkeit. Durch die Wahl einheitlicher Konstanten als Gleichgewichtsfeuchten zeigen vor allem die beiden äußeren Lagen vergleichsweise gute Näherungen zu den Messwerten. Auch die feuchtespezifischen Materialkennwerte, respektive die verschiedenen Diffusionskoeffizienten, können bestätigt werden. Obwohl es zu einigen Abweichungen kommt, erzeugt der Diffusionsvorgang stets einen sinnvollen Verlauf, der in allen Serien und annähernd jeder Phase ein gutes Ergebnissen darstellt. Einzig in der Heizphase, hier vor allem in 45 und 70 mm Tiefe, stimmen die Berechnungen nicht mit den Messungen überein. Teilweise zeigen sich die Fehler bereits ab der zweiten Phase. Als Ursache für dieses Verhaltens werden die Besonderheiten der Prüfkörper, bzw. der experimentellen Untersuchung angenommen, die in der Modellierung nicht berücksichtigt wurden.

Tabelle 4.1: Durchschnitt der absoluten Fehler bei der Berechnung der Feuchtigkeitsverteilung in [%]

Differenz [%]	m <sub>15</sub> zu b <sub>15</sub>	m <sub>25</sub> zu b <sub>25</sub>	m <sub>45</sub> zu b <sub>45</sub>	m <sub>70</sub> zu b <sub>70</sub>	Gesamt
Serie M-1	0,8	0,6	1,7	1,2	1,1
Serie M-2	0,9	0,6	1,3	1,2	1,0
Serie M-3	0,5	0,6	1,6	1,1	1,0
Serie M-4	0,8	1,1	1,3	1,6	1,2
Serie M-5	0,6	0,6	1,3	1,2	0,9
Serie O-1	0,8	0,6	1,1	1,0	0,9



Die Verformungen wurden über die Differenzen zwischen den Messwerten und den Berechnungen verglichen. In Form von Mittelwerten werden diese in der Tabelle 4.2 zusammengefasst. Daraus ist abzulesen, dass der durchschnittliche Fehler aller Serien zwischen 0,22 und 0,87 mm liegt. Damit wird auch die Wahl der verschiedenen Referenzfeuchtigkeiten plausibilisiert, welche für die Berechnung der Verformungen entscheidend sind. Da die Feuchtigkeit des unverformten Zustandes jedoch für jeden Prüfkörpertypen individuell festgelegt wurde, ist ein direkter Vergleich der Serien nicht aussagekräftig genug. Eine weitere wichtige Einflussgröße, zumindest für die Berechnung der gehinderten Verformungen, ist die elastische Lagerung. Mit der gewählten Steifigkeit werden akzeptable Näherungen erreicht, obwohl die Funktionsweise nicht vollständig mit der Wirkung der drei angeschraubten Kanthölzer übereinstimmt. Des Weiteren zeigen die realen Elemente an mehreren Stellen ein Verhalten, welches nicht der Theorie entspricht. So weisen mehrere Prüfkörper eine starke Quellung in der vierten Phase auf, die in der Phase 5 teilweise nochmals zunimmt, obgleich die geringe Feuchtigkeitsgradienten zu einem Zustand ohne Krümmung führen sollte. Dies muss an praktischen Einflüssen auf die Prüfkörper liegen, die nicht in der Modellierung berücksichtigt werden.

Tabelle 4.2: Durchschnitt der absoluten Fehler bei der Verformungsberechnung in [mm]

Differenz [mm]	$w_{z2}$ zu $b_{z2}$	$w_{z2}$ (V) zu $b_{z2}$ (V)	Gesamt
Serie M-1	1,07	0,67	0,87
Serie M-2	0,24	0,21	0,22
Serie M-3	0,58	0,65	0,61
Serie M-4	0,31	0,60	0,46
Serie M-5	0,78	0,48	0,63
Serie O-1	0,52	1,00	0,76

Die berechnete Spannung, und damit die Vorhersage von Rissen, hängt von der Qualität der Feuchtigkeitsverteilung und der Verformungen ab. Eine Validierung der quantitativen Aussagen zur Spannung ist jedoch aufgrund fehlender Vergleichswerte nicht möglich. Allerdings kann der Tabelle 4.3 entnommen werden, welche Rissvorhersagen mit den tatsächlich festgestellten Schädigungen übereinstimmen. Daraus wird geschlussfolgert, dass die gewählte Querkzugfestigkeit für die Nadelhölzer von  $f_{t,90,NH} = 3,5$  MPa plausibel ist. Statt einem Bereich wurde ein einzelner Wert festgelegt, der zudem für verschiedene Materialien, inklusive der Schmalseitenverklebung, herangezogen wurde. Obwohl diese Festigkeit somit nicht vollständig mit der Realität übereinstimmen kann, liegt sie zumindest in der richtigen Größenordnung, denn die Rissvorhersage gelingt bei den entsprechenden Prüfkörpern. Unstimmigkeiten ergeben sich lediglich bei jenen zwei Serien, die eine Massivholzplatte als Decklage besitzen. Zum einen passt die Lage der Risse an den Prüfkörpern der Serie M-2 nicht zu den berechneten Spannungsverläufen, zum anderen weist in Serie M-5 das gehinderte Element keine Risse auf, obwohl die berechneten Spannungen die Zugfestigkeiten überschreiten, was die Schlussfolgerung von aufgetretenen Effekte, die nicht in der Modellierung berücksichtigt

wurden, zulässt. Des Weiteren passen die abgeleiteten Zugfestigkeiten der beiden Massivholzplatten mit  $f_{t,90,SWP} = 0,4$  und  $2,4$  MPa nicht zueinander. Insgesamt stellen die Prüfkörper der experimentellen Untersuchung einen zu geringen Probenumfang dar, um darüber gefestigte Aussagen treffen zu können. Bei den weiteren Untersuchungen wird für die Massivholzplatte der Serie M-2 die Festigkeit von  $f_{t,90,SWP_{19}} = 0,4$  MPa an der Oberfläche verwendet, da dieser Wert mit Literaturangaben übereinstimmt. Ebenso wird für die Serie M-5 die Querkzugfestigkeit an der Oberfläche der Massivholzplatte mit  $f_{t,90,SWP_{12}} = 2,4$  MPa festgelegt, da ein geringerer Wert mit den vorliegenden Versuchsergebnissen keinen Sinn ergeben würde.

Tabelle 4.3: Vergleich der Rissbildung im praktischen Versuch mit den Ergebnissen der FE-Berechnung

	Freie Verformung		Gehinderte Verformung		Lage der Risse	
	Versuch	Modell	Versuch	Modell	Versuch	Modell
Serie M-1	Nein	Nein	Ja	Ja	Mitte	Mitte
Serie M-2	Ja & Nein	Grenzbereich	Ja	Ja	Außen	Mitte
Serie M-3	Ja	Ja	Ja	Ja	Mitte	Mitte
Serie M-4	Nein	Nein	Nein	Nein		
Serie M-5	Ja & Nein	Grenzbereich	Nein	Ja	Mitte	Mitte
Serie O-1	Ja	Ja	Ja	Ja	Mitte	Mitte

Nichtsdestotrotz gelingt die Nachmodellierung des feuchteinduzierten Verhaltens von thermisch aktivierbarem Brettsperrholz unter Verwendung der Finite-Elemente-Berechnung.

## 5 Verhalten unter normalen und extremen Nutzungsbedingungen

### 5.1 Anpassungen des Finite-Elemente-Modells

Während der experimentellen Untersuchung, und daher auch bei der Nachmodellierung, herrschten an der raumseitigen Oberfläche und in den Luftkanälen stets dieselben klimatischen Randbedingungen. Derartige Zustände entsprechen jedoch nicht den realen Nutzungsbedingungen. Denn durch den Heiz- und Kühlbetrieb in den Luftkanälen soll ein angenehmes, also ‚normales‘, Umgebungsklima innerhalb des Raumes entstehen. Die für die nachfolgenden Untersuchungen gewählten klimatischen Bedingungen orientieren sich dabei an jenen aus dem praktischen Versuch, da für diese die resultierenden Ausgleichsfeuchtigkeiten bereits bekannt sind, siehe Kapitel 3.3 und 4. Für die Gleichgewichtsfeuchten der weiteren Klimata liegen keine Versuchsergebnisse vor, weshalb diese lediglich über die Gleichung (2.8) bestimmt werden können. Da die festgelegten Ausgleichsfeuchtigkeiten der ersten fünf Phasen im Mittel um 1,2 % geringer sind als die Berechneten, werden hier die Ergebnisse durch die nachfolgende Formel ebenfalls um diese Differenz abgemindert.

$$u_{air} = \left( \frac{-T \cdot \ln(1 - \varphi)}{0,13 \cdot \left(1 - \frac{T}{647,1}\right)^{-6,46}} \right)^{\frac{1}{110 \cdot T^{-0,75}}} - 1,2 \quad (5.1)$$

mit

$u_{air}$  Ausgleichsfeuchtigkeit des Holzes [%]

$T$  Temperatur [K]

$\varphi$  Relative Luftfeuchtigkeit [-]

In der Tabelle 5.1 werden die zu untersuchenden klimatischen Bedingungen aufgelistet. Als das ‚normale‘ Raumklima wird dabei, wie von Mindrup (2020), eine relative Luftfeuchtigkeit von 50 % bei einer Temperatur von 20 °C festgelegt, woraus eine Gleichgewichtsfeuchte von 8,1 % resultiert. Mit diesem Umgebungsklima stellt Phase 6 den ‚normalen‘ Heizbetrieb dar. Entsprechend simuliert die siebte Phase, bei gleichbleibendem Raumklima und umgekehrter thermischer Aktivierung, den ‚normalen‘ Kühlbetrieb. Auffallend ist, dass die beiden dafür notwendigen Ausgleichsfeuchten in der gleichen Größenordnung liegen. Im Anschluss daran werden in der achten Phase die Auswirkungen einer ‚extremen‘ Heizleistung untersucht. Während die Luft in den Kanälen mit 50 °C und 30 % rel. LF. eine Gleichgewichtsfeuchte von 3,8 % erzeugt, wird das Umgebungsklima auf ‚normalem‘ Niveau gehalten. Gleiches gilt in der Phase 9 mit dem Unterschied, dass die ‚extreme‘ Kühlung der vierten Phase in den Luftkanälen angelegt wird. Des Weiteren wird in der zehnten Phase ein Heizfall bei ‚extrem‘ trockenem Umgebungsklima mit lediglich 30 % rel. LF. modelliert, bei welchem gemäß Mindrup (2020) ein hohes Risiko für Schwindrisse besteht. Die resultierenden Ausgleichsfeuchten

liegen dabei dicht beieinander. Der Vollständigkeit halber stellt die Phase 11 den entsprechend umgekehrten Fall für den Kühlbetrieb dar. Das ‚extrem‘ feuchte Raumklima führt dabei mit 25 °C und 70 % rel. LF. zu einer Gleichgewichtsfeuchte von etwa 11,8 %.

*Tabelle 5.1: Untersuchte klimatische Bedingungen im Raum und in den Luftkanälen, sowie die daraus resultierenden Ausgleichsfeuchtigkeiten*

Nr.	Raumklima	Ausgleichsfeuchte	Thermische Aktivierung	Ausgleichsfeuchte
6	20 °C, 50 % rel. LF.	8,1 %	40 °C, 40 % rel. LF.	5,7 %
7	20 °C, 50 % rel. LF.	8,1 %	12 °C, 47 % rel. LF.	8,7 %
8	20 °C, 50 % rel. LF.	8,1 %	50 °C, 30 % rel. LF.	3,8 %
9	20 °C, 50 % rel. LF.	8,1 %	2,5 °C, 65 % rel. LF.	9,4 %
10	15 °C, 30 % rel. LF.	5,0 %	40 °C, 40 % rel. LF.	5,7 %
11	25 °C, 70 % rel. LF.	11,8 %	12 °C, 47 % rel. LF.	8,7 %

Die Implementierung der sechs Klimaphasen in ANSYS erfolgt wie bereits bei der Nachmodellierung in Kapitel 4. Die jeweiligen Klimata werden über einzelne thermisch-transiente Analysen berechnet. Dabei bleibt jede Phase über einen Zeitraum von 30 Tagen bestehen bevor ein Wechsel stattfindet. Ausgewertet wird die modellierte Holzfeuchtigkeitsverteilung jeweils 2, 4, 7, 10, 14, 18, 24 und 30 Tage nach Beginn der Phase. Diese Ergebnisse werden wiederum an je zwei statisch-mechanische Analysen weitergegeben, die zu denselben Zeitpunkten die entsprechende Verformung und Spannung berechnen.

Zudem ist für die statisch-mechanische Analyse die Wahl der Referenzfeuchtigkeit, bei welcher die Prüfkörper unverformt sind, entscheidend. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wird hierfür ein einheitlicher Wert festgelegt. Der Mittelwert aus den zuvor verwendeten Referenzfeuchtigkeiten ergibt dabei 8,0 %. Da die Gleichgewichtsfeuchte des normalen Raumklimas, bei welchem die Elemente unverformt sein sollen, etwa gleich groß ist, wird für alle zu untersuchenden Serien 8,1 % als Referenzfeuchtigkeit gewählt.

Das Ziel dieser Simulationen ist, wie bereits aus den beschriebenen Klimaphasen hervorgeht, die Untersuchung realistischer Randbedingungen. Angewendet werden diese Bedingungen auf die multifunktionellen Prüfkörper des experimentellen Versuchs. Allerdings werden lediglich die Serien M-1, M-2, M-3 und M-5 verwendet. Denn die Serie M-4 besitzt keine raumseitig abschließende Decklage, sodass die Untersuchung variierender Bedingungen nicht möglich ist. Ebenfalls nicht abgebildet wird die Referenzserie O-1. Der Grund hierfür ist, dass die betrachteten Phasen wechselnde Heiz- und Kühlszenarien darstellen, die ohne entsprechende Luftkanäle nicht stattfinden. Da während den Phasen 6 bis 9 das Klima im Raum gleich bleibt, erfährt der Referenzkörper keine Feuchtigkeitsänderungen und wird sich somit nicht verformen. Zwar wechselt das Umgebungsklima in der zehnten und elften Phase, allerdings ist das theoretische Verhalten hierbei bereits aus den Phasen 2 und 3 der Nachmodellierung bekannt.

Für die zu untersuchenden Prüfkörper werden die mechanischen und feuchtespezifischen Materialkennwerte aus Kapitel 4.1 beibehalten, denn die Nachmodellierung hat die Plausibilität dieser Parameter bestätigt. Die Annahmen zur Berücksichtigung des Einbauzustandes werden ebenfalls übernommen. So wird keine Diffusion über die seitlichen und die rückseitige Fläche miteinbezogen und bei jeweils einer statisch-mechanischen Analyse werden die Verformungen durch eine elastische Lagerung eingeschränkt.

Um ein genaueres Modell für den realen Nutzungsbetrieb zu erhalten, wird zudem die Strömung der Luft in den Kanälen berücksichtigt. Dazu werden die Versuchsergebnisse von Mindrup (2020) herangezogen, bei welchen Strömungsgeschwindigkeiten von durchschnittlich 4,0 m/s in den Luftkanälen gemessen wurden. Somit handelt es sich nicht mehr um eine freie, sondern um eine erzwungene Konvektion. Dabei kann ab einer Luftgeschwindigkeit von 3,0 m/s der Übergangswiderstand zwischen der Luft und der Bauteiloberfläche vernachlässigt werden (Rosen, 1978). Folglich wird für den Oberflächenemissionskoeffizienten  $S_K$  in Form des ‚Wärmeübergangskoeffizient‘ ein Wert von  $h_K = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$  festgelegt, der etwa acht Zehnerpotenzen größer ist als bei der freien Konvektion.

## 5.2 Ergebnisse

### 5.2.1 Holzfeuchtigkeitsverteilung

Im Folgenden wird die berechnete Feuchtigkeitsverteilung beschrieben. Es werden die vier betrachteten Prüfkörper zusammengefasst dargestellt. Aufgrund der gleichen feuchtespezifischen Materialkennwerte sind die Unterschiede relativ gering, wie in den Abbildungen 5.1 und 5.2 zu erkennen ist.

