

# Untersuchung der Feuchteausbreitung in und auf Holzbauteilen

Rechnergestützte Simulationen und Vergleich mit praktischen Versuchen

---

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades **Master of Science** an der  
Ingenieur fakultät 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>Betreuer</b>	Dr.-Ing. Patrik Aondio Dipl.-Ing. Stephan Ott
<b>Eingereicht von</b>	Mathias Jagdhuber Matrikelnummer: 03682168
<b>Eingereicht am</b>	11. Juli 2022, in München

## Kurzfassung „Untersuchung der Feuchteausbreitung in und auf Holzbauteilen“

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Feuchtetransportverhalten von Wasser in und auf Holzbauteilen. Die Hauptaufgabe ist dabei, mit Hilfe von Simulationen das potenzielle Schadensbild von auf einer Holzplatte auftreffenden Wassertropfen zu visualisieren und die daraus hervorgehende mögliche Feuchteausbreitung zu untersuchen. Der Feuchtetransport wird dabei über den kompletten Holzfeuchtebereich hinweg als diffusives Phänomen betrachtet. Eine Literaturrecherche zu Beginn erläutert den Stand der Forschung bezüglich der Feuchtigkeit und deren Aufnahme in Holz sowie die Feuchtetransportvorgänge innerhalb der Holzstruktur. Es werden verschiedene der Literatur entnommene Wasseraufnahmekoeffizienten, Diffusionskoeffizienten und Oberflächenemissionskoeffizienten herausgearbeitet. Mit diesen werden insgesamt drei Simulationsreihen mit den maximalen, medialen und minimalen Diffusionskoeffizienten durchgeführt, wobei pro Simulationsreihe der Oberflächenemissionskoeffizient jeweils maximal, minimal und als zu vernachlässigend betrachtet wird. Als Software für die FEM – Berechnungen wird das Programm *Ansys* verwendet, in dem die Diffusion mit Hilfe der instationären Wärmeleitung dargestellt wird. Im Anschluss fungieren zwei praktische Versuchsdurchführungen mit eingefärbtem Wasser als Validierung, deren Applikabilität hinsichtlich der Simulationsergebnisse aufgrund einer ausbleibenden, transversalen Eindringtiefe der Farbstoffe diskutiert wird. Von baupraktischer Relevanz ist dabei die Beobachtung des rapiden Ausbreitens von Feuchte entlang nicht schmalseitenverklebter Fugen und der beobachtbare Einzug in das Hirnholz. Unter Berücksichtigung der einzelnen Simulationsergebnisse ist festzuhalten, dass die vorliegenden Literaturwerte des Diffusionskoeffizienten zu stark schwanken bzw. unzureichende wissenschaftliche Kenntnis über den Feuchtetransport in Holz vorhanden ist, als dass Vorhersagen über ein tatsächlich auftretendes Ausbreitverhalten getroffen werden könnten.

## **Abstract “Investigation of the moisture transport behavior in and on wooden components”**

The present work deals with the moisture transport behavior of water on and in wooden components. The main task is to visualize the potential damage caused by the impact of water droplets on a wooden panel using computer – based simulations and to investigate the resulting possible spread of moisture. Moisture transport is considered as a diffusive phenomenon over the entire wood moisture range. An introductory literature review explains the state of the art regarding moisture in wood and its uptake as well as moisture transport processes within the wood structure. Various water absorption coefficients, diffusion coefficients and surface emission coefficients from the literature are elaborated. With these, a total of three simulation series are carried out with the maximum, average and minimum diffusion coefficients, and varying considerations regarding the surface emission coefficient as maximum, minimum and negligible for each simulation series. The software used for the FEM calculations is *Ansys*, in which diffusion is represented using transient heat conduction. Subsequently, two practical test series with dyed water are used for validation. Their applicability is limited compared to the simulation results due to a lack of transversal penetration of the dyes and will be discussed. The observation of the rapid spread of moisture along joints that are not narrowly glued and the observable penetration into the end grain are of practical relevance. Considering simulation results, it must be stated that the available literature values of the diffusion coefficient vary too much and that there is insufficient scientific knowledge about moisture transport in wood to make predictions about the actual spreading behavior of moisture.

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung „Untersuchung der Feuchteausbreitung in und auf Holzbauteilen“ .....	ii
Abstract “Investigation of the moisture transport behavior in and on wooden components” .....	iii
Inhaltsverzeichnis .....	iv
Symbole und Abkürzungen .....	1
1 Einleitung.....	3
1.1 Motivation und Zielsetzung .....	3
1.2 Methodische Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit.....	4
2 Stand der Wissenschaft.....	5
2.1 Werkstoff Holz – Aufbau und Eigenschaften.....	5
2.2 Feuchtigkeit im Holz und deren Aufnahme .....	7
2.2.1 Grundlagen der Holzfeuchte .....	7
2.2.2 Sorption und die Bindungsformen des Wassers im Holz.....	9
2.2.3 Kapillare Aufnahme von flüssigem Wasser .....	12
2.3 Feuchtetransportvorgänge im Holz.....	16
2.3.1 Allgemeines zum Feuchtetransport und zum Diffusionskoeffizienten.....	16
2.3.2 Diffusion im hygroscopischen Bereich .....	22
2.3.3 Diffusion im überhygroscopischen Bereich .....	25
2.3.4 Einfluss der Umgebungsbedingungen – Oberflächenemissionskoeffizient.....	30
2.3.5 Feuchtetransportkoeffizienten in der Literatur .....	33
3 Rechnerbasierte Simulationen mittels der Software ANSYS.....	40
3.1 Methodik.....	40
3.1.1 Analogie der Feuchtediffusion und der Wärmeleitung.....	40
3.1.2 Modellierung der Fragestellung .....	41

3.1.3	Struktur der Simulationen und Eingabeparameter in der <i>Ansys Workbench</i> .....	45
3.2	Simulationsergebnisse .....	47
3.2.1	Einfluss der Schwankungen des Diffusionskoeffizienten unter Vernachlässigung des Oberflächenemissionskoeffizienten.....	47
3.2.2	Einfluss der Schwankungen von Diffusionskoeffizient und Oberflächenemissionskoeffizient .....	49
3.3	Diskussion der Simulationsergebnisse .....	51
3.3.1	Abweichungen zwischen den Simulationen .....	51
3.3.2	Qualität und Kritik an den Simulationen .....	52
4	Praktische Versuchsdurchführungen .....	56
4.1	Tropfversuch I mit Tinte .....	56
4.1.1	Methodik Tropfversuch I .....	56
4.1.2	Versuchsergebnisse Tropfversuch I.....	57
4.1.3	Schlussfolgerung aus den Ergebnissen des Tropfversuchs I .....	62
4.2	Exkurs: Suche nach eindringendem Farbstoff .....	63
4.2.1	Methodik zur Farbfindung .....	63
4.2.2	Versuchsergebnisse und Schlussfolgerung .....	64
4.3	Tropfversuch II mit Beize .....	67
4.3.1	Optimierte Methodik Tropfversuch II .....	67
4.3.2	Versuchsergebnisse Tropfversuch II.....	67
5	Diskussion der Versuchsergebnisse im Vergleich mit den Resultaten der rechnerbasierten Simulationen .....	73
6	Fazit und Ausblick .....	80
7	Literaturverzeichnis .....	82
8	Abbildungsverzeichnis .....	92
9	Tabellenverzeichnis .....	95

10 Anhang.....	96
10.1 Beispielhafte Zwischenergebnisse einer Feuchtesimulation .....	96
10.2 Anhänge zu den praktischen Versuchsdurchführungen.....	97
10.2.1 Tropfversuch I mit Tinte .....	97
10.2.2 Tropfversuch II mit Beize .....	101
Eidesstattliche Erklärung.....	105

## Symbole und Abkürzungen

### Große lateinische Buchstaben

$A$	Querschnittsfläche des Probekörpers	$m^2$
$A_W$	Wasseraufnahmekoeffizient	$kg/(m^2 \cdot s^{0.5})$
$A_{nass}$	Nasse Wasserfläche	$m^2$
$D$	Diffusionskoeffizient	$m^2/s$
$D'$	Scheinbarer Diffusionskoeffizient	$m^2/s$
$K$	Spezifische Permeabilität	$m^3/m$
$N$	Anzahl der kreisförmigen, parallelen Kapillaren	-
$Q$	Volumenstrom durch die Kapillaren	$m^3/s$
$S$	Oberflächenemissionskoeffizient	$m/s$

### Kleine lateinische Buchstaben

$c$	Feuchtekonzentration	$kg/m^3$
$g$	Diffusionsstromdichte	$kg/(m^2 \cdot s)$
$l$	Länge in Fließrichtung	$m$
$m$	Masse	$kg$
$m_{dtr}$	Masse des darrtrockenen Holzes mit $u = 0\%$	$kg$
$\Delta m'_0$	Durch die Gerade extrapolierter Schnittpunkt der Ordinate	$kg/m^2$
$\Delta m'_{t_f}$	Flächenbezogene Massenzunahme bis zum Zeitpunkt $t_f$	$kg/m^2$
$p$	Druck	$Pa$
$m_u$	Masse des feuchten Holzes	$kg$
$r$	Innenradius der Kapillare	$m$
$r_0$	Rohdichte im Darrzustand	$kg/m^3$
$t$	Zeit	$s$
$t_f$	Prüfdauer	$s$
$u$	Holzfeuchte	Massen-%
$u_{eq}$	Ausgleichsfeuchte	Massen-%
$u_F$	Holzfeuchtegehalt des Fasersättigungspunktes	Massen-%
$u_{max}$	Maximal möglicher Holzfeuchtegehalt	Massen-%
$u_S(t)$	Oberflächenholzfeuchte zum Zeitpunkt $t$	Massen-%
$x$	Weglänge	$m$

### Griechische Buchstaben

$\lambda$	<i>Wärmeleitfähigkeit</i>	<i>W/mK</i>
$\partial$	<i>Partielles Differential</i>	-
$\eta$	<i>Dynamische Viskosität der Flüssigkeit</i>	<i>Pa·s</i>

### Abkürzungen

<i>Abb.</i>	<i>Abbildung</i>
<i>BSP</i>	<i>Brettsperrholz</i>
<i>bspw.</i>	<i>beispielsweise</i>
<i>bzw.</i>	<i>beziehungsweise</i>
<i>FEM</i>	<i>Finite – Elemente – Methode</i>
<i>inkl.</i>	<i>inklusive</i>
<i>vgl.</i>	<i>vergleiche</i>

### Mathematische Operatoren

$\emptyset$	<i>Durchschnitt</i>
-------------	---------------------

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Zielsetzung

In Zeiten, in denen die Folgen des Klimawandels immer deutlicher zu spüren sind, muss der unaufhaltsamen Erderwärmung entgegengewirkt werden. Zentraler Punkt hierbei ist insbesondere die Einsparung von Treibhausgasen (Umweltbundesamt, 2019). Im Bauwesen kann allein durch die Substitution der Baumaterialien eine erhebliche Reduktion umweltschädlicher Treibhausgase erreicht werden. Wenn beispielsweise anstelle mineralischer Baustoffe Holz für die Gebäudekonstruktion verwendet wird, können auf diese Weise bei Errichtung und Abriss bis zu 56% an Emissionen eingespart werden (Hafner et al., 2017). Dementsprechend ist es nicht verwunderlich, dass der prozentuale Anteil an Wohngebäuden in Holzbauweise in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen ist und inzwischen sogar in etwa jede fünfte Baugenehmigung als solche angetragen wird (Statistisches Bundesamt, 2021). Der in Holz gebaute Bestand steigt infolgedessen kontinuierlich an und in Konsequenz dazu auch die Anzahl der (Bestands-)Schäden in Holzbauten.

Zu diesen Schäden gehören unter anderem Wasserschäden, welche zu den problematischsten Schadensfällen in einem Holzhaus zählen. Deshalb sollten solche Schadensbilder und die damit einhergehenden Konsequenzen genauer untersucht werden, um in Zukunft sowohl die Untersuchungskosten mit Hilfe theoretischer Abschätzungen minimieren zu können als auch eine aus praktischer und ökologischer Sicht ressourcenschonende Sanierung zu ermöglichen. Von einer beschädigten Fußbodenheizung, über Undichtigkeiten im Dachaufbau oder leckenden Rohren, kann es vielfältige Gründe für Wasserschäden geben. Da viele Schäden nicht sofort sichtbar sind und erst nach einiger Zeit entdeckt werden, wenn beispielsweise bereits Schimmel an den Wänden oder Decken auftritt, sind oftmals großflächige Sanierungen notwendig. Vor Ort können erfahrene Sachverständige inzwischen sehr gut feststellen, welche Holzbauteile ausgetauscht werden müssen und welche noch ausreichend tragfähig bzw. gebrauchstauglich sind. In der Theorie hingegen können solche Fragestellungen zur Ausbreitung der Holzfeuchte noch nicht präzise beantwortet werden. Zur exakten theoretischen Simulation solcher Wasserschäden bedarf es noch weiterer Forschung. Der Bereich der Holzphysik benötigt noch eindeutige Materialparameter, wie beispielsweise genaue Kennwerte zum Feuchtetransport (Niemz & Sonderegger, 2021). Die aus bisherigen Untersuchungen erhaltenen Werte der Feuchtetransportkoeffizienten weisen teils noch große Unterschiede auf (Schaffrath, 2015; Sonderegger, 2011). Selbst für Probekörper der gleichen Holzart können vermutlich nie die gleichen Feuchtetransportkoeffizienten bestimmt werden, da Holz als natürlich gewachsener Rohstoff aufgrund seiner Inhomogenität ohnehin nie die gleichen Ausbreitungseigenschaften aufweisen wird. Es stellt sich jedoch die Frage, wie relevant diese Abweichungen in Fällen der Simulation solcher Wasserschäden sind und in welchem Umfang solche Szenarien modellierbar sind. Das Ziel der Arbeit ist es deshalb, mittels einer rechnergestützten Simulation das Ausbreitungsverhalten von Feuchte in einem Bauteil aus Holz zu modellieren und sich anhand von praktischen Versuchen ein Bild davon zu machen, wie beispielsweise das Schadensbild einer auf eine Holzplatte tropfendes Wasser aus einer undichten Haustechnikinstallation aussehen könnte. Anschließend werden die Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen der Versuchsdurchführungen verglichen.

## 1.2 Methodische Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit stellt einen Tastversuch dar, in dem das Szenario eines undichten und tropfenden Haustechnikanschlusses nachgeahmt wird. Eine defekte Dichtung lässt Wasseraustritt aus einem Rohr zu, welches folglich zu tropfen beginnt. In festgelegten, gleichbleibenden Abständen tritt eine bestimmte Menge an Wasser aus der leckenden Stelle. Vereinfachend soll das Wasser idealisiert als Kreisform auf der Holzoberfläche auftreffen, ohne zu zerstäuben. Nach dem Aufprall adsorbiert der kapillaraktive und hygroskopische Baustoff die Tropfen und gibt sie ins Bauteil weiter. Mittels rechnerbasierter Simulationen unter Verwendung der Finiten – Elemente – Methode (FEM) und anhand von praktischen Versuchen wird die zeitliche Entwicklung der Feuchteausbreitung auf und innerhalb der Konstruktion modelliert und abgeschätzt, um einen Anhaltswert davon zu bekommen, wie sich die Wassermoleküle in und auf Holzbauteilen ausbreiten könnten.

Behandelt werden im Allgemeinen Nadelhölzer und insbesondere die *Gewöhnliche Fichte (Picea abies)*, da sie aus forstwirtschaftlicher Sicht die wichtigste Baumart Mitteleuropas ist (Aas, 2017) und die im Massivbau traditionell verwendete Holzart für den Innenausbau darstellt (Richter & Ehmcke, 2017). Zusätzlich ist sie durch ihre als Nadelholz typische Homogenität (Richter & Ehmcke, 2017) exakter zu beschreiben, was letztendlich zu weniger Modellabweichung und dadurch zu einem realitätsgetreueren Simulationsergebnis führt.

Die Arbeit ist insgesamt in drei Blöcke unterteilt. Zu Beginn der Arbeit werden die theoretischen Grundlagen erläutert. Eine umfangreiche Literaturrecherche fasst den bisherigen Forschungsstand zum Thema diffusiver Feuchtetransport in Holzbauteilen zusammen. Informationen zur Ausbreitung und mathematische Hintergründe des wissenschaftlichen Standes werden ausgiebig erläutert. Der zweite Teil der Thesis wird den Simulationen gewidmet. Darin wird zuerst auf die Methodik des Modells eingegangen, wobei die Grenzen, die Annahmen und die verwendeten Materialparameter beschrieben werden. Anschließend werden die Ergebnisse präsentiert und diskutiert. Es wird auf mögliche Fehler und Abweichungen der verschiedenen FEM – Berechnungen untereinander eingegangen und die Aussagekraft des Modells besprochen. Um die Simulationen zu validieren und deren Richtigkeit abzuschätzen, werden im dritten Block zwei praktische Tropfversuche durchgeführt. Hierbei wird eine Holzplatte mit einem Infusionssystem über 24 Stunden mit Tropfen beaufschlagt und daraufhin das Verhalten des Wassers auf und im Holzbauteil untersucht. Dabei werden im ersten Versuch ein Tinte – Wasser – Gemisch und im zweiten Versuch eine in Wasser gelöste Pulverbeize verwendet. Zusätzlich wird mittels einer Webcam die Versuchsdurchführung aufgezeichnet, um damit weitere Rückschlüsse auf das Zusammenspiel von Holz und Wasser ziehen zu können. Daraufhin werden die Ergebnisse der praktischen Versuche untereinander und mit den Simulationsergebnissen verglichen. Zum Schluss wird ein Fazit gezogen und ein Ausblick auf mögliche Erweiterungen der Simulationen sowie sonstige Möglichkeiten der Validierung gegeben.

## 2 Stand der Wissenschaft

### 2.1 Werkstoff Holz – Aufbau und Eigenschaften

Um den Transport von Feuchtigkeit im Holz verstehen zu können, muss zuerst auf den strukturellen Aufbau des Holzes eingegangen werden, da der Feuchtetransport maßgeblich von der Struktur des Holzes beeinflusst wird (Time, 1998). Im Vergleich zu den evolutionär weiterentwickelten Laubhölzern weisen Nadelhölzer einen einfacheren und gleichmäßigeren Aufbau auf. Die Struktur von Holz, welches in seiner Eigenschaft als natürlich gewachsener Rohstoff von Baumart zu Baumart über unterschiedliche Materialeigenschaften verfügt, wird im Allgemeinen in eine Makro- und eine Mikrostruktur unterteilt (Kollmann, 1982). Die Makrostruktur beschreibt dabei diejenigen Elemente, die mit bloßem Auge sichtbar sind, wohingegen die mikroskopischen Bestandteile nur unter einem Mikroskop zu erkennen sind (Niemz & Sonderegger, 2021).

Abbildung 2-1 zeigt jeweils den makroskopischen (links) und den mikroskopischen Aufbau eines Nadelholzes (rechts).

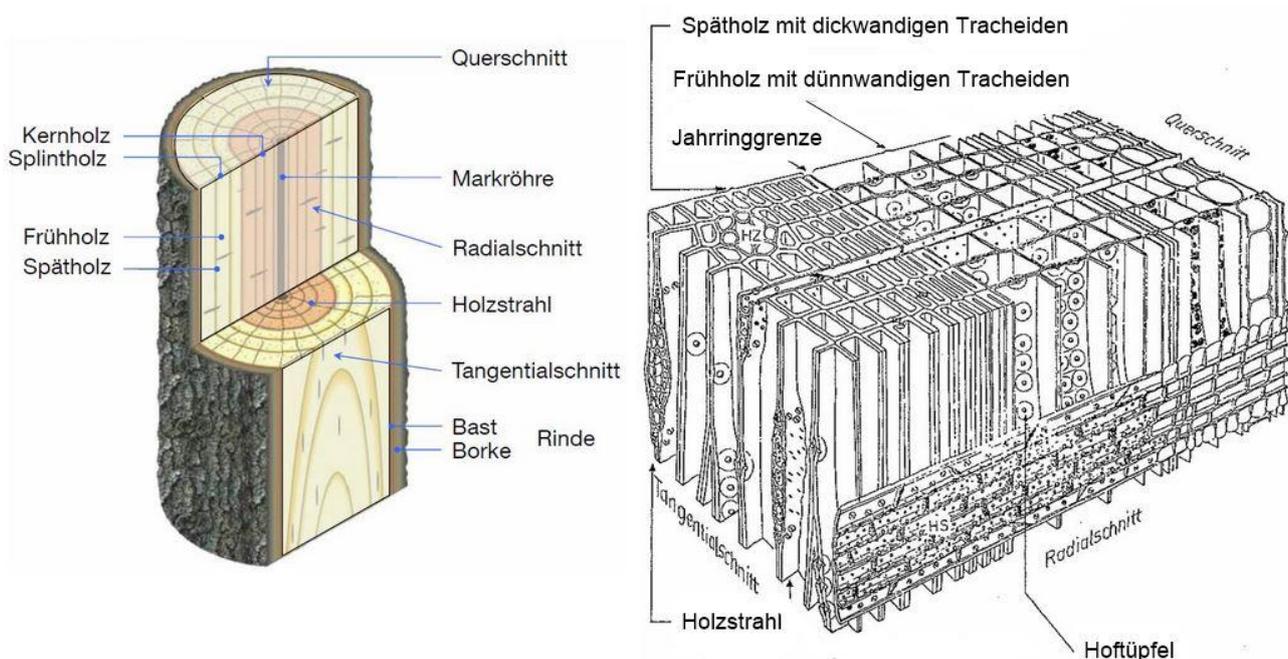


Abbildung 2-1: Links: Makroskopischer Aufbau aus (Winter, 2019); rechts: Mikroskopischer Aufbau nach (Zürcher & Niemz, 2011)

#### Makroskopischer Aufbau:

Bei makroskopischer Betrachtungsweise kann der Werkstoff Holz in die Schichten Rinde, Kambium, Holzmasse und Markröhre gegliedert werden. Das Kambium, das zwischen Rinde und Holzmasse liegt, ist für das Dickenwachstum des Baumes verantwortlich. Die Holzmasse stellt den überwiegenden Teil des Baumes dar und kann wiederum in Kern- und Splintholz unterteilt werden. Das Splintholz ist für die Versorgung des lebenden Baumes zuständig, da der Transport von Wasser und Nährstoffen ausschließlich dort geschieht. Das Kernholz, welches sich je nach Baumart teils durch

seine dunkle Färbung vom Splint absetzt, enthält keine lebenden Zellen mehr. Dort werden Fette und Harze angelagert und man spricht von einer Verkernung des Holzes (Kollmann, 1982).

Ein weiterer wichtiger Bestandteil sind die radial verlaufenden Holzstrahlen, die unter anderem dem Stofftransport dienen. Die primären Holzstrahlen, die auch Markstrahlen genannt werden, verbinden die Markröhre mit der Rinde (vgl. Abbildung (Abb.) 2-1). Erstrecken sie sich nicht über die ganze Länge des Radius, handelt es sich um sekundäre Holzstrahlen (Mindrup, 2019).

Zu den markantesten makroskopischen Eigenschaften zählen die Zuwachszonen bzw. Jahresringe. Durch die klimatischen Verhältnisse und die daraus resultierenden periodischen Aktivitäten über ein Kalenderjahr hinweg entstehen Zellen unterschiedlicher Größe. Zu Beginn der Vegetationsperiode produziert das Kambium zum erfolgreichen Wassertransport Zellen mit großen Hohlräumen und dünnen Zellwänden. Das sogenannte Frühholz erscheint hell im Gegensatz zum dichteren Spätholz, welches sich aufgrund der dicken Zellwände und kleineren Hohlräumen dunkler abzeichnet und entsprechend seiner Eigenschaften zur Festigung des Baumes beiträgt (Neroth & Vollenschaar, 2011).

#### Mikroskopischer Aufbau:

Mikroskopisch betrachtet ist Nadelholz ein Verbund aus unzähligen, röhrenförmigen Zellen. Diese Fasern gleichen hohlen Röhren, welche an beiden Enden geschlossen sind, und werden als Tracheiden bezeichnet (Stamm, 1946). Diese Zellform ist die Urform der Holzzelle und bildet mit bis zu 95 Volumen-% (Vol.-%) das Holz der Nadelbäume. Sie sind mehrere Millimeter lang und haben durchschnittlich ein Verhältnis von Länge zu Durchmesser von circa 100:1 (Kollmann, 1982). Eine Tracheide besteht aus einer Zellwand, der eigentlichen Holzsubstanz und einem Hohlraum, auch Lumen genannt. Der Porenanteil beträgt je nach Rohdichte des Holzes zwischen 50 % und 60 % und die spezifische innere Oberfläche der Fichte kann nach einzelnen Berechnungen mit 179 m<sup>2</sup>/g angegeben werden (Niemz & Sonderegger, 2021).

Der Wassertransport im lebenden Baum erfolgt in den Tracheiden. Diese sind durch Tüpfel, wie in Abbildung 2-2 (links) gezeigt, verbunden, welche ähnlich einem Sicherheitsventil den Wasserdurchlass regeln (Zillig, 2009). Bei der Verkernung des Holzes verklebt die Tüpfelscheibe durch angelagerte Harze und Fette an der Zellwand (Kollmann, 1982), wodurch der Feuchtetransport stark beeinträchtigt wird (Niemz & Sonderegger, 2021). Die effektiven Öffnungen in der Schließhaut, auch Margo genannt, durch welche die Wassermoleküle von einer Zelle zur Nächsten gelangen können, sind in etwa 0,1 bis 0,7 µm groß (Niemz & Sonderegger, 2021).

Aus chemischer Sicht handelt es sich beim Werkstoff Holz um ein Biopolymer. Die reine Holzsubstanz besteht hauptsächlich aus einem Verbund aus Cellulose, Hemicellulose und Lignin, welche gemeinsam für den fibrillären Aufbau der Zellwand verantwortlich sind (Neroth & Vollenschaar, 2011; Niemz & Sonderegger, 2021). Der schematische Aufbau einer Zellwand ist in Abbildung 2-2 (rechts) dargestellt. Die Micellen, oder auch Elementarfibrillen genannt, stellen die kleinste fibrilläre Einheit dar und setzen sich aus den Elementarzellen der Cellulose zusammen (Neroth & Vollenschaar, 2011).

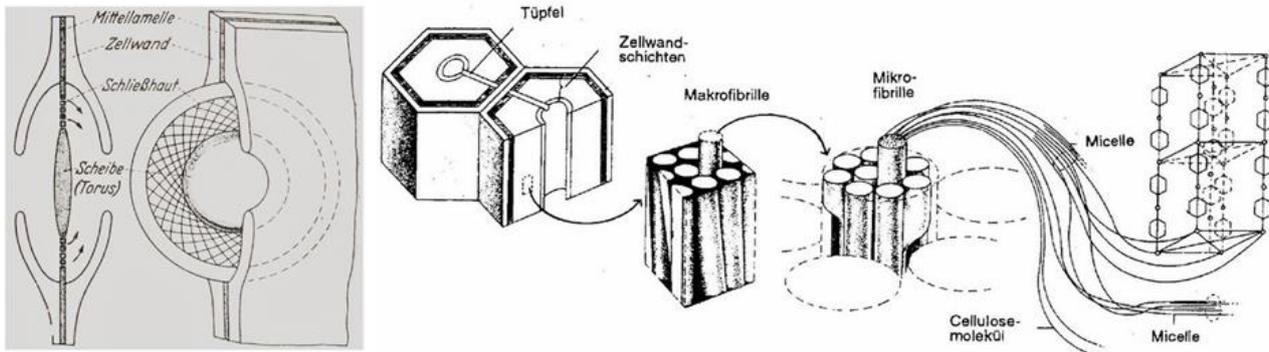


Abbildung 2-2: Links: Schema der Flüssigkeitsbewegung durch Tüpfel und Tracheiden aus (Kollmann, 1982); rechts: Schematischer Aufbau einer Zellwand aus (Fortuin, 2003)

Entsprechend der beschriebenen inhomogenen, anisotropen Struktur wird Holz auch als kapillarporös bezeichnet. Durch kapillare Transportprozesse kann tropfbar flüssiges Wasser aufgenommen werden. Darüber hinaus kann das Hohlraumsystem aber auch Wasser aus der Luft absorbieren, welches sich dann zwischen den einzelnen Micellen in der Zellwand bindet. Dieses Verhalten wird als hygroskopisch bezeichnet (Niemz & Sonderegger, 2021).

## 2.2 Feuchtigkeit im Holz und deren Aufnahme

### 2.2.1 Grundlagen der Holzfeuchte

Der Feuchtegehalt des Holzes beeinflusst fast alle physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Holzes (Sonderegger, 2011). Infolge des strukturellen Aufbaus enthalten die Zellen stets eine bestimmte Menge Wasser. Diese ist abhängig von den klimatischen Umgebungsbedingungen wie Temperatur und relativer Luftfeuchte (Siau, 1984).

Die Holzfeuchte  $u$  wird definiert als das Verhältnis von dem im Holz enthaltenen Wasser zur Trockenmasse des Holzes (Niemz, 2016).

$$u = \frac{m_u - m_{dtr}}{m_{dtr}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2-1)$$

---

$u$	[%]	Holzfeuchte in Massen-%
$m_u$	[kg]	Masse des feuchten Holzes
$m_{dtr}$	[kg]	Masse des darrtrockenen Holzes mit $u=0\%$

Genormt wird die Kenngröße der Feuchte im ersten Teil der dreiteiligen Reihe DIN EN 13183. Die Messung erfolgt in der Regel mit der Darmmethode, auf die im ersten Teil eingegangen wird (DIN EN 13183-1). Die beiden folgenden Teile erläutern weitere Verfahren zur Ermittlung der Holzfeuchte (DIN EN 13183-2; DIN EN 13183-3).

Im Allgemeinen kann, wenn von Feuchtigkeit im Holz gesprochen wird, diese in zwei grundlegende Bereiche (hygroskopischer und kapillarer Bereich) mit drei Grenzzuständen (darrtrocken, Fasersättigung und Wassersättigung) unterteilt werden (Gamper et al., 2013). Die folgende Abbildung 2-3

veranschaulicht diese graphisch. Die Differenzierung in die verschiedenen Bereiche erfolgt in Abhängigkeit des Auftretens des vorhandenen Wassers bzw. des Prozentsatzes der Holzfeuchte.

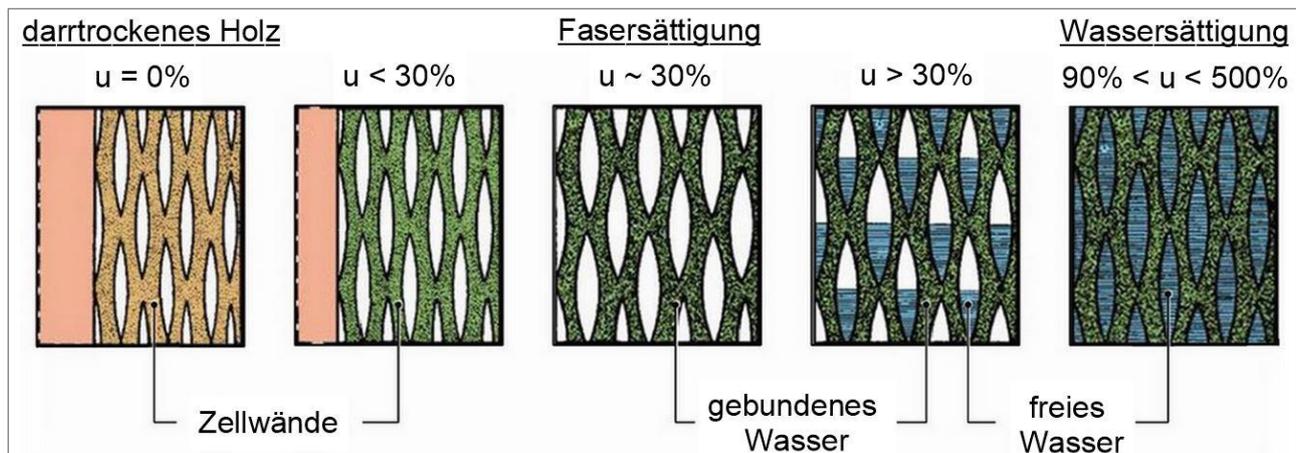


Abbildung 2-3: Die Bereiche der Holzfeuchte in Anlehnung an (Winter, 2019)

Die Holzfeuchte von darrtrockenem Holz beträgt 0 % und es befindet sich dementsprechend kein Wasser im Holz (Gamper et al., 2013). Erreicht werden kann dies zum Beispiel mittels des bereits erwähnten Darrverfahrens, bei der ein Probekörper bei  $103 \pm 2 \text{ °C}$  bis zur Massenkonstanz getrocknet wird (DIN EN 13183-1).