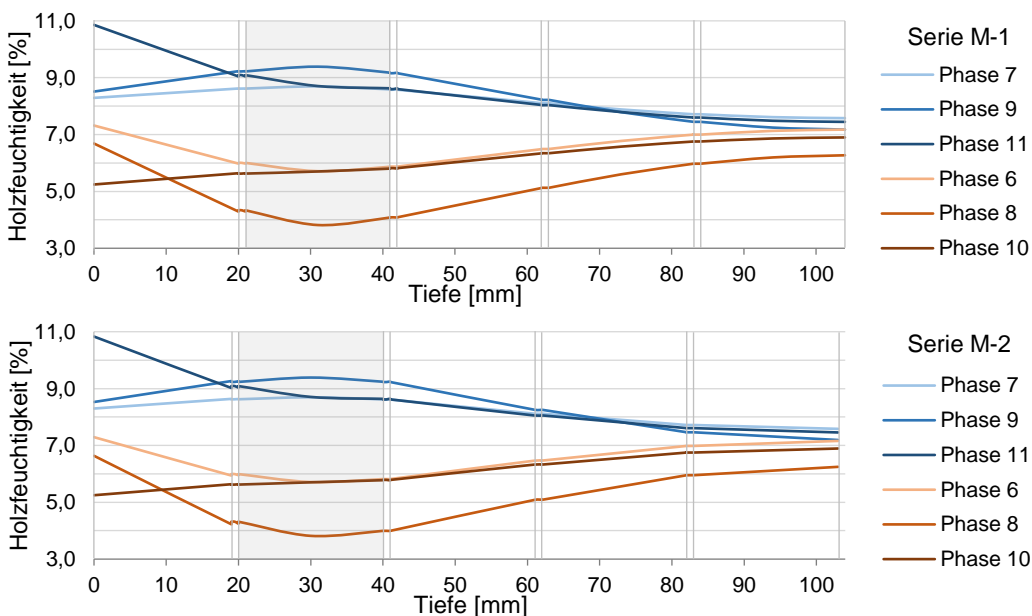


Abbildung 5.1: Berechnete Feuchtigkeitsverteilung über die Querschnittstiefe der Serien M-1 (oben) und M-2 (unten) am Ende der Phasen 6 bis 11

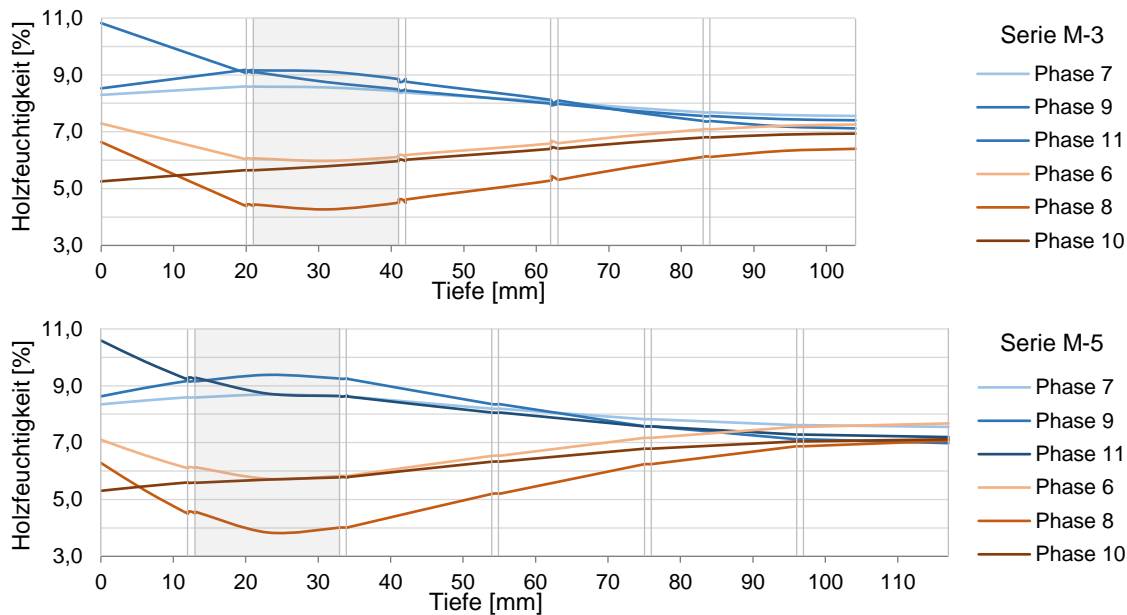


Abbildung 5.2: Berechnete Feuchtigkeitsverteilung über die Querschnittstiefe der Serien M-3 (oben) und M-5 (unten) am Ende der Phasen 6 bis 11

Die dort gezeigten Diagramme stellen die Verläufe der Feuchtigkeit über die Querschnittstiefe jeweils zum Ende der Phasen 6 bis 11 dar. Die Phasen mit Heizbetrieb sind in Rot-Tönen dargestellt, während die Phasen des Kühlbetrieb blau eingefärbt sind. Die grau hinterlegten Flächen markieren die Lage der Luftkanäle. Durch die unterschiedlichen klimatischen Bedingungen im Raum und im Luftkanal liegt in allen Decklagen am Ende jeder Phase eine Feuchtigkeitsgradient vor. An der raumseitigen Oberfläche wird die Ausgleichsfeuchte des Umgebungsklimas angestrebt. Diese wird jedoch in keiner Phase erreicht, sondern stets über- oder unterschritten, da die thermische Aktivierung die Decklage immer gleichzeitig durch eine Trocknung oder Befeuchtung beeinflusst. Die Gleichgewichtsfeuchte, welche die Luft im Kanal anstrebt, wird bei allen Prüfkörpern und Phasen lediglich durch einen kleinen Bereich in der Mitte der Luftkanalebene erreicht. Da die Phasen nur 30 Tage anhalten und währenddessen zwischen Heiz- und Kühlbetrieb wechseln, ändert sich die Feuchtigkeit in der tiefsten Lamellenlage lediglich um wenige Prozent, und erreicht daher nie den jeweiligen Gleichgewichtszustand. Besonders ausgeprägt ist dies in Serie M-5, die eine weitere Brettlage besitzt, in welcher die Feuchtigkeit nahezu unverändert bleibt.

Der Verlauf der Holzfeuchtigkeiten während den Phasen 6 bis 11 ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Die Diagramme zeigen jeweils die Holzfeuchtigkeit in der Mitte der einzelnen Lagen. Der Index in der Legende gibt, unter Berücksichtigung der Klebstoffschichten von 1,0 mm, die entsprechende Tiefe am Modell an. Wie zuvor ist auch hier erkennbar, dass alle vier Serien ein ähnliches Verhalten aufweisen. Besonders auffällig ist die sprunghafte Änderung der Feuchtigkeit am Anfang jeder Phase in den Serien M-1, M-2 und M-5, deren Ursache der nicht vorhandene Übergangswiderstand im Luftkanal ist, wodurch ein schneller Feuchtigkeitswechsel ermöglicht wird. Dieses Verhalten ist in der Serie M-3 nicht zu sehen. Hier verläuft die Kurve  $b_{31}$  als eine typische Annäherung an die Gleichgewichtsfeuchte. Dies ist auf die Orientierung der Lamellen zurück zu führen, bei denen neben

5. Verhalten unter normalen und extremen Nutzungsbedingungen

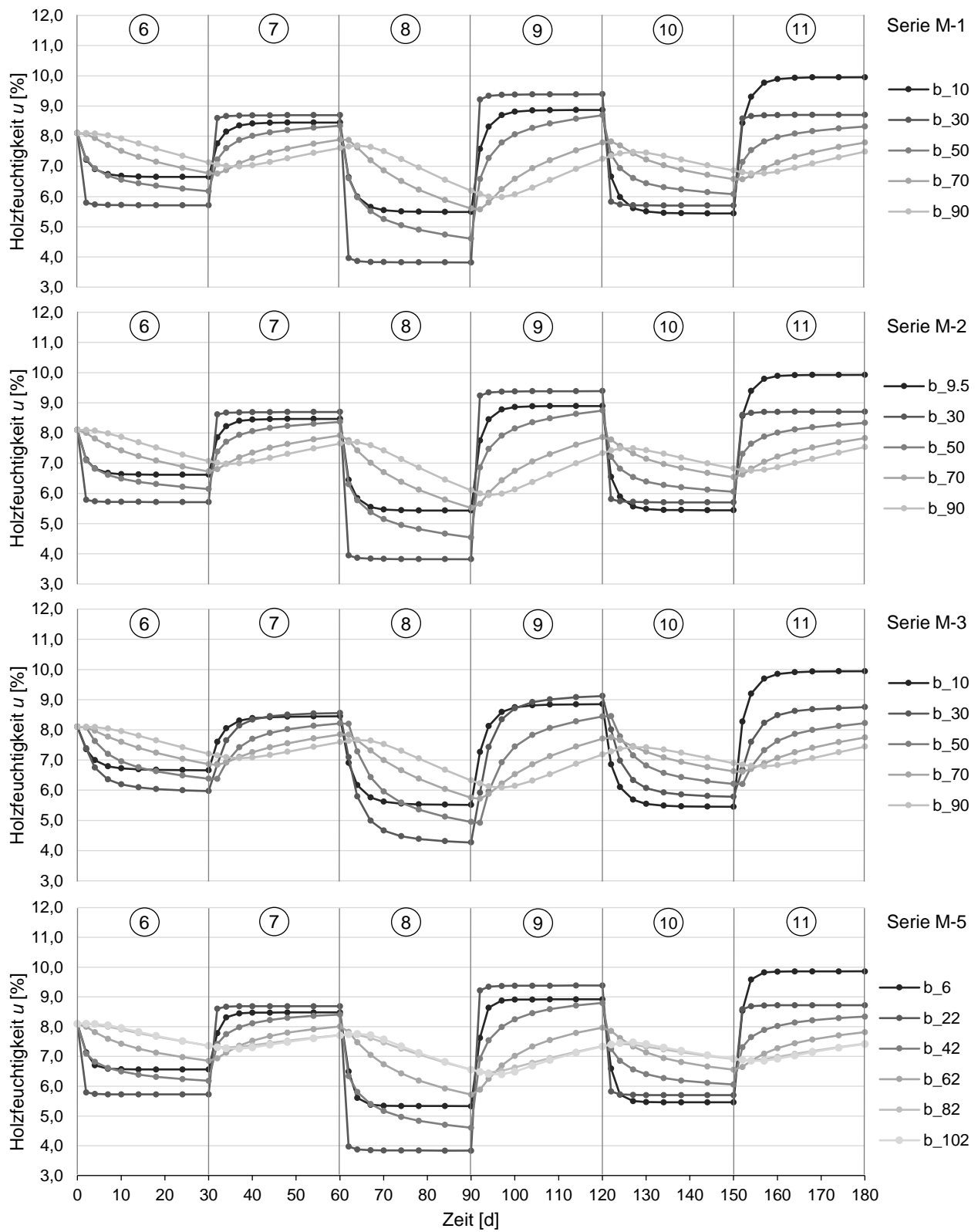


Abbildung 5.3: Feuchtigkeitsverlauf in den verschiedenen Lagen der Serien M-1, M-2, M-3 und M-5 über die Phasen 6 bis 11



der Decklage auch die zweite Ebene der Prüfkörper um 90 Grad gedreht ist, sodass schlussendlich die Faserrichtung parallel zu den Luftkanälen verläuft. Da der Diffusionskoeffizient quer zur Faser eine Zehnerpotenz kleiner als längs zur Faser ist, verhält sich auch der Feuchtigkeitstransport in diese Richtung langsamer. Die Decklagen zeigen in allen Fällen den üblichen Verlauf zum Erreichen eines bestimmten Feuchtigkeitsniveaus, welches stets einem Gleichgewichtszustand zwischen den beiden wirkenden Ausgleichsfeuchten entspricht. Durch den aktiven Heiz- und Kühlbetrieb liegt die Feuchtigkeit innerhalb der Luftkanalebene während den Phasen 6 bis 9 jeweils entsprechend höher bzw. niedriger als in den restlichen Schichten. Anders verhält es sich in der zehnten und elften Phase. Dort bewirken die extremen Umgebungsbedingungen für die Decklagen eine stärkere Trocknung als die des Heizbetriebs, bzw. eine stärkere Befeuchtung als die des Kühlbetriebs. In der Betrachtung der tiefer liegenden Brettlagen, welche keinen direkten Luftkontakt besitzen, ist zu erkennen, dass keine plötzlichen Feuchtigkeitswechsel mit Beginn einer neuen Phase passieren. Stattdessen laufen diese aufgrund ihrer Trägheit weiter und weisen den jeweiligen Hoch- oder Tiefpunkt der bisherigen Bewegung erst mehrere Tage nach dem Wechsel der klimatischen Randbedingungen auf. Des Weiteren zeigen diese Graphen bei allen Prüfkörpern ein nahezu lineares Verhalten. Über den gesamten Zeitraum der sechs Phasen schwankt die Holzfeuchtigkeit in den tiefsten beiden Lagen jeder Serie maximal um 2,0 bis 2,5 %. Die berechneten Verläufe von  $b_{82}$  und  $b_{102}$  des sechslagigen Prüfkörpers der Serie M-5 sind nahezu identisch und im Diagramm kaum voneinander zu unterscheiden.

### 5.2.2 Feuchteinduzierte Verformungen

Bei den Verformungen in den Phasen 6 bis 11 handelt es sich um Krümmungen der Prüfkörper, die aus dem Quellen oder Schwinden des Holzes hervorgehen. Das Maß der Verformungen wird, wie in Kapitel 3 und 4, über den Stich in z-Richtung bestimmt. Die Messrichtung und die Vorzeichenwahl entsprechen dabei der Abbildung 3.11.

Für die Berechnungen der Serie M-1, die in Abbildung 5.4 dargestellt sind, treten die typischen Verläufe ein. Mit jedem Feuchtigkeitswechsel gehen Verformungen einher. In den Phasen 6, 8 und 10 folgen aus den Heizbetrieben Trocknungen der Prüfkörper, die in Schwindverformungen resultieren. Analog dazu führt die Befeuchtung in den kühlenden Phasen 7, 9 und 11 zu Quellungen. Die Krümmung, und somit die Länge des Stichts, ist umso größer, je weiter die sich einstellende Holzfeuchte von der Referenzfeuchtigkeit entfernt ist. Dies gilt für beide Richtungen. In allen Phasen weist die Verformung nach dem Erreichen eines Hoch- oder Tiefpunktes stets ein rückläufiges Verhalten auf, obwohl die klimatischen Bedingungen beibehalten werden. Der Grund hierfür ist die abnehmende Feuchtegradienten innerhalb des Bauteils. In der Phase 6 zeigt sich, dass die freie Verformung  $b_{22}$  im normalen Heizbetrieb mit 2,18 mm deutlich geringer ist als im experimentellen Versuch und in den extremen Szenarien. Die höhere Heizleistung der achten Phase führt zu einem maximalen Stich von 3,78 mm. Des Weiteren ergibt die trockene Umgebung in Phase 10 eine Verformung von bis zu 3,22 mm. Ähnlich verhält es sich im Kühlbetrieb. Während das Bauteil unter den normalen Bedingungen der Phase 7 lediglich bis zu einem Stich von -1,04 mm quillt, erreicht die Verformung unter

verstärktem Kühlbetrieb in der neunten Phase einen Stich von bis zu -2,15 mm und die besonders Umgebung führt in Phase 11 zum stärksten Quellen mit maximal -2,72 mm. Die Berechnung der gehinderten Verformung  $b_{z2}$  (V) zeigen zu jeder Zeit dasselbe Verhalten wie das freie Modell, wenn auch in geringerer Ausprägung. Der Vergleich der Zahlenwerte ergibt einen Stich am gehinderten Prüfkörper, der stets etwa einem Viertel der freien Verformung entspricht.

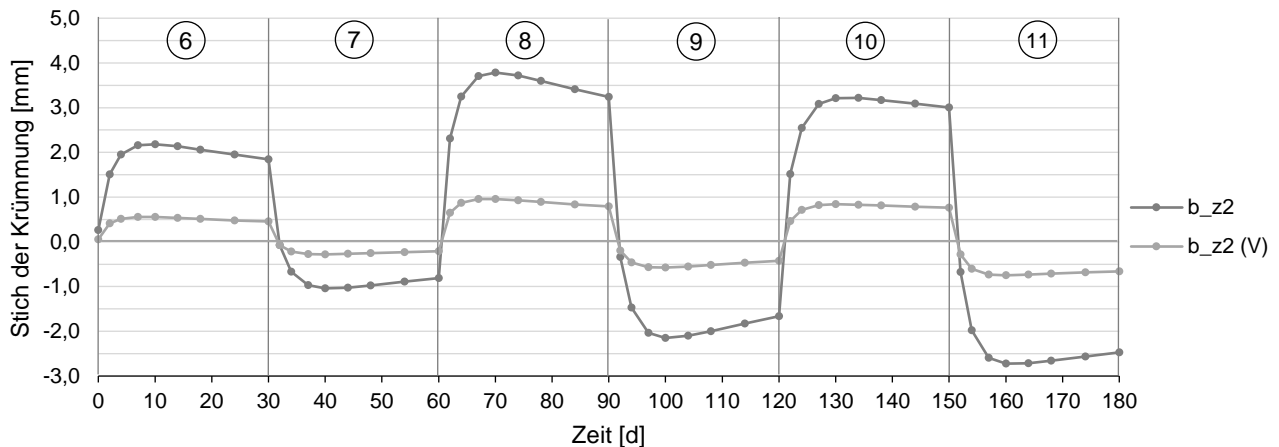


Abbildung 5.4: Ergebnisse der Verformungsberechnungen für den freien und gehinderten Prüfkörper der Serie M-1 in den Phasen 6 bis 11

Die Abbildung 5.5 zeigt den Verformungsverlauf der Serie M-2. Das Verhalten von  $b_{z2}$  und  $b_{z2}$  (V) entspricht qualitativ jenem der Serie M-1. Die Feuchtigkeitsverteilungen beider Prüfkörpertypen sind gemäß Abschnitt 5.2.1 nahezu identisch, worauf ein Verlauf mit denselben Extremstellen und Steigungsverhältnissen folgt. Einzig die Decklage der Serie M-2 unterscheidet sich durch eine 19 mm starke Massivholzplatte, welche in Plattenebene ein signifikant geringeres Quell- und Schwindmaß besitzt als Weißtanne. Demzufolge sind die Verformungen insgesamt kleiner und im normalen Heizbetrieb beträgt der maximale Stich lediglich 0,42 mm. Unter den durchgeführten klimatischen Bedin-

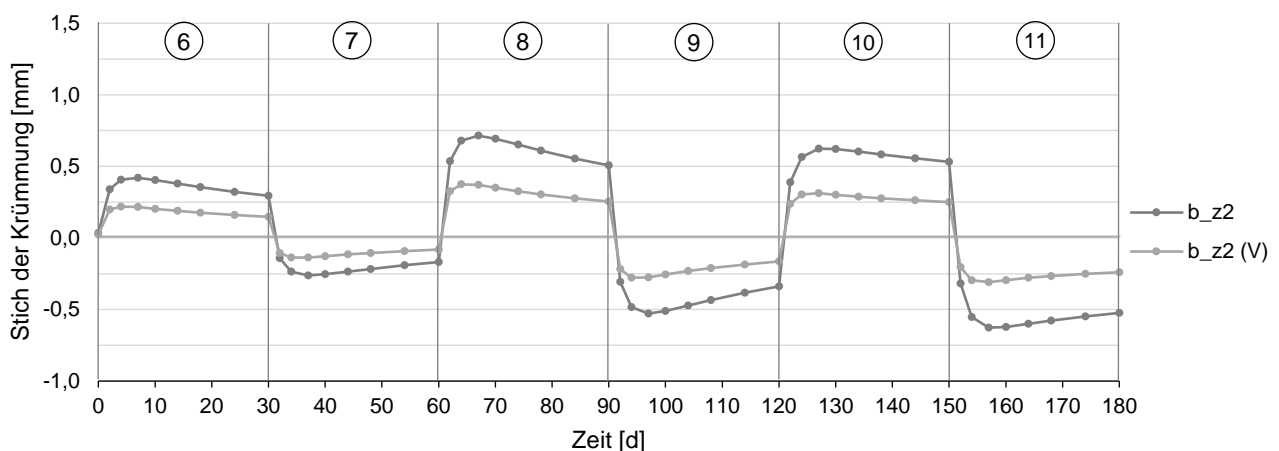


Abbildung 5.5: Ergebnisse der FE-Berechnungen für das freie ( $b_{z2}$ ) und gehinderte ( $b_{z2}$  (V)) Prüfkörperverhalten der Serie M-2 in den Phasen 6 bis 11

gungen ergibt sich die größte Schwindverformung in der achten Phase zu 0,71 mm und in der Phase 11 erreicht die Quellung ein Maximum von -0,63 mm. Zu allen Zeitpunkten ist die gehinderte Verformung  $b_{z2}$  (V) etwa halb so groß wie die des freien Modells.

Das Verformungsverhalten der Serie M-3 wird durch das Diagramm in Abbildung 5.6 dargestellt. Auch hier zeigen die Berechnungen  $b_{z2}$  und  $b_{z2}$  (V) jeweils zum Beginn der einzelnen Phase eine Verformung entsprechend der Befeuchtung oder der Trocknung, die aus den klimatischen Randbedingungen hervor geht. Wie vor allem an der freien Verformung zu erkennen ist, findet nach dem Erreichen des jeweiligen Hoch- oder Tiefpunktes eine rückläufige Verformung statt. Dieser Effekt ist derart ausgeprägt, dass die Krümmung bis zum Ende der Phase wieder im Bereich des Ausgangszustandes liegt oder sich sogar umkehrt. In abgeschwächter Form zeigt auch das gehinderte Modell diese Verformung. Der Grund für dieses Verhalten ist auf die abnehmende Feuchtigkeitsgradienten zurückzuführen. Wie jedoch aus den Serien M-1 und M-2 hervor geht sind die Auswirkungen nicht derart groß. Maßgebender ist der Einfluss der horizontal ausgerichteten Decklage. Zum Beginn jeder neuen Phase ist die entstehende Feuchtigkeitsgradienten hoch und die Faserrichtung der tieferen Brettlagen geben die Hauptrichtung der Verkrümmung vor. Dadurch zeigt sich das übliche Verhalten des Quellens und Schwindens. Mit zunehmender Trocknung oder Befeuchtung des Bauteils dominiert die Decklage die Verformungsrichtung. Aufgrund der horizontalen Faserrichtung krümmt sich das Bauteil nun hauptsächlich über die Höhe und zugleich wird die Krümmung über die Breite aufgehoben. Aufgrund der elastischen Lagerung im Modell, welche alle Verformungsrichtungen gleichermaßen hindert, verhält sich  $b_{z2}$  (V) weniger ausgeprägt.

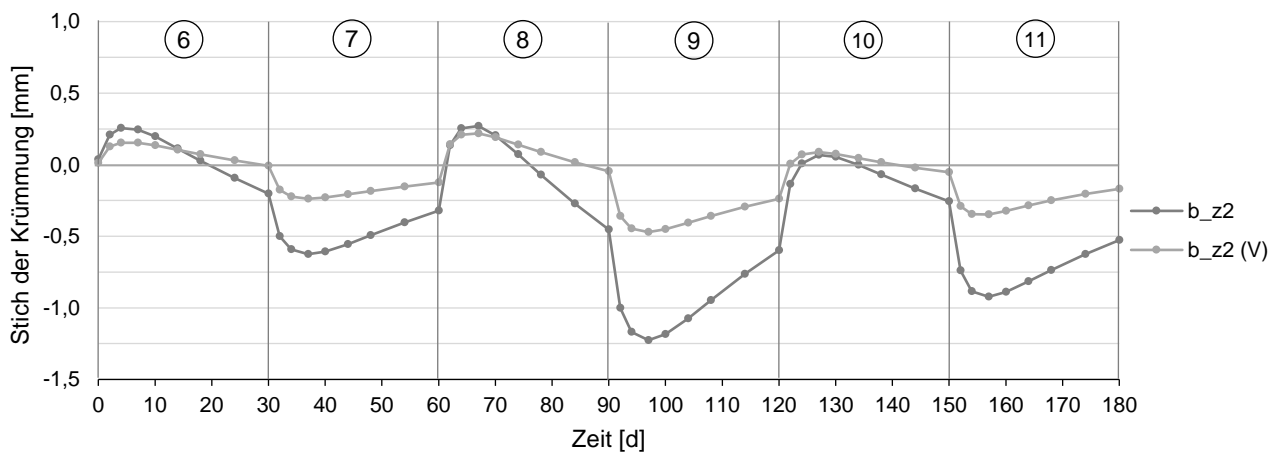


Abbildung 5.6: Ergebnisse der FE-Berechnungen für das freie ( $b_{z2}$ ) und gehinderte ( $b_{z2}$  (V)) Prüfkörperverhalten der Serie M-3 in den Phasen 6 bis 11

Folglich sind die Bauteile der Serie M-3 doppelt gekrümmt, wie es die Abbildung 5.7 veranschaulicht. Die berechneten Werte zur Krümmung über die Breite des Prüfkörpers sind daher nur bedingt aussagekräftig, da sie nur eine Richtung berücksichtigen.

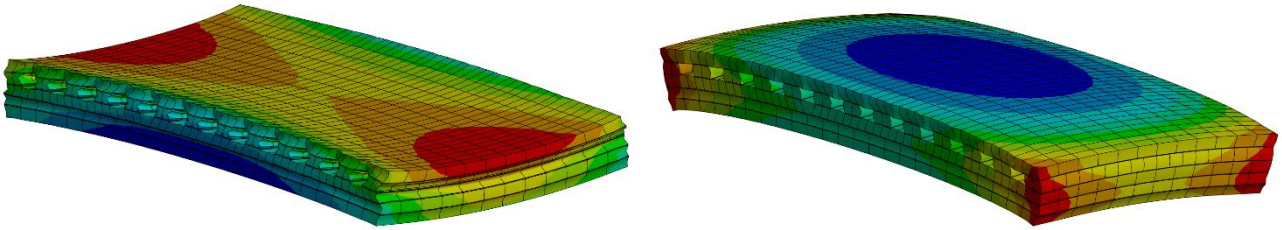


Abbildung 5.7: Doppelt gekrümmter Prüfkörper der Serie M-3 am Ende der Phase 6 (links) und der Phase 9 (rechts) (60-fache Überhöhung)

Bei der Serie M-5 verlaufen die Verformungen entsprechend der Feuchtigkeitsverteilung ähnlich wie an den Prüfkörpertypen M-1 und M-2, siehe Abbildung 5.8. Hier ändert sich die Krümmung zu Beginn einer Klimaphase sprunghaft und erreicht damit bereits annähernd die maximale Verformung. Im Verlauf jeder Phase geht die Krümmung des Bauteils aufgrund der abnehmenden Feuchtigkeitsgradienten zurück. Für das freie Berechnungsmodell ergibt sich daraus im normalen Heizbetrieb der Phase 6 eine Schwindverformung von bis zu 0,38 mm. Die siebte Phase führt lediglich zu einem Stich von -0,18 mm. Wie bereits in den Serien M-1 und M-2 wird die maximale Schwindverformung mit 0,64 mm, bedingt durch die extreme Heizleistung, in der achten Phase erreicht. Die größte Quellung von -0,42 mm wird auch hier in der elften Phase durch die extrem feuchte Umgebungsluft herbeigeführt. Die Berechnung von  $b_{z2}$  (V) zeigt, dass das Verhalten des gehinderten Prüfkörpers prinzipiell das Gleiche ist, jedoch schränkt die elastische Lagerung die Verformung um etwa 40 % ein.

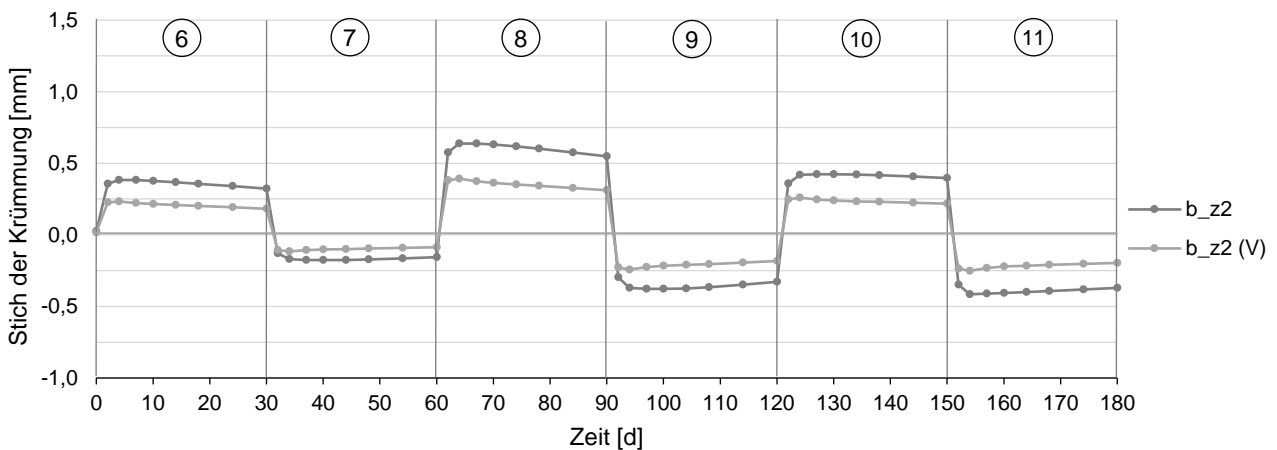


Abbildung 5.8: Ergebnisse der FE-Berechnungen für das freie ( $b_{z2}$ ) und gehinderte ( $b_{z2}$  (V)) Prüfkörperverhalten der Serie M-5 in den Phasen 6 bis 11

Die Tabelle A.5 im Anhang bietet eine Übersicht über die maximalen Verformungen jeder Serie und aller Phasen. Daraus geht hervor, dass der Prüfkörpertyp M-1 sowohl beim freien als auch beim gehinderten Modell die stärksten Krümmungen aufweist, während die Serie M-5 sich am wenigsten verformt.

### 5.2.3 Spannungen und Risse

Neben dem Verformungsverhalten ist von besonderem Interesse, ob die Bauteile unter den geprüften Bedingungen Risse aufweisen. Daher werden im Folgenden die maximalen Spannungen der drei Heizphasen 6, 8 und 10 untersucht, stets sowohl für den freien als auch für den gehinderten Prüfkörper. Die einheitlichen Randbedingungen haben im experimentellen Versuch dazu geführt, dass die maximalen Spannungen und somit die möglichen Risse an der raumseitigen Oberfläche auftreten. Zudem war dies der einzige Ort, an welchem zerstörungsfreie Untersuchungen vorgenommen werden konnten. Durch verschiedene Bedingungen auf der Außen- und Innenseite der Decklage treten unterschiedliche Schwindverformungen auf, die ebenfalls ein Risiko für Rissbildung auf der Innenseite darstellen können. Daher werden in den nachfolgenden Betrachtungen jeweils zwei Diagramme, eines für die Raumseite und eines für die Innenseite, pro Serie gezeigt.

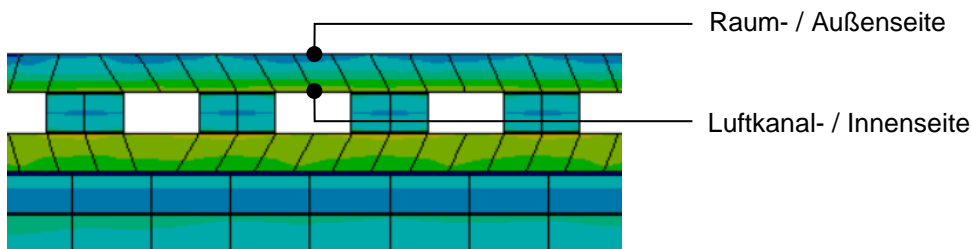


Abbildung 5.9: Definition der Außen- und Innenseite der Decklage am Ausschnitt des Modells

Die Abbildung 5.10 veranschaulicht die jeweils auftretenden maximalen Zugspannungen  $\sigma_{t,90,max}$  der Serie M-1. In Phase 6 führen die anliegenden Bedingungen an der raumseitigen Oberfläche beim freien wie beim gehinderten Modell zu Spannungen, die im Bereich von 0,31 bis 0,97 MPa liegen. Während dort die Quersugfestigkeit von  $f_{t,90,NH} = 3,5$  MPa nicht gefährdet wird, ist dies auf Seiten der Luftkanäle der Fall. Durch den Heizbetrieb ist das angrenzende Holz trockener, sodass der freie Prüfkörper Spannungsspitzen von bis zu 3,69 MPa und der gehinderte von maximal 4,19 MPa erreichen. Ähnliches gilt in der achten Phase. Auch dort erreichen die auftretenden Zugspannungen an der Außenseite, mit höchstens 1,69 MPa, nicht die Quersugfestigkeit. Allerdings wird durch den extremen Heizbetrieb eine starke Schwindverformung hervorgerufen, welche durch den Aufbau eingeschränkt wird und so zu Spannungen am freien Modell von bis zu 6,59 MPa führen und am gehinderten Prüfkörper ein Maximum von 7,44 MPa erreichen. Dies überschreitet die Festigkeit von  $f_{t,90,NH} = 3,5$  MPa über die komplette Breite des Bauteils und ist ein theoretischer Beweis für Rissbildungen. Die extrem trockenen Umgebungsbedingungen der Phase 10 hingegen erzeugen auf der Außenseite die geringsten Holzfeuchtigkeiten, siehe Abbildung 5.2. Folglich entstehen auch dort große Zugspannungen. Diese betragen bis zu 3,86 MPa am freien und am gehinderten Prüfkörper maximal 4,78 MPa. Somit wird die Zugfestigkeit überschritten und Risse entstehen mittig über den Luftkanälen. Hierzu kommt der aktive Heizbetrieb, welcher der Phase 6 entspricht und demzufolge ähnliche Spannungen an der Innenseite der Decklage hervorruft, die ebenfalls zu Rissen führen können. Daher besteht in der zehnten Phase die Gefahr, dass sich die Decklagen über die gesamte Stärke aufspalten.