Der hygroskopische Bereich ist der Bereich, in dem das Wasser hauptsächlich in gebundener Form vorliegt. Das bedeutet, die Feuchte befindet sich in den Zellwänden, wo es an die chemischen Bestandteile der Holzsubstanz gebunden ist. Neben dem gebundenem Wasser in den Micellzwischenräumen ist zusätzlich Feuchte in Form von Wasserdampf in den Lumen vorhanden (Kollmann, 1982). In diesem Bereich, in dem uns Holz in der Regel vorliegt, weist der Baustoff je nach Holzfeuchte neben der Änderung der physikalischen Eigenschaften eine Volumenänderung durch Quellen und Schwinden auf. Der genaue Wert der Holzfeuchte  $u$  ist in großem Maße abhängig von der relativen Luftfeuchte. Befindet sich ein Stück Holz in einem gleichbleibenden Umgebungsklima, stellt sich nach einer gewissen Zeit ein entsprechend zugehöriger Gleichgewichtszustand ein, die sogenannte Gleichgewichtsfeuchte. Weiteren Einfluss auf diese Ausgleichsfeuchte  $u_{eq}$  haben neben der relativen Luftfeuchte in erster Linie die Temperatur, der Luftdruck sowie der chemische und strukturelle Aufbau des Holzes (Niemz & Sonderegger, 2021). Mit steigender Temperatur bzw. sinkender relativen Luftfeuchte reduziert sich die Ausgleichsfeuchte (Siau, 1984). Nadelhölzer weisen in beheizten Innenräumen eine Ausgleichsfeuchte von circa 12 % auf (Gamper et al., 2013).

Die Fasersättigung ist der Übergang zwischen dem hygroskopischen und dem kapillaren Bereich. Diese liegt vor, wenn das gesamte Hohlräumssystem der Zellwand mit gebundenem Wasser gefüllt ist, das Porengefüge der Holzstruktur aber noch kein freies Wasser aufweist (Niemz & Sonderegger, 2021). Die Fasersättigung ist in der Baupraxis von großer technischer Bedeutung. Unterhalb dieses Wertes, also im hygroskopischen Bereich, hat die Holzfeuchteänderung teils großen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften, wohingegen oberhalb dieses Grenzzustandes sich die mechanischen Eigenschaften kaum mehr ändern. Die Fasersättigung tritt bei einer relativen Luftfeuchte von 100 % ein (Kollmann, 1982). Oft wird in Bezug auf die Fasersättigung von einem Punkt gesprochen, wobei

es sich bei näherer Betrachtung korrekterweise um einen Übergangsbereich handelt (Kießl & Möller, 1989). Ein Grund hierfür ist, dass sich ein dauerhaft homogenes Umgebungsklima von exakt 100 % relativer Luftfeuchte nicht erzeugen lässt. Bei einem Versuchsaufbau mit Dampf gesättigter Atmosphäre treten unweigerlich Kondensationserscheinungen auf (nähere Erläuterung hierzu siehe Unterpunkt Kapillarkondensation in Kapitel 2.2.2). Deswegen werden die Gleichgewichtsfeuchten im Luftfeuchtebereich von knapp 100 % lediglich extrapoliert und daraus resultierend variieren die Werte je nach angewandter Bestimmungsmethode (Kollmann, 1982; Schaffrath, 2015). Der jeweilig approximierten 100 % - Wert wird als Fasersättigungspunkt  $u_F$  betrachtet. Dieser schwankt bei einheimischen Holzarten der Baumart entsprechend im Bereich von etwa 22 bis 36 % (Popper & Niemz, 2009) und ist weiter abhängig von Temperatur und Rohdichte (Niemz & Sonderegger, 2021).

Ist freies Wasser im Gefüge vorhanden, spricht man vom kapillaren Bereich. Der Begriff des „freien“ Wassers ist allerdings irreführend, da das Wasser teils durch beachtliche Kapillarkräfte an das Holz gebunden ist. Im Vergleich mit den Bindungskräften der chemisch gebundenen Feuchte in der Zellwand sind die Kapillarkräfte allerdings gering (Kollmann, 1982). Der kapillare Bereich kann auch als überhygroskopischer Bereich bezeichnet werden (Holm, 2001).

Der obere Grenzzustand der freien Wassersättigung ist erreicht, wenn das komplette Porengefüge, das heißt sowohl die intermicellaren Hohlräume als auch die Zelllumina, mit Kapillarwasser gefüllt ist (Niemz & Sonderegger, 2021). Der maximal mögliche Feuchtegehalt  $u_{max}$  kann in Abhängigkeit der Fasersättigung  $u_F$  und der Rohdichte  $r_0$  mittels Gleichung (2-2) abgeschätzt werden (Kollmann, 1982; Niemz & Sonderegger, 2021).

$$u_{max} = u_F + \frac{1500 - r_0}{1,50 \cdot r_0 \cdot 10^{-2}} \quad [\%] \quad (2-2)$$

---

$u_{max}$	[%]	Maximal möglicher Holzfeuchtegehalt
$u_F$	[%]	Holzfeuchtegehalt des Fasersättigungspunktes
$r_0$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Rohdichte im Darrzustand

Aus Gleichung (2-2) wird zudem ersichtlich, dass Frühholz mit den weiträumigeren Lumen mehr Wasser aufnehmen kann als Spätholz und dass poröse Holzarten mit geringerer Rohdichte mehr Wasser aufnehmen können als dichtere Holzarten (Kollmann, 1982; Siau, 1984).

### 2.2.2 Sorption und die Bindungsformen des Wassers im Holz

Wie bereits beschrieben, besteht Holz aus einem Verbund aus unzähligen röhrenförmigen Zellen, welche sich aus Zellwänden und Lumen zusammensetzen. Setzt man darrtrockenes Holz in ein bestimmtes Umgebungsklima, nimmt der porige Holzkörper so lange Wasserdampf aus der Luft auf und bindet diese in der Zellwand, bis der Gleichgewichtszustand der Ausgleichsfeuchte  $u_{eq}$  erreicht ist. Der Grund für die hygroskopische Eigenschaft des Holzes liegt in den chemischen Bestandteilen. Cellulose, Hemicellulose und Lignin sind durch ihre Hydroxylgruppen wasseranziehend und binden das Wasser in der Zellwand. Das Phänomen der Feuchteaufnahme wird auch Sorption, genauer Adsorption, genannt. Der gegenteilige Prozess der Feuchteabgabe wird Desorption genannt. Aufgrund dessen, dass der Prozess der Sorption von verschiedenen Faktoren abhängig ist, werden

unter Berücksichtigung der Holzfeuchte  $u$  drei verschiedene Phasen unterschieden. Diese werden wie folgt bezeichnet (Kollmann, 1982; Niemz & Sonderegger, 2021):

- Chemisorption, auch Chemosorption genannt
- Physisorption, im engeren Sinn auch Adsorption genannt
- Kapillarkondensation

Die drei Vorgänge sind, wie in Abbildung 2-4 zu sehen, abhängig vom Holzfeuchtebereich. Die im folgenden angegebenen Prozentzahlen sind allerdings nur Richtwerte, da sich die verschiedenen Phasen nicht wie dargestellt exakt abgrenzen lassen. Während die Chemisorption separat von Stat-ten geht, laufen dagegen insbesondere Adsorption und Kapillarkondensation teilweise sogar gleichzeitig ab, jedoch mit den jeweiligen Hauptanteilen in den angegebenen Feuchtebereichen (Kollmann, 1982).

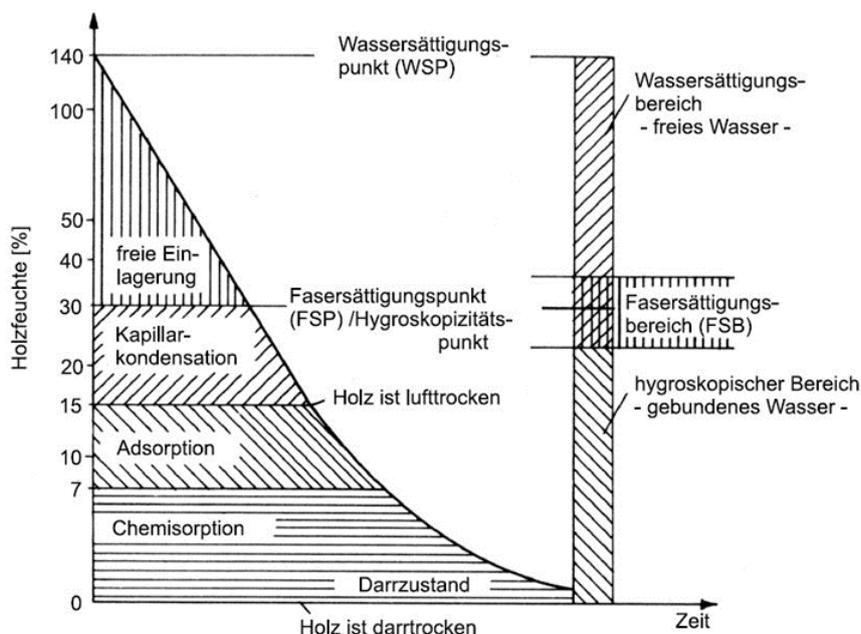


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der Bindungsformen des Wassers im Holz aus (Niemz & Sonderegger, 2021)

### Chemisorption:

Die Chemisorption spielt im Holzfeuchtebereich von 0 % bis in etwa 7 % und einer relativen Luftfeuchte von kleiner als 20 % eine Rolle. Zwischen den Hydroxylgruppen der chemischen Bestandteile und der polaren Wassermoleküle der Umgebungsluft herrscht eine molekulare Anziehungskraft und es wird mittels Wasserstoffbrücken eine monomolekulare Schicht ausgebildet. Sind alle freien Hydroxylgruppen abgesättigt, ist die Chemisorption abgeschlossen. Erwähnenswert hierbei ist, dass sich die Wassermoleküle lediglich an der Oberfläche der Micelle anlagern und nicht eindringen. Aus diesen Anlagerungen resultieren zudem die Quellungserscheinungen des Holzes (Kollmann, 1982; Niemz & Sonderegger, 2021).

### Physisorption (oder Adsorption):

Bei fortsetzender Steigerung der Feuchte wird die als nächstes eintretende Phase der Physisorption bzw. Adsorption genannt. Der Feuchtegehalt bewegt sich im Bereich von 7 % bis 15 % und die relative Luftfeuchte ist kleiner als 60 %. Weiterhin aufgenommene Wassermoleküle lagern sich in den Hohlräumen des Mikrosystems an, indem sie durch van-der-Waals-Kräfte bzw. elektrostatische Kräfte gebunden werden. Es liegt eine polymolekulare Wasserschicht vor. Je mehr Schichten an einer Micelloberfläche vorhanden sind, desto schwächer wird die physikalische Bindung der äußersten Wassermoleküle an die Zellwand und der Flüssigkeitscharakter des gebundenen Wassers nimmt zu (Niemz & Sonderegger, 2021; Stamm, 1967b).

### Kapillarkondensation:

Im Bereich der Kapillarkondensation reicht der Holzfeuchtebereich von 15 % bis hin zur Fasersättigung. Die relative Luftfeuchte der Umgebung beträgt dementsprechend zwischen 60 % und 100 %. Verantwortlich für die Kapillarkondensation sind die Mikrokapillaren mit einem Radius kleiner als 0,1 µm. Bei hohen relativen Luftfeuchtebereichen ist der Sättigungsdruck in den Kapillaren dieses Radius niedriger als über einer ebenen Oberfläche, sodass ein Teil des Wasserdampfs in den Kapillaren kondensiert und sich an der Zellwand bindet (Niemz, 2005; Niemz & Sonderegger, 2021). Nimmt der Dampfdruck in der Umgebung weiter zu, treten diese Kondensationserscheinungen in weiteren und den Durchmesser betreffend breiteren Kapillaren auf. Aus diesem Grund kann die Fasersättigung nicht als konkreter Punkt bestimmt, sondern muss, wie bereits erläutert, approximiert werden. Außerdem sieht man, dass bereits unterhalb des Sättigungsdruckes Wasser in den Kapillaren existieren kann, weswegen eine scharfe Abgrenzung des hygroskopischen und kapillaren Bereichs nicht möglich ist (Kollmann, 1982). Mit fortschreitender Feuchteaufnahme quillt das Zellwandgefüge weiter auseinander, bis das Mikrosystem komplett gesättigt ist. Der Fasersättigungsbereich ist erreicht (Niemz & Sonderegger, 2021).

Der Bereich der freien Einlagerung entspricht dem kapillaren, überhygroskopischen Bereich, welcher bereits in Kapitel 2.2.1 erläutert wurde.

Die treibenden Kräfte der Sorption sind der Wasserdampfdruck der Umgebungsluft und die Konzentration des bereits gebundenem Wasser im Holz. Die Phasenänderung von Wasserdampf zu gebundenem Wasser dauert so lange an, bis sich ein Gleichgewicht eingestellt hat (Frandsen et al., 2007). Aufgrund der Eigenarten der drei verschiedenen Sorptionsphasen steigt das hygroskopische Gleichgewicht nicht linear mit der relativen Luftfeuchte an, sondern weist einen S-förmigen Verlauf auf, wie in Abbildung 2-5 zu sehen ist. Diese materialspezifischen Kennfunktionen werden als Sorptionsisothermen bezeichnet und zeigen unter Berücksichtigung einer bestimmten Temperatur das holzartenabhängige Speichervermögen in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte (Niemz & Sonderegger, 2021). Über die Geschwindigkeit der Sorption wird hierbei keine Aussage getroffen. Kollmann (1982) beschreibt, dass die Quellungsgeschwindigkeit umso größer ist, je weiter der Probekörper von der Gleichgewichtsfeuchte entfernt ist. Nach Frandsen et al. (2007) erfolgt die Feuchteaufnahme bei geringer Luftfeuchte schneller als bei hoher Luftfeuchte.

Eine Besonderheit der Sorption bei Holz ist, dass Ad- und Desorption nicht deckungsgleich verlaufen. Diese als Hysterese bezeichnete Eigenschaft ist nach Kollmann (1982) auf die Trägheit der Wassermoleküle während des Bindens bzw. Entbindens zurückzuführen. Das Desorptionsgleichgewicht, das heißt die Gleichgewichtsfeuchte der Feuchteabgabe, liegt oberhalb des Wertes der Feuchteaufnahme bei gleicher Luftfeuchte. Abbildung 2-5 zeigt den Hystereseeffekt. Der genaue physikalische Hintergrund der Abweichung ist noch nicht eindeutig geklärt (Niemz & Sonderegger, 2021). Wie weit die Isothermen auseinander liegen, ist holzartenabhängig und kann je nach Spezies bis zu mehreren Prozentpunkten betragen. Ausgiebige Messungen hierzu wurden von Popper et al. (2009) durchgeführt. Für bauphysikalische Berechnungen wird in der Regel die Mittelwertkurve der beiden Sorptionsisothermen, die als ausreichend genau befunden wird, betrachtet (Mindrup, 2019).

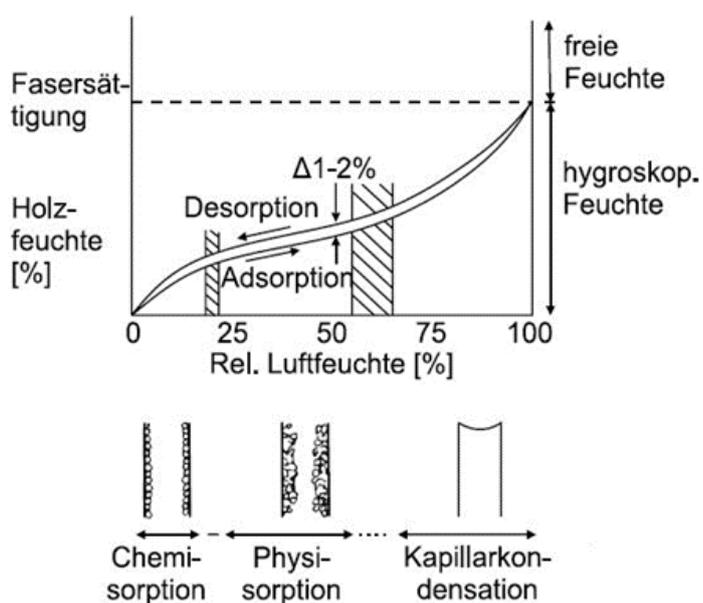


Abbildung 2-5: Phasen der Sorptionsisothermen einschließlich dem Prinzip des Hystereseeffektes aus (Niemz & Sonderegger, 2021)

Neben der graphischen Aufbereitung der Sorptionsisothermen kann das Sorptionsverhalten auch mit Hilfe von analytischen Ausdrücken beschrieben werden. Drei der bekanntesten und am meistgenutzten Modelle hierbei sind die Methode von Hailwood und Horrobin (1946), die Brunner-Emmet-Teller-Methode (Brunauer et al., 1938) und das Modell von Dent (1977), welcher die Methode von Brunauer et al. aufgreift und modifiziert (Sonderegger, 2011; Time, 1998). Solche mathematischen Modelle ermöglichen unter anderem die Abschätzung eines Fasersättigungspunktes oder es können die Sorptionsisothermen von bislang fremden Holzarten aufgestellt werden (Popper et al., 2008).

### 2.2.3 Kapillare Aufnahme von flüssigem Wasser

Von der Kapillaraktivität eines Baustoffes wird gesprochen, wenn bei Berührung mit Wasser dieses aufgesaugt wird (Künzel, 1994). Im hygroskopischen Bereich ist die Sorption für die Feuchteaufnahme verantwortlich. Hierbei gewinnt mit steigender Luftfeuchte überwiegend die Aufnahme durch die Kapillaren mittels Kapillarkondensation an Bedeutung. Oberhalb des Fasersättigungsbereiches wird freies Wasser durch Kapillarkräfte aufgenommen (Niemz et al., 2012).

Holz kann mit einem System von miteinander kommunizierenden Zellen verglichen werden. Zur Veranschaulichung dient die Vorstellung der Kapillaren als einfache Zylinder, dem sogenannten Zylinderkapillarenmodell (Künzel, 1994). Aufgrund von Oberflächenspannungen zwischen der Zellstruktur und der benetzenden Flüssigkeit sowie der daraus resultierenden Zugunterschiede kommt es zu einer Wasserbewegung, wobei das flüssige Wasser in den engen Röhren des Makrosystems aufgesogen wird (Mindrup, 2019; Niemz & Sonderegger, 2021). Dieser Prozess dauert solange an, bis die freie Wassersättigung erreicht ist (Künzel, 1994). Die Schwerkraft ist im Vergleich zu den auftretenden kapillaren Kräften vernachlässigbar gering (Siau, 1984).

Die in der Praxis am meist erforschte Materialkenngröße zur Bestimmung der Kapillartransporteigenschaften ist der Wasseraufnahmekoeffizient  $A_W$ , welcher im Gegensatz zu den im weiteren Verlauf angesprochenen Transportkoeffizienten unabhängig vom Wassergehaltsgefälle ist (Kießl & Möller, 1989; Niemz et al., 2012). Der Wasseraufnahmekoeffizient beschreibt die kapillare Aufnahme von Wasser durch die Oberfläche eines Baustoffes und liefert dadurch eine Aussage über seine Saugfähigkeit. Die Bestimmung des Wertes ist in der DIN EN ISO 15148 genormt. Ein Probekörper, der zuvor unter vorgegebenen Umgebungsbedingungen konditioniert worden ist, wird teilweise in Wasser getaucht. Die unter Wasser stehende Unterseite des Prüfkörpers saugt durch Kapillarkräfte im Laufe der Zeit eine gewisse Menge an Wasser auf. Über die Prüfdauer hinweg wird die Probe mehrmals gewogen und die Massendifferenz zwischen jeder Wägung und der Ausgangsmasse wird ins Verhältnis zur wasseraufnehmenden Oberfläche gesetzt. In Abhängigkeit zur Wurzel der Zeit wird diese Massendifferenz in ein Koordinatensystem angetragen, wie in Abbildung 2-6 zu sehen ist (DIN EN ISO 15148).

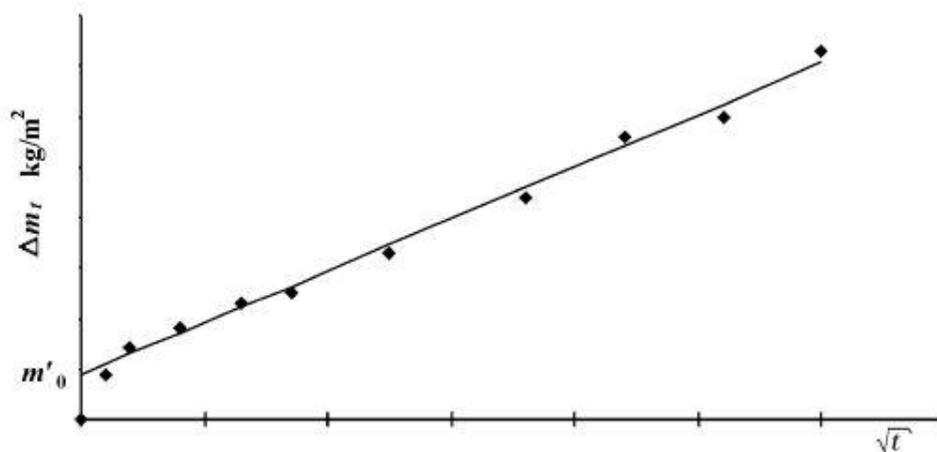


Abbildung 2-6: Kurve zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten aus (DIN EN ISO 15148)

Abgesehen von einer kurzen Stabilisierungsphase zu Beginn des Versuchs kann die Kurve mit einer Geraden angenähert werden (DIN EN ISO 15148). Der Grund für diese anfänglich steiler verlaufende Wasseraufnahme ist nach Zillig (2009) das schnelle, sofortige Füllen aller direkt mit dem Wasser in Verbindung stehenden Hohlräume, weswegen die angenäherte Gerade zudem hinzukommend nicht im Ursprung des Koordinatensystems beginnt. Im weiteren Zeitverlauf ist die Aufnahme von weiterem Wasser abhängig von der Zellstruktur und wird insbesondere durch die geringen Durchmesser der Tüpfel kontrolliert, die vom flüssigen Wasser passiert werden müssen, um

benachbarte Lumen zu erreichen (Zillig, 2009). Die Tüpfel (vergleiche Abbildung 2-2 (links)) limitieren den Flüssigtransport und sind hauptverantwortlich für den Flusswiderstand durch die Tracheiden (Siau, 1984). Genauere Erläuterungen zu den Feuchtetransportvorgängen erfolgen in Kapitel 2.3. Sobald das aufgenommene Wasser während der Versuchsdurchführung die gegenüberliegende Seite des Probekörpers erreicht, kommt es zu einem abrupten Abfall der Steigung (DIN EN ISO 15148).

Der Wasseraufnahmekoeffizient  $A_W$  kann in Bezug auf den Werkstoff Holz mit Hilfe des in Abbildung 2-6 gezeigten Verlaufs durch die folgende Gleichung (2-3) berechnet werden. Dieser entspricht dem Verhältnis aus Menge des aufgenommenen Wassers zur Wurzel der Zeit.

$$A_W = \frac{\Delta m'_{t_f} - \Delta m'_{t_0}}{\sqrt{t_f}} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})] \quad (2-3)$$

$A_W$	$[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})]$	Wasseraufnahmekoeffizient
$\Delta m'_{t_f}$	$[\text{kg}/\text{m}^2]$	Flächenbezogene Massenzunahme bis zum Zeitpunkt $t_f$
$\Delta m'_{t_0}$	$[\text{kg}/\text{m}^2]$	Durch die Gerade extrapolierter Schnittpunkt der Ordinate
$t_f$	$[\text{s}]$	Prüfdauer

Aufgrund des anisotropen Aufbaus von Vollholz ist die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme des Werkstoffes stark abhängig von der anatomischen Richtung. Eine Übersicht über einige aus der Literatur stammender Wasseraufnahmekoeffizienten ist in Tabelle 2-1 zu sehen. Die Werte entstanden aus Versuchen mit Probekörpern der Holzart Fichte und wurden unter Berücksichtigung der Hauptschnittrichtungen ermittelt. Sofern in den Literaturangaben für den Wasseraufnahmekoeffizienten Wertebereiche angegeben sind, entspricht der in Tabelle 2-1 aufgeführte Wert dem jeweiligen Mittelwert.

Tabelle 2-1: Wasseraufnahmekoeffizienten aus der Literatur der Holzart Fichte (*picea abies*)

Wasseraufnahmekoeffizienten $A_W$ $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})]$			
longitudinal	tangential	radial	Quelle
0,01670	0,00200	0,00300	(Sonderegger, 2011)
0,01096	0,00154	0,00170	(Niemz, Sonderegger, Häring, Joščák & Krackler, 2012)
0,01350	0,00140	0,00141	(Niemz, Mannes, Koch & Herbers, 2010)
0,02900	0,00290	0,00195	(Niemz, 2006) aus (Niemz et al., 2010)
0,02000	0,00186	0,00175	(Jakob, Niemz & Hurst, 2005) aus (Niemz et al., 2010)
0,01890	0,00400	0,00300	(Wang & Niemz, 2002) aus (Niemz et al., 2010)
0,01500	0,00375	0,00300	(Zillig, 2009)
$\emptyset$	<b>0,00249</b>	<b>0,00226</b>	
$\emptyset$	<b>0,01772</b>	<b>0,00238</b>	

\*) transversaler Wasseraufnahmekoeffizient entspricht dem Mittelwert aus tangentialem und radialem Wert

Da Holz keinen industriell gefertigten Rohstoff darstellt, sondern aufgrund seines natürlichen Wachstums Schwankungen unterliegt, streuen auch die Wasseraufnahmekoeffizienten gleicher Holzarten (Niemz & Sonderegger, 2021; Sonderegger, 2011). Trotz dessen ist erkennbar, dass die in der Literatur zu findenden Werte für die Fichte innerhalb der gleichen anatomischen Richtung jeweils in der gleichen Größenordnung liegen. Weiter sind jeweils zwischen der tangentialen und der radialen Richtung nur geringe Unterschiede zu beobachten. Die Durchschnitte beider Richtungen aus Tabelle 2-1 weichen nur in etwa 10 % voneinander ab, sodass die Werte zu einer gemeinsamen, transversalen Richtung zusammengefasst werden. Dafür spricht neben den Streuungen aufgrund des natürlichen Wachstums weiter, dass aus den Werten der Literatur nicht erkennbar ist, ob der Koeffizient radial oder tangential größer ist. Niemz et al. (2010) erklärt, dass infolge der radial ausgerichteten Holzstrahlen in dieser Richtung mehr Wasser transportiert wird als tangential, wohingegen die Wasseraufnahmekoeffizienten von vier der sieben Quellen aus Tabelle 2-1 dieser Aussage widersprechen. Des Weiteren ist die Zusammenfassung zu einer transversalen Richtung im Holzbau eine übliche Verallgemeinerung, da sich im Allgemeinen die Eigenschaften von Holzbauteilen, wie beispielsweise der Feuchtetransport, im eingebauten Zustand nicht exakt der radialen bzw. tangentialen Richtung zuordnen lassen (Time, 1998).

Unter Berücksichtigung des strukturellen Aufbaus des Holzes ist es nicht verwunderlich, dass der Wasseraufnahmekoeffizient in longitudinaler Richtung um ein Vielfaches höher liegt als in transversaler Richtung. Vergleicht man die Werte von Tabelle 2-1, unterscheiden sich beide Durchschnittswerte um einen Faktor von circa 7,5.

Üblicherweise wird der Wasseraufnahmekoeffizient wie in Abbildung 2-6 als Gerade in Abhängigkeit zur Wurzel der Zeit dargestellt. Dem besseren Verständnis wegen und in Bezug auf die Anwendung von  $A_W$  auf die Simulationen in Kapitel 3 wird die Wasseraufnahme in das Verhältnis der Zeit in Sekunden gesetzt. Die in Abbildung 2-7 gezeigte Wurzelfunktion verdeutlicht, dass mit steigendem Wassergehalt im Probekörper im Laufe der Prüfdauer eine gleichbleibende Fläche immer weniger Wasser aufnimmt. Als Wasseraufnahmekoeffizient wurde der Durchschnittswert der transversalen Richtung von  $0,00238 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$  gewählt. 600.000 Sekunden entsprechen knapp sieben Tage.

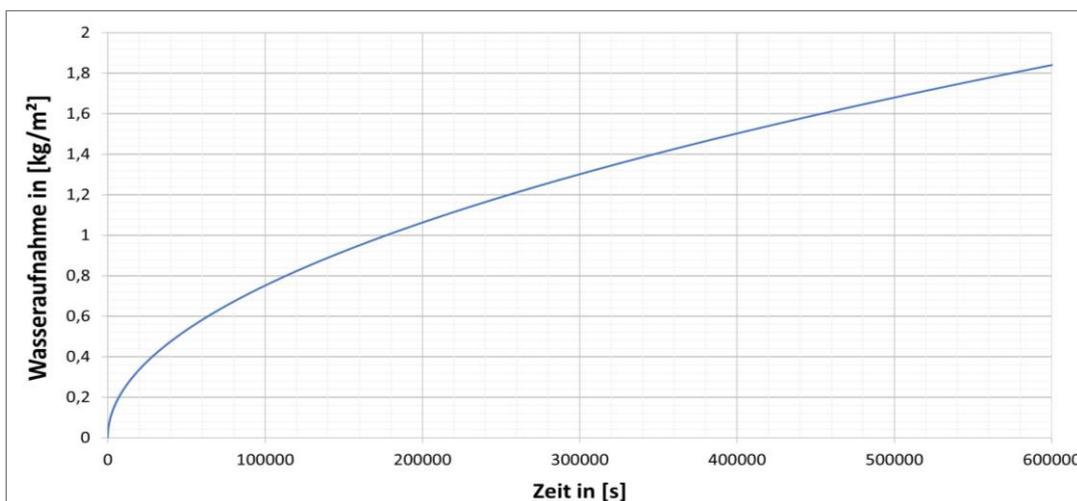


Abbildung 2-7: Wasseraufnahme in transversaler Richtung mit  $A_W = 0,00238 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$

Bei genauerer Betrachtung wird der Wasseraufnahmekoeffizient neben der Struktur stark von der Dichte des Holzes bzw. der Holzart beeinflusst (Niemz & Sonderegger, 2021). Dementsprechend saugen Zillig (2009) zufolge die dünnwandigen Tracheiden des Frühholzes Wasser langsamer auf als das dickwandigere Spätholz. Siau (1984) erklärt diese Phänomene damit, dass es bei der Trocknung von Holz im Allgemeinen zu Tüpfelverklebungen kommt, die insbesondere im Frühholz den Wasseraufnahmekoeffizienten herabsetzen. Ein Forschungsteam um Spear bekräftigt diese Aussage und begründet die geringere Anzahl an Tüpfelverschlüssen im Spätholz mit der geringeren Flexibilität der Tüpfelscheibe in den dickwandigen Tracheiden (Spear et al., 2018). Zillig (2009) führt als zweiten Grund für den höheren Wasseraufnahmekoeffizienten im Spätholz den Durchmesser der Lumen mit auf. Die engeren Kapillaren führen zu größeren Kapillarkräften als in den Frühholzzellen. Weiter ist neben der Unterscheidung zwischen Früh- und Spätholz der Wasseraufnahmekoeffizient auch zwischen Kern- und Splintholz differenzierbar (Niemz et al., 2012). Die Einlagerung durch Fette, Harze und Extraktstoffen bei der Verkernung des Nadelholzes und die daraus resultierende Verklebung der Tüpfel führt dazu, dass das Kernholz im Verhältnis zum Splintholz nur schwer tränkbar ist (Niemz & Sonderegger, 2021). Im Allgemeinen weist die Fichte aufgrund der hohen Anzahl an Tüpfelverschlüssen gegenüber anderen Holzarten, wie zum Beispiel der Buche, einen niedrigen Wasseraufnahmekoeffizienten auf, wodurch auch die im Vergleich schlechtere Imprägnierbarkeit der Nadelholzart zu erklären ist. (Niemz et al., 2010).

Führt man den Versuch zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten nach DIN EN ISO 15148 anstelle mit Wasser mit einer nicht polaren Flüssigkeit gleicher Viskosität, wie zum Beispiel Cyclohexan, durch, ermittelt sich insbesondere in transversaler Richtung ein signifikant höherer Aufnahmekoeffizient. Nicht polare Flüssigkeiten weisen gegenüber der Zellwand einen geringeren Reibungswiderstand auf und binden sich zudem nicht an die Hydroxylgruppen der Micellen, wodurch als weitere Folge die für Holz typischen Schwellerscheinungen ausbleiben (Siau, 1984; Zillig, 2009). Zillig (2009) misst bei Verwendung von Cyclohexan einen im Durchschnitt 5,5-fachen Aufnahmekoeffizienten quer zur Faser im Vergleich zum Wasser.

## 2.3 Feuchtetransportvorgänge im Holz

### 2.3.1 Allgemeines zum Feuchtetransport und zum Diffusionskoeffizienten

Nachdem im bisherigen Verlauf der Arbeit die Hintergründe der Feuchteaufnahme sowie der Wasseraufnahmekoeffizient beschrieben wurden, erfolgt im folgenden Kapitel die Erläuterung der Transportvorgänge von Feuchte bzw. Wasser im Holz. Hierbei werden Transportkoeffizienten vorgestellt, die im Gegensatz zum Wasseraufnahmekoeffizienten durch das Konzentrationsgefälle bestimmt werden, damit im späteren Modell eine Aussage über den zeitabhängigen Verlauf der Holzfeuchte getroffen werden kann.