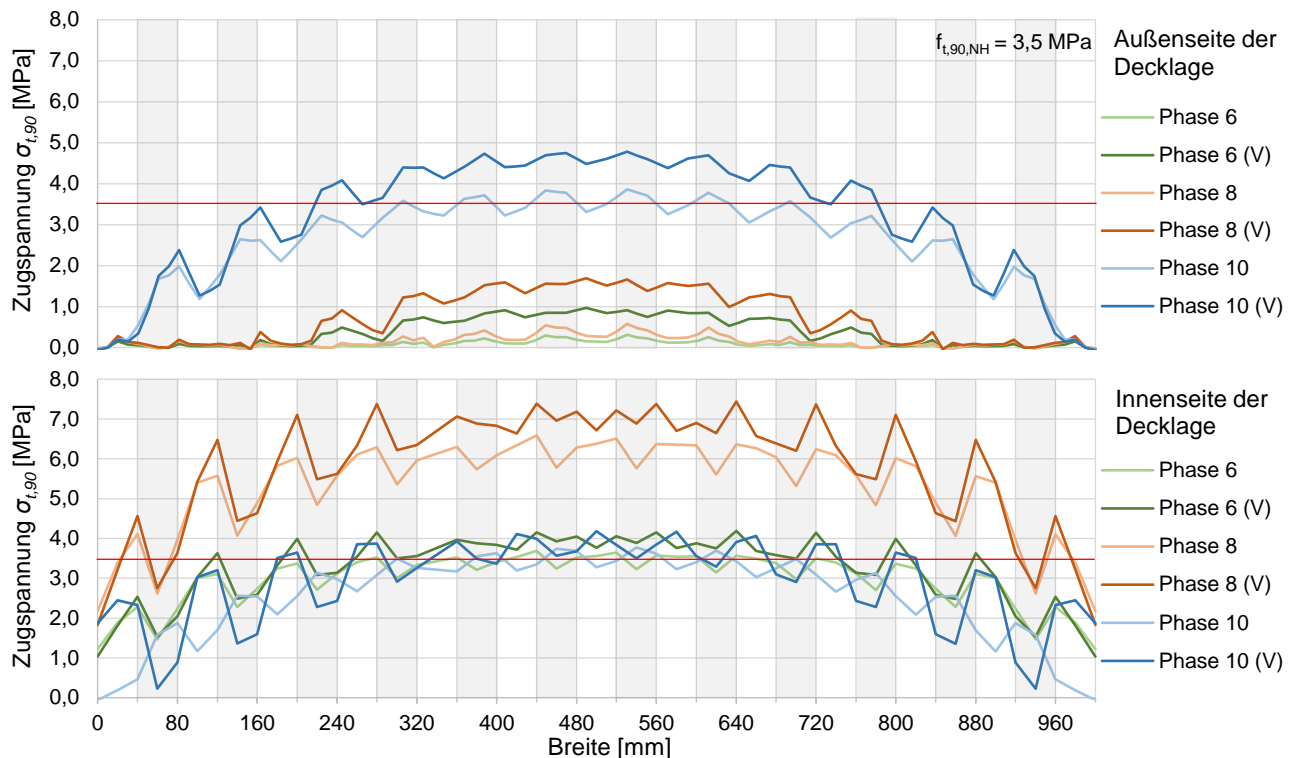


Abbildung 5.10: Maximale Spannungen der freien und gehinderten Prüfkörper der Serie M-1 in den Phasen 6, 8 und 10 an der Außenseite (oben) und Innenseite (unten) der Decklage; mit farblicher Markierungen der Luftkanäle sowie der Querkzugfestigkeit

In Abbildung 5.11 sind die maximalen berechneten Zugspannungen  $\sigma_{t,90,max}$  der Serie M-2 dargestellt. Dabei zeigt das Diagramm für die raumseitige Oberfläche lediglich die zehnte Phase. In den Phasen 6 und 8 treten sowohl am freien als auch am gehinderten Modell keine Zugspannungen auf. Der Grund hierfür liegt im normalen Raumklima und dem geringeren Schwindmaß, welches zu weniger Verformungen und bei Hinderung zu kleineren Spannungen führt. Die Querkzugfestigkeit an der Oberfläche der 19 mm starken Massivholzplatte ist gemäß Kapitel 4.2.4 mit  $f_{t,90,SWP,19} = 0,4 \text{ MPa}$  angegeben und wird in allen Phasen auf der Innenseite der Decklage überschritten. Durch den Heizbetrieb treten in Phase 6 auf der Luftkanalseite des freien Modells Zugspannungen von bis zu 2,93 MPa und an dem Gehinderten von maximal 3,21 MPa auf. Dasselbe geschieht auch in der achten Phase, allerdings führt die extreme Heizleistung in dieser Phase zu einer stärkeren Reaktion. Infolgedessen erreichen die Querkzugspannungen maximal 5,72 MPa und sind somit um ein Vielfaches größer als die Festigkeiten. Auch in Phase 10 entstehen Zugspannungen, welche auf der Innenseite der Decklage geringer ausfallen, da die Decklage gleichmäßiger getrocknet wird. Dennoch bewirken die Zugspannungen von 2,14 MPa am freien und 2,26 MPa am gehinderten Prüfkörper das Entstehen von Rissen auf der Luftkanalseite. Des Weiteren finden sich an der Außenseite Zugspannungen bis zu 2,51 MPa, welche die Festigkeiten überschreiten. Somit können sich bei sehr trockenen Umgebungsbedingungen sowohl im freien als auch gehinderten Fall Risse auf beiden Seiten der Decklage bilden. Die Entwicklung von durchlaufende Spalten verhindert die mittlere Schicht des dreilagigen Aufbaus (Sonderegger & Niemz, 2004).



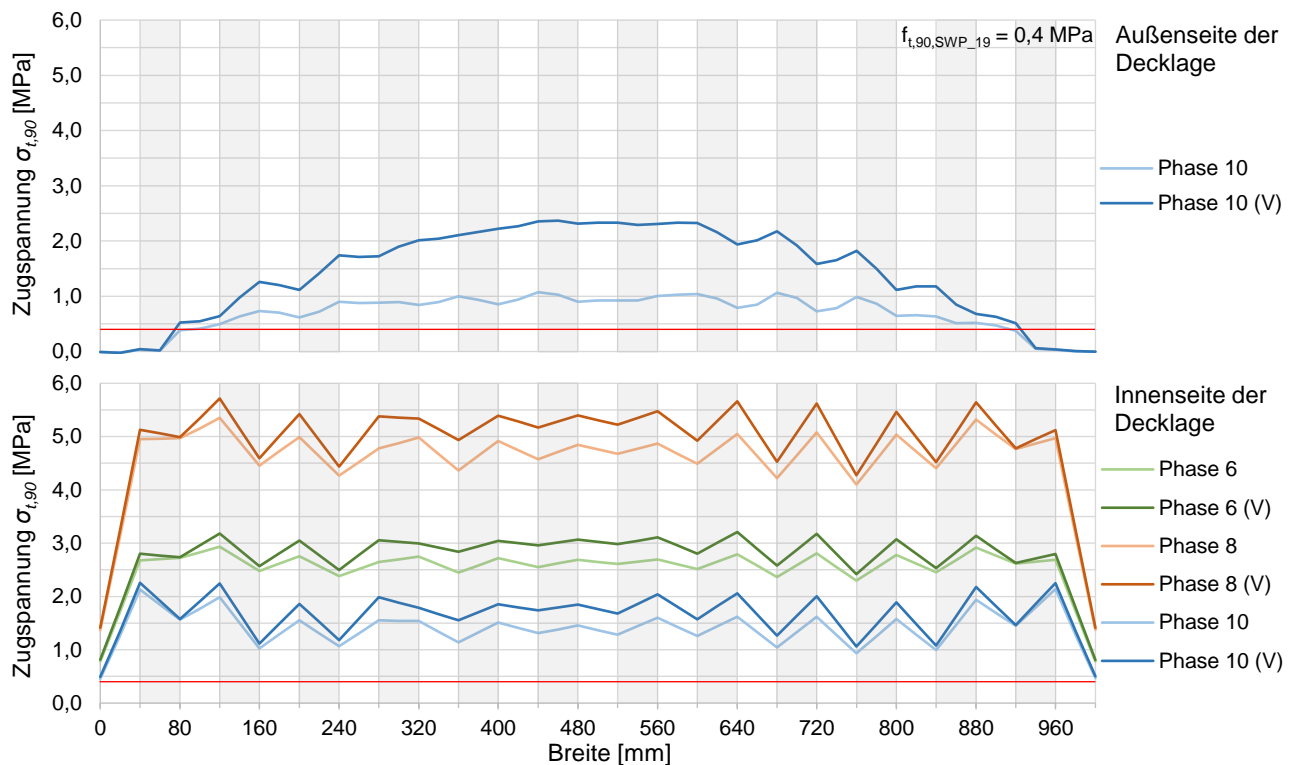


Abbildung 5.11: Maximale Spannungen der freien und gehinderten Prüfkörper der Serie M-2 in den Phasen 6, 8 und 10 an der Außenseite (oben) und Innenseite (unten) der Decklage; mit farblicher Markierungen der Luftkanäle sowie der Quersugfestigkeit

Aufgrund der horizontal ausgerichteten Decklage verlaufen die Quersugspannungen  $\sigma_{t,90,max}$  in der Serie M-3 über die Höhe des Querschnittes, wie sie auch Abbildung 5.12 darstellt. Die Spannungsverläufe zeigen eine große Ähnlichkeit zu denen der Serie M-1. Abgesehen von den Spannungsspitzen, die sich aus den Luftkanälen ergeben, liegen in allen Phasen die Spannungen an den Oberflächen annähernd im selben Bereich. Da die Decklagen beider Serien aus Weißtanne bestehen, zeigen sie folglich unter denselben klimatischen Bedingungen das gleiche Verhalten. Einzig die nahezu gleichen Spannungen der freien und gehinderten Prüfkörper machen einen Unterschied. Folglich entstehen auch hier während des normalen Heizbetriebs in der Phase 6 Schwindrisse auf der Innenseite der Decklage, jedoch nicht an der raumseitigen Oberfläche. Sowohl am freien als auch am gehinderten Berechnungsmodell wird die Zugfestigkeit  $f_{t,90,NH} = 3,5$  MPa mit maximalen Spannungen von bis zu 4,1 MPa überschritten. Im extremen Fall der achten Phase wird das Holz der Deckschicht derart getrocknet, dass sich Zugspannungen von bis zu 7,4 MPa auf der Luftkanalseite bilden. Diese Überschreitung der Zugfestigkeit resultiert in über die gesamte Höhe des Querschnittes verteilten Rissen. Die trockenen Umgebungsbedingungen der Phase 10 führen zusammen mit dem Heizbetrieb zu einer vergleichsweise einheitlichen Trocknung der Decklage. Dennoch sind die entstehenden Quersugspannungen mit etwa 3,9 MPa auf der Innenseite und ca. 4,3 MPa auf der Außenseite ebenfalls höher als die Quersugfestigkeit. Da die Spannungen auf beiden Seiten derselben Brettlage anliegen, besteht die Gefahr, dass Spalten über die gesamte Tiefe Deckschicht entstehen.



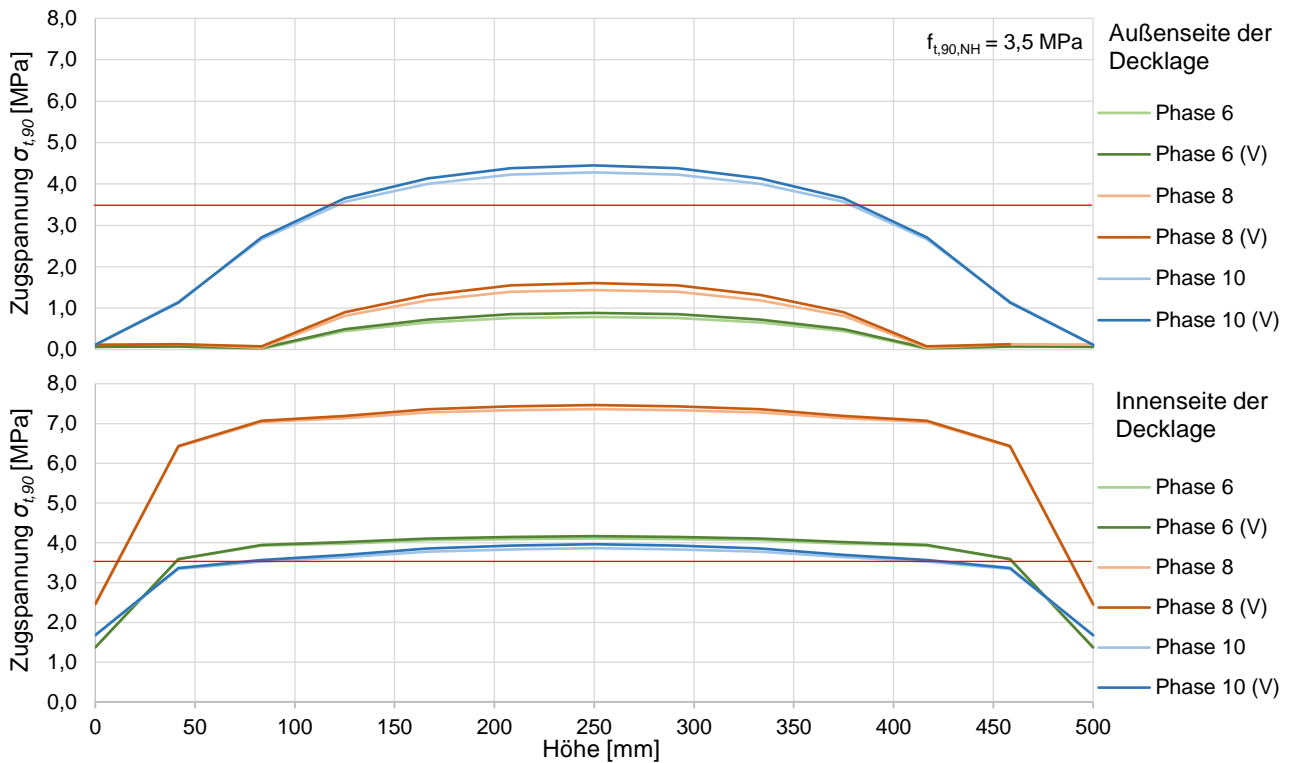


Abbildung 5.12: Maximale Spannungen der freien und gehinderten Prüfkörper der Serie M-3 in den Phasen 6, 8 und 10 an der Außenseite (oben) und Innenseite (unten) der Decklage; mit farblicher Markierungen der Luftkanäle sowie der Querkzugfestigkeit

In der Serie M-5 entstehen unter den gegebenen Randbedingungen während der Phasen 6 und 8 auf der Außenseite der Decklage ebenfalls keine Zugspannungen. Daher zeigt das erste Diagramm in Abbildung 5.13 lediglich die maximalen Spannungen der zehnten Phase. Der aktive Heizbetrieb führt bei den Prüfkörpern vielmehr zu Spannungen auf der Innenseite der Decklage, welche in der sechsten Phase am freien Modell bis zu 3,19 MPa und am Gehinderten maximal 3,73 MPa erreichen und die in Kapitel 4.2.4 erörterte Querkzugfestigkeit von  $f_{t,90,SWP_{12}} = 2,4 \text{ MPa}$  überschreiten. Wie bei den zuvor beschriebenen Serien ist dieses Verhalten in der Phase 8 wiederum extremer, wobei die Spannungen am freien Prüfkörper maximal 5,93 MPa erreichen, während die gehinderten Verformungen zu Spitzen von 6,62 MPa führen. In der zehnten Phase sind die auftretenden Zugspannungen insgesamt geringer, dafür jedoch auf beiden Seiten der Decklage gleichermaßen präsent. An der Innenseite werden Spannungen von bis zu 3,20 und 3,42 MPa erreicht, die somit zu Rissen führen. Zugleich ist auf der Raumseite lediglich die Zugspannung des gehinderten Prüfkörpers mit maximal 3,15 MPa höher als die Festigkeit. Das freie Modell erfährt mit 2,38 MPa Zugkräfte, die im Grenzbereich der Festigkeit liegen. Insgesamt treten an diesem Prüfkörpertyp alle Spannungsspitzen über oder am Rand der Luftkanäle auf und bilden dort Risse.