Bei der Bewegung von Wassermolekülen durch das Zellsystem von Holz handelt es sich um einen äußerst komplexen Prozess (El Kouali & Vergnaud, 1991). Die Beziehung von Holz und Feuchte ist inzwischen bereits seit knapp einem Jahrhundert Grundlage von Untersuchungen. So bemühte sich Tuttle beispielsweise schon 1925 darum, eine mathematische Lösung zu den Gesetzmäßigkeiten der Feuchtebewegung in Holz zu finden (Tuttle, 1925). Voigt, Krischer & Schauss zählten 1940 zu

den ersten, die dabei zwischen hygroskopischem und kapillarem Holzfeuchtebereich unterscheiden (Voigt et al., 1940). Im Laufe der Jahre wurden weitere Forschungen in diesem Feld der Holzphysik betrieben. Kollmann (1982) erklärt, die differenzierenden Forschungsergebnisse seien darauf zurückzuführen, dass eine exakte analytische Lösung zur Beschreibung der Ausbreitung der Feuchte aufgrund ihrer Komplexität kaum möglich sei. Trotz weiterführender Versuche und verbesserter Modelle lässt sich diese Äußerung im Wesentlichen jedoch bis heute nicht revidieren und es bestehen weiterhin Unklarheiten über die genauen Hintergründe und Zusammenhänge des Feuchtetransports (Kucharczyk & Pawlik, 2020).

Grundsätzlich wird die Erscheinung von Wassermolekülen in Holz in drei Basisformen unterschieden, die sich in Abhängigkeit des Dampfdrucks und im Ort des Auftretens unterscheiden. In der Zellwand liegt das Wasser in gebundener Form vor. In den Lumen des Hohlraumsystems erscheint das Wasser in Abhängigkeit der Holzfeuchte und des Dampfdrucks als Wasserdampf oder in Form von freiem Wasser (Siau, 1984). Das freie Wasser, welches durch kapillare Kräfte im porigen System des Holzes gebunden ist, tritt im überhygroskopischen Bereich auf und die Feuchtigkeitsbewegung findet hauptsächlich in den Hohlräumen statt (Mounji et al., 1991; Siau, 1984). Im hygroskopischen Bereich dagegen bewegen sich Wassermoleküle zum einen in chemisch und physisch gebundener Form innerhalb der Zellwand und zum anderen als Wasserdampf durch das Hohlraumsystem des Holzes weiter (Stamm, 1967b). Abbildung 2-8 gibt eine Übersicht über die Transportwege von Wassermolekülen im Holz.

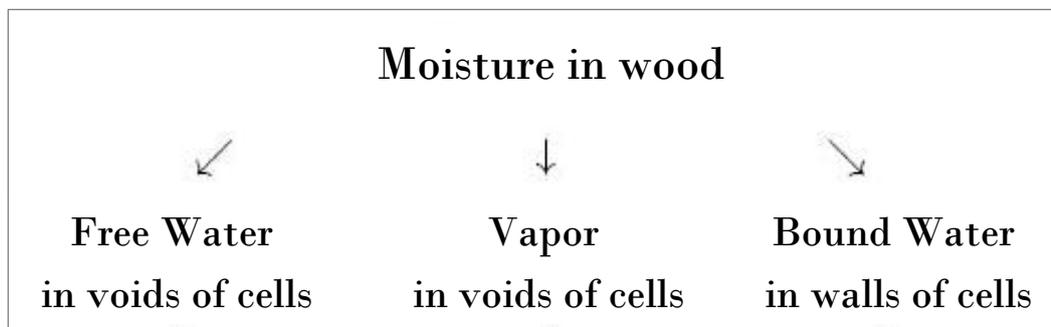


Abbildung 2-8: Transportwege der Feuchte im Holz in Anlehnung an (Čiegis & Starikovičius, 2002)

Da bis heute in Bezug auf die vermeintlich korrekte Beschreibung des Feuchtetransportes im Holz noch viele Fragen offen sind, besteht eine Vielzahl an verschiedenen analytischen Annäherungsversuchen und dementsprechend divergierenden Auffassungen zur Lösung der Fragestellung (Cloutier & Fortin, 1993; Zillig, 2009). Im hygroskopischen Bereich ist sich die große Mehrheit allerdings in der grundlegenden Beschreibung einig. Der Transport der Feuchte im Holzfeuchtebereich von 0 % aufwärts bis zur Fasersättigung, auf die der Großteil der Untersuchungen abzielt, wird in der Regel mittels der Diffusion beschrieben. Erreicht die Holzfeuchte den Bereich der Fasersättigung und befindet sich freies Wasser im porösen System des Holzes werden die Feuchtemechanismen diffiziler (El Kouali & Vergnaud, 1991). Neben der Wasserdampfdiffusion bzw. der Diffusion des gebundenen Wassers tritt eine durch Kapillarkräfte getriebene Strömung ein (Siau, 1984). Trotz dessen beschreiben einige Autoren den Holzfeuchtebereich zwischen Faser- und Wassersättigung ebenfalls mit Hilfe der Diffusion und erreichen damit akzeptable Ergebnisse (Simpson & Liu, 1997).

Als Diffusion bezeichnet man im Wesentlichen den natürlichen und ungerichteten Stoffaustausch in einem Gemisch von Gasen bzw. Flüssigkeiten. Moleküle sind durch die in ihnen enthaltene Energie stets in Bewegung und bewegen sich ziellos und unbestimmt durch ein Medium. Befinden sich zusätzlich Konzentrationsunterschiede im System, führt die sogenannte Brownsche Molekularbewegung zu einem wahrnehmbaren Stofftransport. Die diffundierenden Moleküle zielen solange auf einen Ausgleich dieser Konzentrationsunterschiede ab, bis eine gleichmäßige Mischung erreicht und das Konzentrationsgefälle abgebaut ist (Klopfer, 1974).

Der erste, der einen Zusammenhang zwischen dem Feuchtetransport und der Diffusion herstellte, war Tuttle im Jahr 1925 (Kisseloff, 1969). Er berechnete den Vorgang der Holz Trocknung analog zum instationären Fourierschen Gesetz der Wärmeleitung und ersetzte hierbei die Wärmeleitfähigkeit mit einem sogenannten Diffusionskoeffizienten sowie den Temperaturgradienten mit einem Feuchtegradienten (Tuttle, 1925). Aus naturwissenschaftlicher Sicht kann diese Annahme getroffen werden, da die Diffusion und die Wärmeleitung den gleichen empirischen Gesetzmäßigkeiten eines diffusiven Phänomens folgen (Baehr & Stephan, 2016). Da A. Fick im Jahr 1855 als erster die Grundgesetze der Diffusion mittels mathematischer Ansätze aufstellte, spricht man in Bezug auf diese Gleichungen von den Fickschen Gesetzen (Avramidis, 2018). Unter der Voraussetzung von isothermen und stationären Bedingungen kann der eindimensionale Feuchtetransport dementsprechend mit dem 1. Fickschen Gesetz, wie in Gleichung (2-4) gezeigt, beschrieben werden. Die treibende Kraft des Diffusionsstroms ist hierbei der Gradient der Konzentration des diffundierenden Wassers (Niemz & Sonderegger, 2021).

$$g = -D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \tag{2-4}$$

---

$g$	$[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$	<i>Diffusionsstromdichte (Feuchtemenge pro Zeit- und Flächeneinheit)</i>
$D$	$[\text{m}^2/\text{s}]$	<i>Diffusionskoeffizient</i>
$\partial c / \partial x$	$[(\text{kg}/\text{m}^3)/\text{m}]$	<i>Konzentrationsgradient in Bezug auf die Weglänge</i>
$c$	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	<i>Feuchtekonzentration</i>
$x$	$[\text{m}]$	<i>Weglänge</i>

Der Diffusionskoeffizient  $D$  wird in der Einheit  $[\text{m}^2/\text{s}]$  definiert und entspricht einem Proportionalitätsfaktor, der die Stromdichte  $g$  in ein Verhältnis zum Konzentrationsgradienten  $\partial c / \partial x$  setzt. Er beschreibt diejenige Menge an Wasser, die bei einem Feuchtekonzentrationsunterschied von 1 kg Wasser pro Kubikmeter Holz durch einen Querschnitt von 1  $\text{m}^2$  über eine Weglänge von 1 m pro Sekunde fließt. Im Gegensatz zum Wasseraufnahmekoeffizienten, der lediglich die aufgenommene Wassermenge in Abhängigkeit zur Wurzel der Zeit kennzeichnet, ist der Feuchtetransportkoeffizient innerhalb des Holzbauteils abhängig vom Gefälle der treibenden Kraft (Niemz & Sonderegger, 2021). Das negative Vorzeichen resultiert aus der dem Feuchtegradienten entgegen gesetzten Diffusionsrichtung (Time, 1998).

In der Realität ist der Vorgang der Feuchtebewegung im Holz allerdings komplexer als ein stationärer und eindimensionaler Stoffstrom. Die stets wechselnden klimatischen Umstände legen nahe, dass es sich beim Feuchtetransport in Holzkonstruktionen um ein von Zeit und Richtung abhängiges Phänomen handelt (Schaffrath, 2015).

Das praxisnähere, instationäre 2. Ficksche Gesetz leitet sich mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung aus dem stationären Fall ab. Durch diese Umformung hebt sich zudem das negative Vorzeichen auf (Wadsö, 1993). Gleichung (2-5) zeigt die mathematischen Gesetzmäßigkeit für den zeitabhängigen, eindimensionalen Fall (Avramidis, 2018).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (2-5)$$

---

$\partial c / \partial t$	$[(\text{kg}/\text{m}^3)/\text{s}]$	<i>Konzentrationsgradient in Bezug auf die Zeit</i>
$c$	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	<i>Feuchtekonzentration</i>
$t$	$[\text{s}]$	<i>Zeit</i>
$x$	$[\text{m}]$	<i>Weglänge</i>
$D$	$[\text{m}^2/\text{s}]$	<i>Diffusionskoeffizient</i>
$\partial c / \partial x$	$[(\text{kg}/\text{m}^3)/\text{m}]$	<i>Konzentrationsgradient in Bezug auf die Weglänge</i>

Die beiden genannten Diffusionsgleichungen geben als treibendes Potential jeweils den Feuchtekonzentrationsgradienten an. Der Einfachheit halber kann anstelle der Konzentration  $c$  jedoch gleichwertig die verwandte Variable der Holzfeuchte  $u$  genutzt werden. Nach Böhner (1976) kann man die beiden treibenden Kräfte mit den Variablen  $c$  und  $u$ , welche in Abhängigkeit der Holzdicke stehen, ineinander überführen, da die Volumenänderung des Holzes infolge der Feuchteänderung vernachlässigbar klein ist. Die entsprechende eindimensionale Differentialgleichung, bei der die Holzfeuchte die Ursache des Stofftransportes ist, lautet dann wie folgt (Sonderegger et al., 2010).

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (2-6)$$

Die Nutzung der Holzfeuchte als Potential ermöglicht bei Untersuchungen der Feuchtetransportmechanismen eine messtechnisch einfachere Erfassung und es handelt sich um einen allgemein bekannten und greifbaren Parameter (Cunningham et al., 1989; Schaffrath, 2015). Von denjenigen Autoren, die beim Feuchtetransport von Diffusion sprechen, verwendet die große Mehrheit daher das Gefälle der Holzfeuchte bzw. der Feuchtekonzentration (El Kouali & Vergnaud, 1991). Eine nähere Erläuterung dieser sowie weiterer treibenden Kräfte und wie die jeweiligen Proportionalitätsfaktoren der treibenden Kräfte ineinander umgeformt werden können, wird ausführlich von Siau (1984) in seinem Buch über die Transportvorgänge im Holz beschrieben. Im Allgemeinen ist darauf zu achten, dass die Proportionalitätsfaktoren, auch wenn sie in der Literatur teilweise die gleiche Bezeichnung tragen, nicht unbedingt auf den selben treibenden Kräften basieren und dadurch nicht immer die gleiche Einheit aufweisen (Fortuin, 2003).

Weiter sind die Werte des Diffusionskoeffizienten abhängig von der auf den Diffusionsgleichungen, wie in den Gleichungen (2-4) und (2-5) dargestellt, basierenden verschiedenen Methoden der Herleitung (Hukka, 1999). Die Simulationen der vorliegenden Arbeit modellieren ein instationäres Phänomen. Bei dem hierzu maßgebenden 2. Fickschem Gesetz handelt es sich mathematisch gesehen um eine lineare partielle Differentialgleichung 2. Ordnung. Solche Grundgleichungen können entweder mittels des Separationsansatzes, der Laplace-Transformation oder von anderen numerischen Methoden gelöst werden. Das Lösen mit Hilfe der genannten Methoden ist im Vergleich zum leichter löslichen 1. Fickschem Gesetz mathematisch komplexer und mit größerem Rechenaufwand

verbunden. Oft werden für die einfachere Lösbarkeit deshalb vereinfachte Annahmen getroffen, wie etwa die Betrachtung des Diffusionskoeffizienten als Konstante über den Holzfeuchtebereich hinweg (Schaffrath, 2015). Ob der Diffusionskoeffizient konstant oder in Abhängigkeit der Holzfeuchte veränderlich ist, ist umstritten. Obwohl aus der Diffusionsgleichung nicht hervorgeht, dass dies zwangsläufig zutreffen muss, und viele Autoren nicht von einem konstanten Diffusionskoeffizienten ausgehen, entspricht es einigen Untersuchungen nach einer gültigen Näherung. (Liu et al., 2001).

Da in der vorliegenden Arbeit vorrangig die Werte der Feuchtetransportkoeffizienten relevant sind und die verschiedenen analytischen Herleitungen einen zu großen Umfang einnehmen würden, wird nicht weiter auf die Berechnungen eingegangen und das Thema der Herleitung der Diffusionskoeffizienten wird lediglich angeschnitten. Umfangreiche analytische Lösungsansätze mit den Fickschen Gesetzen und zur Diffusion sind in den Büchern von Baehr und Stephan (2016) und von Crank (1976) zu finden.

Für das Lösen von partiellen Differentialgleichungen sind basierend auf der Herangehensweise bestimmte Anfangs- und Randbedingungen nötig (Niemz & Sonderegger, 2021). Die Werte zur weiterführenden Bestimmung der Feuchtetransportkoeffizienten stammen überwiegend aus experimentellen Messungen. Die stationären Diffusionskoeffizienten resultieren in der Regel aus der sogenannten cup-Methode, während die instationären Werte gemeinhin mit der als Sorptionsmethode bezeichneten Herangehensweise hergeleitet werden (Olek et al., 2005). Die cup-Methode wird in DIN EN ISO 12572 beschrieben. Diese Norm regelt im Allgemeinen die Bestimmung der Dampfdurchlässigkeit und beschreibt den hygrokopischen Bereich. Ein Probekörper wird auf gegenüberliegenden Seiten jeweils unterschiedlichen klimatischen Bedingungen ausgesetzt. Sobald die Holzprobe eine Massenkonstanz und damit an jeder Stelle über den Querschnitt die jeweilige Ausgleichsfeuchte  $u_{eq}$  erreicht hat, können über die Massenänderung die stationären Diffusionskoeffizienten errechnet werden (Sonderegger, 2011). Forschungsarbeiten, in denen die cup-Methode angewendet wird, sind beispielsweise von Vanek und Teisinger (1989) oder von Sonderegger (2011). Bei der instationären Sorptionsmethode wird die gesamte Holzprobe, dessen Anfangsholzfeuchte durch Lagerung bis zur Massenkonstanz in einem bestimmten klimatischen Klimata bekannt ist, in ein konstantes Umgebungsklima gesetzt. Durch Ad- bzw. Desorption nimmt die Probe Feuchtigkeit auf bzw. gibt sie ab und es kommt zu einer zeitabhängigen Feuchtigkeitsänderung. Während der Versuchsdurchführung werden die Massenänderung bzw. die Holzfeuchte gemessen. Letztendlich kann mit den auf diese Weise erhobenen Daten auf den Feuchtetransport und auf die instationären Diffusionskoeffizienten geschlossen werden (Avramidis, 2018). Als Beispiele für die Berechnung der Diffusionskoeffizienten mit Hilfe der Sorptionsmethode können die Arbeiten von Choong und Skaar (1972) oder von Schaffrath (2015) genannt werden. Auf ähnliche Weise lassen sich auch die Bewegungsbeiwerte im überhygrokopischen Bereich feststellen. Eine Möglichkeit der Bestimmung der Diffusionskoeffizienten im kapillaren Bereich ist die Ermittlung aus Trocknungsversuchen und der damit einhergehenden Massen- bzw. Holzfeuchteänderung über den Probenquerschnitt im Laufe der Zeit (Fortuin, 2003). Des Weiteren gibt es Bestimmungsgleichungen für den Diffusionskoeffizienten, welche unter Berücksichtigung des Wasseraufnahmekoeffizienten gebildet werden. Die Bedingung hierfür ist die Proportionalität der Feuchteaufnahme zur Wurzel der Zeit. Zu finden ist eine solche Arbeitsweise beispielsweise bei Koponen (1987) oder bei Sonderegger (2011).

Alternative Methoden, um die Feuchtetransportkoeffizienten zu erhalten, sind bildgebende Verfahren wie die Computertomographie oder die Neutronenradiographie. Bei der mit der Röntgenstrahlung verwandten Neutronenradiographie handelt es sich um eine neuere Möglichkeit der Messung, bei der über den Querschnitt auf den Wasserstoffgehalt geschlossen werden kann. Das Verfahren gilt als zerstörungsfrei (Mannes et al., 2009). Eriksson et al. (2006) bestimmen mit Hilfe von CT-Scans die Diffusionskoeffizienten.

Für einen perfekt fickianen Körper sollten sowohl nach stationärer als auch nach instationärer Messmethode die gleichen Diffusionskoeffizienten vorgefunden werden. Da dies allerdings nicht der Realität entspricht, wird in Bezug auf den Feuchtetransport in Holz von einigen Forschenden von einer nicht vollkommenen Übereinstimmung mit dem Vorgang der Diffusion ausgegangen (Frandsen et al., 2007; Time, 1998; Wadsö, 1993). Nach Wadsö (1993) liegt insbesondere bei sehr hohen relativen Luftfeuchten des Umgebungsklimas kein rein diffusives Verhalten vor und er bezeichnet diesen Bereich als ‚non-fickian‘. Bei geringeren Luftfeuchten bis zu 75 % hingegen hält er die Fickschen Gesetze für anwendbar. Frandsen et al. (2007) versuchen dieses zweistufige Verhalten mathematisch darzustellen. Ein sogenanntes multi-fickianes Modell teilt den Feuchtetransport in die Diffusion des Wasserdampfes und des gebundenen Wassers auf und liefert jeweils eine auf den Fickschen Gesetzen basierende Diffusionsgleichung. Bei niedrigeren Luftfeuchten überwiegt die Wasserdampfdiffusion, wohingegen bei höheren Luftfeuchten der Anteil der Diffusion des gebundenen Wassers signifikanter wird (Frandsen et al., 2007). Sonderegger (2011) bestimmt in seiner Dissertation sowohl stationäre als auch instationäre Werte der Fichte und der Buche. Den Grund der in etwa doppelt so hoch gemessenen stationären Werten im Vergleich zu Instationären erklärt er durch die auftretenden Volumenänderungen und damit einhergehenden Schwellspannungen. Avramidis (2018) nennt das Phänomen der auftretenden Relaxation als Ursache für die höheren stationären Werte. Genauere Erläuterungen und Hintergründe dieser Erklärungsversuche liegen nicht vor. Anderen Untersuchungen zufolge kann das Verhältnis von stationärem zu instationärem Ergebnis, was jeweils den Lösungen des 1. und 2. Fickschen Gesetzes entspricht, sogar bis zum 10-fachen reichen (Sonderegger, 2011).

Allerdings treten ebenso bei gleicher mathematischer Berechnungsweise mittels des instationären Fickschen Gesetzes teilweise große Streuungen in Bezug auf die errechneten Diffusionskoeffizienten auf. Der primäre Ursprung der Varianzen ist hierbei auf die Eigenschaft zurückzuführen, dass Holz als natürlich gewachsener Rohstoff starken anatomischen Schwankungen unterliegt (Böhner, 1976). Cunningham et al. (1989) beispielsweise ermitteln innerhalb der gleichen Versuchsdurchführung Diffusionskoeffizienten für Probekörper der Kiefer, deren Werte um einen Faktor von bis zu  $10^2$  streuen. Je nach Anteil von Kern- bzw. Splintholz, je nach Vegetationsperioden und daraus resultierendem Früh- oder Spätholzanteil oder je nach Wachstumsstandort des lebenden Baumes unterscheiden sich der strukturelle Aufbau der Kapillaren bzw. der Bestandteile wie bspw. existierende Holzstrahlen sowie die Rohdichte des Holzes (Kollmann, 1982; Niemz & Sonderegger, 2021). Dies sind für die Feuchtetransportmechanismen relevante Parameter und entscheidend für die Diffusivität der jeweiligen Holzart (Murr, 2021; Nadler et al., 1985; Niemz & Sonderegger, 2021). Weiteren Einfluss auf die Werte der Bewegungsbeiwerte hat die Temperatur. Die Diffusionskoeffizienten wachsen mit steigender Temperatur stark an (Niemz & Sonderegger, 2021).

Als weitere maßgebende Fehlerquellen, aus denen zusätzlich Differenzen der ermittelten Diffusionskoeffizienten resultieren, können Ungenauigkeiten bezüglich der Messungen der klimatischen Verhältnisse wie relative Luftfeuchte und Temperatur sowie der Holzfeuchte der Probe genannt werden (Murr, 2021; Nadler et al., 1985).

Analog zum Wasseraufnahmekoeffizienten weist der Diffusionskoeffizient aufgrund des kapillaren Aufbaus des Holzes je nach anatomischer Richtung unterschiedliche Größenordnungen auf (Sonderegger, 2011). Dementsprechend sind die Diffusionskoeffizienten in longitudinaler Richtung größer als radial und tangential. Der Faktor ist abhängig von der jeweiligen Forschungsarbeit. Cunningham et al. (1989) sprechen bei 30 °C als grobe Richtlinie von einer Zehnerpotenz, wohingegen das Verhältnis von longitudinalem zu transversalem Wert bei Koponen (1987) bei 20°C und einer Rohdichte des Holzes von 411 kg/m<sup>3</sup> circa 2,05 entspricht. Niemz und Sonderegger (2021) nennen im Holzfeuchtebereich von 25 % einen Faktor von etwa 2 – 4 und bei einer Holzfeuchte von 5 % den Faktor 50 – 100. Zudem wird ähnlich dem Wasseraufnahmekoeffizienten oftmals der radiale und der tangentiale Wert zu einer transversalen Zahl zusammengefasst, wie beispielsweise bei Rozas et al. (2009) oder bei Koponen (1987), da sich dieser bei Weichhölzern kaum unterscheidet (Hukka, 1999). Der Vergleich von konkreten Literaturwerten erfolgt in Kapitel 2.3.5.

### 2.3.2 Diffusion im hygroskopischen Bereich

Historisch bedingt beruht der Großteil der Berechnungen des Feuchtetransportes in Holz, insbesondere im hygroskopischen Bereich, auf den Diffusionsgleichungen (siehe Gleichungen (2-4) bis (2-6)). Gründe der häufigen Verwendung der Fickschen Gesetze sind die relativ einfachen mathematischen Ansätze und die ausreichend genauen Ergebnisse (Čiegis & Starikovičius, 2002; Skaar, 1988). Stationär kann der diffusive Transport im hygroskopischen Holzfeuchtebereich nach DIN EN ISO 12572 und der cup-Methode zum einen mit der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl oder dem Diffusionskoeffizienten angegeben werden, wie es zum Beispiel bei Sonderegger (2011) der Fall ist. Die vermutlich am meist genutzte Lösungsmethode ist allerdings das instationäre 2. Ficksche Gesetz (Time, 1998). Wie bereits erwähnt, geht der Feuchtetransport im hygroskopischen Bereich auf zwei verschiedene Arten von statten. Zum einen treiben die Wassermoleküle dampfförmig durch die Lumen, zum anderen können sie sich in gebundener Form durch die Zellwand bewegen (Siau, 1984). Die möglichen Pfade, die dabei zurückgelegt werden können, werden in Abbildung 2-9 schematisch dargestellt.

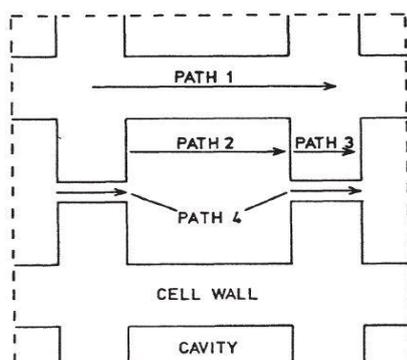


Abbildung 2-9: Schematische Darstellung der vier primären Pfade des transversalen Feuchtetransports aus (Skaar, 1988)

Path 1: Die intermicellaren, hygroskopisch gebundenen Wassermoleküle bewegen sich innerhalb der Zellwand (Stamm, 1967b).

Path 2: Wasserdampf sowie teilweise freies Wasser, welches in sehr hohen Luftfeuchten beim Erreichen des Fasersättigungsbereiches auftreten kann, strömen durch die Lumen (Skaar, 1988; Time, 1998).

Path 3: Der Wasserdampf eines Lumens kondensiert an der Zellwand, diffundiert durch diese hindurch in gebundener Form und verdampft im benachbarten Lumen erneut (Stamm, 1967b).

Path 4: Die Wassermoleküle durchdringen die Tüpfel entweder als Dampf durch den Torus oder in gebundener Form durch die Schließhaut (Stamm, 1967b). Ersterer Transportweg steht allerdings im Widerspruch zu Ausführungen von Siau (1984), wonach der Torus impermeabel sei. Die graphische Darstellung eines Tüpfels mitsamt den Begrifflichkeiten ist in Abbildung 2-2 (links) zu sehen.

Der genaue Sachverhalt der Bewegung von gebundenem Wasser im Zellwandsystem ist bislang nicht gänzlich geklärt (Kucharczyk & Pawlik, 2020). Nach Skaar (1988) stellt der Weitertransport von gebundenem Wasser in Bezug auf die Feuchteweiterleitung infolge der Diffusion im hygroskopischen Bereich den maßgebenden Pfad des Feuchteflusses dar. Anderen Autoren nach ist der Wert des Diffusionskoeffizienten von gebundenem Wasser im Gegensatz zur Wasserdampfdiffusion sehr gering (Frandsen et al., 2007; Kucharczyk & Pawlik, 2020). Bei letztgenanntem Diffusionsvorgang stellen die zu durchdringenden Tüpfel für den Wasserdampf den 40-fachen Widerstand im Vergleich zu einer gleich langen Wegstrecke in den Kapillaren dar (Avramidis, 2018). Nähert sich die Holzfeuchte dem Fasersättigungsbereich, beginnt durch die Kapillarkondensation (vgl. Kapitel 2.2.2) freies Wasser in den feinsten Kapillaren zu existieren. Durch das Dampfdruckgefälle verdampft dieses an den ausgelasteten Lumen und diffundiert in benachbarte luftgefüllte Poren, um den Konzentrationsunterschied abzubauen (Niemz & Sonderegger, 2021). Die Dampfdiffusion in den Kapillaren ist jeweils abhängig von der Porengröße. Je größer diese ist, desto freier sind die Wassermoleküle in ihrer Bewegung und desto mehr Geltung hat die Anwendung des Modells der Diffusion bzw. der Fickschen Gesetze, da es zu weniger Zusammenstößen mit der Zellwand kommt. Eine zu 100 % realitätsgetreue Anwendung der Diffusionsgleichungen ist in porigen Systemen aufgrund der Zellwand nicht zu erreichen (Künzel, 1994). Während der Diffusionskoeffizient der Wasserdampfdiffusion unabhängig von der Holzfeuchte annähernd konstant bleibt, nimmt der Diffusionskoeffizient des gebundenen Wassers mit steigender Holzfeuchte etwa exponentiell zu (Murr, 2021).

Die beiden Prozesse der Wasserdampfdiffusion und der Diffusion des gebundenen Wassers werden beispielsweise von Frandsen et al. (2007), Krabbenhoft und Damkilde (2004) oder Hozjan und Svensson (2011) mit Hilfe zweier miteinander gekoppelten Diffusionsgleichungen betrachtet. Im Gegensatz dazu fasst der Diffusionskoeffizient, der lediglich mittels einer einzelnen Fickschen Diffusionsgleichung hergeleitet wurde, einen gemeinschaftlichen Wert aus diesen zwei Prozessen des Feuchtetransports zusammen (Rozas et al., 2009; Time, 1998). Dies ist auch die meistgenutzte Näherung zur Beschreibung der Bewegung der Holzfeuchte (Angst & Malo, 2010). Abbildung 2-10 stellt die beiden Prozesse noch einmal graphisch dar. Je höher die relative Luftfeuchte der Umgebung wird, desto größer wird der Einfluss der Diffusion des gebundenen Wassers (Frandsen et al., 2007).

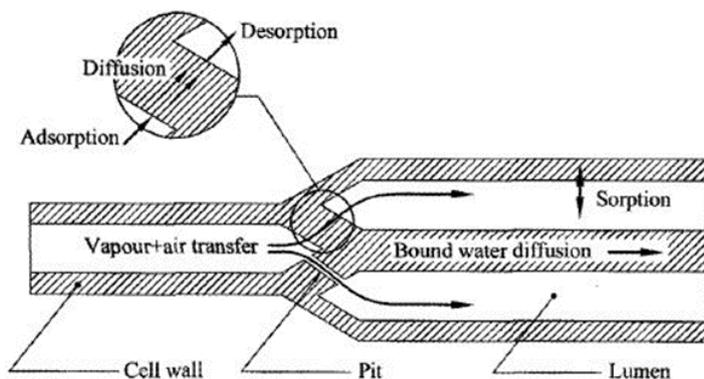


Abbildung 2-10: Feuchtetransportmodell aus (Krabbenhoft & Damkilde, 2004)

Wie im Vorhergehenden erwähnt, laufen nach einigen Autoren die Vorgänge der Dampfdiffusion und die Diffusion des gebundenen Wassers nicht unabhängig vom Feuchtegehalt ab. Es wird erläutert, dass die Diffusionskoeffizienten in Abhängigkeit der Holzfeuchte veränderlich sind. Diese Meinung ist in der Literatur allerdings inkonsistent. Beispiele für Untersuchungen, in denen konstante Diffusionskoeffizienten angenommen werden, sind die von Choong und Skaar (1972) oder Kucharczyk und Pawlik (2020). Oftmals wird diese Hypothese aber auch aus praktischen Gründen angenommen, da auf diese Weise die partielle Differentialgleichung mit weniger Aufwand zu lösen ist und die Annahme nahezu zu ebenso hinreichend guten Ergebnissen führt (Simpson & Liu, 1997). Der Großteil der Literatur geht allerdings von holzfeuchteabhängigen Diffusionskoeffizienten aus (Kucharczyk & Pawlik, 2020). Hierbei können beispielsweise Forschungsarbeiten von Avramidis und Siau (1987), Eriksson et al. (2006), Mannes et al. (2009), Olek und Weres (2007), Sonderegger (2011) oder Vanek und Teischinger (1989) aufgezählt werden. Entsprechend dem in etwa exponentiellen Wachstum des Transports durch gebundenes Wasser verwenden diese Autoren teilweise einen exponentiellen Lösungsansatz zur empirischen Beschreibung des Feuchtetransports und erreichen durch exponentiell wachsende Diffusionskoeffizienten gute Näherungen an die experimentell ermittelten Werte, siehe z. B. in (Mannes et al., 2009). Avramidis (2018) erklärt die mit der Holzfeuchte steigenden Diffusionskoeffizienten durch die intermicellare Bindung des gebundenen Wassers. Mit wachsender Holzfeuchte sättigen die Wassermoleküle zuerst die freien Hydroxylgruppen der chemischen Bestandteile, bevor dann durch Physisorption eine polymolekulare Schicht von Wassermolekülen entsteht. Bis zu sieben Schichten sollen möglich sein. Je weiter außen eine Schicht liegt, desto schwächer ist die physische Bindung zwischen den Wassermolekülen und der Micelle und desto leichter lässt sie sich unter einem Feuchtestrom lösen (Avramidis, 2018).

Des Weiteren nehmen die Diffusionskoeffizienten im hygrokopischen Bereich nach Siau (1984) mit steigender Rohdichte des Holzes ab und mit anwachsender Temperatur zu. Zusätzlich hat die anatomische Richtung sowie die Holzart selbst einen Einfluss auf die Werte des Diffusionskoeffizienten, wie unter anderem durch Versuche von Vanek und Teischinger (1989) und Sonderegger (2011) bestätigt wird. Das Holz der Fichte besitzt sowohl stationär als auch instationär einen in etwa zwei bis drei Mal so großen Diffusionskoeffizienten als Buchenholz. (Sonderegger, 2011). Vanek und Teischinger (1989) ermitteln ähnliche Tendenzen. Bei ihnen weist die Eiche etwas niedrigere Werte auf als die der Buche und die Diffusionskoeffizienten der Kiefer sind leicht unterhalb denen der Fichte zu finden. Je weiter sich die Holzfeuchte dem Fasersättigungsbereich nähert, desto größer wird der

Abstand der Diffusionskoeffizienten der Nadelhölzer zu den zwei genannten Laubhölzern, wobei die Werte der beiden Weichhölzer oberhalb der beiden Laubhölzer liegen (Vanek & Teischinger, 1989). In Bezug auf die Richtungsabhängigkeit ermittelt Sonderegger (2011) für die Fichte in longitudinaler Richtung bis zu zwölf Mal so hohe Werte als quer zur Faser. Bei der Buche kann der Faktor bis zu 15 betragen. Olek et al. (2005) bestimmen im hygrokopischen Bereich Verhältnisse der anatomischen Richtungen Tangential / Radial / Longitudinal mit 1 / 1,1 / 6,8 (Salin, 2008). Avramidis (2018) spricht in longitudinaler Richtung von einem 2,5-fachen Wert im Vergleich zur transversalen Richtung. Bei getrennter Beobachtung des transversalen Werts der Fichte in je der radialen und tangentialen Richtung ist nach Sonderegger et al. (2010) und Vanek und Teischinger (1989) festzustellen, dass bei kleinen Holzfeuchten der radiale Diffusionskoeffizient größer ist als der tangentielle Wert. Ab 15 % (Sonderegger et al., 2010) bzw. 8 % (Vanek & Teischinger, 1989) ändert sich diese Tendenz und der tangentielle Diffusionskoeffizient befindet sich oberhalb des radialen Wertes. Als Grund für diesen Sachverhalt nennt Sonderegger et al. (2010) die radial ausgerichteten Holzstrahlen, die insbesondere bei geringer Holzfeuchte den Wasserdampftransport erleichtern. Bei höheren Holzfeuchten gewinnt gegenüber der annähernd gleichbleibenden Dampfdiffusion der Einfluss des Feuchtestroms des gebundenen Wassers an Bedeutung. Bezüglich des unterschiedlichen Feuchtetransportverhaltens von Kern- zu Splintholz gibt es Time (1998) zufolge, der sich auf verschiedene Forschungsarbeiten beruft, für die Fichte keine bemerkbaren Abweichungen.

Weiter wurden Time (1998) zufolge von verschiedenen Autoren Messungen durchgeführt, in denen die transversalen Diffusionskoeffizienten in Abhängigkeit der Ad- und Desorption für die Fichte bestimmt wurden. Dabei wurde ein Faktor von Desorption zu Adsorption von 2,5 bis 3 festgestellt.

### 2.3.3 Diffusion im überhygrokopischen Bereich

Die meisten Forschungsarbeiten, die den Feuchtetransport in Holz untersuchen, begrenzen sich auf den hygrokopischen Bereich. Insbesondere aber wenn die Zellwände gesättigt sind und freies Wasser in den Zellhohlräumen des Holzes vorhanden ist, sind ebenso die Feuchtetransportkoeffizienten oberhalb des Fasersättigungspunktes von Bedeutung (Cunningham et al., 1989; El Kouali & Vergnaud, 1991). Der überhygrokopische, kapillare Bereich unterscheidet sich vom hygrokopischen Bereich dadurch, dass neben dem Wasserdampf und dem gebundenen Wasser zusätzlich freies Wasser im Porensystem des Holzes existiert (Stamm, 1967a). Der Übergang der beiden Bereiche ist wie bereits erwähnt allerdings fließend und nicht exakt zu bestimmen (Kollmann, 1982).

Holz als natürlich gewachsenes Material weist ein weitverzweigtes Kapillarsystem auf, welches für die Permeabilität und dementsprechend auch für die Geschwindigkeit der Feuchtigkeitsbewegung verantwortlich ist (Böhner, 1976). Entscheidende Parameter für den Feuchtetransport sind insbesondere die Volumenanteile, Durchmesser und Querschnittsformen der Strukturelemente wie Poren, Tüpfel sowie Holzstrahlen. Das bedeutet, dass das Makrosystem der zu betrachtenden Holzprobe einen entscheidenden Einfluss auf das Feuchtetransportverhalten hat (Niemz & Sonderegger, 2021). Nach Siau (1984) hat zudem die Viskosität des durchdringenden Mediums eine große Bedeutung auf die Geschwindigkeit der strömenden Flüssigkeit. Weiterhin nimmt im kapillaren Bereich, ebenso wie im hygrokopischen Bereich, der Diffusionskoeffizient mit steigender Temperatur stark zu (Kollmann, 1982).

Abbildung 2-11 zeigt auf der linken Seite die schematische Darstellung des Feuchtetransports in jeweils longitudinaler und tangentialer Richtung. Rechts befindet sich eine beispielhafte Zeichnung von Tracheiden inklusive der seitlich angeordneten Tüpfel.

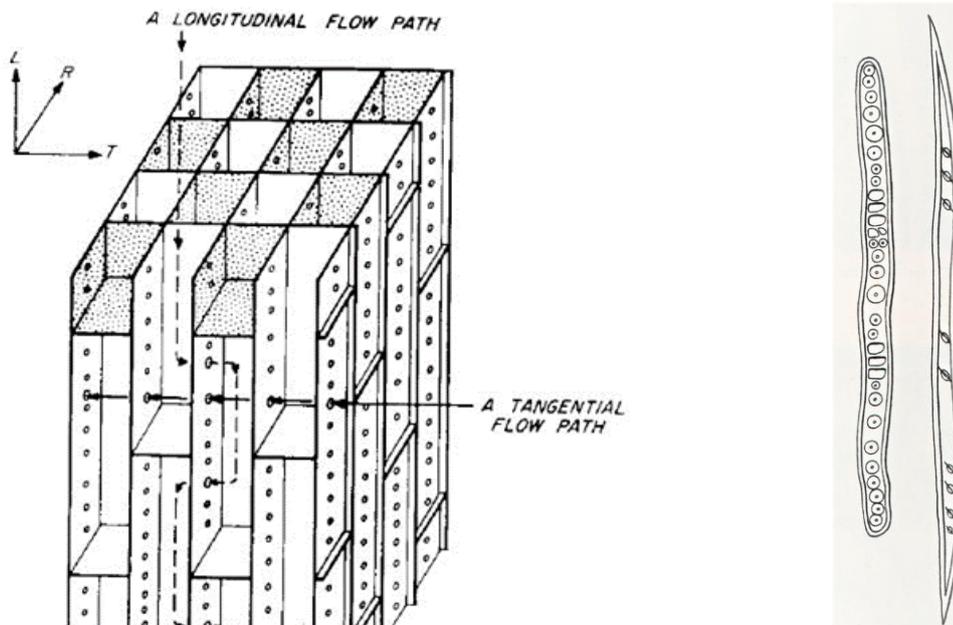


Abbildung 2-11: Links: Schematische Darstellung des Feuchtetransportes mit longitudinalem und tangenialem Pfad nach (Comstock, 1970); rechts: Tracheiden inklusive Tüpfel nach (Kollmann, 1982)

Mit ansteigender Holzfeuchte  $u$  nähert sich der Prozess der Diffusion insbesondere in longitudinaler Richtung einem kapillargetriebenen Prozess (Rosenkilde & Söderström, 1997). Innerhalb eines mit freiem Wasser gefüllten Lumens erfolgt die Bewegung des Wassers infolge von Kapillarkräften. Bei Betrachtung der kompletten Holzstruktur liegt ein System von miteinander verbundenen unterschiedlich weiten Kapillaren vor. Hier ist eine reine Kapillarbewegung nicht mehr möglich. Je nach Durchmesser liegen zu verschiedenen Anteilen luft- und wassergefüllte Lumina vor. Befinden sich das Lumen einer Tracheide selbst oder Lumina benachbarter Tracheiden nicht in einem Gleichgewichtszustand und es liegen lokale Feuchte- und damit Zugunterschiede vor, so bewirken diese Zugunterschiede innerhalb der Kapillaren eine Feuchtebewegung. Die Wassermoleküle verdampfen an den dampfdruckgesättigten Stellen und kondensieren an den nicht gesättigten Stellen wieder. Da die Zugkraft bei kleiner werdendem Kapillardurchmesser größer wird, saugen die engeren Tracheiden Wassermoleküle aus den Weiten. Dementsprechend sind die Kapillaren mit geringerem Durchmesser stets als erstes mit freiem Wasser gefüllt (Kollmann, 1982; Niemz & Sonderegger, 2021). Tracheiden, die ein sehr weites Lumen aufweisen, sind entsprechend irrelevant in Bezug auf die Geschwindigkeit des Feuchtetransports im überhygroskopischen Bereich, weil durch den großen Durchmesser die sehr kleinen Zugkräfte vernachlässigbar sind (Stamm, 1946). Den bestimmenden Widerstand des Feuchtstroms und die damit einhergehende Regulierung der Geschwindigkeit gehen insbesondere von den geringen Durchmessern der Tüpfel aus, welche von den Wassermolekülen durchdrungen werden müssen, um benachbarte Zellen zu erreichen (Siau, 1984).

Die Feuchtebewegung in tangentialer Richtung, welche der durchgestrichene Pfad in Abbildung 2-11 (links) zeigt, basiert, wie die schematische Darstellung aufzeigt, auf denselben Transportprinzipien wie der gestrichelte, longitudinale Transportweg (Comstock, 1970). Analog zu den bereits behandelten hygroskopischen Feuchtetransportkoeffizienten und den Wasseraufnahmekoeffizienten wird in der vorliegenden Arbeit der tangentialer und der radiale Diffusionskoeffizient ebenso wieder zu einem gemeinsamen transversalen Durchschnittswert zusammengefasst, wie es beispielsweise in den Forschungsarbeiten von Koponen (1987) oder von Rozas et al. (2009) der Fall ist.

Siau (1984) zufolge, der sich ausgiebig mit den Feuchtetransportprozessen in Holz beschäftigt, kann im kapillaren Bereich sowohl ein viskoser oder laminarer als auch ein turbulenter Fließzustand eintreten. Eine laminare Strömung ist ein geradliniger, stromlinienförmiger Fluss mit einer parabelförmigen Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt. Zur mathematischen Beschreibung können das Gesetz nach Darcy bzw. das Gesetz nach Hagen-Poiseuille angewendet werden. Ein turbulenter Fließzustand tritt ein, sobald Wirbel oder Turbulenzen in der Strömung auftreten. Solche treten ein, wenn das Wasser aus den Tüpfeln heraus in die Lumen der Tracheiden strömt (Niemz & Sonderegger, 2021; Siau, 1984).

Oftmals wird versucht, den Feuchtestrom in den Kapillaren im überhygroskopischen Bereich mit Hilfe des Gesetzes von Darcy (Gleichung (2-7)) oder mit dem Gesetz von Hagen-Poiseuille (Gleichung (2-8)) einer viskosen Strömung anzunähern (Siau, 1984).

Gesetz nach Darcy:

$$Q = \frac{K \cdot A}{\eta} \cdot \frac{\Delta p}{l} \quad (2-7)$$

Gesetz nach Hagen-Poiseuille:

$$Q = \frac{N \cdot \pi \cdot r^4}{8 \cdot \eta} \cdot \frac{\Delta p}{l} \quad (2-8)$$

---

$Q$	$[m^3/s]$	Volumenstrom durch die Kapillaren
$K$	$[m^3/m]$	Spezifische Permeabilität
$A$	$[m^2]$	Querschnittsfläche des Probekörpers
$\eta$	$[Pa \cdot s]$	Dynamische Viskosität der Flüssigkeit
$\Delta p$	$[Pa]$	Strömung verursachende Druckdifferenz
$l$	$[m]$	Länge in Fließrichtung
$N$	$[-]$	Anzahl der kreisförmigen, parallelen Kapillaren
$r$	$[m]$	Innenradius der Kapillare

Das Gesetz von Hagen-Poiseuille lässt sich aus dem Gesetz von Darcy überführen und beschreibt den laminaren Feuchtestrom einer newtonschen Flüssigkeit, wie beispielsweise Wasser, durch das poröse Medium des Holzes, welches als Bündel von parallel nebeneinander liegenden Röhren bzw. Kapillaren modelliert wird. Die Durchlässigkeit des Holzes wird dabei mittels der spezifischen Permeabilität  $K$  angegeben. Hier kann die physikalische Einheit *darcy*  $[m^3/m]$  verwendet werden. 1 *darcy* entspricht in etwa  $9,87 \times 10^{-13} m^3/m$  (Siau, 1984). Forschungsarbeiten, die diese Einheit nutzen, sind

hierzu beispielsweise von Comstock (1970) oder von Emaminasab et al. (2017). Neben der Permeabilität von Flüssigkeiten können die beiden Gesetzmäßigkeiten ebenso zur Bestimmung der Gaspermeabilität im hygroskopischen Bereich angewendet werden (Niemz & Sonderegger, 2021).

Obwohl die beiden Gleichungen sachdienlich den Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit des Volumenstroms und dem auftretenden Druckgefälle aufzeigen, handelt es sich um eine starke Idealisierung des Zusammenhangs, da die Beschreibung des Feuchtestroms durch das Kapillarsystem des Holzes als weit komplexerer Prozess anzusehen ist. Holz ist mit einem parallelen Kapillarmodell nur bedingt beschreibbar. Sowohl das Gesetz von Darcy als auch das Gesetz von Hagen-Poiseuille gehen von unendlich langen Kapillaren und impermeablen Zellwänden aus (Siau, 1984). Dies ist allerdings nicht der Realität entsprechend, da wie in Abbildung 2-11 (rechts) zu sehen ist, die Tüpfel lediglich seitlich an den Tracheiden vorzufinden sind. An den Enden der Kapillaren verzweigen sich die Tracheiden und laufen spitz zu (Kollmann, 1982; Siau, 1984). Ein weiterer Grund für das nicht-darciane Verhalten von Flüssigkeiten in Holz kann auf die im Holz existierenden Inhomogenitäten zurückgeführt werden. Strukturelle Unterschiede, das heißt Zonen mit verschiedenen großen Durchlässigkeiten, stellen eine erhebliche Abweichung vom einheitlichen parallelen Zylinderkapillarmodell dar. Wesentlicher Kritikpunkt in Bezug auf die Verwendung der Gesetzmäßigkeiten zur Beschreibung des Feuchtestroms als laminare Strömung ist allerdings, dass es sich in der Realität um instationäre Transportvorgänge handelt. Der Volumenstrom, der durch teilweise auftretende Nichtlinearitäten wie beispielsweise durch Turbulenzen oder Wirbel beim Durchdringen der engen Tüpfel gekennzeichnet ist, ist nur schwer in ein stationäres, viskoses Transportmodell zu überführen (Hanvongjirawat, 2003; Siau, 1984). Die Verwendung der beiden oben genannten Gesetzmäßigkeiten setzt voraus, dass sich bereits ein stationärer, laminarer Feuchtestrom eingestellt hat. Allerdings dringt im instationären Diffusionsvorgang ebenso Wasser in noch leere Tracheiden ein, wobei die Gesetze von Darcy und von Hagen-Poiseuille genau genommen keine Gültigkeit besitzen (Kollmann, 1982).

Deshalb wird im überhygroskopischen Bereich neben der Beschreibung als kapillare Strömung, ebenso wie im Bereich unterhalb des Fasersättigungsbereiches, oftmals der Ansatz der Diffusion als mathematischen Näherung verwendet. Nach Stamm (1967b) handelt es sich zwar beim Feuchtettransport im kapillaren Bereich im Gegensatz zum hygroskopischen Bereich nicht direkt um einen Diffusionsvorgang, aber die Bewegung des freien Wassers wird vom Diffusionsprozess des Holzfeuchtebereichs unterhalb des Fasersättigungsbereiches gesteuert. Diese Ansicht bestätigt Kollmann (1982) und führt weiter aus, dass der überhygroskopische Bereich dadurch selbst als Diffusionsphänomen beschreibbar wird. Insgesamt gibt es bis heute zahlreiche Veröffentlichungen, die insbesondere bezüglich der Holztrocknung den Ansatz der Diffusion über den kompletten Holzfeuchtebereich nutzen und damit angemessene Ergebnisse erzielen (Fortuin, 2003). Schon Tuttle (1925), der gewissermaßen als Präzedenzfall das Phänomen der Diffusion verwendete, benutzte dieses über beide Holzfeuchtebereiche hinweg und untersuchte erfolgreich die Trocknung eines Probekörpers von einer Holzfeuchte von 50 % bis auf 8 % mit einem durchgängigen konstanten Diffusionskoeffizienten. Simpson und Liu (1997) begründen die Benutzung eines Diffusionskoeffizienten im kapillaren Bereich mit zwei Argumenten. Neben der bereits erwähnten Erläuterung, dass nicht die Kapillarwirkung, sondern die nicht faser gesättigten Zellen für die Feuchtebewegung verantwortlich sind, stellen sie die Überlegung an, dass es sich bei der Verwendung der Diffusion lediglich um eine

mathematische Annäherung eines nicht exakt darstellbaren Prozesses handelt. Annahmen über den konkreten Mechanismus werden hierbei nicht getroffen. Der Diffusionskoeffizient charakterisiert lediglich einen Proportionalitätsfaktor zwischen einer Holzfeuchteänderungsrate und einem Feuchtegradienten. Aufgrund dieser Logik gewähren Simpson und Liu (1997) der Diffusionsmathematik über den gesamten Holzfeuchtebereich ihre Gültigkeit. Auch Künzel (1994) zufolge kann, wie es von vielen Autoren praktiziert wird, der Kapillartransport in wassersaugenden Baustoffen mit der Methodik der Diffusion approximiert werden. Als Begründung gibt Künzel an, dass nach Crank (1976) der Diffusionsansatz mit konzentrationsabhängigen Kapillartransportkoeffizienten, die den Diffusionskoeffizienten entsprechen, bezüglich der Massenzunahme die gleiche Wurzel-der-Zeit-Abhängigkeit aufweist wie der kapillare Saugprozess. Ebenso wie Crank erläutert auch bereits Klopfer (1974), dass es diesen Zusammenhang zwischen kapillarem Saugen, dem Wasseraufnahmekoeffizient sowie Diffusionskoeffizienten gibt.

Ähnlich dem hygrokopischen Bereich besteht im kapillaren Bereich ebenso wenig Einigkeit über die Werte und den Verlauf des Feuchtetransportkoeffizienten. Es gibt Forschungsarbeiten, die die Diffusivität im überhygrokopischen Bereich als Konstante betrachten, andere nennen wiederum holzfeuchteabhängige Diffusionskoeffizienten. Konstante Feuchtetransportkoeffizienten werden beispielsweise von Nadler et al. (1985), von Hukka (1999) oder von Amardo et al. (2020) gegeben. Nadler et al. (1985) wählen dabei sowohl für den Bereich unter als auch über der Fasersättigung jeweils einen konstanten Wert, wobei der Diffusionskoeffizient des kapillaren Bereichs das Vierfache des Koeffizienten im hygrokopischen Bereich entspricht. Chen et al. (1996) bestimmen in Bezug auf die Holz Trocknung im kapillaren Bereich den Diffusionskoeffizienten jeweils einmal als Konstante und einmal als holzfeuchteabhängige lineare Kurve. Allerdings wird festgestellt, dass in Bezug auf die modellierte Vorhersage eine kaum signifikante Verbesserung zu beobachten ist bei der Verwendung eines holzfeuchteabhängigen Diffusionskoeffizienten. Dementsprechend ist die Annahme eines konstanten Kapillartransportkoeffizienten durchaus ausreichend (Chen et al., 1996). Im Gegensatz dazu sind die veröffentlichten Diffusionskoeffizienten von Koponen (1987) veränderlich mit der Holzfeuchte. Sowohl die longitudinalen als auch die transversalen Werte nehmen mit steigender Holzfeuchte vom Fasersättigungsbereich aus ab.

Vergleicht man weiter die longitudinalen Diffusionskoeffizienten mit denen in transversaler Richtung, ist zu erwarten, dass die Diffusionskoeffizienten in Faserrichtung betragsmäßig größer sind als quer zur Faser. Dies liegt an der geringeren Anzahl der zu durchdringenden Tüpfel bei gleicher Weglänge (siehe Abbildung 2-11), wodurch die Wassermoleküle in longitudinaler Richtung einem geringeren Widerstand ausgesetzt sind als quer zur Faser (Stamm, 1946). Amardo et al. (2020) geben im überhygrokopischen Bereich für die marokkanische Buche einen in longitudinaler Richtung circa 19 % höheren Wert als in transversaler Richtung an. Dieser Faktor erscheint gering, zieht man zum Vergleich den Faktor von 2,05 (bei 20°C und einer Rohdichte von 411 kg/m<sup>3</sup>) von Koponen (1987) heran. In Bezug auf die Rohdichte gibt Koponen (1987) Bestimmungsgleichungen an, wonach mit steigender Rohdichte der Diffusionskoeffizient kleiner wird. Beurteilt man den Diffusionskoeffizienten weiter in Bezug auf der Unterscheidung von Splint- und Kernholz, beschreibt Stamm (1967a) eine um ein Vielfaches höhere Durchlässigkeit von Splintholz im Vergleich zum Kernholz.

### 2.3.4 Einfluss der Umgebungsbedingungen – Oberflächenemissionskoeffizient

Analog zur Wärmeleitung tritt zwischen der Holzoberfläche und der Umgebung ein Übergangswiderstand auf, der zu Auswirkungen auf den Diffusionsstrom führt. Das bedeutet, ein auf die Wassermoleküle wirkender Widerstand an der Oberfläche des Probekörpers beeinflusst den Übertritt des Wassers in die Umgebungsluft (Söderström & Salin, 1993). Folglich spielen in Bezug auf den Feuchtestrom im Holz zwei verschiedene Faktoren eine Rolle. Ersterer ist der bisher ausführlich dargelegte Diffusionskoeffizient, welcher den inneren Widerstand im Holzprobekörper beschreibt. Demgegenüber charakterisiert ein äußerer Widerstand den Übergang zwischen Holzoberfläche und Atmosphäre. Als Pendant zum Diffusionskoeffizienten  $D$  wird der äußere Widerstand vom sogenannten Oberflächenemissionskoeffizient  $S$  gekennzeichnet. Dieser wird in der Einheit [m/s] definiert (Chen et al., 1995). Der totale Widerstand entspricht dementsprechend der Kombination aus dem inneren und dem äußeren Widerstand. Der direkt aus Versuchsdurchführungen gemessene Diffusionskoeffizient beinhaltet sowohl den wahren Diffusionskoeffizienten  $D$  und den Oberflächenemissionskoeffizienten  $S$ . Man spricht vom scheinbaren Diffusionskoeffizienten  $D'$  (Avramidis & Siau, 1987).

Der Oberflächenemissionskoeffizient ist ein Maß für die Interaktion zwischen Holzkörper und Umgebungsklima und ist invers proportional zum äußeren Widerstand (Choong & Skaar, 1972). Das bedeutet, dass mit steigendem Oberflächenemissionskoeffizient der Widerstand der Wassermoleküle in die Umgebungsluft zu emittieren geringer wird. Spricht man von einem unendlich großen Oberflächenemissionskoeffizienten, existiert folglich kein Übergangswiderstand mehr. In diesem Fall würde der Feuchtegehalt an der Holzoberfläche exakt der Gleichgewichtsfeuchte entsprechen (Söderström & Salin, 1993). Die Annahme des sofortigen Angleichens der oberflächennahen Schicht an die Ausgleichsfeuchte  $u_{eq}$  ist allerdings in der Praxis nicht zutreffend (Böhner, 1976). Der Diffusionsstrom, der an der Grenzfläche zwischen dem Holzkörper und der umgebenden Luftschicht herrscht, kann als Produkt aus dem Oberflächenemissionskoeffizienten und der Differenz zwischen der Oberflächenholzfeuchte und der Ausgleichsfeuchte betrachtet werden. Gleichung (2-9) zeigt den Zusammenhang zwischen dem Diffusionskoeffizient, der den inneren Widerstand kennzeichnet, und dem Oberflächenemissionskoeffizienten, der den äußeren Widerstand abbildet (Liu, 1989; Schaffrath, 2015).

$$D \cdot \frac{\partial u}{\partial x} = S \cdot (u_{eq} - u_S(t)) \quad (2-9)$$

---

$D$	[m <sup>2</sup> /s]	Diffusionskoeffizient
$\partial u / \partial x$	[%/m]	Holzfeuchtegradient
$S$	[m/s]	Oberflächenemissionskoeffizient
$u_{eq}$	[%]	Ausgleichsfeuchte, Oberflächenholzfeuchte zum Zeitpunkt $t = \infty$
$u_S(t)$	[%]	Oberflächenholzfeuchte zum Zeitpunkt $t$

Durch das Lösen der Differentialgleichungen der Gleichung (2-9) und des 2. Fickschen Gesetzes (Gleichung (2-5) bzw. Gleichung (2-6)) unter Berücksichtigung der entsprechend festgelegten Randbedingungen können die jeweiligen Diffusions- und Oberflächenemissionskoeffizienten bestimmt werden. Allerdings bestehen in den von verschiedenen Autoren berechneten Oberflächenemissionskoeffizienten große Unterschiede (Schaffrath, 2015).

Es ist unklar, welche Variablen Einfluss auf den Oberflächenemissionskoeffizienten haben. In der Literatur finden sich verschiedene Forschungsarbeiten, die lediglich von einem Einfluss der Umgebungsparameter ausgehen, wohingegen verschiedene andere Autoren bei der Bestimmung des Oberflächenemissionskoeffizienten neben den Eigenschaften der Umgebung auch die Eigenschaften der Holzoberfläche mitberücksichtigen (Liu & Simpson, 1999). Während beispielsweise in den Veröffentlichungen von Avramidis und Siau (1987) oder von Wadsö (1993) nur den Variablen der Luft, die den Probekörper umgibt, Einfluss auf den äußeren Widerstand zugeschrieben werden, charakterisieren unter anderem Choong und Skaar (1972), Rosen (1978) oder Liu und Simpson (1996) die Interaktion zwischen der Materialoberfläche und der Atmosphäre sowohl mit den Eigenschaften des Holzes als auch mit denen der Umgebungsluft (Liu & Simpson, 1999).

Bereits Newman versuchte 1931 mit dem Lösen der Fickschen Gesetze den gemessenen, scheinbaren Diffusionskoeffizienten in jeweils inneren und äußeren Anteile aufzuteilen (Liu, 1989). Bei der Berechnung wurden der Diffusionskoeffizient und der Oberflächenemissionskoeffizient jeweils als Konstante angenommen (Avramidis, 2018; Liu, 1989). Avramidis und Siau (1987) betrachten dagegen den Oberflächenemissionskoeffizienten als veränderlich. Das Inverse des äußeren Widerstandes soll demnach mit steigender relativer Luftfeuchte kleiner und mit anwachsender Temperatur größer werden. Die Tendenz der steigenden Koeffizienten mit steigender Temperatur ist ebenfalls bei den von Schaffrath (2015) berechneten Werten festzustellen. Forschungen nach Chen et al. (1995) zufolge ist im hygroskopischen Bereich in Bezug auf den Zusammenhang von Holzfeuchteverlauf und Oberflächenemissionskoeffizient ein gegenläufiges Verhalten wie bei der Betrachtung von Holzfeuchteverlauf und Diffusionskoeffizient festzustellen. Während der Diffusionskoeffizient mit steigender Holzfeuchte anwächst, werden für den Oberflächenemissionskoeffizienten mit kleiner werdender Holzfeuchte größer werdende Werte bestimmt. Choong und Skaar (1972) hingegen gehen davon aus, dass der äußere Widerstand zusätzlich in Abhängigkeit der Oberflächenschicht und der Holzart steht und die Ergebnisse mitunter zwischen Splint- und Kernholz differenziert werden können. Untersuchungen der beiden Autoren zeigen im hygroskopischen Bereich eine Proportionalität zwischen Oberflächenemissionskoeffizient und dem Kehrwert der Rohdichte. Siau und Avramidis (1996) geben als ausschlaggebende Parameter des äußeren Widerstandes die Charakteristik des Fluids wie Temperatur und Viskosität, die Geschwindigkeit der den Probekörper umströmenden Luft sowie die Holzeigenschaften wie die spezifische Dichte, den Feuchtegehalt und die Oberflächenbeschaffenheit an. Söderström und Salin (1993), die sich in ihrer Veröffentlichung ausgiebig mit dem Oberflächenemissionskoeffizienten und deren großen Schwankungen in der Literatur beschäftigen, gehen von einem holzartenabhängigen Wert aus. Eine weitere Ursache dieser gewaltigen Streuungen ist den beiden Autoren zufolge eine oftmals nicht korrekte mathematische Berechnungsmethode zum Erhalt des äußeren Widerstandes. Falsche Annahmen führen so zu nicht der Realität entsprechenden Werten des Oberflächenemissionskoeffizienten (Söderström & Salin, 1993).

Ein Parameter, über dessen Einfluss auf den Oberflächenemissionskoeffizienten allerdings im Allgemeinen Einigkeit herrscht, ist die Luftgeschwindigkeit, mit der der Probekörper umströmt wird. Diese hat eine signifikante Bedeutung für den Wert des äußeren Widerstandes. Umfangreiche Untersuchungen hat hierzu Rosen (1978) durchgeführt. Dieser hat mehrere Holzproben unterschiedlicher Dicke verschiedenen Luftgeschwindigkeiten ausgesetzt und dabei die Adsorptionsrate beobachtet. Mit größer werdender Luftgeschwindigkeit steigt ebenso der

Oberflächenemissionskoeffizient an. Seinen Messungen nach wird die Sorptionsrate ab einer Luftgeschwindigkeit von 3 m/s kaum mehr beeinflusst (Rosen, 1978). Mit diesen Forschungsergebnissen hat Rosen (1978) ein relevantes und bis heute oft zitiertes Werk veröffentlicht (Avramidis, 2018; Chen et al., 1995; Liu, 1989; Siau, 1984; Siau & Avramidis, 1996). Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass bei einer ausreichenden Probendicke und einer umströmenden Luftgeschwindigkeit von mindestens 3 m/s der äußere Widerstand vernachlässigt werden kann (Schaffrath, 2015; Siau, 1984). Dies entspricht einem unendlich großen Oberflächenemissionskoeffizienten und der gemessene, scheinbare Diffusionskoeffizient  $D'$  kann mit dem wahren, inneren Diffusionskoeffizienten  $D$  gleichgesetzt werden (Schaffrath, 2015). Diese Vereinfachung verschafft wesentliche Erleichterung im Rechenaufwand und wird so zum Beispiel von Kucharczyk und Pawlik (2020) verwendet. Hierbei sollte allerdings erwähnt werden, dass es sich lediglich um eine Vereinfachung handelt. Rosen (1978) stellt auch bei einer Luftgeschwindigkeit von 11,7 m/s weiterhin einen Übergangswiderstand fest, auch wenn der Einfluss im Vergleich zum inneren Widerstand nur noch gering ist.

Ein weiteres Ergebnis der Untersuchungen von Rosen (1978) ist, dass ebenso wie die Luftgeschwindigkeit die Probendicke maßgebenden Einfluss auf die Relevanz des äußeren Widerstand aufweist. Je größer die Probendicke des Holzkörpers ist, desto geringer wird die Relevanz des äußeren Widerstandes (Rosen, 1978). Daraus folgt, dass mit anwachsender Probendicke der Einfluss des Oberflächenemissionskoeffizienten  $S$  schwindet und sich der wahre Diffusionskoeffizient  $D$  dem scheinbaren, gemessenen Diffusionskoeffizienten  $D'$  annähert (Choong & Skaar, 1972). Der wahre Diffusionskoeffizient  $D$  liegt betragsmäßig oberhalb des scheinbaren Diffusionskoeffizienten  $D'$ , weil der äußere Widerstand auf den Diffusionsstrom den Wert des gemessenen  $D'$  herabsetzt (Choong & Skaar, 1972; Liu, 1989). Weiter gilt Rosen (1978) zufolge, dass der Oberflächenemissionskoeffizient in longitudinaler Richtung geringer ist als in transversaler Richtung. Das heißt, der Einfluss des äußeren Widerstandes auf den Diffusionsstrom in Faserrichtung ist größer als quer zur Faser.

Im Falle des direkten Wasserkontaktes ist ein äußerer Übergangswiderstand zu vernachlässigen und die Berechnung der Diffusionskoeffizienten mit den Fickschem Gesetz allein ist ausreichend (Angst & Malo, 2010).