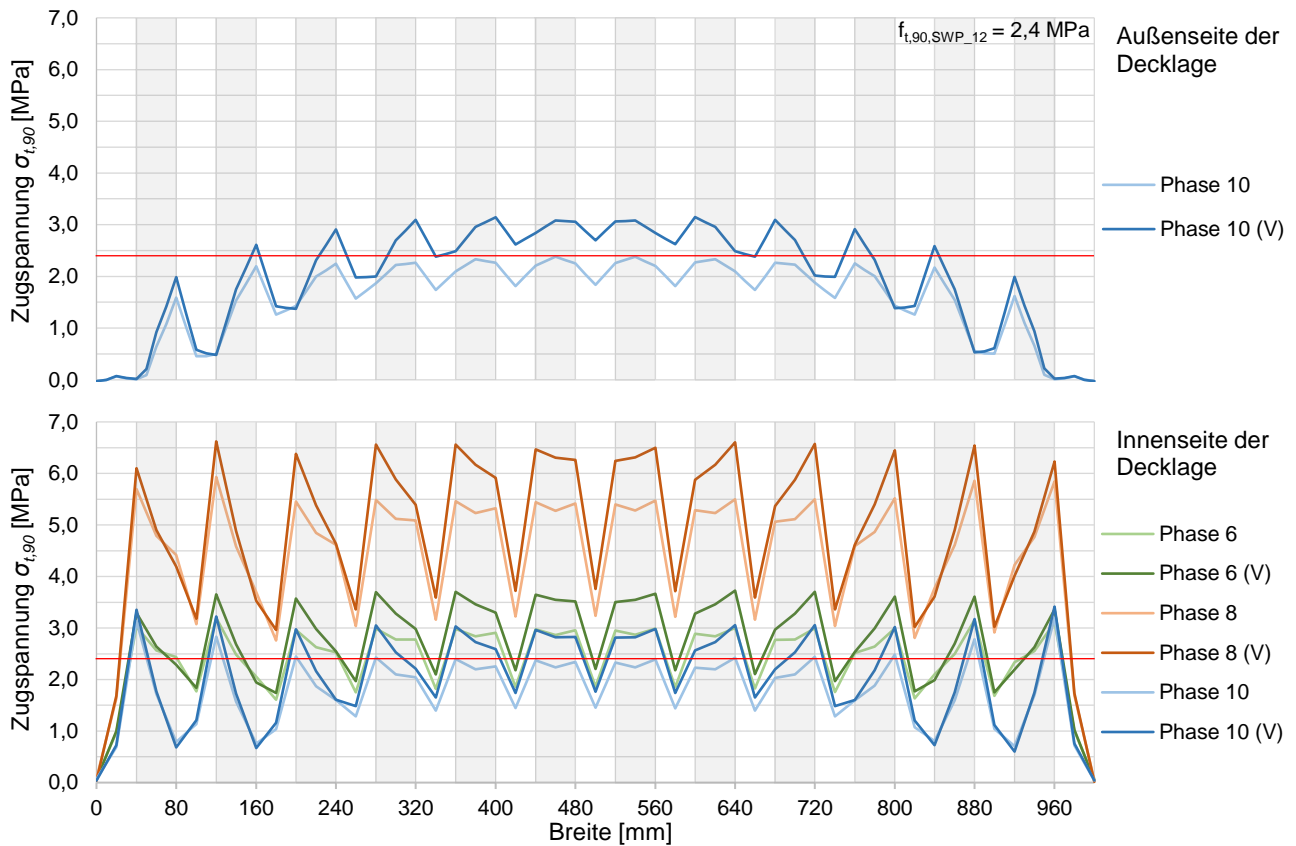


Abbildung 5.13: Maximale Spannungen der freien und gehinderten Prüfkörper der Serie M-5 in den Phasen 6, 8 und 10 an der Außenseite (oben) und Innenseite (unten) der Decklage; mit farblicher Markierungen der Luftkanäle sowie der Querzugfestigkeit

Die Ableitung, ob sich Risse bei den berechneten Zugspannungen und den festgelegten Zugfestigkeiten ergeben, ist in Tabelle 5.2 zusammengefasst. Es kann geschlussfolgert werden, dass sich in allen drei durchgeführten Heizphasen an jedem Prüfkörpertypen Risse bilden. Diese beschränken sich bei normalen und extremen Heizbetrieb auf die Luftkanalseite, während raumseitig ausschließlich unter extremen Umgebungsklimata Risse auftreten.

Tabelle 5.2: Abgeleitete Rissbildung für die Heizphasen 6, 8 und 10 an der Außen- und Innenseite der Decklage

Rissbildung	Phase 6		Phase 8		Phase 10	
	Außen	Innen	Außen	Innen	Außen	Innen
Serie M-1	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja
Serie M-1 (V)	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja
Serie M-2	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja
Serie M-2 (V)	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja
Serie M-3	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja
Serie M-3 (V)	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja
Serie M-5	Nein	Ja	Nein	Ja	Grenzbereich	Ja
Serie M-5 (V)	Nein	Ja	Nein	Ja	Grenzbereich	Ja

### 5.3 Diskussion

Die Ergebnisse für die FE-Berechnungen der normalen und extremen Randbedingungen stellen lediglich Annäherungen und eine qualitative Beschreibung dar. Neben der Vielzahl an Vereinfachungen und Annahmen, die bereits in die Modellierung eingegangen sind, wurden auch die Ausgleichsfeuchtigkeiten lediglich vage festgelegt. Ungenauigkeiten bezüglich der Gleichgewichtsfeuchte haben signifikante Konsequenzen, da diese maßgebend für die Feuchtigkeitsverteilung ist und zudem in die Verformungsberechnung und in die daraus resultierenden Spannungen eingeht.

Die Wahl des Betrachtungszeitraumes von 30 Tagen pro Phase liefert zufriedenstellende Ergebnisse. Es zeigt sich, dass die maximalen Verformungen und Spannungen, sowie gegebenenfalls Risse, bereits wenige Tage nach Beginn der Klimaphase erfolgen und anschließend wieder zurück gehen. Allerdings können anhand dieser Untersuchungen keine Aussagen zu kurzfristigen Spitzenlasten oder schnellen Wechseln im Betrieb getroffen werden.

Aufgrund der einheitlichen Ausgangsbedingungen aller Serien kann zudem die Wirkung der Verformungshinderung bzw. der ‚elastischen Lagerung‘ betrachtet werden. Daraus geht hervor, dass der Einfluss umso größer ist, je höher das Quell- und Schwindmaß, d.h. das Verformungspotential, der Decklage ist. Zudem nimmt die Wirkung ab, je steifer das Bauteil selbst ist. An dem prinzipiellen Verhalten ändert die Hinderung nichts, jedoch an der Ausprägung. Mit Letzterem steigen entsprechend die Zugspannungen.

Zur Berücksichtigung realistischer Verhältnisse wie der Strömungsgeschwindigkeit wurde der Oberflächenemissionskoeffizient vernachlässigt. Dies hat sehr schnelle Feuchtigkeitswechsel innerhalb des angrenzenden Holzes zur Folge. Ob bzw. in welchem Verhältnis dieses Verhalten mit der

Realität übereinstimmt kann nicht überprüft werden, da hierzu keine vergleichbaren Daten vorliegen. Den größten Einfluss auf das Bauteilverhalten haben jedoch die Kombinationen der gewählten Klimata. So führt das normale Raumklima zusammen mit dem normalen Heiz- oder Kühlbetrieb in allen Serien zu kleineren Verformungen, verglichen mit den anderen Heiz- bzw. Kühlszenarien in dieser Arbeit. Zudem ergeben sich an den raumseitigen Oberflächen keine oder nur geringe Querspannungen, die jedoch nicht die Zugfestigkeiten überschreiten. Der Einfluss des Umgebungsklimas ist begrenzt, sodass durch den Heizbetrieb an der Innenseite der Decklage bei allen Prüfkörpertypen das Risiko der Rissbildung besteht.

Die Durchführung eines extremen Heiz- oder Kühlbetriebs, beispielsweise um die raumklimatisierende Leistung zu erhöhen, bringt mehrere negative Folgen mit sich. So ergeben sich in allen Serien relativ große Verformungen. Während das normale Umgebungsklima das Entstehen von Schwindrissen an der Raumseite der Decklage verhindert, folgen aus der Trocknung an der Innenseite Zugspannungen, welche die Querspannungen teilweise um ein Vielfaches überschreiten und die Wahrscheinlichkeit einer Rissbildung sehr begünstigen.

Des Weiteren kann die Aussage von Mindrup (2020) bestätigt werden, dass bei extrem trockenen Umgebungsbedingungen die Heizleistung reduziert werden muss. Neben vergleichsweise großen Verformungen entstehen an allen Prüfkörpern auf beiden Seiten der Decklage Zugspannungen, welche die Querspannungen überschreiten. Das Risiko der Rissbildung ist somit auch hier gegeben.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

### 6.1 Ergebnisse und Fazit

Im Rahmen des Forschungsprojektes InnoCrossLam werden multifunktionale Brettsperrholz-Wände entwickelt, mit welchen die Konditionierung der Raumluft über thermische Aktivierung möglich ist. Für das Erreichen einer Heiz- oder Kühlleistung strömt klimatisierte Luft durch integrierte Kanäle. Aus vorangegangenen Machbarkeitsstudien geht hervor, dass es während des Betriebs zum Entstehen von Schwindrissen kommen kann. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher die Verformungen thermisch aktivierten Brettsperrholzes unter nutzungsbedingten Feuchtigkeitsänderungen sowie die einhergehenden Rissbildungen zu untersuchen.

Dazu wurde das Verhalten sechs unterschiedlicher Prüfkörpertypen in einer experimentellen Untersuchung betrachtet. Jede dieser Serien bestand aus drei Versuchsobjekten, wobei je eines an der Verformung gehindert war. Unter Laborbedingungen wurden sie fünf verschiedenen klimatischen Bedingungen, inklusive einer Heiz- und einer Kühlphase, ausgesetzt. Im Verlauf des Versuchs erfolgten Feuchtigkeitsmessungen in mehreren Tiefen des Querschnitts. Zudem wurde über den Stich der Verkrümmung festgehalten, wie sich die Bauteile im Verlauf der Phasen verformten. Des Weiteren fand zum Heizphasenende eine handnahe Untersuchung der Prüfkörper auf Rissbildungen statt.

Unter zur Hilfenahme verschiedener graphischer Darstellungen zeigt sich, dass die unterschiedlichen Serien das theoretische Verhalten widerspiegeln, wohingegen nicht alle Literaturangaben mit der Realität übereinstimmen. Die Versuche bestätigen eine stärkere Austrocknung oder Befeuchtung des Gesamtquerschnittes aufgrund der integrierten Luftkanäle. Maßgeblichen Einfluss auf die Verformung hat das Material der Decklage und der Aufbau des Querschnittes. Darüber hinaus entstehen bei einer Vielzahl an Prüfkörpern Schwindrisse an der raumseitigen Oberfläche.

Um tiefergehende Untersuchungen durchführen zu können wird ein Finite-Elemente-Modell mit dem Programm ANSYS Workbench erstellt. Zur Darstellung der Diffusion finden die physikalischen Gesetzmäßigkeiten des Wärmetransportes Verwendung. Diese Berechnungen beziehen unter anderem das non-Fickian-Verhalten von Holz ein. Die Validierung des Modells erfolgt im Anschluss über die klimatischen Bedingungen und den Vergleich der Ergebnisse mit den experimentellen Untersuchungen. Anhand der Feuchtigkeitsverteilungen werden die feuchtespezifischen Kennwerte und Annahmen plausibilisiert. Zudem bestätigt das Verformungsverhalten die mechanischen Parameter und die gewählten Referenzfeuchtigkeiten. Mithilfe des Vergleichs der maximalen berechneten Querzugspannungen mit den gewählten Festigkeiten werden die Vorhersagen zur Rissbildung abgeleitet. Die Prognosen stimmen in den meisten Fällen mit der Realität überein. Lediglich bei jenen Prüfkörperserien, die Massivholzplatten als Decklagen besitzen, treten einzelne Unstimmigkeiten hinsichtlich der Zugfestigkeiten und des realen Verhaltens auf. Insgesamt gelingt die Nachmodellierung mit einer absoluten Abweichung der Feuchtigkeitsverteilung von durchschnittlich 1,0 % und einer Krümmung, deren Stich im Mittel einen Fehler von 0,59 mm aufweist.

Mit dem validierten Modell erfolgen daraufhin weitere Untersuchungen zum Verhalten unter normalen und extremen Bedingungen. Es werden unterschiedliche Kombinationen der Klimata in den Luftkanälen sowie in der Umgebung angesetzt und die Luftgeschwindigkeit in den Kanälen berücksichtigt. Zunächst wird je ein normales Heiz- und Kühlszenario betrachtet, wobei vergleichsweise kleine Verformungen auftreten. Die Querspannungen an der Außenseite der Decklage bleiben gering, jedoch besteht an der Innenseite ein Risiko für Rissbildungen. Innerhalb des folgenden extremen Heiz- und Kühlbetriebs ergeben sich größere Verformungen. Während auch hier an der Außenseite die Spannungen nicht die Zugfestigkeiten überschreiten, sind die Wahrscheinlichkeiten für Risse an der Innenseite der Decklage sehr hoch. Die extrem trockenen oder feuchten Umgebungsbedingungen haben ebenfalls relativ starke Krümmungen zur Folge. Im Heizbetrieb besteht sowohl an der Innen- als auch an der Außenseite der Decklage die Gefahr von Rissen, welche gegebenenfalls zum Spalten der gesamten Lage führen können.

Alle untersuchten Prüfkörpertypen zeigen im normalen und extremen Betrieb stets das beschriebene Verhalten. Folglich besteht bei allen Serien die Gefahr, dass durch Risse, Spalten oder Öffnungen der Brettstoßfugen Luftundichtigkeiten entstehen. Die Verformungshinderung, wie sie im Einbauzustand zu erwarten ist, erhöht das bestehende Risiko. Da dies mit dem Verlust der Funktionsfähigkeit einher geht, ist bereits der normale Heizbetrieb als kritisch anzusehen. Vor allem für den extremen Heizbetrieb oder für extreme Umgebungsbedingungen sind die untersuchten Serien nicht geeignet.

Nachfolgend werden die zentralen Erkenntnisse zu den verschiedenen multifunktionalen Prüfkörpertypen zusammengefasst. Die Decklagen der Serien M-1 und M-3 bestehen aus Weißtannenslamellen. Daraus folgen für beide Prüfkörpertypen vergleichsweise große Verformungen. In der Serie M-1 findet die Krümmung über die Breite statt, in der Serie M-3 hingegen hauptsächlich über die Höhe der Elemente. Diesem Verlauf folgen die entsprechenden Querspannungen, welche wiederum in Rissen resultieren können. Zudem stellen die Schmalseitenverklebungen eine Schwachstelle der Decklage dar, da sie sich während der Heizphase der experimentellen Untersuchungen öffneten. Die entstandenen Risse verlaufen je nach Prüfkörpertyp quer bzw. längs über die Luftkanäle und gefährden somit die Funktionsfähigkeit der thermischen Aktivierung.

Aufgrund des geringen Quell- und Schwindmaßes der Massivholzplatten verformen sich die Serien M-2 und M-5 in relativ kleinem Maße. Der Prüfkörpertyp M-5 ist durch den sechslagigen Aufbau insgesamt steifer, und zeigt daher eine noch geringere Krümmung. Die Querspannungen werden in beiden Serien während den Heizphasen infolge der Spannungen überschritten und führen ebenfalls zu Rissen in den Decklagen. Deren geschichteter Aufbau verhindert jedoch ein Spalten der gesamten Massivholzplatten.

Die theoretische Betrachtung normaler und extremer Betriebszustände bezog die Serie M-4 nicht mit ein. Die Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen ergeben jedoch bereits, dass die geringsten Verformungen auf das Fehlen der Decklage zurückzuführen sind. Ebenso resultieren auftretende Spannungen während der Heizphase nicht in Rissen. Folglich wäre dieser Prüfkörpertyp in Kombination mit einer passenden Decklage am besten für die praktische Nutzung geeignet. Das Material der Decklage muss luftdicht und formstabil gegenüber Temperatur- und Feuchtigkeitswechseln sein, sowie eine gute Leitfähigkeit für die Zu- oder Abfuhr der Wärme besitzen.