Ein grundlegendes Problem der vorhandenen Literatur ist allerdings, dass für den Oberflächenemissionskoeffizienten nur Werte für den hygrokopischen Bereich dargelegt werden. Das liegt daran, dass die bekannten Berechnungsmethoden lediglich für den Bereich unterhalb der Fasersättigung als gültig angesehen werden (Tremblay et al., 2000). Die Sachlage, dass die Werte für Holzfeuchten im überhygrokopischen Bereich mit den Bestimmungsmethoden wie bspw. von Choong und Skaar (1972) nicht bestimmt werden können, ist auch einer der Kritikpunkte von Söderström und Salin (1993) an den existierenden Oberflächenemissionskoeffizienten und den mathematischen Ansätzen zur Berechnung des äußeren Widerstandes. Oberflächenemissionskoeffizienten für den kapillaren Bereich in [m/s] liegen in dieser Masterarbeit aufgrund dessen nicht vor. Tremblay et al. (2000), der die Holz Trocknung im Allgemeinen nicht mit den Gesetzen der Fickschen Diffusion, sondern den Transport an der Oberfläche als konvektiven Massenstrom beschreibt, stellt jedoch über den kompletten Holzfeuchtebereich einen Übergangswiderstand in der Einheit [kg/(m<sup>2</sup>·s)] fest.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Werte des Oberflächenemissionskoeffizienten des hygroskopischen Bereiches inkonsistent sind und großen Schwankungen unterliegen. Trotz gleicher Rechenwege streuen die ermittelten Werte teils beträchtlich (Siau & Avramidis, 1996). Weiterhin existiert keine klare Übereinkunft zwischen den Autoren, welche Parameter überhaupt mit in den Koeffizienten einfließen (Liu & Simpson, 1999). Sowohl die Luftgeschwindigkeit als auch die Probendicke haben allerdings vermutlich einen bedeutenden Einfluss auf den Oberflächenemissionskoeffizienten (Rosen, 1978). Schaffrath (2015) unterlässt eine Gegenüberstellung der von ihm erfassten zu den bereits in der Literatur vorliegenden Oberflächenemissionskoeffizienten, da eine kritische Auseinandersetzung aufgrund der großen Streuungen des Koeffizienten nur wenig sinnvoll erscheint. Er bemängelt zudem, dass oftmals in Veröffentlichungen die Luftgeschwindigkeiten nicht angegeben werden, wodurch sich eine Gegenüberstellung erübrigt. Wird in einer Forschungsarbeit lediglich ein Diffusionskoeffizient bestimmt und die Windgeschwindigkeit während der Versuchsdurchführung ist kleiner als 3 m/s oder der Parameter der Luftgeschwindigkeit wird nicht erwähnt, ist nicht feststellbar, inwieweit von denjenigen Autoren dem Oberflächenemissionskoeffizienten Beachtung geschenkt wurde. Aufgrund der großen Schwankungen der in der Literatur gefundenen Diffusionskoeffizienten  $D$  fällt dies aber kaum ins Gewicht. Das zeigen auch Veröffentlichungen beispielsweise von Schaffrath (2015) und Koc et al. (2003). Diese untersuchten die Diffusionskoeffizienten  $D$  einerseits unter Vernachlässigung eines Übergangswiderstandes, das heißt  $S \rightarrow \infty$ , und andererseits mit einem finiten Oberflächenemissionskoeffizienten. Obwohl bei letztgenanntem Fall die Regressionskurve der Messdaten zu einer besseren Übereinstimmung mit der theoretischen Betrachtung als Diffusion führt, weichen die Diffusionskoeffizienten hierbei gegenüber der Vernachlässigung des äußeren Widerstandes nur geringfügig voneinander ab.

### 2.3.5 Feuchtetransportkoeffizienten in der Literatur

In diesem Kapitel werden nun die in der Literatur gefundenen Diffusions- und Oberflächenemissionskoeffizienten verglichen. Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln erwähnt, handelt es sich beim Transport der Feuchte im Holz um einen noch nicht gänzlich geklärten Vorgang der Holzphysik. In der Literatur weichen sowohl die Diffusionskoeffizienten als auch die Oberflächenemissionskoeffizienten untereinander stark voneinander ab. Es werden lediglich die Transportkoeffizienten der Literatur entnommen, welche aus instationären Vorgängen ermittelt worden sind und den Prozess des Feuchtetransportes mittels der Diffusion betrachten.

Abbildung 2-12 und Abbildung 2-13 umfassen jeweils eine Zusammenstellung der Diffusionskoeffizienten unter Berücksichtigung der Schnittrichtung. Dabei handelt es sich um Fichtenholz, sofern der Graph nicht gepunktet bzw. keine andere Holzart angegeben ist. Bei den transversalen Werten von Nadler et al. (1985) wird allgemein auf wenig dichte Holzarten verwiesen. Es ist erkennbar, dass die Diffusionskoeffizienten sowohl in longitudinaler als auch in radialer bzw. tangentialer Richtung je nach Quelle stark differenzieren. In der Literatur sind die in den beiden Abbildungen dargelegten Diffusionskoeffizienten entweder tabellarisch angegeben (bspw. in Houška und Koc (2000) oder Amardo et al. (2020)), durch Bestimmungsgleichungen zu berechnen (bspw. Koponen (1987) oder Rozas et al. (2009)) oder aus Diagrammen abzulesen, wie zum Beispiel in Angst und Malo (2010).

Die zu den jeweiligen Messungen vorliegenden Temperaturen unterscheiden sich stark innerhalb der einzelnen Forschungsarbeiten. Die Transportkoeffizienten der Literatur, welche unabhängig von der Umgebungstemperatur der Versuchsdurchführung dargelegt sind, reichen von  $20 \pm 2$  °C (Houška & Koc, 2000) bis zu 35 °C (Olek et al., 2005). Koponen (1987) und Rozas et al. (2009), deren Transportkoeffizienten mittels Bestimmungsgleichungen in Abhängigkeit von Temperatur und Rohdichte zu berechnen sind, bestimmen ihre Diffusionskoeffizienten aus Trocknungsversuchen, die im Temperaturbereich von 50 °C bis 165 °C sowie von 40 °C bis 80 °C durchgeführt worden sind. Da das in Kapitel 3 durchgeführte Modell allerdings in geregelter Normalklima modelliert wird, werden die in Abbildung 2-12 und Abbildung 2-13 angegebenen Koeffizienten der beiden Autoren ermittelt, indem entgegen dem definierten Temperaturintervall in die Bestimmungsgleichungen 20 °C eingesetzt wird.

Als Trennlinie zwischen hygrokopischem und kapillarem Bereich wird  $u = 29$  % gewählt, welche Popper und Niemz (2009) nach Messungen mit Hilfe der Hailwood-Horrobin-Methode bestimmen. In den Bestimmungsgleichungen von Koponen (1987) ist neben dem Fasersättigungspunkt zusätzlich die Rohdichte  $r_0$  einzusetzen. Nach DIN 68364 beträgt die Rohdichte für eine Holzfeuchte von 12 %  $460 \text{ kg/m}^3$  ( $= u_{12}$ ). Im Darrzustand für  $u = 0$  % resultiert daraus nach Gleichung (2-1) eine Dichte von  $411 \text{ kg/m}^3$ .

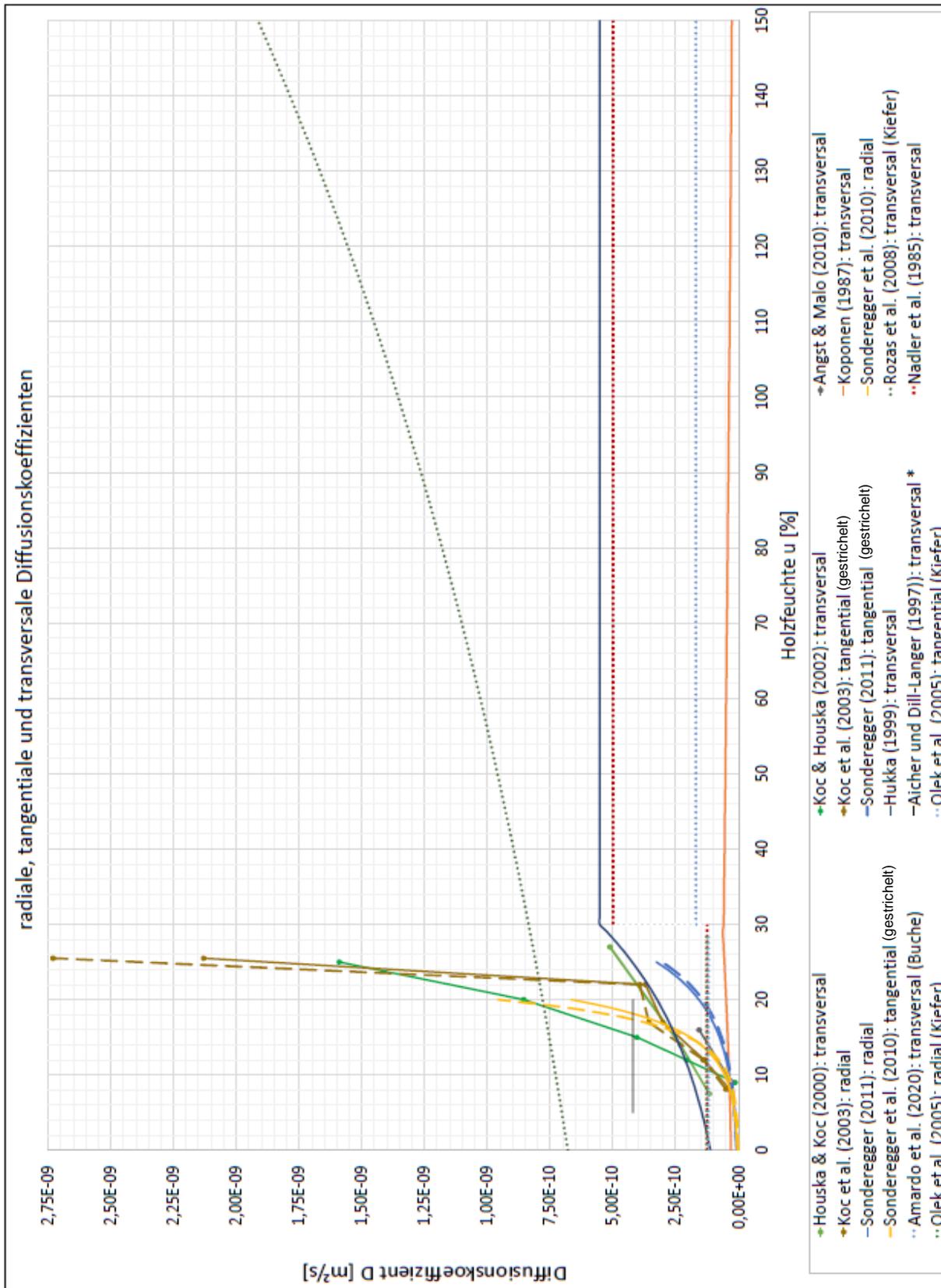


Abbildung 2-12: Zusammenstellung radialer und tangentialer sowie transversaler Diffusionskoeffizienten aus der Literatur (\* entspricht aus Diagramm abgelesenem Wert aus (Angst und Malo, 2010))

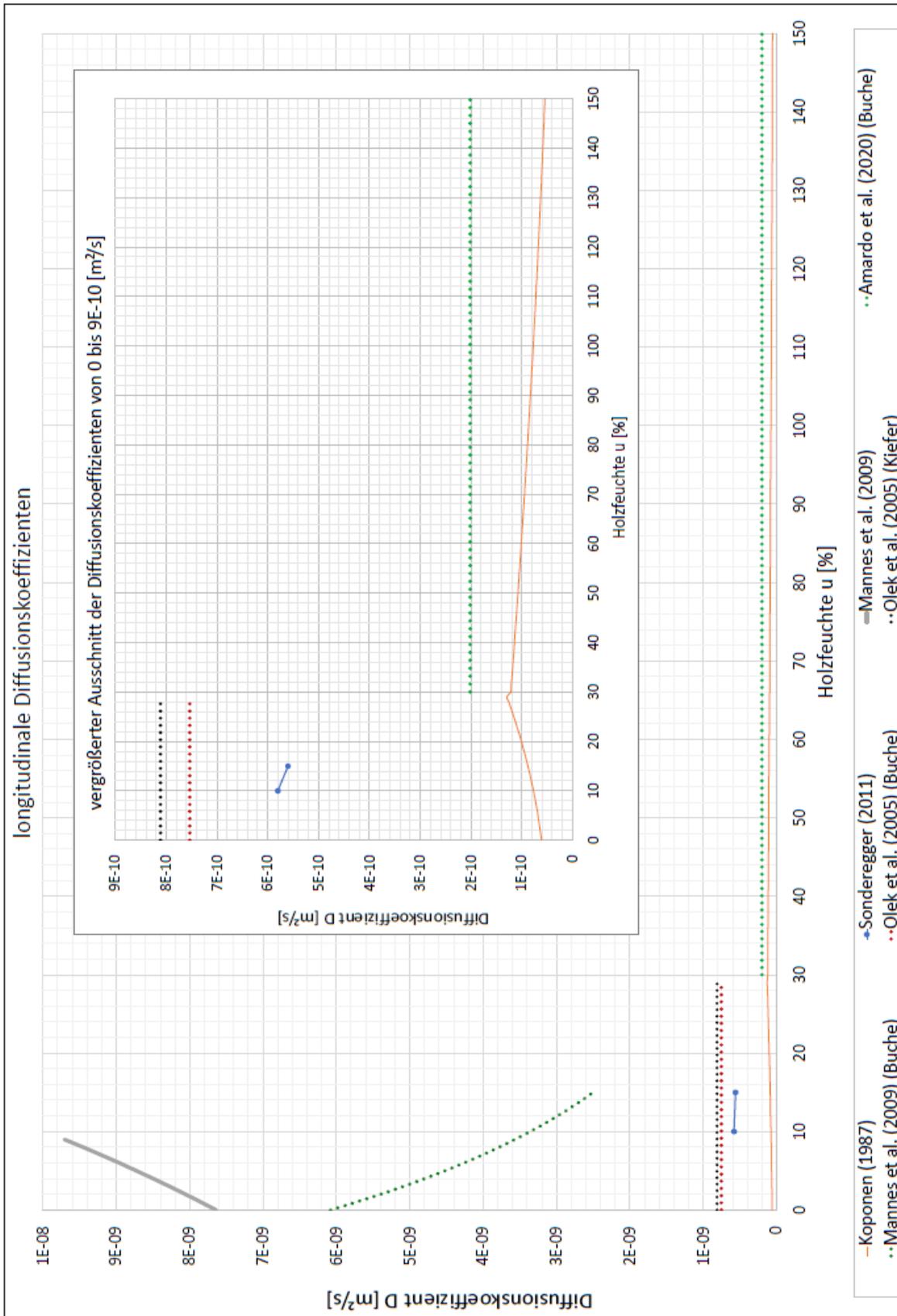


Abbildung 2-13: Zusammenstellung longitudinaler Diffusionskoeffizienten aus der Literatur

Zur übersichtlicheren Darstellung werden die Diffusionskoeffizienten von Cunningham et al. (1989) getrennt in Abbildung 2-14 dargestellt. Die Autoren stellen bei ihren Messungen an Probekörpern der Kiefer Streuungen des bis zum etwa 100-fachen innerhalb der gleichen Schnittrichtung fest. Außerdem werden insbesondere bei einer Temperatur von 30 °C höhere Diffusionskoeffizienten in Faserrichtung ermittelt im Vergleich zu denen quer zur Faser.

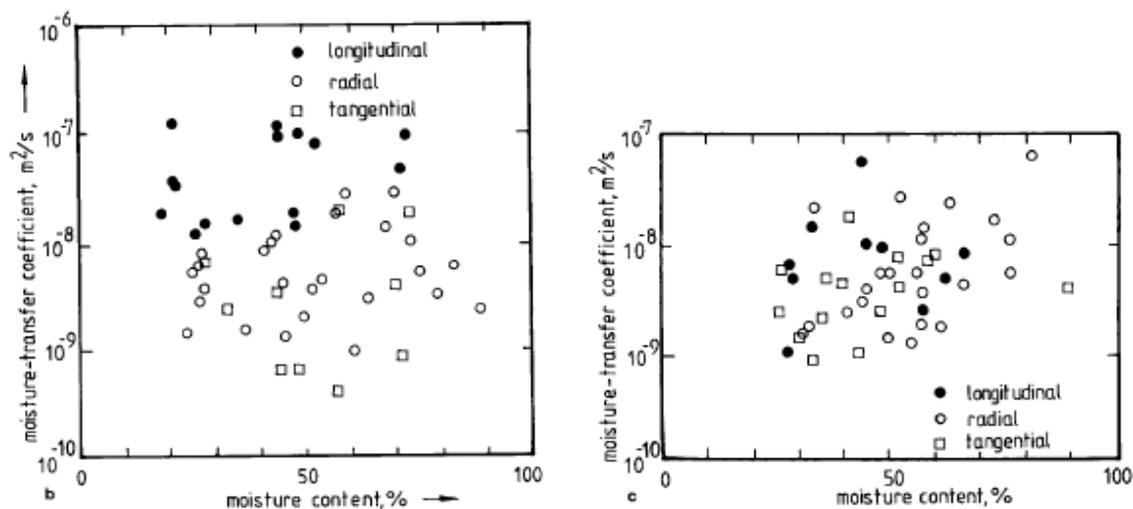


Abbildung 2-14: Diffusionskoeffizienten nach (Cunningham et al., 1989): links: bei 30 °C; rechts: bei 17 °C

Im Allgemeinen ist in Abbildung 2-12 erkennbar, dass der Großteil der Diffusionskoeffizienten quer zur Faser im Bereich zwischen  $3\text{E}-11 \text{ m}^2/\text{s}$  und  $6\text{E}-10 \text{ m}^2/\text{s}$  liegt. Insbesondere im Holzfeuchtebereich von 5 % bis 25 % weisen die gefundenen Werte in etwa die gleiche Größenordnung auf und es lässt sich damit entsprechend ein Trend bezüglich der Größenordnung des Diffusionskoeffizienten erkennen. Ausgenommen weniger Messpunkte liegen die von Cunningham et al. (1989) ermittelten Werte unabhängig der Schnittrichtung oberhalb der in Abbildung 2-12 und Abbildung 2-13 gezeigten Diffusionskoeffizienten. Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass die in der Literatur gefundenen longitudinalen Diffusionskoeffizienten etwa im Bereich von  $6\text{E}-11 \text{ m}^2/\text{s}$  und  $1\text{E}-07 \text{ m}^2/\text{s}$  liegen. Für die Diffusionskoeffizienten quer zur Faser findet man in der Literatur Werte von ungefähr  $3\text{E}-11 \text{ m}^2/\text{s}$  bis  $7\text{E}-08 \text{ m}^2/\text{s}$ . In beiden Faserrichtungen schwanken die Diffusionskoeffizienten um einen Faktor größer Tausend. Weiterhin lässt sich aus den dargelegten Diffusionskoeffizienten keine Korrelation zwischen den einzelnen Holzarten erkennen, obwohl nach Versuchen von Schaffrath (2015) Fichtenholz im Vergleich zu anderen Hölzern wie Buche, Eiche oder Douglasie den größten Diffusionskoeffizienten aufweisen soll. Zudem soll Time (1998) zufolge der Transportkoeffizient der Fichte über dem der Kiefer liegen.

Der Faktor der Diffusionskoeffizienten von Desorption zu Adsorption, der Untersuchungen zufolge im hygroskopischen Bereich 2,5 bis 3 entsprechen soll (Time, 1998), kann nicht bestätigt werden. Die Koeffizienten von Hukka (1999), die mittels Desorption ermittelt sind, liegen ab einer Holzfeuchte von circa 15 % unter den durch Adsorption bestimmten Werten von Sonderegger et al. (2010).

Im Folgenden werden einige der in der Literatur vorzufindenden Werte des Oberflächenemissionskoeffizienten vorgestellt. Diese zeigt Tabelle 2-2.

Tabelle 2-2: Zusammenstellung von Oberflächenemissionskoeffizienten aus der Literatur

anatomische Richtung	Oberflächenemissionskoeffizient [m/s]	Luftgeschwindigkeit während Versuchsdurchführung	Bereich der Holzfeuchte	Holzart	Quelle
transversal	8,36E-08	gering *	7,5 % - 27 %	Fichte	(Houška & Koc, 2000)
transversal	1,05E-06	gering *	9 % - 25 %	Fichte	(Koc & Houška, 2002)
transversal	5,00E-08	nicht angegeben	8 % - 16 %	Fichte	(Angst & Malo, 2010)
transversal	2,20E-08	nicht bekannt	5 % - 20 %	Fichte	nach (Aicher & Dill-Langer, 1997) aus (Angst & Malo, 2010)
transversal	** 19,4E-08 bis 6,96E-06	2 - 3 m/s	nicht gegeben	Fichte	(Schafrath, 2015)
tangential	5,05E-07	nicht angegeben	0 % - 20 %	Fichte	(Sonderregger et al., 2010)
tangential	9,70E-07	nicht angegeben	8,1 % - 25,5 %	Fichte	(Koc et al., 2003)
radial	6,19E-07	nicht angegeben	0 % - 20 %	Fichte	(Sonderregger et al., 2010)
radial	1,85E-06	nicht angegeben	8,1 % - 25,5 %	Fichte	(Koc et al., 2003)
longitudinal	4,88E-06	nicht angegeben	0 % - 5,32 %	Fichte	(Mannes et al., 2009)
transversal	*** 2,24E-08 bis 81,50E-08	2,5 m/s	1,50 % - 13,72 %	Kiefer	(Avramidis & Siau, 1987)
tangential	**** 2,08E-07 bis 3,42E-07	0,8 m/s	9 % - 14 %	Kiefer	(Olek & Weres, 2007)
tangential	**** 2,81E-07 und 3,21E-07	Luftzirkulation vorhanden *	7 % - 14 %	Kiefer	(Olek et al., 2005)
tangential	**** 3,39E-07 und 3,86E-07	Luftzirkulation vorhanden *	7 % - 14 %	Buche	(Olek et al., 2005)
tangential	***** 1,50E-06 bis 1,80E-06	1,5 m/s	18 % - 29 %	Mammutbaum	(Choong & Skaar, 1972)
radial	**** 5,52E-07 bis 6,75E-07	0,8 m/s	9 % - 14 %	Kiefer	(Olek & Weres, 2007)
radial	**** 3,53E-07 und 4,51E-07	Luftzirkulation vorhanden *	7 % - 14 %	Kiefer	(Olek et al., 2005)
radial	**** 4,13E-07 und 6,96E-07	Luftzirkulation vorhanden *	7 % - 14 %	Buche	(Olek et al., 2005)
longitudinal	**** 3,27E-07 und 5,94E-07	Luftzirkulation vorhanden *	7 % - 14 %	Kiefer	(Olek et al., 2005)
longitudinal	**** 4,48E-07 und 1,90E-06	Luftzirkulation vorhanden *	7 % - 14 %	Buche	(Olek et al., 2005)
longitudinal	9,08E-07	nicht angegeben	0 % - 13,78 %	Buche	(Mannes et al., 2009)
longitudinal	**** 1,30E-06 bis 1,80E-06	1,5 m/s	18 % - 29 %	Mammutbaum	(Choong & Skaar, 1972)

\* genauer Wert nicht angegeben; \*\* in Abhängigkeit des Umgebungsklimas; \*\*\* in Abhängigkeit von Temperatur und Holzfeuchte; \*\*\*\* in Abhängigkeit der Lösungsgleichung; \*\*\*\*\* Unterschiede je nach Kern- oder Splintholz

Die in der Literatur vorgefundenen Werte stammen ausschließlich aus Untersuchungen im hygroskopischen Bereich. Je nach Forschungsarbeit schwankt der Bereich der Holzfeuchte von darrtrocken bis hin zur Fasersättigung. Im oberen Teil der Tabelle sind die Werte des Fichtenholzes angeordnet, im unteren Teil befinden sich Angaben zu weiteren Holzarten. Ebenso wie bei den Diffusionskoeffizienten sind große Streuungen erkennbar. Der Maximalwert der Fichte in Tabelle 2-2, gemessen von Schaffrath (2015), beträgt  $6,96E-06$  m/s. Dies entspricht etwa dem 316-fachen des Minimalwertes von  $2,20E-08$  m/s, welcher von Aicher und Dill-Langer (1997) (aus (Angst & Malo, 2010)) bestimmt wurde. Ein Zusammenhang zwischen der Holzart und dem Wert des Oberflächenemissionskoeffizienten ist nicht ersichtlich. Zudem lassen sich die in der Literatur gegebenen Werte nur schlecht vergleichen, da diese weiter stark von der unterschiedlichen und überdies oft nicht angegebenen Luftgeschwindigkeit während der Versuchsdurchführung abhängen (Schaffrath, 2015). Auch Siau und Avramidis (1996) sehen die Gegenüberstellung der von verschiedensten Autoren veröffentlichten Oberflächenemissionskoeffizienten aufgrund der Abhängigkeit von der Berechnungsmethode und den jeweils als unterschiedlich relevant betrachteten maßgebenden Parametern nur als bedingt sinnvoll an. Für entsprechenden weiteren Hintergrund zum Stand der Wissenschaft wird auf das vorangehende Kapitel 2.3.4 verwiesen.

Abschließend kann bezüglich des Stands der Wissenschaft resümiert werden, dass bis dato in Bezug auf die Ausbreitung von Feuchte in Holzbauteilen noch einige offene Lücken hinsichtlich des Forschungsstands bestehen. Sowohl für den wahren Diffusionskoeffizienten  $D$ , der den Transport der Wassermoleküle ohne Berücksichtigung des Feuchtetransportes an der Oberfläche zwischen den einzelnen Zellen beschreibt, als auch für den Oberflächenemissionskoeffizienten  $S$ , der den Feuchtestrom zwischen der Holzoberfläche und der Umgebung darstellt, liegen bisher keine eindeutigen, beständigen Werte vor und die in der Literatur veröffentlichten Werte weisen teils erhebliche Schwankungen auf. Es herrscht keine Einigkeit darüber, welche Parameter und Umgebungsbedingungen in welchem Maße Einfluss auf die jeweiligen Koeffizienten haben bzw. können je nach Berechnungsmethode abweichende Koeffizienten ermittelt werden. Nachstehend folgt eine kritische Auseinandersetzung mit diesen Werten und die Auswirkungen verschiedener Diffusions- und Oberflächenemissionskoeffizienten werden rechnergestützt visualisiert. Anschließend wird mittels praktischer Versuche eine Aussage über die Gültigkeit der Simulationen getroffen.

### 3 Rechnerbasierte Simulationen mittels der Software ANSYS

#### 3.1 Methodik

##### 3.1.1 Analogie der Feuchtediffusion und der Wärmeleitung

Wie bereits erwähnt, basiert das Phänomen der Diffusion und dementsprechend die Beschreibung des Feuchtetransportes nach dem 2. Fickschen Gesetz auf der gleichen mathematischen Grundlage wie die Wärmeleitung. Dementsprechend ist es möglich, diese Analogie zu nutzen und die Simulationen anhand der instationären Wärmeleitung, welche einem gängigen Instrument in der Bauphysik entspricht, durchzuführen. Dieses Ansatzes, den bereits Tuttle (1925) vor knapp 100 Jahren nutzte, bediente sich auch Schaffrath (2015) in seiner Dissertation. Abbildung 3-1 zeigt die Gegenüberstellung der entsprechenden Pendanten von Diffusion und Wärmeleitung.

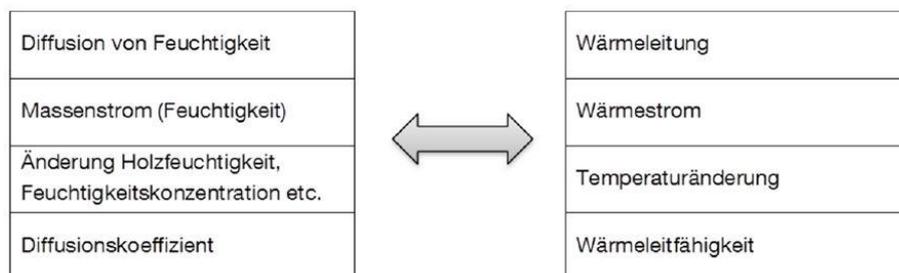


Abbildung 3-1: Gegenüberstellung Diffusion und Wärmeleitung aus (Schaffrath, 2015)

Der Feuchtestrom zwischen der Holzoberfläche und der Umgebung wird analog durch den konvektiven Wärmestrom berücksichtigt. Das bedeutet, der Oberflächenemissionskoeffizient in [m/s] entspricht hierbei dem Wärmeübergangskoeffizienten in [W/(m<sup>2</sup>·°C)]. Die Systemgröße der Holzfeuchte in [%] kommt der Temperatur in [°C] gleich (Schaffrath, 2015).

Wie in Abbildung 3-1 zu sehen ist, kann der Diffusionskoeffizient mit der Einheit [m<sup>2</sup>/s] analog zur Wärmeleitfähigkeit in [W/(m·°C)] genutzt werden. Sowohl die Wärmeleitfähigkeit als auch der Diffusionskoeffizient entsprechen in den partiellen Differentialgleichungen (vgl. Gleichung (2-5) und (2-6)) einem Proportionalitätsfaktor, der den diffusiven Ausgleich der Temperatur bzw. der Feuchte beschreibt. Neben der Wärmeleitfähigkeit wird die instationäre Wärmeleitung entscheidend von der Rohdichte des zu durchdringenden Materials und von dessen spezifischer Wärmekapazität beeinflusst. Bei entsprechender Betrachtung der Diffusion als isothermes System, wie es im Modell dieser Arbeit der Fall ist, gilt, dass das Produkt aus Rohdichte und spezifischer Wärmekapazität zu 1 werden muss (Baehr & Stephan, 2016; Crank, 1976; Häfner et al., 1992). Das bedeutet, dass der Wert der spezifischen Wärmekapazität im nachstehenden Modell folglich dem Kehrwert der Rohdichte des Holzes entspricht. Die Gültigkeit dieses Ansatzes der Analogie von instationärer Wärmeleitung und diffusivem Feuchtetransport mitsamt den genannten Entsprechungen weist beispielsweise Schaffrath (2015) nach. Dieser führt auf diese Weise zur Validierung der Diffusions – und Oberflächenemissionskoeffizienten, die er zuvor durch praktische Trocknungsversuche im hygroskopischen Bereich ermittelt hat, rechnergestützte Simulationen durch und erhält dabei mittels der FEM - Berechnung Ergebnisse, die mit denen der praktischen Versuche vergleichbar sind.

### 3.1.2 Modellierung der Fragestellung

Innerhalb von Holzkonstruktionen ist der Kontakt zwischen Holz und Wasser in der Regel ein nicht gewünschter Fall. Dementsprechend wenig ist bisher über die Ausbreitung von Feuchte in Holz bekannt. Um ein Bild davon zu bekommen, in welcher Geschwindigkeit und in welchem Ausmaß tröpfelndes Wasser in ein Holzbauteil eindringt, werden im Folgenden rechnergestützte Simulationen durchgeführt. Als Basis dienen die aus der Literatur entnommenen Wasseraufnahmekoeffizienten, Diffusionskoeffizienten und Oberflächenemissionskoeffizienten sowie die Analogie zwischen instationärer Wärmeleitung und diffusivem Feuchtetransport. Damit diese Analogie angewendet werden kann, wird das Modell als isothermes System betrachtet.

Modelliert werden soll eine Platte aus Fichtenholz, welche über einen längeren Zeitraum quer zur Faser mit Wassertropfen beaufschlagt wird. Nach dem Aufprall adsorbiert der kapillaraktive Baustoff die Feuchte und gibt sie ins Bauteil weiter. Für den Versuch werden 30 Sekunden als Zeitintervall zwischen den Tropfen gewählt. Damit soll beispielsweise ein tropfendes Rohr nachgeahmt werden. Als zu simulierende Dauer werden 14 Tagen festgesetzt. Diese Zeitspanne stellt einen Kompromiss dar, um einerseits den Vorgang möglichst lange zu simulieren, aber andererseits die Dimensionen der Holzplatte und die damit einhergehende Knotenanzahl für die rechnergestützte FEM-Berechnung möglichst gering zu halten. Dies ist einem nur begrenzt vorliegenden Festplattenspeicher geschuldet, der die Berechnung eines komplexeren Modells nicht möglich macht. Daher beträgt das in den Ergebnisdarstellungen (siehe Kapitel 3.2) mit abgebildete Netz des Modells für die numerischen Berechnungen lediglich eine definierte Elementgröße von 0,05 m. Die Tropfenmenge wird gleichbleibend über die Versuchsdauer hinweg mit 50  $\mu\text{l}$  angenommen. Diese Menge entspricht der in der Medizin üblichen Größe eines Tropfens, wie er etwa oft durch Infusionssysteme verabreicht wird (Schewior-Popp et al., 2021). Das bedeutet unter Berücksichtigung des Tropfintervalls von 30 Sekunden, dass pro Stunde 6 ml Wasser auf die Platte auftreffen. Die Systemgröße der Holzfeuchte  $u$  entspricht in der Simulation der Temperatur in  $[\text{°C}]$ . Als Anfangsfeuchte, das heißt als Gleichgewichtsfeuchte des Holzbauteils im verbauten Zustand, wird  $u = 12 \%$  gewählt. In der FEM-Berechnung entspricht das  $12 \text{ °C}$ . Dieser Wert resultiert aus dem Eurocode 5, demnach Holzbauteile innerhalb einer Konstruktion aufgrund der klimatischen Bedingungen der Nutzungsklasse 1 zugeordnet werden (DIN EN 1991-1-1). Dem nationalen Anhang dieser Norm zufolge wird die Gleichgewichtsfeuchte der Nutzungsklasse 1 mit Werten von 5 % bis 15 % definiert (DIN EN 1991-1-1/NA). Nach Kollmann (1982) gilt eine Holzfeuchte von 12 % dabei als etablierte Normalfeuchtigkeit im Normalklima, welche in der Regel für bauphysikalische Belange genutzt wird. Sobald ein kapillaraktiver Baustoff, wie es bei Holz der Fall ist, mit flüssigem Wasser in Berührung kommt, wird dieses solange aufgesaugt, bis die freie Wassersättigung erreicht ist (Künzel, 1994). Dieser Prozess ist Teil des Modells, bei dem die Holzplatte die auftreffenden Wassertropfen nach und nach aufsaugt. Der maximal mögliche Feuchtegehalt  $u_{max}$  kann mittels Gleichung (2-2) angenähert werden. Bei einem Fasersättigungspunkt von  $u = 29 \%$  und einer Darrdichte von  $r_0 = 411 \text{ kg/m}^3$  (vgl. Kapitel 2.3.5) wird nach der entsprechenden Gleichung eine freie Wassersättigung von  $u_{max} = 205,6 \%$  bestimmt. Da Holz durch sein natürliches Wachstum unter anderem in Bezug auf die Rohdichte Schwankungen unterliegt und der Gleichungsansatz nur einer Näherung entspricht, wird für die Simulationen vereinfachend ein maximaler Feuchtegehalt von  $u_{max} = 200 \%$  verwendet. Hinsichtlich der Simulationen bedeutet das, dass an den Stellen der Oberfläche, die direkt mit den Wassertropfen

beaufschlagt werden, diese maximale Holzfeuchte vorliegt und sich von dort aus weiter ausbreitet. Im Modell wird dabei nicht jeder auftreffende Tropfen einzeln simuliert, sondern beschränkt sich auf die Darstellung einer sich ausbreitenden aufliegenden Wasserfläche auf einer Holzplatte. Analog zur instationären Wärmeleitung entspricht das einem Quader (= Holzplatte) mit einer Einheitstemperatur von 12 °C (= Gleichgewichtsfeuchte), an dessen Oberfläche eine kreisförmige Fläche mit einer Temperatur von 200 °C (= Wassertropfen) einwirkt. Die einwirkende Fläche wird mit Hilfe des Wasseraufnahmekoeffizienten, des Tropfintervalls sowie der Tropfenmenge bestimmt. Für die Berechnung der Größe der Wasserfläche wurde für die vorliegenden Arbeit ein Ansatz entwickelt, der auf dem Gleichgewicht zwischen der aufgenommenen und aufgetroffenen Wassermenge beruht. Die Schwierigkeit liegt dabei darin, dass die Fläche der einwirkenden Wasserfläche im Zeitverlauf zunimmt. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass der Wasseraufnahmekoeffizient  $A_W$  (vgl. Kapitel 2.2.3) linear zur Wurzel der Zeit ist und dementsprechend eine Holzprobe bei teilweisem Eintauchen in ein Wasserbad innerhalb des gleichen Zeitintervalls eine immer kleinere Wassermenge aufnehmen kann. Im Gegensatz dazu bleibt die auftreffende Wassermenge pro Zeitintervall gleich.

Der Wasseraufnahmekoeffizient  $A_W$  nach DIN EN ISO 15148 ist das Maß für die aufgenommene Wassermenge pro Fläche und Zeiteinheit. Der Durchschnitt der aus der Literatur entnommenen transversalen Werte beträgt  $A_W = 0,00238 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$ , wie in Kapitel 2.2.3 bereits bestimmt wurde. Für die Berechnung der aufgenommenen Wassermenge bis zum Zeitpunkt  $t$  wird daraus folgend Gleichung (3-1) aufgestellt. Abbildung 2-7 stellt den Verlauf der aufgenommenen Wassermenge innerhalb der Versuchszeit  $t$  graphisch dar. Zum Zeitpunkt  $t = 0 \text{ s}$  fällt der erste Tropfen.

$$\text{aufgenommene Wassermenge in } \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right] = \sqrt{t} \cdot 0,00238 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}} \right] \quad (3-1)$$

Unter Berücksichtigung der Tropfengröße von 50 mg und einem Tropfintervall von 30 s lautet die Gleichung für die bereits aufgetroffene Wassermenge bis zum Zeitpunkt  $t$  in [s] wie folgt:

$$\text{aufgetroffene Wassermenge in } [\text{kg}] = \frac{t}{30 [\text{s}]} \cdot 0,000050 [\text{kg}] \quad D = \{t \in \mathbb{N} \cdot 30\} \quad (3-2)$$

Abbildung 3-2 zeigt die Kurve der Gleichung (3-2) für die ersten 8000 Sekunden.

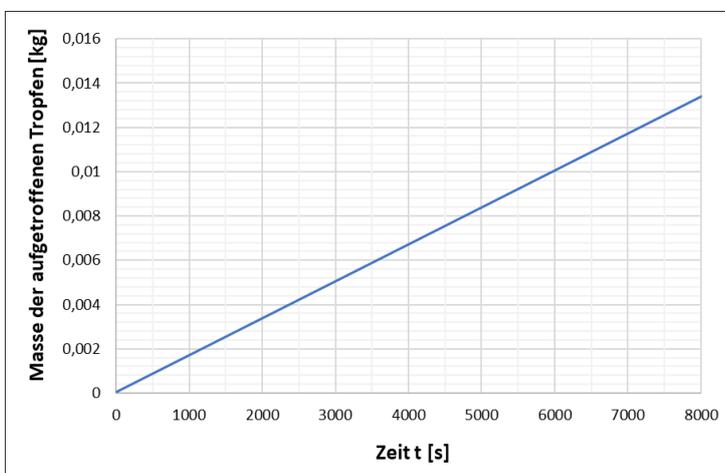


Abbildung 3-2: Veranschaulichung der aufgetroffenen Wassermenge in [kg] in Abhängigkeit der Zeit  $t$  in [s]

Zur Berechnung der Wasserfläche werden folgende Annahmen bzw. Idealisierungen getroffen. Erstens wird die einwirkende Fläche als Kreisfläche betrachtet. Dies bedeutet, dass die Faserrichtung an dieser Stelle vernachlässigt wird. Die Tropfen treffen, ohne zu zerstäuben auf der Holzplatte auf und die Wassermenge verteilt sich gleichmäßig über die bereits vorhandene nasse Fläche, welche eine ideale Kreisfläche darstellt. Zweitens nimmt die Holzprobe das auftreffende Wasser umgehend nach dem Auftreffen und Verteilen über die kreisrund einwirkende Fläche auf. An diesen kreisrunden Stellen wird der Probekörper an der Oberfläche als komplett gesättigt betrachtet. Des Weiteren wird das Quellen, das heißt die Volumen- bzw. Flächenänderung des Probekörpers infolge der Feuchteaufnahme, vernachlässigt.

Die nasse Wasserfläche  $A_{nass}$  in  $[m^2]$  ergibt sich schließlich aus dem Verhältnis der bis zum Zeitpunkt  $t$  aufgetroffenen Wassermenge (Gleichung (3-2)) zur bis zum Zeitpunkt  $t$  aufgenommenen Wassermenge (Gleichung (3-1)).

$$A_{nass} = \frac{\frac{t}{30 [s]} \cdot 0,000050 [kg]}{\sqrt{t} \cdot 0,00238 \left[ \frac{kg}{m^2 \cdot s^{0,5}} \right]} \quad D = \{t \in \mathbb{N} \cdot 30\} \quad (3-3)$$

---

$A_{nass}$	$[m^2]$	nasse Wasserfläche
$t$	$[s]$	Zeit (bei $t = 0$ s fällt der erste Tropfen; Tropfintervall: 30 s)

Auf diese Weise können die nötigen Kreisflächen für die Simulation berechnet werden. Tabelle 3-1 zeigt die beschriebene Berechnungsmethode am Beispiel der ersten zehn Tropfen.

Tabelle 3-1: Flächenberechnung am Beispiel der ersten zehn Tropfen

Tropfen-Nr.:	Zeit $t$ (Zeitpunkt kurz vor nächstem Tropfen) [s]	aufgetroffene Wassermenge [kg]	aufgenommene Wassermenge [kg/m <sup>2</sup> ]	nasse Wasserfläche [m <sup>2</sup> ]	Kreis-Durchmesser [m]
1	30	0,00005	0,01304	0,00384	0,06988
2	60	0,0001	0,01844	0,00542	0,08311
3	90	0,00015	0,02258	0,00664	0,09197
4	120	0,0002	0,02607	0,00767	0,09883
5	150	0,00025	0,02915	0,00858	0,10450
6	180	0,0003	0,03193	0,00940	0,10937
7	210	0,00035	0,03449	0,01015	0,11367
8	240	0,0004	0,03687	0,01085	0,11753
9	270	0,00045	0,03911	0,01151	0,12104
10	300	0,0005	0,04122	0,01213	0,12427

Da es mit der genutzten Software (Näheres zur Software siehe Kapitel 3.1.3) nicht möglich ist, den Radius der Kreisfläche während der Simulation über die Versuchszeit hinweg stetig mit anwachsen zu lassen, muss von vornherein bei der Geometrierstellung eine Vielzahl von einzelnen Kreisen definiert werden, die den Zuwachs der Kreisfläche beschreiben. Die auf die jeweiligen Kreise einwirkende Temperatur kann je nach Zeitschritt der Simulation aktiviert oder unterdrückt werden.

Während der Simulationen wird Schritt für Schritt ein weiterer, nächstgrößerer Kreis zugeschaltet und die 200 °C – warme, kreisförmige Oberfläche wächst stufenweise nach außen hin an. Um nicht für alle 30 Sekunden einen weiteren Kreis erstellen zu müssen, wird die Simulationszeit in Zeitblöcke aufgeteilt und für diese Zeitblöcke werden gemittelte Kreisdurchmesser berechnet. Auf diese Weise entstehen für eine Dauer von 14 Tagen 98 Kreise bzw. Zeitschritte. Der äußerste Kreisdurchmesser nach einer Simulationszeit von 14 Tagen bemisst sich auf circa einen Meter. Um die Rechenzeit zu verkürzen und weniger Festplattenspeicher zu verbrauchen, wird die Holzplatte geviertelt und die Simulation läuft lediglich über ein Viertel der ursprünglichen Holzplatte. Da die Schnittflächen, welche die entlang der y – und der x – Achse verlaufenden Symmetrieachsen darstellen, in der späteren FEM – Berechnung als thermisch isoliert definiert werden, ist diese Vereinfachung möglich. Abbildung 3-3 zeigt die zugehörige angefertigte Geometrie zum Modell.

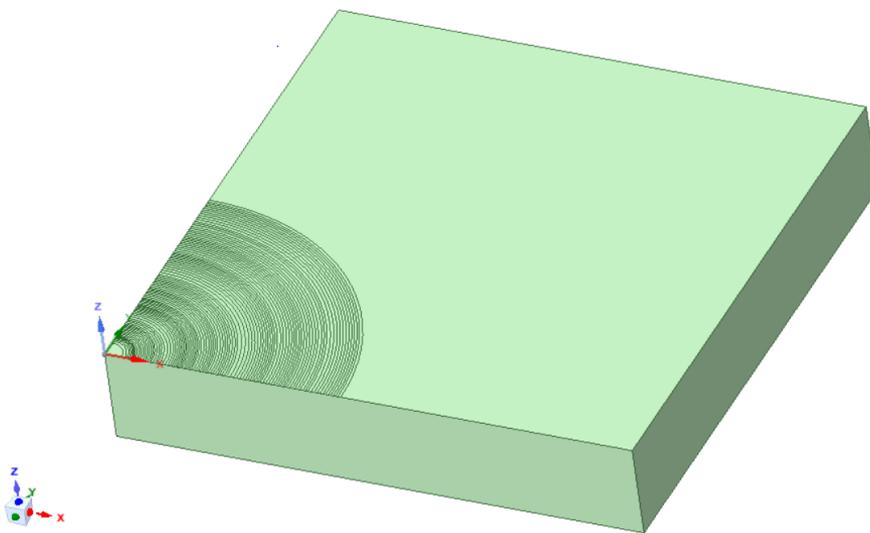


Abbildung 3-3: Geometrie zur Feuchtesimulation

Die geviertelte Platte weist die Maße 1,1 m x 1,1 m x 0,2 m auf. Die Länge und die Breite sind in der Ausbreitung der Feuchte bei Verwendung der maximalen Diffusionskoeffizienten begründet (siehe Kapitel 3.2). Der Hintergedanke ist dabei, dass auch in den Simulationsergebnissen mit den maximalen Diffusionskoeffizienten die maximale Feuchteausbreitung in x- und y-Richtung ersichtlich wird und der äußere Rand des Quaders auch nach 14 Tagen noch nicht von der Temperaturwirkung beeinflusst wird. Die Dicke von 0,20 m wird gewählt, damit die Entwicklung der Feuchteausdehnung zusätzlich in der kartesischen z-Richtung zu beobachten ist, aber gleichwohl eine praxisnahe Dimension aufweist (dataholz.eu, 2022).

Insgesamt handelt es sich um ein stark idealisiertes Modell. Es wird von einer perfekt homogenen Vollholzplatte ohne jegliche Verklebungen ausgegangen. Weiterhin werden sämtliche in der Natur auftretenden Merkmale des Holzes, wie zum Beispiel Äste oder Markstrahlen, vernachlässigt. Es wird lediglich die Anisotropie des Baustoffes beachtet. Die x-Richtung entspricht der Faserrichtung des Holzes, wohingegen die y- und die z-Achse der Richtung quer zur Faser gleichkommen.

### 3.1.3 Struktur der Simulationen und Eingabeparameter in der *Ansys Workbench*

Als Software für die rechnergestützten Simulationen dient das Programm *Ansyes Workbench* (Ansys, Inc., 2021). Im Workbench – Projektmanager der Software, welche ihre Berechnungen mittels der numerischen Finite – Elemente – Methode durchführt, kann der Datenfluss zwischen den einzelnen Analysesystemen mitsamt den jeweilig nötigen Verknüpfungen durch Fenster und Zuordnungen organisiert werden (Gebhardt, 2018). Die Analysesysteme reichen von einer akustischen Modalanalyse bis zur transienten Strukturmechanik (Ansys, Inc., 2021). Detaillierte Informationen zur Software und ihren Anwendungsmöglichkeiten sind im umfangreichen Literaturwerk von Gebhardt (2018) zu finden. Im Fall der vorliegenden Arbeit wird das Analysesystem *Thermisch-transiente Analyse* als relevante *Toolbox* gewählt. Um die Geometrie lediglich einmal erstellen zu müssen, wurde dies der Einfachheit halber in einem separaten Fenster vorgenommen und mit den einzelnen Analysesystemen verknüpft (Fenster A). Abbildung 3-4 zeigt den Aufbau des Simulationen im Projektmanager von *Ansyes Workbench*.

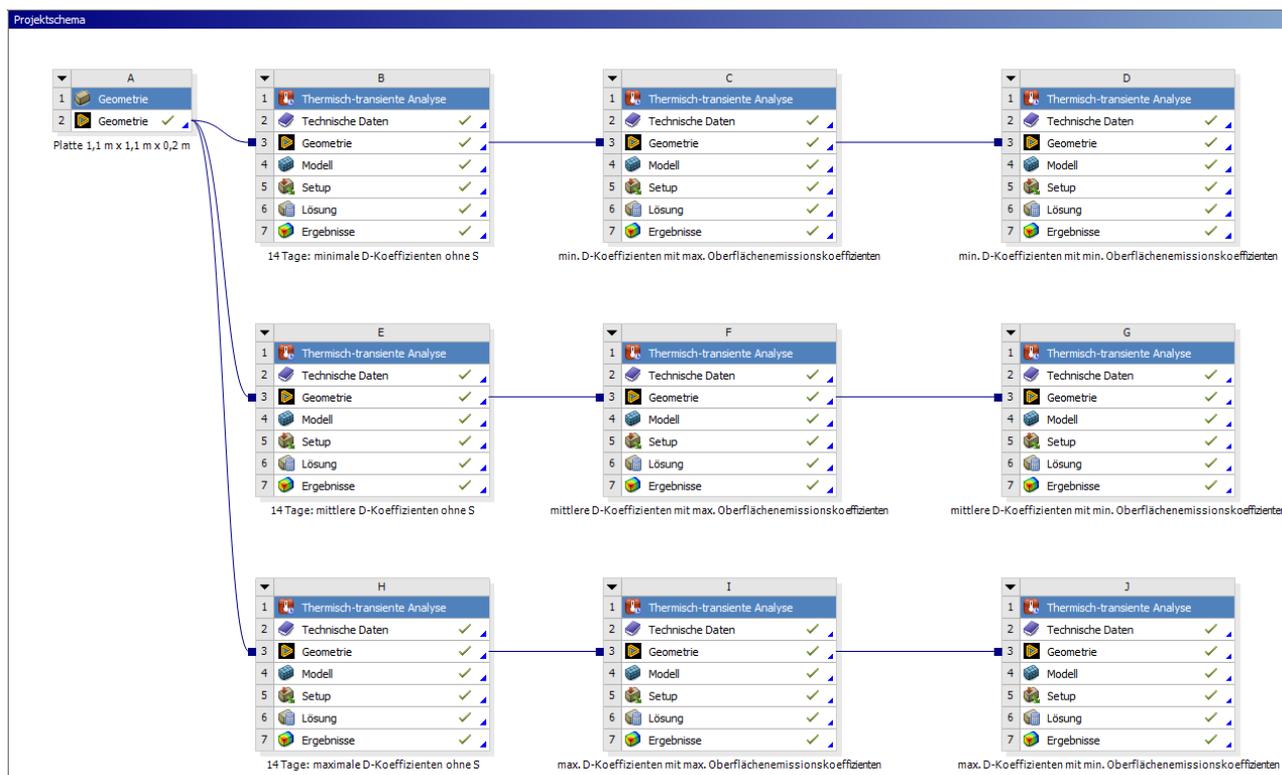
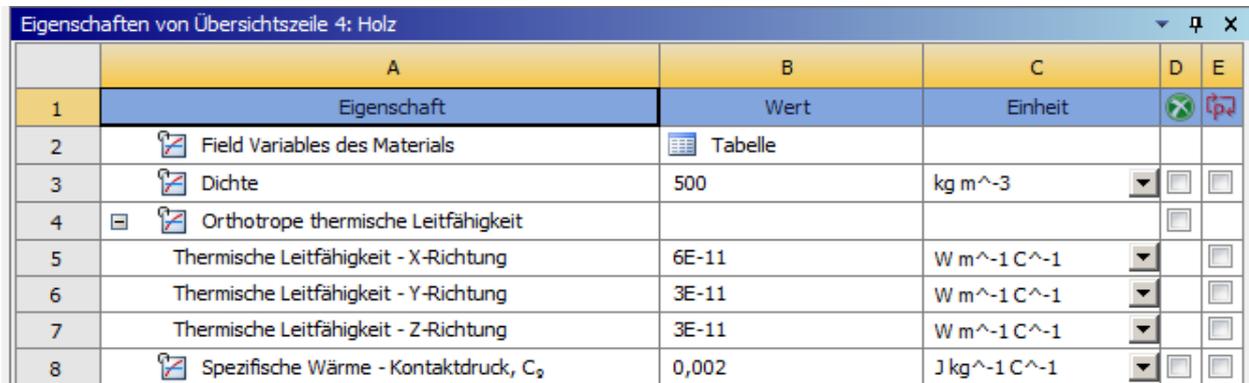


Abbildung 3-4: Aufbau der Simulation im Ansys – Projektmanager

Die maßgeblichen Materialparameter zur Beschreibung der Feuchtetransportvorgänge sind die Diffusionskoeffizienten und die Oberflächenemissionskoeffizienten. In der vorliegenden Arbeit geht es darum, einen Eindruck zu gewinnen, wie sich Wasser bzw. Feuchte auf und innerhalb eines Holzbauteils verhält. Um beispielsweise das Szenario eines tropfenden, undichten Haustechnikanschlusses abzuschätzen und den Einflussbereich in eine mögliche Umgebung einzugrenzen, werden insbesondere die unteren und oberen Schranken der Diffusionskoeffizienten sowie der Oberflächenemissionskoeffizienten betrachtet. Wie bereits in Kapitel 2.3.5 berichtet, schwanken die vorliegenden, aus der Literatur gesammelten Transportkoeffizienten enorm.

Die Fenster B, C und D (vgl. Abb. 3-4) beinhalten Simulationen mit den minimalen Diffusionskoeffizienten aus Kapitel 2.3.5. Die FEM – Berechnungen in Fenster H, I und J werden mit den maximalen Diffusionskoeffizienten durchgeführt. Die Fenster E, F und G stellen eine dritte Simulationsreihe mit Koeffizienten dar, die zwischen den maximalen und minimalen Werten liegen. Damit der alleinige Einfluss der Schwankungen des Diffusionskoeffizienten sichtbar wird, wird jeweils in den Fenstern B, H und E für die obere und untere Schranke sowie dem mittleren Diffusionskoeffizient der Oberflächenemissionskoeffizient vernachlässigt und der Quader als thermisch isoliert betrachtet. Weiter wird, um die Bedeutung des Zusammenspiels von Umgebung zur Oberfläche zu visualisieren, in den anderen sechs Fenstern entsprechend der minimale und maximale Diffusionskoeffizient in Interaktion mit dem minimalen und maximalen Oberflächenemissionskoeffizient aus der Literatur gesetzt.

Um die entsprechenden Simulationen berechnen zu können, muss in der *Ansys Workbench*, sofern es in der softwareeigenen Datenbank nicht bereits als Vorlage existiert, im Vorhinein das für die Simulation benötigte Material erstellt werden. Die Eingabe der Materialkennwerte erfolgt gemäß der in Kapitel 3.1.1 erläuterten Analogie zwischen instationärer Wärmeleitung und Diffusion. Das für die numerische Simulation erschaffene Material „Holz“ wird im Projektmanager mithilfe der Einstellung „Technische Daten“ im jeweiligen Fenster definiert. Die für die FEM – Berechnungen relevanten Materialeigenschaften inklusive deren Eingabe in *Ansys* zeigt Abbildung 3-5 am Beispiel der minimalen Diffusionskoeffizienten.



	A	B	C	D	E
1	Eigenschaft	Wert	Einheit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Field Variables des Materials	Tabelle			
3	Dichte	500	kg m <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Orthotrope thermische Leitfähigkeit			<input type="checkbox"/>	
5	Thermische Leitfähigkeit - X-Richtung	6E-11	W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Thermische Leitfähigkeit - Y-Richtung	3E-11	W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Thermische Leitfähigkeit - Z-Richtung	3E-11	W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Spezifische Wärme - Kontaktdruck, C <sub>p</sub>	0,002	J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abbildung 3-5: Eingabe der Materialparameter am Beispiel der minimalen Diffusionskoeffizienten

Hier wird unter anderem der Diffusionskoeffizient, welcher direkt der Eigenschaft des in der Simulation verwendeten Materials zugeschrieben wird, eingegeben. Die maximalen Werte aus der Literatur liegen longitudinal, das heißt in x-Richtung, bei 1E-07 m<sup>2</sup>/s und transversal bei 7E-08 m<sup>2</sup>/s. Für die minimalen Werte wurde in Faserrichtung 6E-11 m<sup>2</sup>/s und quer zur Faser 3E-11 m<sup>2</sup>/s verwendet. Da die maximalen Werte von Cunningham et al. (1989) weit größer sind als die übrigen in der Literatur gefundenen Werte, wird die dritte Simulationsreihe mit weiteren Diffusionskoeffizienten durchgeführt. Dabei wird in für den longitudinalen Transportkoeffizienten 6E-09 m<sup>2</sup>/s und für den transversalen Koeffizienten 2E-09 m<sup>2</sup>/s gewählt. Beide Werte sind in den oberen Bereichen von Abbildung 2-13 bzw. Abbildung 2-12 angesiedelt und abgesehen von den Werten von Cunningham et al. (1989) (vgl. Abbildung 2-14) befinden sich lediglich eine Messreihe bzw. zwei Einzelwerte oberhalb dieser medial gewählten Diffusionskoeffizienten. Tabelle 3-2 zeigt eine Übersicht über die in den Simulationen gewählten Diffusionskoeffizienten.

Tabelle 3-2: Übersicht über die für die Simulationen gewählten Diffusionskoeffizienten

	Minimal	Medial	Maximal
Longitudinaler Diffusionskoeffizient [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	6,00E-11	6,00E-09	1,00E-07
Transversaler Diffusionskoeffizient [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	3,00E-11	2,00E-09	7,00E-08

Da die Literaturwerte stark schwanken und es sich im Rahmen der Forschungsfrage der Arbeit um eine grobe Abschätzung handelt, inwiefern sich Wassermoleküle im Holzbauteil ausbreiten, wird der Diffusionskoeffizient über den kompletten Bereich der Holzfeuchte von 12 % bis 200 % als Konstante betrachtet. Weiterhin sind Werte für die Dichte und die spezifische Wärmekapazität zu bestimmen. Dabei ist lediglich relevant, dass für die isotherme Diffusion das Produkt dieser beiden Kennwerte zu 1 wird. Folglich ist der Stofftransport abhängig vom Volumen und nicht vom Gewicht des zu durchdringenden Mediums (Häfner et al., 1992). Die Dichte der Holzplatte wird mit dem üblichen Bemessungswert von  $500 \text{ kg/m}^3$  definiert. Resultierend daraus ergibt sich für die spezifische Wärmekapazität ein Wert von  $0,002 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{C})$ .

Der Oberflächenemissionskoeffizient kann mit einer Proportionalitätszahl gedeutet werden, die die Interaktion des Holzprobekörpers zur Umgebung, das heißt die Feuchteaufnahme bzw. – abgabe, quantifiziert. Bezüglich des Modells bedeutet das, dass an den Stellen, an denen keine Temperatureinwirkung stattfindet, ein konvektiver Wärmestrom angegeben wird. Für den Oberflächenemissionskoeffizient wird als Maximalwert  $6,96\text{E}-06 \text{ m/s}$  und als Minimalwert  $2,20\text{E}-08 \text{ m/s}$  festgelegt (vgl. Tabelle 2-2). Die analoge Systemgröße entspricht dem Wärmeübergangskoeffizienten in der Einheit [ $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ ]. Ebenso wie der Diffusionskoeffizient wird der Oberflächenemissionskoeffizient über den kompletten Holzfeuchtebereich als Konstante betrachtet. Die Herkunft der gewählten Werte für Diffusions- und Oberflächenemissionskoeffizienten kann in Kapitel 2.3.5 nachvollzogen werden.

## 3.2 Simulationsergebnisse

### 3.2.1 Einfluss der Schwankungen des Diffusionskoeffizienten unter Vernachlässigung des Oberflächenemissionskoeffizienten

Vorerst werden ausschließlich die Simulationsergebnisse, die aus den Abweichungen des Diffusionskoeffizienten resultieren, betrachtet. Der Oberflächenemissionskoeffizient wird hierbei vernachlässigt und die Holzplatte wird als eigenes, thermisch isoliertes System betrachtet, in dem keinerlei Energie bzw. Feuchte an die Umgebung abgegeben wird. Die longitudinalen Diffusionskoeffizienten schwanken zwischen dem minimalen ( $6\text{E}-11 \text{ m/s}^2$ ) und dem maximalen Wert ( $1\text{E}-07 \text{ m/s}^2$ ) um den Faktor 1666,6. Bei den transversalen Koeffizienten ( $3\text{E}-11 \text{ m/s}^2$  zu  $7\text{E}-08 \text{ m/s}^2$ ) beträgt der Faktor 2333,3. In den Simulationsergebnissen werden diese deutlichen Schwankungen durch erhebliche Unterschiede in den simulierten Feuchteausbreitungen ersichtlich. Die beiden Darstellungen in Abbildung 3-6 zeigen jeweils den Holzfeuchteverlauf nach 14 Tagen mit dem minimalen (links) und maximalen (rechts) Koeffizienten der Feuchteausbreitung. Die Plattenviertel haben die Maße  $1,1 \text{ m} \times 1,1 \text{ m} \times 0,2 \text{ m}$ . Der Maßstab kann in den Abbildungen nicht mit eingeblendet werden. Die Faserichtung verläuft in x – Richtung. Das in den Darstellungen schwarz mitabgebildete Gitter entspricht dem Netz mit der Elementgröße von  $0,05 \text{ m}$ .

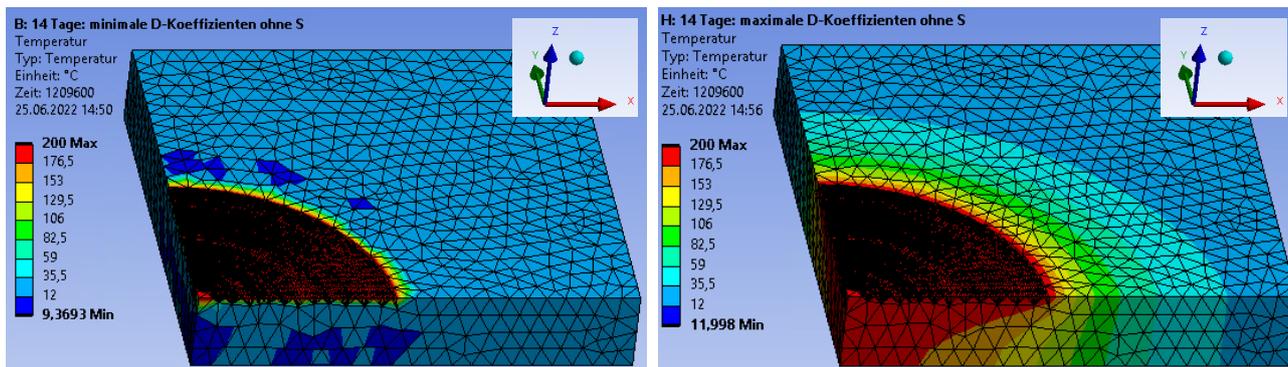


Abbildung 3-6: Simulierter Holzfeuchteverlauf nach 14 Tagen; links: bei Verwendung der minimalen Diffusionskoeffizienten; rechts: bei Verwendung der maximalen Diffusionskoeffizienten

Während in der Simulation mit den minimalen Diffusionskoeffizienten die Wassermoleküle nur langsam in das Holz einziehen und sich nur minimal über den vordefinierten Ausbreitungsversuch hinaus ausbreiten, liegt in der Holzplatte mit den maximalen Diffusionskoeffizienten nach 14 Tagen circa in der Hälfte der Platte eine im Vergleich zum Zeitpunkt vor dem Auftreffen des ersten Tropfens erhöhte Holzfeuchte vor. Die Feuchte zieht hier in Faserrichtung, das heißt in x-Richtung, vom Kreismittelpunkt aus circa 0,95 m weit in das Holz ein. Transversal legen die Wassermoleküle circa 0,80 m zurück. In z-Richtung ist nach zwei Wochen teilweise über die komplette Dicke der Platte ein gesättigter Bereich vorzufinden. Der maximal mögliche Feuchtegehalt  $u_{max}$  wird nach ungefähr 11,3 Tagen auf der der Einwirkung gegenüberliegende Seite erreicht. Im Simulationsergebnis der minimalen Diffusionskoeffizienten ist ein gesättigter Bereich des Holzes hingegen lediglich an der oberflächennahen Schicht festzustellen, welche in Plattenmitte maximal wird und in etwa 5 mm beträgt. Im Allgemeinen ist im Vergleich zum Startwert von  $u = 12\%$  eine erhöhte Holzfeuchte lediglich bis zu einer Tiefe von ungefähr 3 cm vorzufinden. Der Rest der Holzplatte bleibt von der Feuchte unberührt. Abbildung 10-1 im Anhang der Arbeit zeigt am Beispiel der maximalen Diffusionskoeffizienten einige Zwischenergebnisse der graphischen Lösung bis zum Erreichen der Darstellung in Abbildung 3-6. Den minimalen und maximalen Werten gegenüber steht das Simulationsergebnis der mittleren Diffusionskoeffizienten. Mit  $6E-09$  m/s<sup>2</sup> in longitudinaler Richtung und  $2E-09$  m/s<sup>2</sup> in transversaler Richtung entsprechen die Koeffizienten der Feuchteausbreitung dem rund 100 – bzw. 67 – fachen der minimalen Diffusionskoeffizienten. Abbildung 3-7 zeigt das Ergebnis der Simulation nach 14 Tagen.

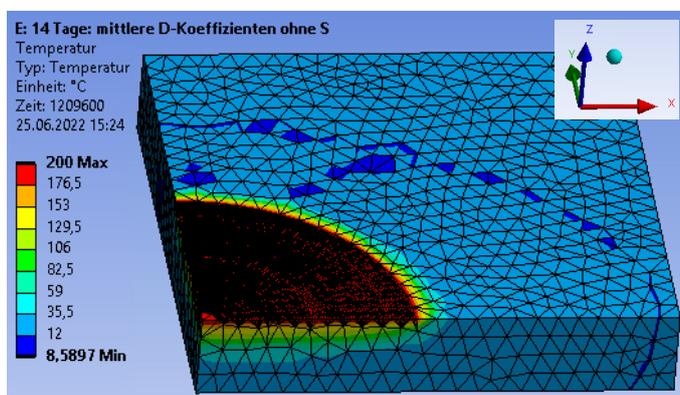


Abbildung 3-7: Simulierter Holzfeuchteverlauf nach 14 Tagen unter Verwendung der mittleren Diffusionskoeffizienten

Die aus dem mittleren Bereich für die Simulation gewählten Diffusionskoeffizienten liegen bedeutend näher an den minimalen als an den maximalen Diffusionskoeffizienten (vgl. Tabelle 3-2). Das macht sich an der numerisch berechneten Feuchteausbreitung bemerkbar. Ebenso wie in der linken Darstellung in Abbildung 3-6 breiten sich die Wassermoleküle in Abbildung 3-7 nur wenig schneller aus als die mit der Zeit anwachsende Kreisfläche des auftreffenden Wassers. In z – Richtung macht sich der größere transversale Diffusionskoeffizient allerdings bemerkbar. Hier ist bis zu einer Tiefe von in etwa 12 cm unterhalb der von den aufgetragenen Tropfen beeinflusste Fläche ein Bereich mit erhöhter Holzfeuchte festzustellen. Bis zu einer Tiefe von circa 1 cm unter der definierten Kreisfläche ist das Holz wassergesättigt.