## 6.2 Ausblick und Forschungsbedarf

Die Finite-Elemente-Berechnung stellt eine geeignete Methode dar, um komplexe Vorgänge des Feuchtigkeitstransportes innerhalb des thermisch aktivierten Brettsperrholzes nachzuvollziehen. Anhand dessen gelingt die Abschätzung des Verformungsverhaltens und der Rissbildungen. Allerdings kann das Modell noch in vielerlei Hinsicht verbessert und erweitert werden. Eine genauere Berücksichtigung der Materialien, bezogen auf ihren Aufbau aus einzelnen Lamellen oder Schichten, sowie aus Versuchen ermittelte Materialkennwerte, ergeben eine höhere Übereinstimmung mit der Realität. Zudem werden bisher weder Hysterese-Vorgänge noch Berechnungsansätze des multi-Fickian-Verhaltens integriert.

Für die weitere Entwicklung thermisch aktivierter Massivholzplatten ist die Feststellung, dass sich die Holzfeuchtigkeit während der Nutzung stark verändert, von Bedeutung. Denn der Feuchtigkeitsgehalt wirkt sich sowohl über die Wärmeleitfähigkeit auf die Heizleistung als auch auf nahezu alle anderen Eigenschaften des Holzes aus. Demzufolge ist die Holzfeuchtigkeit für alle nachfolgenden Untersuchungen stets als eine Variable mit zu berücksichtigen.

Die Bruchmechanik sowie das genaue Entstehungsverhalten von Rissen in der Decklage war nicht Teil der vorliegenden Arbeit. Detaillierte Untersuchungen hierzu können jedoch sinnvoll sein, unter anderem bezüglich der genauen Querzugfestigkeiten verschiedener Materialien. Von Interesse sind vor allem die unterschiedlichen Rissarten, sowie deren Anzahl, Lage und Tiefe. Des Weiteren ist von Relevanz wie die Risse die Luftdichtheit und infolgedessen die Funktionsfähigkeit der thermischen Aktivierung beeinträchtigen. Um ein marktfähiges Produkt zu entwickeln, müssen Lösungen gefunden werden, die dem Entstehen kritischer Risse vorbeugen.

In der vorliegenden Arbeit wurde bereits der Einfluss verschiedener Kombinationen aus klimatischen Bedingungen festgestellt. Zur Überprüfung, ob sich einzelne Prüfkörpertypen für den realen Nutzungsbetrieb eignen, sollten anhand des Modells wirklichkeitsnahe Heiz- und Kühlszenarien durchgeführt werden, welche Temperaturschwankungen der Raumluft über den Verlauf von Tages- und Jahreszeiten einbeziehen und einen daran angepassten Betrieb der thermischen Aktivierung simulieren. Insgesamt gilt es herauszufinden, welche Heiz- und Kühlleistungen notwendig und welche ohne Schädigungen langfristig auch für Spitzenlasten anwendbar sind.



## 7 Literaturverzeichnis

### Materielle Quellen

- Albert, A. (Ed.) (2014). *Schneider Bautabellen für Ingenieure: Mit Berechnungshinweisen und Beispielen* (21. Aufl.). Köln: Bundesanzeiger Verlag.
- Arnold, M., Dietsch, P., & Winter, S. (2021). Mechanical Properties of Innovative Multifunctional Cross Laminated Timber. *Conference Paper, World Conference on Timber Engineering WCTE2021. Chile, Santiago*.
- Avramidis, S. (1989). Evaluation of the "three-variable" models for the prediction of equilibrium moisture content in wood. *Wood Science and Technology*, 23(3), 251–257. <https://doi.org/10.1007/BF00367738>
- Avramidis, S., & Siau, J. F. (1987). An investigation of the external and internal resistance to moisture diffusion in wood. *Wood Science and Technology*, 21(3), 249–256. <https://doi.org/10.1007/BF00351396>
- Azinović, B., Pazlar, T., Danielsson, H., Serrano, E., Füssl, J., Lukacevic, M., . . . Cabrero Ballarín, J. (2020). InnoCrossLam 1st stakeholder article. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/340528828\\_InnoCrossLam\\_1st\\_stakeholder\\_article](https://www.researchgate.net/publication/340528828_InnoCrossLam_1st_stakeholder_article)\* (15.12.2020).
- Crank, J. (1976). *The mathematics of diffusion* (2. ed., reprint). Oxford: Clarendon Press.
- Dietsch, P., Schickhofer, G., Brunauer, A., Tomasi, R., Hübner, U., Krenn, H., . . . Wiegand, T. (2018). Eurocode 5:2022 – Einführung in die neuen Abschnitte Brettsper Holz und Verstärkungen. In R. Görlacher & C. Sandhaas (Eds.), *Karlsruher Tage 2018 - Holzbau: Forschung für die Praxis: Karlsruhe, 04. Oktober - 05. Oktober 2018* (pp. 65–84). Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
- Dunky, M., & Niemz, P. (2002). *Holzwerkstoffe und Leime: Technologie und Einflussfaktoren* (1. Aufl.). Berlin: Springer.
- Dvinskikh, S. V., Henriksson, M., Mendicino, A. L., Fortino, S., & Toratti, T. (2011). NMR imaging study and multi-Fickian numerical simulation of moisture transfer in Norway spruce samples. *Engineering Structures*, 33(11), 3079–3086. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.04.011>
- Florisson, S., Vessby, J., Mmari, W., & Ormarsson, S. (2020). Three-dimensional orthotropic non-linear transient moisture simulation for wood: analysis on the effect of scanning curves and non-linearity. *Wood Science and Technology*, 54(5), 1197–1222. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01210-4>

- Forster, J. (2020). *Verformungsverhalten von multifunktionalem Brettsper Holz unter Feuchteänderung* (Bacheor Thesis). Technische Universität München, München.
- Fortino, S., Mirianon, F., & Toratti, T. (2009). A 3D moisture-stress FEM analysis for time dependent problems in timber structures. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 13(4), 333–356. <https://doi.org/10.1007/s11043-009-9103-z>
- Frandsen, H. L., Damkilde, L., & Svensson, S. (2007). A revised multi-Fickian moisture transport model to describe non-Fickian effects in wood. *Holzforschung*, 61(5), 563–572. <https://doi.org/10.1515/HF.2007.085>
- Frandsen, H. L., & Svensson, S. (2007). Implementation of sorption hysteresis in multi-Fickian moisture transport. *Holzforschung*, 61(6), 693–701. <https://doi.org/10.1515/HF.2007.113>
- Frandsen, H. L., Svensson, S., & Damkilde, L. (2007). A hysteresis model suitable for numerical simulation of moisture content in wood. *Holzforschung*, 61(2), 175–181. <https://doi.org/10.1515/HF.2007.031>
- Gebhardt, C. (2014). *Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench: Einführung in die lineare und nicht-lineare Mechanik* (2., überarb. Aufl., [elektronische Ressource]). München: Hanser. <https://doi.org/10.3139/9783446439566>
- Gecks, J., & Plagge, R. (2015). Massivholzplatten mit Funktionselementen in der Mittellage. Retrieved from <https://ivth.org/content/download/aif/17441BR.pdf>\* (03.12.2020).
- Gereke, T. (2009). *Moisture-induced stresses in cross-laminated wood panels* (Dissertation). Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich.
- Gereke, T., Hass, P., & Niemz, P. (2010). Moisture-induced stresses and distortions in spruce cross-laminates and composite laminates. *Holzforschung*, 64(1), 68. <https://doi.org/10.1515/HF.2010.003>
- Gustafsson, A., Crocetti, R., Just, A., Landel, P., Olsson, J., Pousette, A., . . . Östman, B. (2019). *The CLT Handbook* (1. Auflage). Stockholm: Swedish Wood. Retrieved from <https://www.swedishwood.com/siteassets/5-publikationer/pdfer/clt-handbook-2019-eng-m-svensk-standard-2019.pdf>
- Halász, R. v., & Scheer, C. (Eds.) (1986). *Holzbau-Taschenbuch* (8., vollst. neubearb. Aufl.). Berlin: Ernst.
- Hanhijärvi, A. (1995). *Modelling of creep deformation mechanisms in wood*. Zugl.: Espoo, Helsinki Univ. Of Technology, Diss., 1995. *Dissertation from Helsinki University of Technology: Vol. 997*. Espoo: Technical Research Centre of Finland.

- Häupl, P., Höfker, G., Homann, M., Kölzow, C., Maas, A., Nocke, C., & Riese, O. (2017). *Lehrbuch der Bauphysik: Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima* (8. Auflage). *Lehrbuch*. Wiesbaden: Springer Vieweg. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-16074-6>
- Isopp, A. (2012). Holz: Der Stoff, aus dem die Bäume sind. *Zuschnitt*, 12(48), 8. Retrieved from <https://www.proholz.at/fileadmin/flippingbooks/zuschnitt48/files/assets/common/downloads/publication.pdf>
- Kaufmann, H., Krötsch, S., & Winter, S. (2017). *Atlas Mehrgeschossiger Holzbau* (1. Auflage). *DE-TAIL Atlas*. München: Edition Detail. <https://doi.org/10.11129/9783955533540>
- Keylwerth, R. (1962). Untersuchungen über freie und behinderte Quellung von Holz—Erste Mitteilung: Freie Quellung. *European Journal of Wood and Wood Products*, 20(7), 252–259. <https://doi.org/10.1007/BF02604681>
- Kornadt, O., Carrigan, S., Schöndube, T., Winter, S., Mindrup, K., Knieriemen, G., . . . Staniszewski, A. (2019). *Dynamisch thermisch-hygrisches Verhalten von Massivbaukonstruktionen: Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex für Gebäude aus Mauerwerk und thermisch aktivierbare Massivholzelemente*. *Forschungsinitiative Zukunft Bau: F 3129*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Krabbenhoft, K., & Damkilde, L. (2004). A model for non-fickian moisture transfer in wood. *Materials and Structures*, 37(9), 615–622. <https://doi.org/10.1007/BF02483291>
- Krimmling, J., Deutschmann, J. U., Preuß, A., & Renner, E. (Eds.) (2014). *Atlas Gebäudetechnik: Grundlagen - Konstruktionen - Details ; mit 174 Tabellen* (2., überarb. und erw. Aufl.). Köln: R. Müller.
- Krus, M. (1995). *Feuchttransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken*. (Dissertation). Universität Stuttgart, Stuttgart. Retrieved from [https://wufi.de/literatur/Krus%2011071995%20-%20Feuchttransport-%20und%20Speicherkoeffizienten%20por%C3%B6ser%20mineralischer%20\(2\).pdf](https://wufi.de/literatur/Krus%2011071995%20-%20Feuchttransport-%20und%20Speicherkoeffizienten%20por%C3%B6ser%20mineralischer%20(2).pdf)
- Mestek, P., Werther, N., & Winter, S. (2016). Planen und Bauen mit Brettsper Holz. *Holzbau Handbuch*. (Reihe 4 Teil 6 Folge 1), 4–16. Retrieved from [https://informationsdienst-holz.de/fileadmin/Publikationen/2\\_Holzbau\\_Handbuch/R04\\_T06\\_F01\\_Bauen\\_mit\\_Brettsper Holz.pdf](https://informationsdienst-holz.de/fileadmin/Publikationen/2_Holzbau_Handbuch/R04_T06_F01_Bauen_mit_Brettsper Holz.pdf)
- Mindrup, K. (2020). *Raumklimatisierung durch thermisch aktivierte Massivholzelemente: Konzeptentwicklung, Leistungsbetrachtung und Ableitung von Auslegungswerkzeugen* (Dissertation). Technische Universität München, München.

- Neroth, G., & Vollenschaar, D. (2011). *Wendehorst Baustoffkunde: Grundlagen - Baustoffe - Oberflächenschutz ; mit 363 Tabellen* (27., vollständig überarbeitete Auflage). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9919-4>
- Neuhaus, H. (2017). *Ingenieurholzbau: Grundlagen - Bemessung - Nachweise - Beispiele* (4. Auflage). *Lehrbuch*. Wiesbaden: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-14178-3>
- Niemz, P., & Sonderegger, W. U. (2017). *Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.  
<https://doi.org/10.3139/9783446445468>
- Rose, D. A. (1963). Water movement in porous materials: Part 2 - The separation of the components of water movement. *British Journal of Applied Physics*, 14(8), 491–496.  
<https://doi.org/10.1088/0508-3443/14/8/310>
- Rosen, H. N. (1978). The influence of external resistance on moisture adsorption rates in wood. *Wood and Fiber Science*. (10 (3)), 218–228.
- Schaffrath, J. (2015). *Untersuchungen zu Feuchtetransportvorgängen und feuchteinduzierten Verformungen sowie Spannungen bei Betrachtung verschiedener Holzarten und unterschiedlicher klimatischer Randbedingungen* (Dissertation). Technische Universität München, München.
- Sonderegger, W., Hering, S., Mannes, D., Vontobel, P., Lehmann, E., & Niemz, P. (2010). Quantitative determination of bound water diffusion in multilayer boards by means of neutron imaging. *European Journal of Wood and Wood Products*, 68(3), 341–350.  
<https://doi.org/10.1007/s00107-010-0463-5>
- Trübswetter, T. (2009). *Holztrocknung. Holztechnik: Verfahren zur Trocknung von Schnittholz ; Planung von Trocknungsanlagen* (2. Auflage). s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag.  
<https://doi.org/10.3139/9783446421486>
- Wadsö, L. (1994). Unsteady-state water vapor adsorption in wood: An experimental study. *Wood and Fiber Science*. (26 (1)), 36–50.
- Wagenführ, A., & Scholz, F. (Eds.) (2018). *Taschenbuch der Holztechnik* (3., aktualisierte Auflage). München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.
- Wagenführ, R. (1999). *Anatomie des Holzes: Strukturanalytik, Identifizierung, Nomenklatur, Mikrotechnologie* (5., völlig überarbeitete Auflage). Holz. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verl.
- Willems, W. M., Dinter, S., & Schild, K. (2006). *Vieweg Handbuch Bauphysik Teil 1: Wärme- und Feuchteschutz, Behaglichkeit, Lüftung*. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9123-5>

Willems, W. M., Schild, K., & Stricker, D. (2018). *Feuchteschutz: Grundlagen - Berechnungen - Details. Detailwissen Bauphysik*. Wiesbaden: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-05685-8>

## Normen und Zulassungen

Deutsches Institut für Bautechnik (2015). Z-9.1-711: 1K-PUR-Klebstoffe LOCTITE HB S049 PURBOND bis LOCTITE HB S709 PURBOND für die Verklebung von tragenden Keilzinkenverbindungen. Retrieved from [https://www.irbnet.de/daten/bzp/60209C23C2/bzp-bfi\\_3136786.pdf\\*](https://www.irbnet.de/daten/bzp/60209C23C2/bzp-bfi_3136786.pdf*) (09.02.2021).

Deutsches Institut für Bautechnik (2018). Z-9.1-691: 1K-PUR-Klebstoff "Jowapur 686.30" für die Verklebung tragender Holzbauteile. Retrieved from [https://www.irbnet.de/daten/bzp/CA55DCC9F8/bzp-bfi\\_3151561.pdf\\*](https://www.irbnet.de/daten/bzp/CA55DCC9F8/bzp-bfi_3151561.pdf*) (03.02.2021).

Deutsches Institut für Bautechnik (2020). Z-9.1-555: LIGNOTREND-Elemente in tragenden Wand-, Decken- und Dachkonstruktionen. Retrieved from [https://www.lignotrend.de/\\_Resources/Persistent/aedbdec7c3f09718d9b9eccc013a2cba623e9480/AbZ\\_Z-9.1-555\\_DE%2002.2020.-02.2025\\_k.pdf\\*](https://www.lignotrend.de/_Resources/Persistent/aedbdec7c3f09718d9b9eccc013a2cba623e9480/AbZ_Z-9.1-555_DE%2002.2020.-02.2025_k.pdf*) (03.02.2021).

*DIN EN 12775:2001-04, Massivholzplatten - Klassifizierung und Terminologie; Deutsche Fassung EN\_12775:2001*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

*DIN EN 13183-1:2002-07, Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz\_ - Teil\_1: Bestimmung durch Darrverfahren; Deutsche Fassung EN\_13183-1:2002*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

*DIN EN 13353:2011-07, Massivholzplatten (SWP)\_ - Anforderungen; Deutsche Fassung EN\_13353:2008+A1:2011*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

*DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08, Nationaler Anhang\_ - National festgelegte Parameter\_ - Eurocode\_5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten\_ - Teil\_1-1: Allgemeines\_ - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

*DIN EN 1995-1-1:2010-12, Eurocode\_5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten\_ - Teil\_1-1: Allgemeines\_ - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN\_1995-1-1:2004\_ + AC:2006\_ + A1:2008*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

*DIN EN 301:2018-01, Klebstoffe, Phenoplaste und Aminoplaste, für tragende Holzbauteile - Klassifizierung und Leistungsanforderungen; Deutsche Fassung EN 301:2017*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Österreichisches Institut für Bautechnik (2020). ETA-20/0023: Pfeifer CLT Brettsperrholz. Retrieved from [https://www.pfeifergroup.com/de/produkte/holzbau/clt-brettsperrholz/zertifikate/?no\\_cache=1&tx\\_bh\\_page%5Bfile%5D=2142&tx\\_bh\\_page%5Baction%5D=download&tx\\_bh\\_page%5Bcontroller%5D=File\\*](https://www.pfeifergroup.com/de/produkte/holzbau/clt-brettsperrholz/zertifikate/?no_cache=1&tx_bh_page%5Bfile%5D=2142&tx_bh_page%5Baction%5D=download&tx_bh_page%5Bcontroller%5D=File*) (15.12.2020).

## Immaterielle Quellen

Arnold, M. (2020). *WP5 - Innovative Multifunctional CLT*. InnoCrossLam. 3rd Research Partner Meeting, 15.05.2020, virtual meeting.

Azinović, B. (2019). *Innovative solutions for CLT structures*. ForestValue Kick-Off Seminar, 24.05.2019, Helsinki. Retrieved from <http://innocrosslam.zag.si/>

Binsfeld, C. (2019, November). *Raumklimatechnik*. Lehrstuhl für Bauphysik. Vorlesungsreihe Raumklima und Behaglichkeit, München.

Jowat SE (2020). Jowapur 686.30: Einkomponenten-Polyurethan-Klebstoff für den tragenden Holzleimbau. Retrieved from [https://www.jowat.com/technical-data-sheets/686.30/TD68630\\_Deutsch.PDF\\*](https://www.jowat.com/technical-data-sheets/686.30/TD68630_Deutsch.PDF*) (24.11.2020).

Sonderegger, W., & Niemz, P. (2004). *Untersuchung der Rissbildung an bei unterschiedlicher Feuchte verklebten Massivholzplatten*. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004895033>

## Software

ANSYS Workbench (Version Academic Student 2020 R2) [Computer software] (2020): ANSYS Inc.

Microsoft Excel für Microsoft 365 MSO (Version 2008) [Computer software] (2020): Microsoft.

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Entwicklung der Brettspertholzproduktion in Europa (Gustafsson et al., 2019) .....	10
Abbildung 2.1: Holzprobe mit Kennzeichnung der drei anatomischen Hauptrichtungen (Schaffrath, 2015) .....	14
Abbildung 2.2: Schematischer Nadelholz-Querschnitt (Neroth & Vollenschaar, 2011).....	15
Abbildung 2.3: Aufbau einer Holzzelle (Isopp, 2012) .....	17
Abbildung 2.4: Molekulare und fibrillare Zusammensetzung der Zellwände (Wagenführ & Scholz, 2018).....	17
Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der fortschreitenden Wassereinlagerung in einer Baustoffpore bei steigendem Wassergehalt (Häupl et al., 2017) .....	20
Abbildung 2.6: Schematische Darstellung der Bindungsformen des Wassers in Holz (Niemz & Sonderegger, 2017).....	21
Abbildung 2.7: Sorptionsisotherme mit Hysterese-Effekt (Wagenführ & Scholz, 2018) .....	22
Abbildung 2.8: Feuchtigkeitstransport nach dem multi-Fickian Modell (Krabbenhoft & Damkilde, 2004).....	26
Abbildung 2.9: Modell für den überlagerten Flüssig- und Dampftransport im Porenraum eines hygroskopischen Baustoffes bei (A) isothermen und (B) nichtisothermen Randbedingungen (Krus, 1995) .....	28
Abbildung 2.10: Kapillaritätserscheinung und Ausbildung des Randwinkels $\theta$ in Kapillarporen mit Porenradius $r$ (Willems et al., 2018).....	29
Abbildung 2.11: Verformung schwindender kleinformatischer Holzprofile gemäß ihrer Lage im Stammquerschnitt (Häupl et al., 2017) .....	30
Abbildung 2.12: Qualitative Eigenspannungsverteilung (Querzugspannungen $\sigma_t, 90$ und Querdruckspannungen $\sigma_c, 90$ ) über die Breite $b$ eines Holzquerschnitts bei negativer Feuchtedifferenz $\Delta u$ % (Neuhaus, 2017) .....	32
Abbildung 2.13: Drei- und Fünflagige Brettspertholzelemente (Gustafsson et al., 2019).....	32
Abbildung 2.14: Herstellungsprozess von Brettspertholz (Mestek et al., 2016).....	33
Abbildung 2.15: Schema eines luftführenden thermisch aktivierten Massivholzelements (Mindrup, 2020).....	37



Abbildung 3.1: Querschnitt durch die Prüfkörper der Serie M-1 (Arnold et al., 2021) .....	38
Abbildung 3.2: Querschnitt durch die Prüfkörper der Serie M-2 (Arnold et al., 2021) .....	38
Abbildung 3.3: Querschnitt durch die Prüfkörper der Serie M-3 (Arnold et al., 2021) .....	39
Abbildung 3.4: Querschnitt durch die Prüfkörper der Serie M-4 (Arnold et al., 2021) .....	39
Abbildung 3.5: Querschnitt durch die Prüfkörper der Serie M-5 (Arnold et al., 2021) .....	40
Abbildung 3.6: Querschnitt durch die Prüfkörper der Serie O-1 (Arnold et al., 2021) .....	40
Abbildung 3.7: Vorbereitung der Prüfkörper mit diffusionsdichter Aluminiumfolie und Verformungsbehinderung.....	40
Abbildung 3.8: Anordnung der Prüfkörper in der Klimakammer .....	41
Abbildung 3.9: Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur über den gesamten Versuchszeitraum.....	42
Abbildung 3.10: Schema zur Anordnung der Messpunkte (Arnold, 2020) .....	43
Abbildung 3.11: Skizze zur Messung der Verformung über den Stich der Krümmung (Arnold, 2020) .....	44
Abbildung 3.12: Vorbereitung des Prüfkörpers M-2-3 (V) mit aufgezeichnetem Raster und Einsteck-Elektrodenpaaren .....	44
Abbildung 3.13: Gemessene Holzfeuchtigkeiten und Stiche der Krümmungen der Serie M-1 im zeitlichen Verlauf der experimentellen Untersuchung .....	45
Abbildung 3.14: Gemessene Holzfeuchtigkeiten und Stiche der Krümmungen der Serie M-2 im zeitlichen Verlauf der experimentellen Untersuchung .....	46
Abbildung 3.15: Gemessene Holzfeuchtigkeiten und Stiche der Krümmungen der Serie M-3 im zeitlichen Verlauf der experimentellen Untersuchung .....	47
Abbildung 3.16: Gemessene Holzfeuchtigkeiten und Stiche der Krümmungen der Serie M-4 im zeitlichen Verlauf der experimentellen Untersuchung .....	48
Abbildung 3.17: Gemessene Holzfeuchtigkeiten und Stiche der Krümmungen der Serie M-5 im zeitlichen Verlauf der experimentellen Untersuchung .....	49
Abbildung 3.18: Gemessene Holzfeuchtigkeiten und Stiche der Krümmungen der Serie O-1 im zeitlichen Verlauf der experimentellen Untersuchung .....	50

Abbildung 3.19: Vergleich der sechs Serien hinsichtlich der Holzfeuchtigkeit in $m_{15}$ (oben) sowie dem Stich der Krümmung am freien Prüfkörper in $w_{z2}$ (mittig) und am Gehinderten in $w_{z2}$ (V) (unten).....	51
Abbildung 3.20: Darstellung der Ausgleichsfeuchtigkeit im Vergleich zum Verlauf der Holzfeuchtigkeit in $m_{15}$ der untersuchten Prüfkörper.....	53
Abbildung 3.21: Prüfkörper M-1-3 (V) nach der Heizphase, mit angezeichneten Rissen und farblicher Markierung der Luftkanäle .....	53
Abbildung 3.22: Prüfkörper M-2-2 nach der Heizphase, mit angezeichneten Rissen und farblicher Markierung der Luftkanäle .....	54
Abbildung 3.23: Prüfkörper M-2-3 (V) nach der Heizphase, mit angezeichneten Rissen und farblicher Markierung der Luftkanäle .....	54
Abbildung 3.24: Prüfkörper M-3-1 (links) und M-3-2 (rechts) nach der Heizphase, mit angezeichnetem Riss und farblicher Markierung der Luftkanäle .....	55
Abbildung 3.25: Prüfkörper M-3-3 (V) nach der Heizphase, mit angezeichneten Rissen und farblicher Markierung der Luftkanäle .....	55
Abbildung 3.26: Prüfkörper M-5-2 nach der Heizphase, mit angezeichneten Rissen und farblicher Markierung der Luftkanäle .....	56
Abbildung 3.27: Prüfkörper O-1-1 (links) und O-1-2 (rechts) nach der Heizphase, mit angezeichnetem Riss und farblicher Markierung der Luftkanäle .....	56
Abbildung 3.28: Prüfkörper O-1-3 (V) nach der Heizphase, mit angezeichneten Rissen.....	57
Abbildung 4.1: Allgemeines Projektschema zur Berechnung des Verformungsverhaltens bei Feuchtigkeitsänderungen.....	58
Abbildung 4.2: Projektschema zur Nachmodellierung der experimentellen Untersuchungen der Prüfkörperserie M-1 .....	59
Abbildung 4.3: Generiertes Netz der Serie M-1 für die Berechnungen in Kapitel 4.2 und 5.2.....	60
Abbildung 4.4: Feinmaschige Vernetzung in der Decklage der Serie M-1.....	61
Abbildung 4.5: Berechnete Holzfeuchtigkeitsverteilung in [%] der Prüfkörperserie M-1 am 06.05.2020 als Ausgangssituation.....	64
Abbildung 4.6: Berechnete Holzfeuchtigkeitsverteilung in [%] der Prüfkörperserie M-2 am 18.06.2020, dem Ende der Phase 1 .....	65

Abbildung 4.7: Berechnete Verformung in z-Richtung in [mm] (23-fache Überhöhung) des freien Prüfkörpers der Serie M-2 am 23.09.2020, dem Ende der dritten Phase .....	66
Abbildung 4.8: Berechnete Holzfeuchtigkeit b über den Querschnitt der Serie M-1 im Vergleich zu den Messungen m der experimentellen Untersuchungen zum Ende der Phasen 1, 3 und 5.....	67
Abbildung 4.9: Vergleich der FE-Berechnungen b mit den Messergebnissen m der Serie M-1 in den Tiefen 15, 25, 45 und 70 mm.....	68
Abbildung 4.10: Berechnete Holzfeuchtigkeit b über den Querschnitt der Serie M-1 im Vergleich zu den Messungen m der experimentellen Untersuchungen zum Ende der Phasen 1, 3 und 5.....	69
Abbildung 4.11: Vergleich der FE-Berechnungen b mit den Messergebnissen m der Serie M-2 in den Tiefen 15, 25, 45 und 70 mm.....	70
Abbildung 4.12: Berechnete Holzfeuchtigkeit b über den Querschnitt der Serie M-3 im Vergleich zu den Messungen m der experimentellen Untersuchungen zum Ende der Phasen 1, 3 und 5.....	71
Abbildung 4.13: Vergleich der FE-Berechnungen b mit den Messergebnissen m der Serie M-3 in den Tiefen 15, 25, 45 und 70 mm.....	72
Abbildung 4.14: Berechnete Holzfeuchtigkeit b über den Querschnitt der Serie M-4 im Vergleich zu den Messungen m der experimentellen Untersuchungen zum Ende der Phasen 1, 3 und 5.....	73
Abbildung 4.15: Vergleich der FE-Berechnungen b mit den Messergebnissen m der Serie M-4 in den Tiefen 15, 25, 45 und 70 mm.....	74
Abbildung 4.16: Berechnete Holzfeuchtigkeit b über den Querschnitt der Serie M-5 im Vergleich zu den Messungen m der experimentellen Untersuchungen zum Ende der Phasen 1, 3 und 5.....	75
Abbildung 4.17: Vergleich der FE-Berechnungen b mit den Messergebnissen m der Serie M-5 in den Tiefen 15, 25, 45 und 70 mm.....	76
Abbildung 4.18: Berechnete Holzfeuchtigkeit b über den Querschnitt der Serie O-1 im Vergleich zu den Messungen m der experimentellen Untersuchungen zum Ende der Phasen 1, 3 und 5.....	77
Abbildung 4.19: Vergleich der FE-Berechnungen b mit den Messergebnissen m der Serie O-1 in den Tiefen 15, 25, 45 und 70 mm.....	78

Abbildung 4.20: Vergleich der Verformungsberechnungen $b$ mit den Messergebnissen $w$ der Serie M-1 für den freien (oben) und gehinderten (unten) Prüfkörper .....	79
Abbildung 4.21: Vergleich der Verformungsberechnungen $b$ mit den Messergebnissen $w$ der Serie M-2 für den freien (oben) und gehinderten (unten) Prüfkörper .....	80
Abbildung 4.22: Vergleich der Verformungsberechnungen $b$ mit den Messergebnissen $w$ der Serie M-3 für den freien (oben) und gehinderten (unten) Prüfkörper .....	81
Abbildung 4.23: Vergleich der Verformungsberechnungen $b$ mit den Messergebnissen $w$ der Serie M-4 für den freien (oben) und gehinderten (unten) Prüfkörper .....	82
Abbildung 4.24: Vergleich der Verformungsberechnungen $b$ mit den Messergebnissen $w$ der Serie M-5 für den freien (oben) und gehinderten (unten) Prüfkörper .....	83
Abbildung 4.25: Vergleich der Verformungsberechnungen $b$ mit den Messergebnissen $w$ der Serie O-1 für den freien (oben) und gehinderten (unten) Prüfkörper .....	84
Abbildung 4.26: Berechnete Zugspannungen der Serie M-1 am 21.08.2020 über die Breite des Prüfkörpers; mit farblicher Markierung der Luftkanäle sowie der Querkzugfestigkeit .....	85
Abbildung 4.27: Berechnete Zugspannungen der Serie M-2 am 10.08.2020 ( $\sigma_{t,90}$ ) und 14.08.2020 ( $\sigma_{t,90}$ (V)) über die Breite des Prüfkörpers; mit farblicher Markierung der Luftkanäle sowie der Querkzugfestigkeit .....	86
Abbildung 4.28: Berechnete Zugspannungen der Serie M-3 am 23.09.2020 über die Höhe des Prüfkörpers; mit Markierung der Querkzugfestigkeit .....	87
Abbildung 4.29: Berechnete Zugspannungen der Serie M-4 am 05.08.2020 über die Breite des Prüfkörpers; mit farblicher Markierung der Luftkanäle sowie der Querkzugfestigkeit .....	87
Abbildung 4.30: Berechnete Zugspannungen der Serie M-5 am 10.08.2020 über die Breite des Prüfkörpers; mit farblicher Markierung der Luftkanäle sowie der Querkzugfestigkeit .....	88
Abbildung 4.31: Berechnete Zugspannungen der Serie O-1 am 23.09.2020 über die Breite des Prüfkörpers; mit Markierung der Querkzugfestigkeit .....	89
Abbildung 5.1: Berechnete Feuchtigkeitsverteilung über die Querschnittstiefe der Serien M-1 (oben) und M-2 (unten) am Ende der Phasen 6 bis 11 .....	94
Abbildung 5.2: Berechnete Feuchtigkeitsverteilung über die Querschnittstiefe der Serien M-3 (oben) und M-5 (unten) am Ende der Phasen 6 bis 11 .....	95