### 3.2.2 Einfluss der Schwankungen von Diffusionskoeffizient und Oberflächenemissionskoeffizient

Im Folgenden werden die drei Simulationen zusätzlich jeweils mit dem minimalen und maximalen Oberflächenemissionskoeffizienten ergänzt, sodass insgesamt neun Simulationen durchgeführt werden. Der maximale Oberflächenemissionskoeffizient wird mit  $6,96E-06$  m/s und der minimale Oberflächenemissionskoeffizient wird mit  $2,20E-08$  m/s definiert (siehe Tabelle 2-2). Je größer der Wert des Oberflächenemissionskoeffizienten ist, desto geringer ist der äußere Widerstand auf die Wassermoleküle und desto schneller und leichter emittiert die Feuchte vom Holzbauteil in die Umgebungsluft.

Abbildung 3-8 zeigt das Resultat bei Verwendung der minimalen in der Literatur gefundenen Diffusionskoeffizienten unter Berücksichtigung des maximalen (links) und des minimalen (rechts) Oberflächenemissionskoeffizienten.

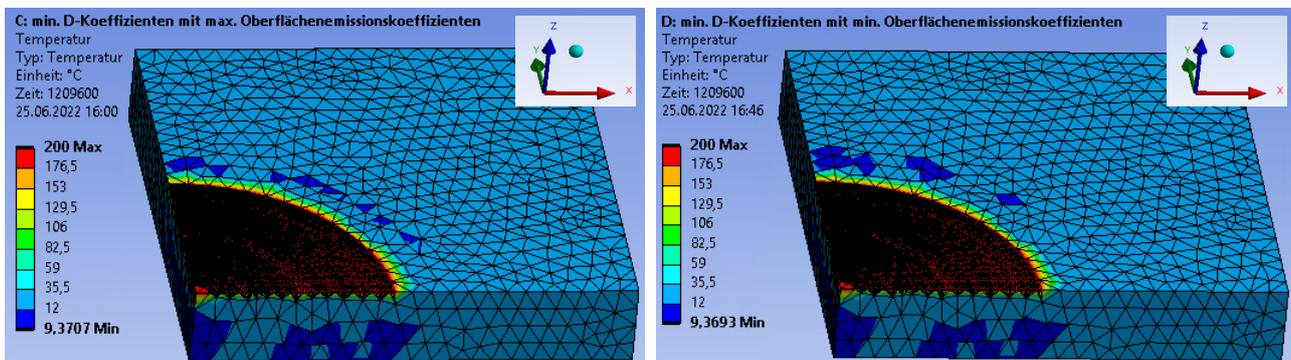


Abbildung 3-8: Simulierter Holzfeuchteverlauf nach 14 Tagen mit minimalen Diffusionskoeffizienten; links: bei Verwendung des maximalen Oberflächenemissionskoeffizienten; rechts: bei Verwendung des minimalen Oberflächenemissionskoeffizienten

Im Vergleich zum Simulationsergebnis mit den minimalen Diffusionskoeffizienten ohne Feuchteabgabe an die Umgebung (vgl. Abbildung 3-6 (links)) ist zu denen unter Berücksichtigung des äußeren Widerstandes kein Unterschied erkennbar. Unabhängig vom Wert des Oberflächenemissionskoeffizienten ist für den minimalen Diffusionskoeffizienten die Feuchteausbreitung vergleichbar.

Abbildung 3-9 stellt die Feuchteausbreitung bei Verwendung der medialen Diffusionskoeffizienten (vgl. Tabelle 3-2) in Interaktion mit dem maximalen und minimalen Grenzwert der in der Literatur zu findenden Oberflächenemissionskoeffizienten dar.

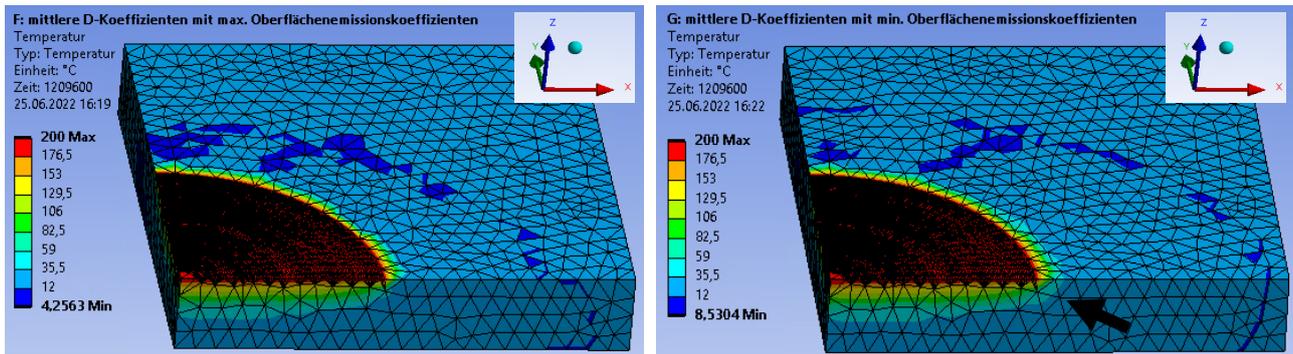


Abbildung 3-9: Simulierter Holzfeuchteverlauf nach 14 Tagen mit mittleren Diffusionskoeffizienten; links: bei Verwendung des maximalen Oberflächenemissionskoeffizienten; rechts: bei Verwendung des minimalen Oberflächenemissionskoeffizienten

Anders als bei der Simulationsreihe mit den minimalen Diffusionskoeffizienten ist bei den mittleren Diffusionskoeffizienten hier bereits ein marginaler Einfluss des Oberflächenemissionskoeffizienten erkennbar. Dieser Einfluss macht sich allerdings erst mit dem Maximalwert von S bemerkbar. Zwischen dem Simulationsergebnis ohne Berücksichtigung des Oberflächenemissionskoeffizienten und dem Ergebnis mit dem Minimum dessen ist kein Unterschied zu beobachten. Unter Berücksichtigung des maximalen Oberflächenemissionskoeffizienten aus Tabelle 2-2 stellt sich hingegen eine geringe Abweichung in Bezug auf die Feuchteausbreitung dar. Auch wenn die Diskrepanz nur sehr gering ist, dringt die Feuchte im Simulationsergebnis bei Vernachlässigung des Oberflächenemissionskoeffizienten quer zur Faser teils bis zu 3 cm weiter, in Faserrichtung stellenweise sogar bis zu 4 cm weiter ein. Der schwarze Pfeil in der Abbildung rechts markiert zur besseren Erkennlichkeit eine solche abweichende Stelle. Der mit  $u = 200\%$ , wassergesättigte Bereich bleibt unabhängig der Definition des äußeren Widerstandes identisch.

Den entscheidendsten Einfluss auf die Lösungen der FEM – Berechnungen hat der Oberflächenemissionskoeffizient in der Simulationsreihe mit den maximalen Diffusionskoeffizienten. Abbildung 3-10 zeigt die Darstellungen des maximal gewählten Transportkoeffizienten in Verbindung mit dem maximalen (links) und den minimalen (rechts) Oberflächenemissionskoeffizienten.

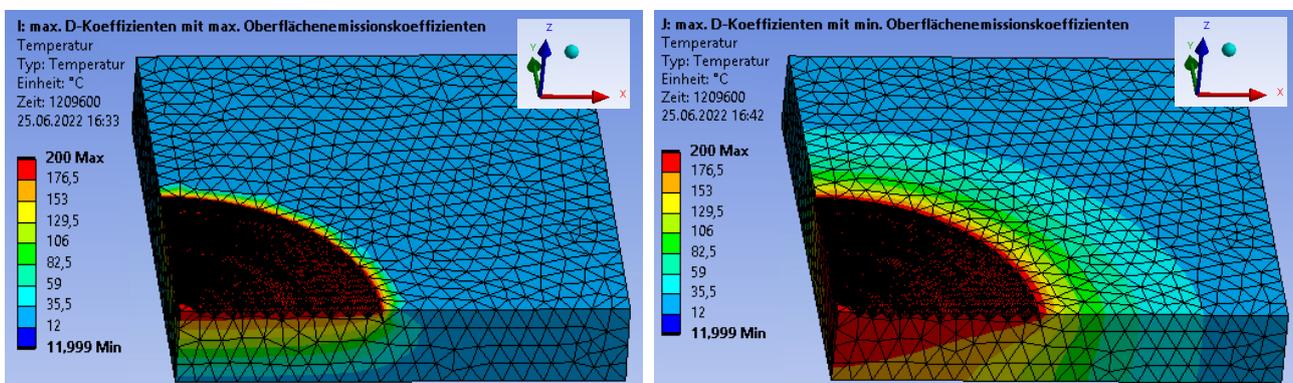


Abbildung 3-10: Simulierter Holzfeuchteverlauf nach 14 Tagen mit maximalen Diffusionskoeffizienten; links: bei Verwendung des maximalen Oberflächenemissionskoeffizienten; rechts: bei Verwendung des minimalen Oberflächenemissionskoeffizienten

Selbst bei Verwendung des minimalen Oberflächenemissionskoeffizienten ist bereits ein signifikanter Unterschied im Vergleich zur Simulation unter Vernachlässigung dessen (siehe Abb. 3-6 (rechts)) festzustellen. Vergleicht man die Reichweite der Feuchte quer zur Faser aus der thermisch isolierten Betrachtung des Holzkörpers mit der Simulation mit dem minimalen Oberflächenemissionskoeffizient, ist noch keine Veränderung bemerkbar. In Faserrichtung hingegen reduziert der Oberflächenemissionskoeffizient mit dem Wert von  $2,20E-08$  m/s die maximale Feuchteausbreitung um circa 5 cm. Die stärkste Abweichung zum Simulationsergebnis in Abbildung 3-6 (rechts), in der der Oberflächenemissionskoeffizient nicht berücksichtigt wird, lässt sich im Volumenanteil mit der maximal gesättigten Holzfeuchte (roter Bereich) feststellen. Während sich in der Darstellung der Simulation mit dem unendlich groß wirkenden äußeren Widerstand der wassergesättigte Bereich bis an die Unterseite der Holzplatte erstreckt, beträgt die Holzfeuchte an der Unterseite des Probekörpers (oranger Bereich) bei Verwendung des minimalen Oberflächenemissionskoeffizienten aus Tabelle 2-2 nur noch Holzfeuchtwerte zwischen 153 % und 176,5 %. Geht man weiter von dem circa 316 – fachen Oberflächenemissionskoeffizienten aus, befinden sich die äußeren 2 cm an der der Feuchteeinwirkung entgegengesetzten Seite sogar in der ursprünglichen Gleichgewichtsfeuchte von 12 %. Darüber hinaus ist erkennbar, dass der Bereich mit  $u > 12$  % ausbaucht. Das bedeutet, im Inneren der Holzplatte ist die Ausbreitung der Feuchte zu allen Zeitpunkten weiter fortgeschritten als nahe der Oberfläche.

Die Simulationsergebnisse werden lediglich anhand der graphischen Darstellung zum Endzeitpunkt  $t = 14$  d gezeigt. Abbildung 10-1 im Anhang bildet zehn weitere Zwischenergebnisse am Beispiel der maximal gewählten Diffusionskoeffizienten unter Vernachlässigung einer Verdunstung an der Oberfläche der Holzplatte ab. Die restlichen Simulationen verhalten sich entsprechend ihrer finalen Ergebnisse nach 14 Tagen (vgl. Abb. 3-6 bis Abb. 3-10) analog zu den Darstellungen in Kapitel 10.1.

### 3.3 Diskussion der Simulationsergebnisse

#### 3.3.1 Abweichungen zwischen den Simulationen

Wie zu erwarten, beeinträchtigen die großen Schwankungen der Diffusionskoeffizienten die Simulationsergebnisse erheblich und eine für die Praxis nutzbare Vorhersage der Feuchteausbreitung in einem Holzbauteil erscheint mit den vorliegenden Literaturwerten nicht möglich. Vergleicht man die Feuchteausbreitung der minimalen Diffusionskoeffizienten mit der Ausbreitung der maximalen Diffusionskoeffizienten im thermisch isolierten System, unterscheidet sich die von der Feuchte durchsetzte Fläche in transversaler Richtung nach 14 Tagen um 27 cm. In longitudinaler Richtung sind es sogar 37 cm. Ein weiterer markanter Unterschied betrifft die Eindringtiefe und damit das Volumen des wassergesättigten Bereiches mit  $u = 200$  %. Während bei Verwendung des maximalen Diffusionskoeffizienten dieser Bereich nach knapp zwei Wochen bereits teilweise durch die komplette Plattendicke von 0,20 m dringt, dringt er in den Simulationsergebnissen mit den minimalen Diffusionskoeffizienten in Plattenmitte nur maximal 5 mm in die Platte hinein. Von einer erhöhten Holzfeuchte betroffen sind dabei die äußersten rund 3 cm. In der Simulation mit den mittleren Diffusionskoeffizienten weisen in etwa die oberen 12 cm eine Holzfeuchte  $> 12$  % auf und bis zu einer Tiefe von circa 1 cm ist das Holz mit Wasser gesättigt. Dabei ist zu beachten, dass selbst die mittleren Diffusionskoeffizienten im oberen Bereich der Literaturwerte angesiedelt sind und die Maximalwerte von

Cunningham et al. (1989) im Vergleich zu Abbildung 2-12 und Abbildung 2-13 außerordentlich große Werte darstellen. Das lässt vermuten, dass sich die tatsächliche Feuchteausbreitung eher im Bereich der Resultate der minimalen bis mittleren Diffusionskoeffizienten aufhält. Außerdem erscheint es unrealistisch, dass eine 20 cm dicke Holzplatte unter einer Einwirkung von 6 ml Wasser pro Stunde bereits nach zwei Wochen über die gesamte Dicke hinweg gesättigt ist. Hierfür spricht zudem ein von Zillig (2009) durchgeführter Versuch, wobei der Wasseraufnahmekoeffizient der Holzart Fichte bestimmt wird. Dabei werden Holzwürfel mit einer Kantenlänge von 20 mm nach DIN EN ISO 15148 in ein Wasserbad gesetzt (siehe Kapitel 2.2.3). Die kleinen Holzproben sind auch nach 3 Wochen noch nicht gänzlich gesättigt und es ist weiterhin eine Massezunahme zu verzeichnen. In der Simulation wird dem Probekörper ein ähnlicher Wasseraufnahmekoeffizient wie in den Ergebnissen von Zillig (2009) zugeordnet. Diese Argumente legen die Vermutung nahe, dass die tatsächliche Feuchteausbreitung im Bereich der Ergebnisse der Simulationsreihen mit den minimalen (Fenster B, C und D) und den mittleren Diffusionskoeffizienten (Fenster E, F und G) liegt.

Einen nur teilweise relevanten Einfluss hat weiterhin der Oberflächenemissionskoeffizient  $S$ . Insbesondere bei Gebrauch des maximalen Diffusionskoeffizienten ist eine große Differenz einerseits zwischen den Darstellungen der Simulationen ohne und mit Berücksichtigung des Oberflächenemissionskoeffizienten und andererseits auch zwischen den Simulationen bei Verwendung der verschiedenen Oberflächenemissionskoeffizienten erkennbar. Das liegt daran, dass sich die Feuchte in und an der Oberfläche des Bauteils in den unterschiedlichen Modellen unterschiedlich weit ausbreitet und in einzelnen Simulationsergebnissen dadurch beträchtliche Teile der Oberfläche eine höhere Holzfeuchte als die Gleichgewichtsfeuchte aufweisen. An diesen Stellen wird der Oberflächenemissionskoeffizient wirksam und es stellt sich eine Feuchteabgabe an die Umgebung ein. Bei den Simulationsreihen mit den minimalen und mittleren Diffusionskoeffizienten, bei denen die Feuchteausbreitung nicht bzw. kaum schneller von Statten geht als das Anwachsen der kreisförmigen Einwirkung, ist aus diesem Grund kein bzw. nur unmerklich ein Einfluss des Oberflächenemissionskoeffizienten vorhanden. Daraus ist abzuleiten, dass in Bezug auf die Feuchteausbreitung in einem Holzbauteil die Relevanz des Oberflächenemissionskoeffizienten in erster Linie stark vom Wert des Wasseraufnahmekoeffizienten, der das Ausmaß der einwirkenden Fläche bestimmt, und vom Diffusionskoeffizienten, der die Geschwindigkeit der Feuchte im Holzbauteil regelt, abhängt.

### 3.3.2 Qualität und Kritik an den Simulationen

Im Allgemeinen muss jedoch erwähnt werden, dass den Simulationen viele Annahmen und Vereinfachungen zugrunde liegen. Die Simulationen basieren auf der grundlegenden Sichtweise, dass die Ausbreitung von Wassermolekülen in Holzbauteilen auf dem physikalischen Prozess der Diffusion beruht, und infolgedessen wird die Analogie zwischen instationärer Wärmeleitung und Diffusion genutzt. Die Beschreibung des Feuchtetransports mit Hilfe der Diffusion stellt dabei lediglich einer vereinfachten Näherung dar (Kucharczyk & Pawlik, 2020). Während im hygrokopischen Bereich die Beschreibung des Feuchtetransports als diffusiver Prozess den Regelfall darstellt (El Kouali & Vergnaud, 1991; Schaffrath, 2015; Siau, 1984), ist diese Beschreibung im kapillaren Holzfeuchtebereich umstrittener (Kucharczyk & Pawlik, 2020; Pang, 1997; Siau, 1984). Kapillare Effekte werden in der Simulation vollständig vernachlässigt. Insgesamt entspricht die Beschreibung des Feuchtetransports als diffusives Phänomen einem einfach zu lösenden Prozess, da nur wenige

Materialparameter nötig sind. Gleichzeitig können damit zufriedenstellende Lösungen erzielt werden (Kucharczyk & Pawlik, 2020). Weiterhin werden die für die Ausbreitung zuständigen Parameter unabhängig der Holzfeuchte als Konstante betrachtet. Da die Simulationen allerdings lediglich einer groben Abschätzung dienen, wie beispielsweise ein Schadensfall eines undichten Rohres aussehen könnte, sollte diese Annahme ausreichend sein. Zudem würden holzfeuchteabhängige Materialkennwerte eine Genauigkeit vortäuschen, die unter Berücksichtigung der teils weit auseinander liegenden Literaturwerte faktisch nicht angebracht ist.

In den Ergebnissen der FEM – Berechnungen sind Werte im Bereich zwischen 12 % (Gleichgewichtsfeuchte) und 200 % (maximale Wassersättigung) zu erwarten. Die entstandenen Werte kleiner 12 % werden entweder numerischen Fortpflanzungsfehlern oder einer nicht fehlerfreien Eingabe durch den Bediener zugeschrieben. Allerdings handelt es sich dabei lediglich um lokal begrenzte Bereiche innerhalb des Netzes, welche nicht weiter beachtet werden, da diese das Endergebnis vermutlich nicht entscheidend beeinflussen. Unter anderem deshalb wird in der Präsentation der Simulationsergebnisse auch auf die Angabe des vorliegenden Holzfeuchte – Mittelwertes verzichtet. Weiterhin ist der Mittelwert abhängig vom Volumen des Holzkörpers, welches in der Praxis je nach Bauteil schwankt. Darüber hinaus ist bezüglich der Qualität der Simulation allgemein die Frage zu stellen, inwieweit eine Temperatureinwirkung mit einer Feuchteeinwirkung gleichgesetzt werden darf. Hierbei muss beachtet werden, dass die oberen und unteren Schranken der beiden Systemgrößen sich nicht entsprechen. Die Temperatur beginnt aus naturwissenschaftlicher Sicht bei  $-273,15\text{ °C}$  und weist keinen oberen Grenzwert auf. Der mögliche Holzfeuchtebereich des Fichtenholzes befindet sich zwischen dem darrtrockenen Zustand und dem maximalen Feuchtegehalt, das heißt zwischen 0 % und 200 %. Ob und inwieweit sich diese Tatsache auf die Simulationsergebnisse auswirkt, ist nicht bekannt. Weiter handelt es sich um eine isotherme Modellierung der Problemstellung. Dies entspricht in der Regel nicht der Realität. Bei Betrachtung einer mangelhaft ausgeführten Trinkwasserinstallation mit Warmwasser beispielsweise tritt nach Norm mindestens  $55\text{ °C}$  warmes Wasser aus (DIN 1988-200). Der Temperaturunterschied zum Bauteil innerhalb der Konstruktion, welches Raumklima aufweist, wird in der Simulation ignoriert. Diese Herangehensweise kann dadurch legitimiert werden, dass im Vergleich zum Feuchtetransport die Wärmeleitung um ein Vielfaches schneller abläuft (Nadler et al., 1985; Schaffrath, 2015).

Die präsentierten Darstellungen zeigen die ausgebreitete Feuchte nach 14 – tägigem Betropfen. Die Simulationsdauer von 2 Wochen ist dem begrenzt vorliegenden Festplattenspeicher geschuldet. Die Vorgehensweise einer möglichen Visualisierung über einen längere Zeitraum bliebe allerdings identisch. Betrachtet man jedoch den Verlauf der Simulationen, reichen 14 Tage aus, um immerhin einen Eindruck davon zu bekommen, wie sich der Schadensfall von auf Holz auftreffendem Wasser entwickeln könnte und dass mit den vorhandenen Literaturwerten keine aussagekräftige Vorhersage über die wahrscheinliche Feuchteausbreitung zu treffen ist. Erkennbar ist allerdings, dass bereits bei einer zweiwöchigen Betropfung mit  $6\text{ ml/h}$  gravierende Schäden in und auf Holzbauteilen entstehen könnten. Insbesondere in den Simulationen mit den maximalen Diffusionskoeffizienten breitet sich die Feuchte weit aus. Hier müsste im Zweifel das komplette Holzbauteil ausgetauscht werden, da das Wasser nicht nur oberflächlich vorzufinden ist, sondern das Bauteil komplett durchdringt. Bei den minimalen Diffusionskoeffizienten fokussiert sich die Feuchteausbreitung hauptsächlich auf die äußersten Zentimeter des Holzes. Sollte es die Statik im jeweilig konkreten Fall zulassen, wäre eine

weniger tiefgreifende Sanierung der Konstruktion ausreichend. Auch an dieser Stelle wird deutlich, dass die ermittelten Simulationsergebnisse aufgrund der geringen Präzision für die Baupraxis keinen Nutzen aufweisen.

Des Weiteren müssten die den maximalen Diffusionskoeffizienten zugehörigen Simulationen, sofern diese der Realität entsprechen, den Ergebnissen geschuldet angepasst werden. Erreicht das aufgenommene Wasser die gegenüberliegende Seite der Holzplatte, flacht nach DIN EN ISO 15148 die proportionale Kurve von aufgenommener Wassermenge zur Wurzel der Zeit ab und es kommt zu einem schlagartigen Abfall des Wasseraufnahmekoeffizienten. Das bedeutet, dass ab dem Zeitpunkt, an dem das Wasser die Unterseite des Holzbauteils erreicht, im gleichen Zeitintervall die aufgenommene Menge an Wasser pro Fläche geringer wird. Als Resultat daraus müsste die einwirkende Kreisfläche, die mittels des Wasseraufnahmekoeffizienten bestimmt worden ist, ab diesem Zeitpunkt als schneller anwachsend definiert werden (vgl. Gleichung (3-3)). Da die Ergebnisse der Simulationsreihe mit den maximalen Diffusionskoeffizienten allerdings als unwahrscheinlich eingeschätzt werden, wird auf diesen Schritt verzichtet.

Bezüglich des Oberflächenemissionskoeffizienten wird oftmals Gleichung (2-9) erwähnt. Dabei gilt nach Avramidis und Siau (1987), dass sich bei größerer Probendicke der scheinbare Diffusionskoeffizient dem Wert des wahren Diffusionskoeffizienten annähert. In Bezug auf ein sehr großes Holzbauteil lässt sich nun folglich vermuten, dass bei Betrachtung des gemessenen, scheinbaren Diffusionskoeffizienten der Einfluss des oberflächigen Feuchtestroms verschwindend gering ist. Dieser Schlussfolgerung widersprechen allerdings die Simulationsergebnisse bei Verwendung der in der Literatur vorliegenden Werte der maximalen Diffusionskoeffizienten in Kombination mit den Oberflächenemissionskoeffizienten. Zudem wird der Oberflächenemissionskoeffizient, obwohl dieser nur für den Holzfeuchtebereich von 0 % bis zur Fasersättigung definiert ist, über den kompletten Holzfeuchtebereich hinweg vom darrtrockenen Zustand bis zur maximalen Wassersättigung als Konstante in der Simulation verwendet. Den Forschungsergebnissen nach Tremblay et al. (2000) ist auch davon auszugehen, dass neben dem hygrokopischen auch im kapillaren Bereich ein Feuchtestrom an der Oberfläche existiert. Abschließend kann dementsprechend zusammengefasst werden, dass den Simulationsergebnissen nach der Wert des äußeren Widerstandes grundsätzlich Einfluss auf die Ausbreitung der Feuchte im Holzbauteil hat. Inwieweit die Oberflächenemission jedoch konkret Einfluss auf Schadensbilder ähnlich denen der Simulationen nimmt, ist wiederum fraglich. Insbesondere die Simulationsergebnisse mit den minimalen und medialen Diffusionskoeffizienten, welche im Vergleich zur Feuchteausbreitung mit den maximalen Diffusionskoeffizienten als realistischer eingestuft werden, weisen bei Verwendung der Oberflächenemissionskoeffizienten kaum Unterschiede auf.

Einer der begründetsten Kritikpunkte bezüglich der Qualität der Simulation ist die starke Idealisierung des Werkstoffs Holz. Grundsätzlich wird das Verhalten des natürlich gewachsenen Rohstoffs von zahlreichen Eigenschaften klassifiziert. Im Modell werden die meisten dieser Faktoren vernachlässigt und die Holzplatte wird als einfacher, bis auf die Holzfasern homogener Quader mit nur wenigen Attributen definiert. Charakteristika wie Äste, Holzstrahlen sowie die Markröhren werden vernachlässigt und die Fasern liegen durchwegs parallel gerichtet im Bauteil. Das Modell entspricht einer Holzplatte aus einem Stück mit den Maßen 1,1 m x 1,1 m x 0,2 m und weist keine Eigenschaften einer Verklebung auf. Diese wirklichkeitsfremden Annahmen werden damit begründet, dass es

lediglich darum geht, ein grobes Bild von der Ausbreitung der Feuchte auf und im Holzbauteil zu bekommen. Man kann aufgrund der Natürlichkeit des Werkstoffes allerdings ohnedies davon ausgehen, dass sich die konkrete Feuchteausbreitung in jedem Bauteil andersartig verhält.

Auch die Art der Oberflächenbeschaffenheit wird im Modell nicht mitberücksichtigt. Die wasseraufnehmende Kreisfläche auf der Oberfläche des Probekörpers wird mit Hilfe von Wasseraufnahmekoeffizienten bestimmt, bei denen in der entsprechenden Literatur nicht auf die Art der Oberfläche der Prüfkörper eingegangen wird. Untersuchungen nach Weber (2022) zufolge, die sich mit den Wasseraufnahmekoeffizienten von gehobelten, geschliffenen und sägerauen Holzproben beschäftigt, beeinträchtigt die Oberflächenbeschaffenheit das Einziehen von Wasser durchaus. Bei den sägerauen Probestücken ist die zügigste Wasseraufnahme zu verzeichnen, bei den gehobelten die Langsamste. Betrachtet man den in der vorliegenden Arbeit benutzten Wasseraufnahmekoeffizient von  $0,00238 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$ , befindet sich dieser bei Betrachtung der Wasseraufnahme nach 24 Stunden im mittleren Bereich der von Weber (2022) ermittelten Werte, was in etwa einer geschliffenen Oberfläche entspricht. Zusätzlich wird festgestellt, dass sich das Ausbreitmaß eines einzelnen Wassertropfens ebenfalls in Abhängigkeit der Struktur der Holzoberfläche differenziert verhält und dass bis zum vollständigen Aufsaugen eines Tropfens ein gewisser Zeitraum benötigt wird. In Anbetracht der Ergebnisse dieser Untersuchungen sollte die Berechnung der Ausbreitung der kreisförmigen Wasserfläche inklusive der Annahme des sofortigen Einziehens der Tropfen kritisch gesehen werden.

Im Modell wird als einheitliche Anfangsholzfeuchte 12 % gewählt. In der Baupraxis liegt allerdings in der Regel über den Querschnitt eine parabelförmige Holzfeuchteverteilung vor, weil sich die Holzfeuchte der Innenzone stets zeitverzögert ändert (Fortuin, 2003; Mindrup, 2019). Die Vereinfachung der konstanten Startfeuchte wird als ausreichend genau angenommen, da weder ein konkretes Fallbeispiel vorliegt und die nicht exakt quantifizierbaren Diffusionskoeffizienten ohnehin stark schwanken. Zusätzlich wird auf diese Weise die Ausbreitung der Feuchte durch den ansteigenden Holzfeuchtwert einfach ersichtlich.

Insgesamt wird also deutlich, dass die Wasseraufnahme-, Diffusions- und Oberflächenemissionskoeffizienten sowohl einzeln als auch in Kombination miteinander die Simulationsergebnisse beeinträchtigen. Die Qualität einer Simulation basiert in großen Teilen auf der Güte der definierten Materialkennwerte, ebenso wie auf den getroffenen Vereinfachungen. Ein Modell stellt stets den Versuch einer Reduktion der Komplexität dar, ohne dabei die allgemeingültigen Aussagen zu beschneiden (Fleischmann et al., 2018). Wie erläutert, werden jedoch eine Reihe von Annahmen getroffen, während gleichzeitig aufgrund sowohl von messtechnischen Fehlern als auch unzureichender wissenschaftlicher Kenntnis zum Transportprozess erhebliche Schwankungen bezüglich der holzspezifischen Kenngrößen existieren. Zusammenfassend kann erwähnt werden, dass es mit den vorliegenden Literaturwerten nicht möglich ist, eine konkrete Aussage über die Feuchteausbreitung in Holzbauteilen zu treffen, da insbesondere die Diffusionskoeffizienten zu sehr streuen. Der Einfluss des Oberflächenemissionskoeffizient scheint den Simulationsergebnissen zufolge vorwiegend an die Werte der Diffusions- und Wasseraufnahmekoeffizienten gebunden zu sein. Um nachfolgend die unterschiedlichen Simulationsergebnisse in der Praxis einordnen zu können und die Ergebnisse im Ansatz zu validieren, werden im Anschluss praktische Versuchsdurchführungen durchgeführt.

## 4 Praktische Versuchsdurchführungen

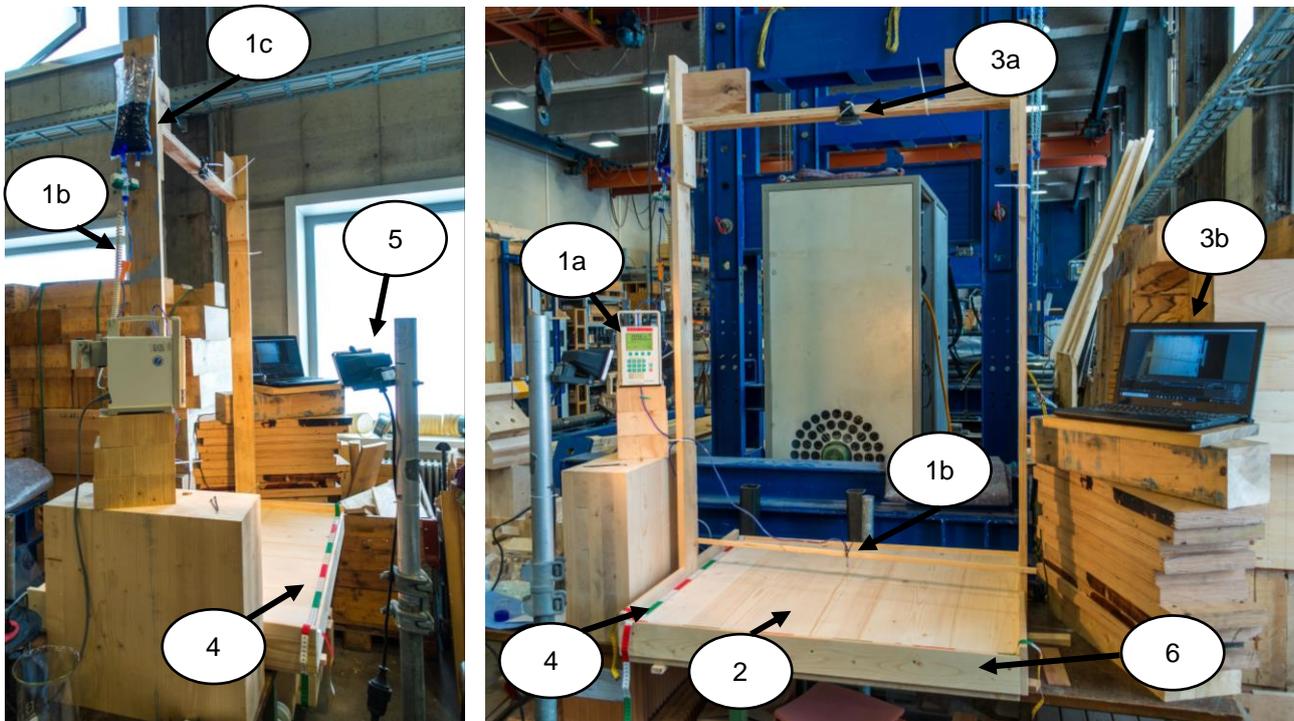
### 4.1 Tropfversuch I mit Tinte

#### 4.1.1 Methodik Tropfversuch I

Damit eine Abschätzung der konkreten Qualität der FEM – Berechnungen getroffen werden kann, werden in der Materialprüfungsanstalt der TU München insgesamt zwei an die softwaregestützten Simulationen angelehnten praktischen Tropfversuche durchgeführt. Dabei wird jeweils über 24 Stunden hinweg eine Wassermenge von 6 ml/h quer zur Faserrichtung auf eine Holzplatte aufgetropft, was einer Wassermenge von 50 mg schweren Tropfen alle 30 Sekunden entspricht. Die Simulationszeit von 14 Tagen wird auf einen Tag verkürzt, da dies ausreichen sollte, um die Richtigkeit der getroffenen Annahmen abschätzen und die Ausbreitung der Feuchte beurteilen zu können.