Abbildung 5.3: Feuchtigkeitsverlauf in den verschiedenen Lagen der Serien M-1, M-2, M-3 und M-5 über die Phasen 6 bis 11 .....	96
Abbildung 5.4: Ergebnisse der Verformungsberechnungen für den freien und gehinderten Prüfkörper der Serie M-1 in den Phasen 6 bis 11 .....	98
Abbildung 5.5: Ergebnisse der FE-Berechnungen für das freie ( $b_{z2}$ ) und gehinderte ( $b_{z2}$ (V)) Prüfkörperverhalten der Serie M-2 in den Phasen 6 bis 11 .....	98
Abbildung 5.6: Ergebnisse der FE-Berechnungen für das freie ( $b_{z2}$ ) und gehinderte ( $b_{z2}$ (V)) Prüfkörperverhalten der Serie M-3 in den Phasen 6 bis 11 .....	99
Abbildung 5.7: Doppelt gekrümmter Prüfkörper der Serie M-3 am Ende der Phase 6 (links) und der Phase 9 (rechts) (60-fache Überhöhung) .....	100
Abbildung 5.8: Ergebnisse der FE-Berechnungen für das freie ( $b_{z2}$ ) und gehinderte ( $b_{z2}$ (V)) Prüfkörperverhalten der Serie M-5 in den Phasen 6 bis 11 .....	100
Abbildung 5.9: Definition der Außen- und Innenseite der Decklage am Ausschnitt des Modells .....	101
Abbildung 5.10: Maximale Spannungen der freien und gehinderten Prüfkörper der Serie M-1 in den Phasen 6, 8 und 10 an der Außenseite (oben) und Innenseite (unten) der Decklage; mit farblicher Markierungen der Luftkanäle sowie der Querkzugfestigkeit .....	102
Abbildung 5.11: Maximale Spannungen der freien und gehinderten Prüfkörper der Serie M-2 in den Phasen 6, 8 und 10 an der Außenseite (oben) und Innenseite (unten) der Decklage; mit farblicher Markierungen der Luftkanäle sowie der Querkzugfestigkeit .....	103
Abbildung 5.12: Maximale Spannungen der freien und gehinderten Prüfkörper der Serie M-3 in den Phasen 6, 8 und 10 an der Außenseite (oben) und Innenseite (unten) der Decklage; mit farblicher Markierungen der Luftkanäle sowie der Querkzugfestigkeit .....	104
Abbildung 5.13: Maximale Spannungen der freien und gehinderten Prüfkörper der Serie M-5 in den Phasen 6, 8 und 10 an der Außenseite (oben) und Innenseite (unten) der Decklage; mit farblicher Markierungen der Luftkanäle sowie der Querkzugfestigkeit .....	105

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Vor- und Nachteile von thermisch aktivierten Bauteilen als Heizkörper (Binsfeld, 2019) .....	12
Tabelle 2.1: Funktionen der Holzzellen in Nadel- und Laubhölzern (Wagenführ, 1999) .....	16
Tabelle 2.2: Gegenüberstellung der mathematischen Beschreibung von Wärmeleitung und Diffusion (Schaffrath, 2015).....	25
Tabelle 3.1: Die fünf klimatischen Phasen der experimentellen Untersuchung .....	42
Tabelle 4.1: Durchschnitt der absoluten Fehler bei der Berechnung der Feuchtigkeitsverteilung in [%].....	89
Tabelle 4.2: Durchschnitt der absoluten Fehler bei der Verformungsberechnung in [mm] .....	90
Tabelle 4.3: Vergleich der Rissbildung im praktischen Versuch mit den Ergebnissen der FE-Berechnung .....	91
Tabelle 5.1: Untersuchte klimatische Bedingungen im Raum und in den Luftkanälen, sowie die daraus resultierenden Ausgleichsfeuchtigkeiten.....	93
Tabelle 5.2: Abgeleitete Rissbildung für die Heizphasen 6, 8 und 10 an der Außen- und Innenseite der Decklage .....	106

## 10 Anhang

*Tabelle A.1: Auflistung der durchgeführten Messungen während des Versuches*

Datum	Tage seit Beginn	Laufende Phase	Messungen
06.05.2020	0	1	Holzfeuchtigkeit
25.05.2020	19	1	Holzfeuchtigkeit
10.06.2020	35	1	Holzfeuchtigkeit
18.06.2020	43	1	Holzfeuchtigkeit
23.06.2020	48	2	Holzfeuchtigkeit
03.07.2020	58	2	Holzfeuchtigkeit
10.07.2020	65	2	Holzfeuchtigkeit
20.07.2020	75	2	Holzfeuchtigkeit
28.07.2020	83	2	Holzfeuchtigkeit & Verformung
03.08.2020	89	3	Holzfeuchtigkeit & Verformung
05.08.2020	91	3	Holzfeuchtigkeit & Verformung
07.08.2020	93	3	Holzfeuchtigkeit & Verformung
10.08.2020	96	3	Holzfeuchtigkeit & Verformung
12.08.2020	98	3	Holzfeuchtigkeit & Verformung
14.08.2020	100	3	Holzfeuchtigkeit & Verformung
17.08.2020	103	3	Holzfeuchtigkeit & Verformung
21.08.2020	107	3	Holzfeuchtigkeit & Verformung
24.08.2020	110	3	Holzfeuchtigkeit & Verformung
26.08.2020	112	3	Holzfeuchtigkeit & Verformung
04.09.2020	121	3	Holzfeuchtigkeit
07.09.2020	124	3	Holzfeuchtigkeit & Verformung
11.09.2020	128	3	Holzfeuchtigkeit & Verformung
14.09.2020	131	3	Holzfeuchtigkeit & Verformung
18.09.2020	135	3	Holzfeuchtigkeit
21.09.2020	138	3	Holzfeuchtigkeit & Verformung
23.09.2020	140	4	Holzfeuchtigkeit, Verformung & Risse
30.09.2020	147	4	Holzfeuchtigkeit & Verformung
12.10.2020	159	4	Holzfeuchtigkeit & Verformung
28.10.2020	175	5	Holzfeuchtigkeit & Verformung
15.11.2020	193	5	Holzfeuchtigkeit & Verformung
30.11.2020	208	5	Holzfeuchtigkeit & Verformung



Tabelle A.2: Materialkennwerte für Fichte und Weißtanne

Eigenschaft in ANSYS	Wert	Einheit
Rohdichte	453,6 <sup>a</sup>	kg/m <sup>3</sup>
Spezifische Wärmekapazität	1.500 <sup>b</sup>	Ws/kgK
Koeffizient der thermischen Ausdehnung in x-Richtung	0,0001 <sup>c</sup>	1/°C
Koeffizient der thermischen Ausdehnung in y-Richtung	0,0025 <sup>c</sup>	1/°C
Koeffizient der thermischen Ausdehnung in z-Richtung	0,0025 <sup>c</sup>	1/°C
Elastizitätsmodul in x-Richtung	10.000 <sup>c</sup>	MPa
Elastizitätsmodul in y-Richtung	800 <sup>c</sup>	MPa
Elastizitätsmodul in z-Richtung	450 <sup>c</sup>	MPa
Schubmodul in xy-Richtung	600 <sup>c</sup>	MPa
Schubmodul in yz-Richtung	40 <sup>c</sup>	MPa
Schubmodul in xz-Richtung	650 <sup>c</sup>	MPa
Querkontraktionszahl der xy-Fläche <sup>d</sup>	2,70E-05 <sup>c</sup>	-
Querkontraktionszahl der yz-Fläche <sup>d</sup>	6,00E-04 <sup>c</sup>	-
Querkontraktionszahl der xz-Fläche <sup>d</sup>	3,30E-05 <sup>c</sup>	-
<p>a Kennwert nach (Arnold et al., 2021) als Mittelwert aller untersuchten Prüfkörper                      b Kennwert nach (Neroth &amp; Vollenschaar, 2011)                      c Kennwert nach (Neuhaus, 2017)                      d Für die Querkontraktionszahlen gilt für Holz im Allgemeinen <math>\nu_{xy} = \nu_{yx}</math> nicht, wird jedoch aufgrund der Vorgaben von ANSYS Workbench vereinfacht angenommen</p>		

Tabelle A.3: Materialkennwerte für dreilagige Massivholzplatten SWP/3

Eigenschaft in ANSYS	Wert	Einheit
Rohdichte	453,6 <sup>a</sup>	kg/m <sup>3</sup>
Spezifische Wärmekapazität	1.500 <sup>b</sup>	Ws/kgK
Koeffizient der thermischen Ausdehnung in x-Richtung	0,0002 <sup>c</sup>	1/°C
Koeffizient der thermischen Ausdehnung in y-Richtung	0,0002 <sup>c</sup>	1/°C
Koeffizient der thermischen Ausdehnung in z-Richtung	0,0025 <sup>c</sup>	1/°C
Elastizitätsmodul in x-Richtung	8.500	MPa
Elastizitätsmodul in y-Richtung	370	MPa
Elastizitätsmodul in z-Richtung	370	MPa
Schubmodul in xy-Richtung	690	MPa
Schubmodul in yz-Richtung	50	MPa
Schubmodul in xz-Richtung	450	MPa
Querkontraktionszahl der xy-Fläche <sup>d</sup>	2,70E-05 <sup>e</sup>	-
Querkontraktionszahl der yz-Fläche <sup>d</sup>	6,00E-04 <sup>e</sup>	-
Querkontraktionszahl der xz-Fläche <sup>d</sup>	3,30E-05 <sup>e</sup>	-
<p>a Kennwert nach (Arnold et al., 2021) als Mittelwert aller untersuchten Prüfkörper                      b Kennwert nach (Neroth &amp; Vollenschaar, 2011), übernommen von Vollholz                      c Kennwert nach (Neuhaus, 2017)                      d Für die Querkontraktionszahlen gilt für Holz im Allgemeinen <math>\alpha_{xy} = \alpha_{yx}</math> nicht, wird jedoch aufgrund der Vorgaben von ANSYS Workbench vereinfacht angenommen                      e Angenommener Kennwert wie Fichte, da keine Literaturwerte vorhanden</p>		

Tabelle A.4: Materialkennwerte für 1K-PUR-Klebstoff

Eigenschaft in ANSYS	Wert	Einheit
Rohdichte	1.150 <sup>a</sup>	kg/m <sup>3</sup>
Spezifische Wärmekapazität	1.000 <sup>b</sup>	Ws/kgK
Koeffizient der thermischen Ausdehnung	0,0 <sup>b</sup>	1/°C
Elastizitätsmodul	5.000 <sup>b</sup>	MPa
Schubmodul	2.300 <sup>b</sup>	MPa
Querkontraktionszahl	0,1 <sup>b</sup>	-
a Kennwert nach (Jowat SE, 2020) b Angenommener Kennwert für Klebstoffdicke von 1,0 mm, der bei Berechnungen zu akzeptablen Ergebnissen führt		

Tabelle A.5: Maximaler Stich der Krümmung [mm] in den Phasen 6 bis 11

Verformung [mm]	Phase 6	Phase 7	Phase 8	Phase 9	Phase 10	Phase 11
Serie M-1 $b_{z2}$	2,18	-1,04	3,78	-2,15	3,22	-2,72
Serie M-1 $b_{z2}$ (V)	0,56	-0,28	0,96	-0,58	0,84	-0,75
Serie M-2 $b_{z2}$	0,42	-0,26	0,71	-0,53	0,62	-0,64
Serie M-2 $b_{z2}$ (V)	0,22	-0,14	0,37	-0,28	0,31	-0,31
Serie M-3 $b_{z2}$	0,26	-0,63	0,27	-1,23	0,07	-0,92
Serie M-3 $b_{z2}$ (V)	0,15	-0,24	0,22	-0,47	0,09	-0,35
Serie M-5 $b_{z2}$	0,38	-0,18	0,64	-0,38	0,42	-0,42
Serie M-5 $b_{z2}$ (V)	0,23	-0,11	0,39	-0,24	0,26	-0,25

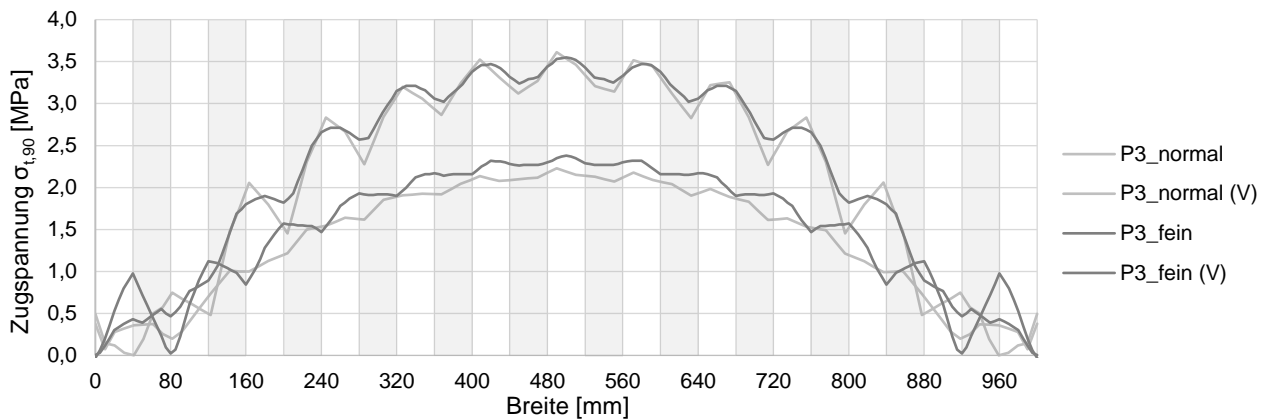


Abbildung A.1: Vergleich der berechneten Spannungen der Serie M-1 zwischen dem normalen und dem feinen Netz in der Phase 3

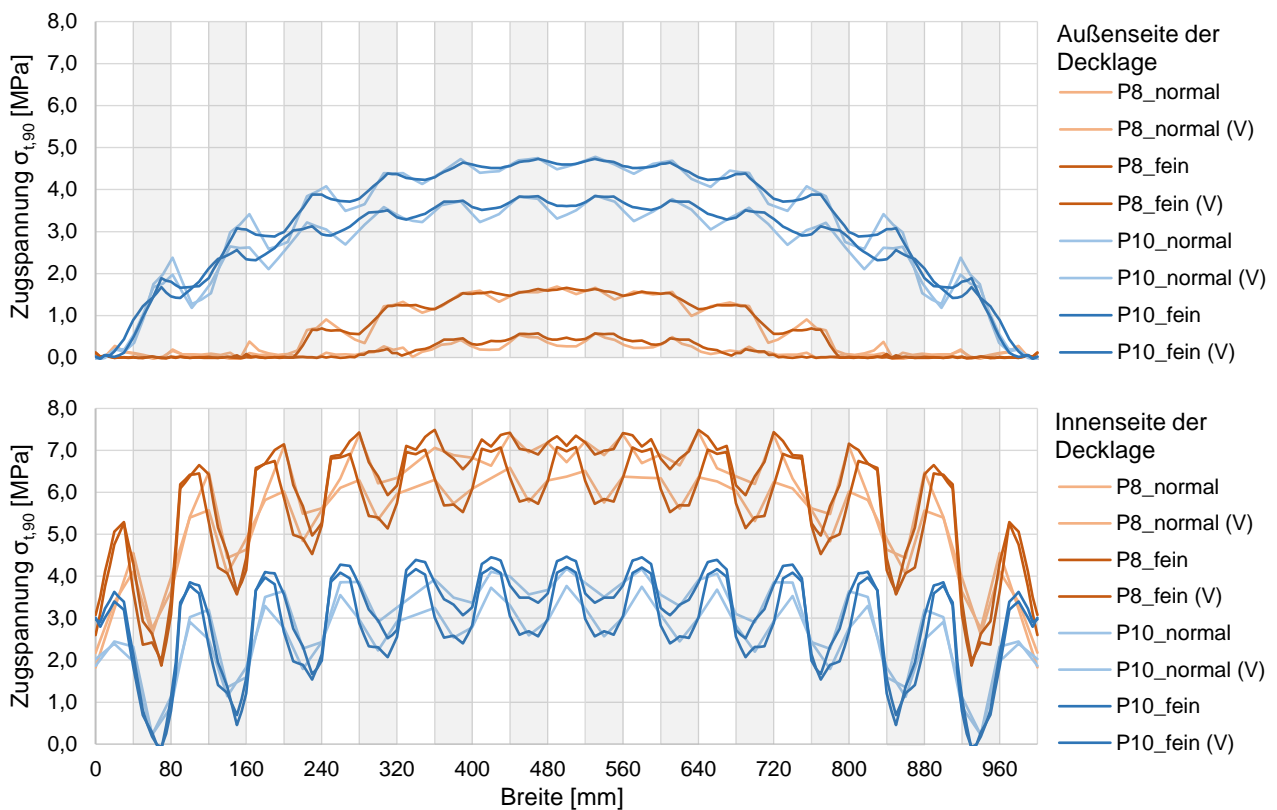


Abbildung A.2: Vergleich der berechneten Spannungen der Serie M-1 zwischen dem normalen und dem feinen Netz in der Phase 8 und 10