Im ersten Tropfversuch wird in das auftropfende destillierte Wasser 0,5 Vol. - % handelsübliche Tinte (Handelsname: *Tinte 4001 Königsblau*; Hersteller: *Pelikan*) beigemischt. Dieses Mischverhältnis wird der Abschlussarbeit von Weber (2022) entnommen. Dosiert und aufgebracht wird das in einen Infusionsbeutel gefüllte, blau eingefärbte Wasser mittels einer Infusionspumpe (Handelsname: *Infusomat fmS*; Hersteller: *Braun*) mitsamt zugehörigem Infusionsbesteck. Da eine, wie im Modell verwendete, idealisierte Holzplatte aus einem Stück ohne Verklebungen mit den Maßen von 1,1 m x 1,1 m x 0,2 m in der Realität nicht existiert, wird eine in der Prüfhalle vorliegende nicht schmalseitenverklebte Brettsperrholz (BSP) – Platte verwendet. Diese weist die Dimensionen 0,85 m (longitudinal) x 1,0 m (transversal) x 0,1 m auf. In der Plattendicke handelt es sich um fünf 20 mm starke Lamellen aus Fichtenholz. Da vermutet wird, dass die Feuchtigkeit innerhalb eines Tages nicht weiter als in die obere Lamelle eindringt, wird die BSP – Platte als geeignet eingestuft und für die Versuchsdurchführung genutzt. Allerdings sind auf der Oberfläche des Prüfkörpers durch vorangegangene Untersuchungen Markierungen angebracht, die mit einem Bandschleifer abgeschliffen werden. Dabei werden zusätzlich die nicht schmalseitenverklebten Fugen zwischen den einzelnen außen liegenden Lamellen etwas mit Holzstaub gefüllt. Das Wasser – Tinte – Gemisch wird mit Hilfe einer circa 1 cm über der Platte platzierten Infusionsnadel mittig auf die eben ausgerichtete Holzplatte getropft. Der Infusionsbeutel wird auf einer Höhe von etwa 1,50 m über der BSP – Platte aufgehängt. Eine Webcam (Hersteller und Handelsname: *Logitech C270 HD-Webcam*), die 1,40 m oberhalb des Versuchskörpers angebracht und an einen Laptop angeschlossen ist, zeichnet den Versuch über 24 Stunden mit auf. Ein neben der Holzplatte positionierter Strahler sorgt für eine ausreichende Beleuchtung. Damit dabei eine Größenordnung der Wasserlache und des blau eingefärbten oberflächigen Holzbereichs mit abgeschätzt werden kann, werden zusätzlich Maßbänder auf dem Prüfkörper angebracht, auf denen 10 cm – Abschnitte farblich gekennzeichnet sind. Eine Einfassung um den Prüfkörper herum schützt davor, dass das auftropfende Wasser über den Plattenrand hinweg auf den Boden der Prüfhalle fließt. Die BSP – Platte weist vor Beginn der Betropfung eine Holzfeuchte von 12,6 % auf. Die Temperatur des eingefärbten Wassers beträgt 23 °C und in der Prüfhalle herrscht ein geregeltes Normalklima mit 20 °C ± 2 °C und einer relativen Luftfeuchte von 55 % ± 5 %. Der Zeitraum der 24 – stündigen Versuchsdurchführung beläuft sich von 18.05.22 um 10:32 Uhr bis 19.05.22 um 10:32 Uhr. Des Weiteren werden in regelmäßigen Abständen mit einer

Kamera separat Fotos gemacht, da das Aufnahmebild der Webcam nur von geringer Qualität ist. Am Ende der Versuchsdurchführung wird das überschüssige, noch nicht eingezogene eingefärbte Wasser abgetupft, damit der Prüfkörper durchschnitten und die Eindringtiefe festgestellt werden kann. Abbildung 4-1 zeigt den Versuchsaufbau aus zwei Perspektiven.



- 1a Infusionspumpe
- 1b Infusionsbesteck inkl. Infusionsnadel
- 1c Infusionsbeutel (destilliertes Wasser mit 0,5 Vol. - % Tinte)
- 2 BSP – Platte (0,85 m (longitudinale Richtung) x 1,00 m x 0,1 m)
- 3a Webcam
- 3b Laptop
- 4 Maßbänder (2 Stück)
- 5 Strahler
- 6 Einfassung

Abbildung 4-1: Versuchsaufbau für Tropfversuch I mit Tinte

#### 4.1.2 Versuchsergebnisse Tropfversuch I

Gleich zu Beginn der Versuchsdurchführung ist zu beobachten, dass entgegen der Annahme, dass das Wasser sofort nach dem Auftreffen eingesogen wird, auf der Holzoberfläche eine blaue Wasserlache vorhanden ist, die über die 24 Stunden hinweg bleibt. Darüber hinaus wird diese von einer Fläche umschlossen, die bereits aufgesogene Feuchtigkeit aufweist, was durch eine blaue Einfärbung der Holzoberfläche erkenntlich wird. Sowohl die Wasserlache als auch die von der Feuchtigkeit beeinflusste, eingefärbte oberflächennahe Holzschicht wächst stetig an. Insgesamt sind während der Versuchsdurchführung dementsprechend drei verschiedene Bereiche auf der Holzplatte

erkennbar: Ein Bereich mit einer Wasserlache auf dem Prüfkörper, ein blau eingefärbter und demnach schon mit Feuchtigkeit versehener Bereich und ein unberührter Bereich. Weiterhin ist festzustellen, dass es sich nicht um kreisförmige Flächen handelt und dass die Ausbreitung sowohl der Pflanze als auch des blau eingefärbten Bereiches in Faserrichtung um ein Vielfaches schneller von Statten geht als quer zur Faser. Trotz der ebenen Ausrichtung des Prüfkörpers breitet sich die blaue Lache nicht gleichmäßig in alle Richtungen aus, sondern von der Webcam aus gesehen hauptsächlich nach unten links, wie in den Darstellungen in Anhang 10.2.1 zu sehen ist. In Faserrichtung nach oben hin dehnt sich die blaue Farbe hingegen nur langsam aus und ab rund 12 Stunden nach Versuchsbeginn stoppt die Ausbreitung der blauen Fläche in diese Richtung beinahe gänzlich. In Abbildung 4-2 entspricht das der linken Seite. Zudem entspricht die Form der Wasserlache keiner einheitlichen geometrischen Form, sondern breitet sich äußerlich asymmetrisch und bis auf die Bevorzugung der Faserrichtung ohne erkennbare Systematik aus. Der blau eingefärbte Bereich kann indes, abgesehen von kleinen Disproportionen, annähernd als lang gezogene anwachsende Ellipse abgeschätzt werden. So beträgt die Hauptachse der Ellipse nach 5 Stunden beispielsweise circa 30,0 cm und nach 10 Stunden in etwa 40,0 cm. Die Nebenachse wächst in diesen 5 Stunden um etwa 1,5 cm von 11,5 cm auf 13,0 cm. Das entspricht jeweils einem ungefähren Verhältnis von Haupt – zu Nebenachse von 2,6 zu 1 nach 5 Stunden und von 3,1 zu 1 nach 10 Stunden. Abbildung 4-2 zeigt die beiden zugehörigen Aufnahmen. Abgesehen vom finalen Ausbreitmaß entsprechen sämtliche aus den Aufnahmen ermittelten Maße einer auf 0,5 cm gerundeten Genauigkeit.

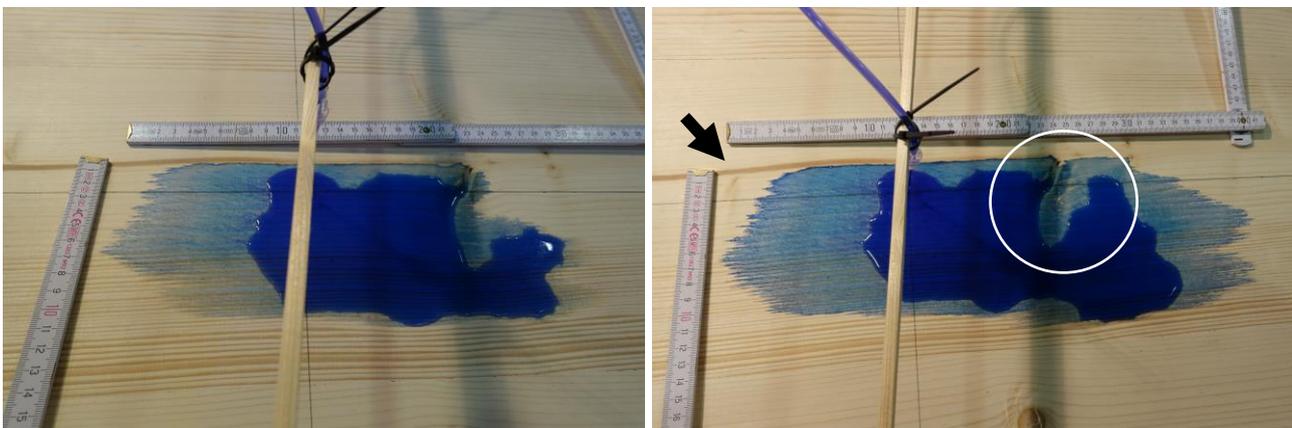


Abbildung 4-2: Feuchteausbreitung nach 5 h (links) und 10 h (rechts)

In der Abbildung 4-2 ist erkennbar, dass die Lache sich nicht linear in Faserrichtung ausbreitet. Im weiß eingekreisten Bereich umfließt das Tinte – Wasser – Gemisch einen Ast, welcher auch nach Versuchsende nicht von der Wasserlache bedeckt ist. Außerdem ist eine mit einem schwarzen Pfeil gekennzeichnete Markröhre zu sehen, die über den kompletten Zeitraum der Versuchsdurchführung eine quer zur Faser wirkende Sperrschicht darstellt und bis zum Ende der 24 Stunden von der blauen Färbung nicht überwunden wird. Auf der der Markröhre gegenüberliegenden Seite des blauen Fleckes befinden sich breite Spätholzjahre, die scheinbar ebenfalls die Ausbreitung der farbgebenden Flüssigkeit erschweren. Insbesondere in transversaler Richtung ist dementsprechend zu beobachten, dass die Ausbreitung der blauen Fläche der flüssigen Lache auf der Oberfläche nicht weit voraus ist. Bei den Jahringen des Spätholzes stockt die blau eingefärbte Fläche vereinzelt so lange, bis sich der wässrige Bereich darüber zeitgleich mit ausbreitet.

Neben der allgemeinen Betrachtung der Ausbreitung des blauen Wasser – Tinte – Gemisches sind zudem lokal Besonderheiten bezüglich des Feuchtetransportverhaltens auffällig. Zum einen erhält die blau eingefärbte Oberfläche im Laufe der Versuchsdurchführung ein immer satteres Blau. Insbesondere im Vergleich der Ausbreitungen nach 5 und 22 Stunden ist eine dunklere Blaufärbung zu beobachten (vgl. Abb. 4-2 mit Abb. 4-3). Der Ausschnitt in Abbildung 4-3 zeigt zudem den Teil des eingefärbten Bereichs, welcher ab circa 12 Stunden nach Versuchsbeginn kaum mehr anwächst. Zusätzlich zur flächigen Farbsättigung hebt sich am mit Zacken versehenen äußeren Rand des blauen Areals eine immer dunkelblauer werdende Umrahmung ab. Der nicht gleichförmige, sondern gezackte Rand entsteht dadurch, dass die Blaufärbung in den Jahrringen des Frühholzes weiter ausgeprägt ist als in denen des Spätholzes.

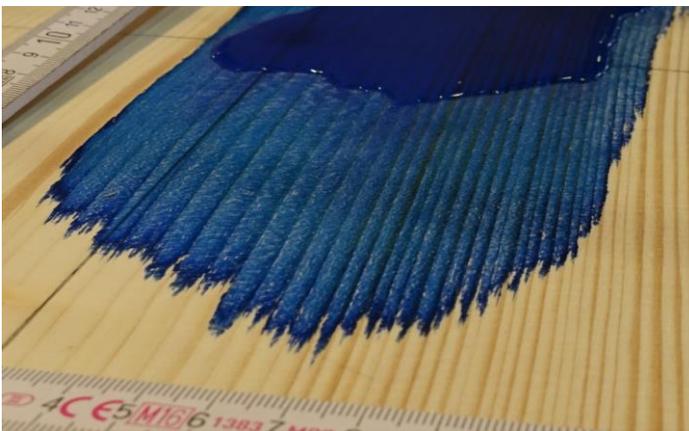


Abbildung 4-3: Darstellung zur Verdeutlichung der bevorzugten Ausbreitung im Frühholz und der dunkler werdenden Sättigung (nach 22 h)

Während sich das Tinte – Wasser – Gemisch sowohl oberflächlich als auch in Form der Wasserlache nach 12 Stunden in Faserrichtung nahezu nur noch in eine Richtung hin ausbreitet, erreicht die blaue Flüssigkeit durch Ausbreitung quer zur Faser circa 13,5 Stunden nach Versuchsbeginn eine nicht schmalseitenverklebte Fuge zwischen zwei Lamellen der BSP – Platte. Ab diesem Zeitpunkt wächst die bis dato entstandene Wasserlache auf der Holzoberfläche nur noch marginal an und der Zuwachs fokussiert sich auf den Bereich um die Fuge. Die blaue Einfärbung des bis dahin angewachsenen, annähernd ellipsenförmigen Areals nimmt im von der Webcam aus gesehenen unteren Bereich in der zweiten Hälfte des Versuchszeitraums in longitudinaler Richtung noch etwas mehr als 4 cm zu. In Abbildung 4-4 wird ersichtlich, dass der Flächengewinn um die nicht schmalseitenverklebte Fuge hingegen äußerst zügig von Statten geht. An der mit einem gelben Pfeil markierten Stelle entsteht knapp 13,5 Stunden nach Versuchsbeginn eine anwachsende Ausbuchtung der blauen Lache. Sobald die blaue Flüssigkeit die Fuge überläuft, breitet sich die blaue Fläche schlagartig entlang dieser aus. Insgesamt ist entlang der Fuge innerhalb von 150 Minuten eine Ausbreitung der blauen Farbe von rund 45 cm festzustellen. Die ersten blauen Ausläufer gelangen dabei etwa 15 Stunden nach Beginn der Versuchsdurchführung an den Rand der BSP – Platte.

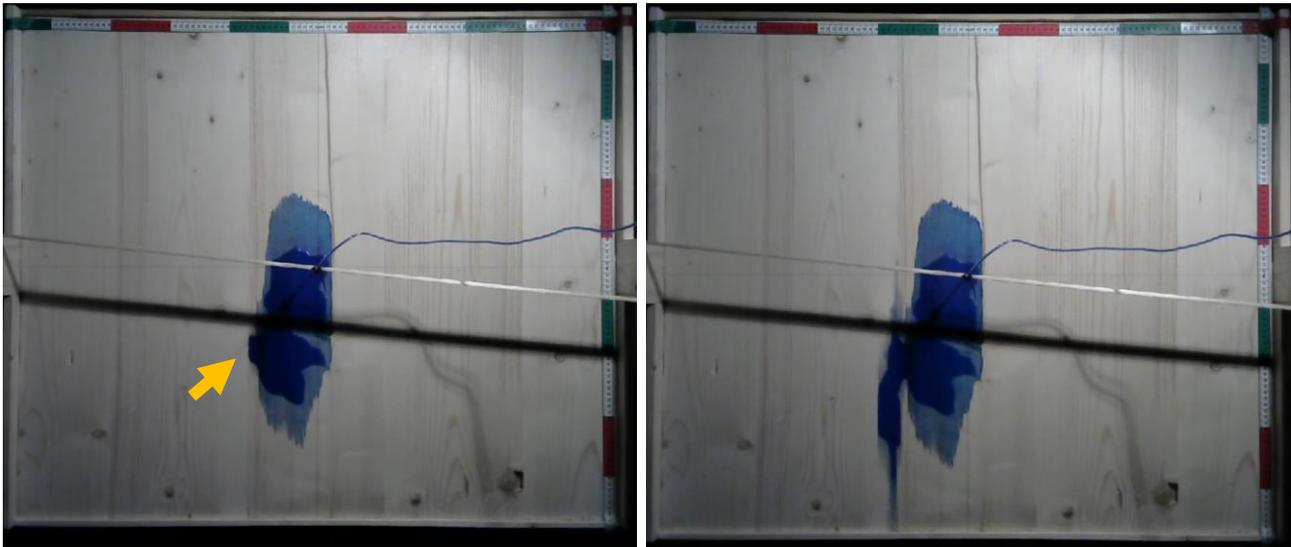


Abbildung 4-4: Feuchteausbreitung nach 13,5 h (links) und 16 h (rechts) aus Webcam – Aufnahme

Zusätzlich zu den bisher gezeigten Darstellungen befinden sich im Anhang 10.2.1 Abbildungen der stündlichen Feuchteausbreitung während der Versuchsdurchführung inklusive der Angaben der maximalen, auf halbe Zentimeter gerundeten Ausbreitmaße der blauen Färbung auf der Oberfläche.

Nach Ende der 24 – stündigen Versuchsdurchführung wird der Probekörper nach Abtupfen der blauen Wasserlache zerteilt. Abbildung 4-5 zeigt die Oberfläche der Holzplatte vor dem Entfernen der Pfütze. Der blau eingefärbte Bereich weist die maximalen Abmessungen in Faserrichtung von 46,9 cm und quer zur Faser von 18,3 cm auf. Bei der longitudinalen Ausprägung von 46,9 cm wird der blaue Bereich um die Fuge vernachlässigt, da dieser bis zur Umfassung der Holzplatte reicht und sich beim Vorhandensein einer größeren Platte noch weiter ausgebreitet hätte. Die Ausprägung der blauen Lache beträgt in Faserrichtung 26,9 cm und quer zur Faser 17,6 cm.

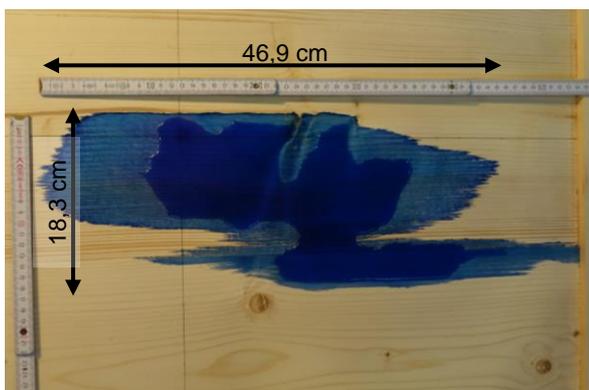


Abbildung 4-5: Finale Feuchteausbreitung nach 24 h (Tropfversuch I)

In Abbildung 4-6 ist der zerschnittene Prüfkörper zu sehen. Dabei ist zu beobachten, dass lediglich die Oberfläche der Holzplatte blau erscheint. Im Inneren des Probekörpers ist abgesehen vom Bereich um die Fuge und keine Blaufärbung erkennbar. Ergänzend werden an den Teilstücken mit Hilfe eines elektronischen Holzfeuchtemessgerätes die Holzfeuchte gemessen. Die Dorne werden circa

1,5 cm tief eingestochen. Sowohl unterhalb des blau eingefärbten als auch im vom Farbstoff unbeeinträchtigten Bereich sind im Vergleich zur Anfangsfeuchte von 12,6 % bis auf eine Ausnahme nur erhöhte Holzfeuchten festzustellen. Die unter der blauen Fläche bestimmten Holzfeuchtwerte reichen bis 25,0 %. Allerdings sind auch im nicht vom Farbstoff beeinflussten Bereich, insbesondere in Verlängerung des blau eingefärbten Areals in Faserrichtung, leicht erhöhte Messwerte zu beobachten, die zwischen 12,4 % und 14,0 % schwanken. Abbildung 4-7 (links) zeigt dies beispielhaft anhand eines Viertels der zerteilten BSP – Platte. Das „x“ markiert jeweils den Mittelpunkt zwischen den Messdornen. In der Darstellung rechts ist das elektronische Widerstandsmessgerät abgebildet, welches die Eindringtiefe der Dorne veranschaulicht. Bei den Messungen werden die Dorne senkrecht zur Faserrichtung eingestochen.

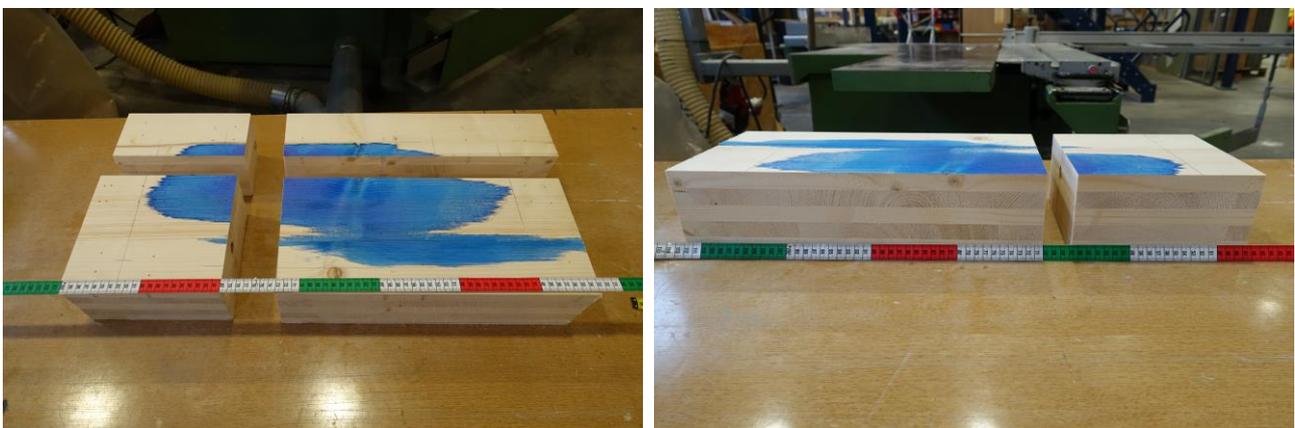


Abbildung 4-6: Zerteilter Probekörper nach Versuchsende (Tropfversuch I)

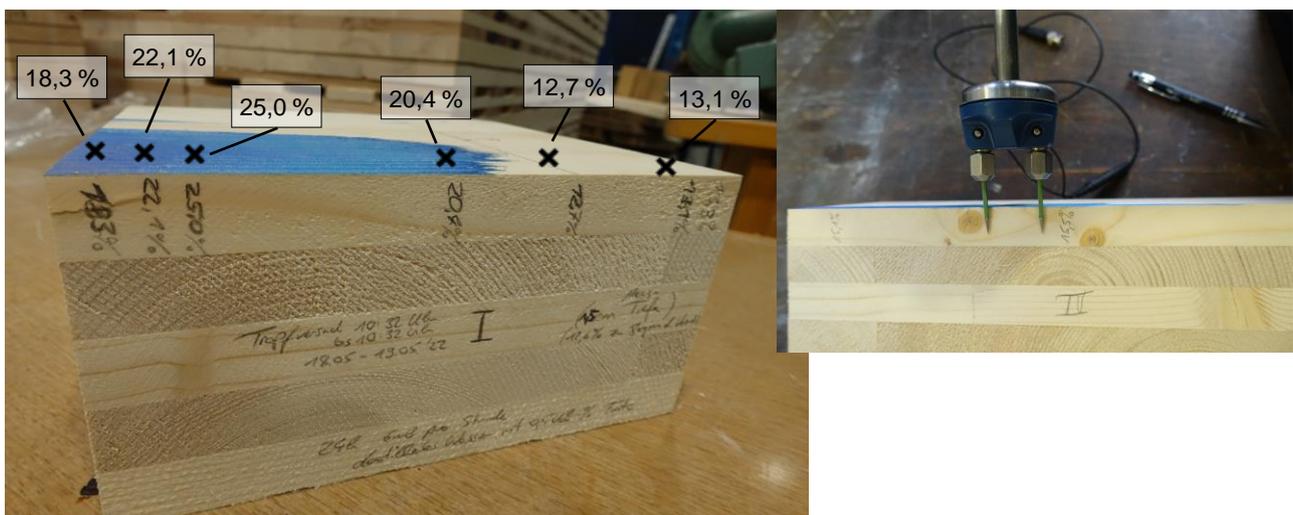


Abbildung 4-7: Links: Holzfeuchtemesswerte in 1,5 cm Messtiefe; rechts: Veranschaulichung der Holzfeuchtemessung mit dem verwendeten Messgerät

Während der Farbstoff in der Fläche nicht eindringt, ist in der Fuge und hirnholzseitig zwischen der BSP – Platte und der Einfassung innerhalb des Probekörpers eine blaue Färbung erkennbar. Das Tinte – Wasser – Gemisch zieht in der Fuge bis zur Einfassung, breitet sich dort im Zwischenraum aus und dringt flächig in das Hirnholz der obersten Lamellenreihe ein. Ein 2 cm vom Rand der Platte entfernter Schnitt senkrecht zur Fuge bringt folgenden Beobachtungen, wie Abbildung 4-8 zeigt.

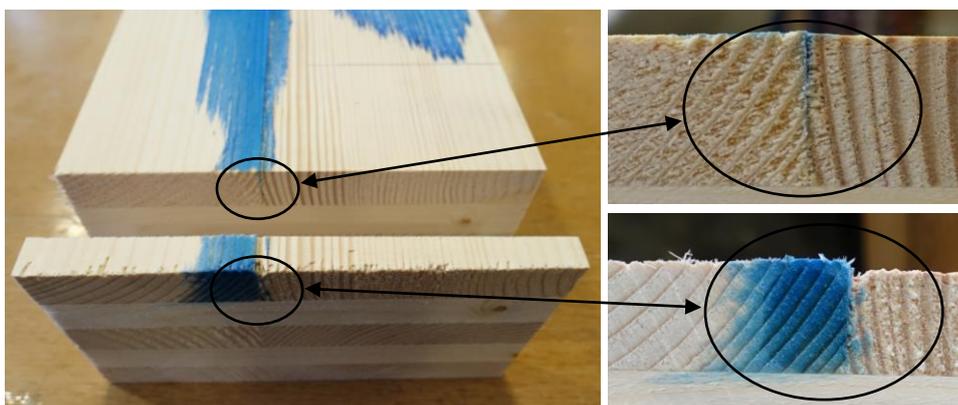


Abbildung 4-8: Schnittbild quer zur Fuge

Das Hirnholz der obersten Lamelle weist an der Seite des Plattenrandes über die gesamte Höhe eine Blaufärbung auf. Auch auf der Rückseite des 2 cm schmalen Streifens sind blaue Pigmente erkennbar, welche insbesondere im Bereich der Spätholzringe zu beobachten sind. Des Weiteren ist festzustellen, dass im Inneren der Holzplatte nahezu über die komplette, 20 mm tiefe Fuge zwischen den Lamellen der ersten Brettlage blauer Farbstoff eingedrungen ist. Außerdem kann am Plattenrand im Bereich der Fuge eine Volumenzunahme wahrgenommen werden. Diese beträgt maximal in etwa 2,5 mm und nimmt entlang des Spalts in Richtung der Plattenmitte ab, wo diese nach wenigen Zentimetern kaum mehr zu erkennen ist.

#### 4.1.3 Schlussfolgerung aus den Ergebnissen des Tropfversuchs I

Die Versuchsergebnisse aus dem mit tintenhaltigem Wasser durchgeführten Tropfversuch entsprechen nicht dem vermuteten Resultat bzw. gleichen den Ergebnissen der in dieser Arbeit bereits vorgenommenen numerischen FEM – Berechnungen nicht. Selbst bei Verwendung der minimalen Diffusionskoeffizienten entspricht der von der Feuchtigkeit beeinflusste Bereich in der Simulation nach 24 Stunden in etwa einem Zentimeter. Im praktischen Versuch dringt der blaue Farbstoff in den 24 Stunden quer zur Faser nicht in das Holzbauteil ein und ist lediglich in den äußersten Faserreihen zu erkennen. Aufgrund dessen wird die Überlegung angestellt, ob sich der Farbstoff der Tinte auf der Oberfläche der Holzplatte abgesetzt hat, während die Wassermoleküle selbst hingegen in das Bauteil eingezogen sind. Diese These erwähnt unter anderem auch Weber (2022), die in ihren Forschungen von mit Tinte – Wasser – Gemischen penetrierten Holzproben beobachtet, dass das Wasser scheinbar tiefer eindringt als der Farbstoff der Tinte. Dafür spricht weiterhin die Tatsache, dass die Blaufärbung um die Lache herum im Laufe der Versuchsdurchführung kontinuierlich dunkler wird. Dieser Effekt könnte durch eine fortwährende Auswaschung und dem Absetzen der Indikatorfarbe an der Holzoberfläche entstehen, wohingegen die Wassermoleküle eindringen und sich im Holzbauteil ausbreiten. Die Holzfeuchtemessung mit 1,5 cm tiefen Dornen ergeben zudem gegenüber der Anfangsfeuchte erhöhte Messwerte. Allerdings sind diese Messungen mit den

elektronischen Widerstandsmessgeräten an dieser Stelle kritisch anzusehen, da die gemessenen Wegstrecken zwischen den Dornen nicht exakt bekannt sind und ebenso über die feuchte Oberfläche gehen könnten. Es wird nur ein grober Anhaltspunkt bezüglich der Holzfeuchte dargestellt. Gegen diese Vermutung, die Feuchte würde tiefer in das Holz eindringen, spricht die nahezu ausbleibende Quellung der Holzplatte. Einzig an der Fuge kommt es zu einer feuchtebedingten Volumenzunahme. Diese beträgt am Plattenrand, wo die blaue Flüssigkeit insbesondere über das Hirnholz eingezogen ist, sogar bis zu 2,5 mm. In der Plattenmitte ist diese mit  $< 0,5$  mm nur minimal wahrnehmbar. Flächig ist keine Volumenänderung zu erkennen.

Vor diesem Hintergrund und mit dem Hauptaugenmerk auf eine mögliche, weitreichendere Eindringtiefe in transversaler Richtung wird nachfolgend, nachdem eine geeignete Indikatorfarbe dafür auffindig gemacht worden ist, ein vergleichbarer Tropfversuch mit einem weiteren Farbstoff und leicht optimierter Methodik durchgeführt. Eine umfassendere Analyse zu den Versuchsergebnissen und der Vergleich zu den Simulationsergebnissen folgt in Kapitel 5 in Verbindung mit den Resultaten des zweiten Tropfversuchs.

## 4.2 Exkurs: Suche nach eindringendem Farbstoff

### 4.2.1 Methodik zur Farbfindung

Da die Tinte quer zur Faser nicht mit in das Holz eingezogen ist, einige Argumente aber dafür sprechen, dass die aufgetropfte Feuchte tiefer als nur oberflächlich eingedrungen ist, wird im Folgenden nach einem passenden Farbstoff gesucht, mit dem in einem zweiten Tropfversuch die Eindringtiefe bestenfalls bestimmt werden kann. Dazu wird ein insgesamt 24 Stunden dauernder Versuch durchgeführt, bei dem fünf verschiedene Indikatoren auf Holzproben getropft werden, die am Ende zerteilt werden. Ein 19 cm breites und 2 cm hohes Fichtenbrett mit einer anfänglichen Holzfeuchte von 11,8 % wird in 5 jeweils 15 cm lange Streifen zerschnitten. Auf die Probestücke werden innerhalb der ersten 8 Stunden mittels einer Pipette stündlich 10 Tropfen der jeweiligen Wasser – Farbstoff – Lösung mittig aufgetropft. Die weiteren 16 Stunden haben die verschiedenen Flüssigkeiten Zeit, in die Prüfkörper einzuziehen. Dies ist nach Versuchsende auch bei allen Proben der Fall. Abbildung 4-9 zeigt den Versuchsaufbau nach dem Aufbringen aller Tropfen 8 Stunden nach Versuchsbeginn inklusive der gewählten farbigen Mittel und der genutzten Pipette (links oben).

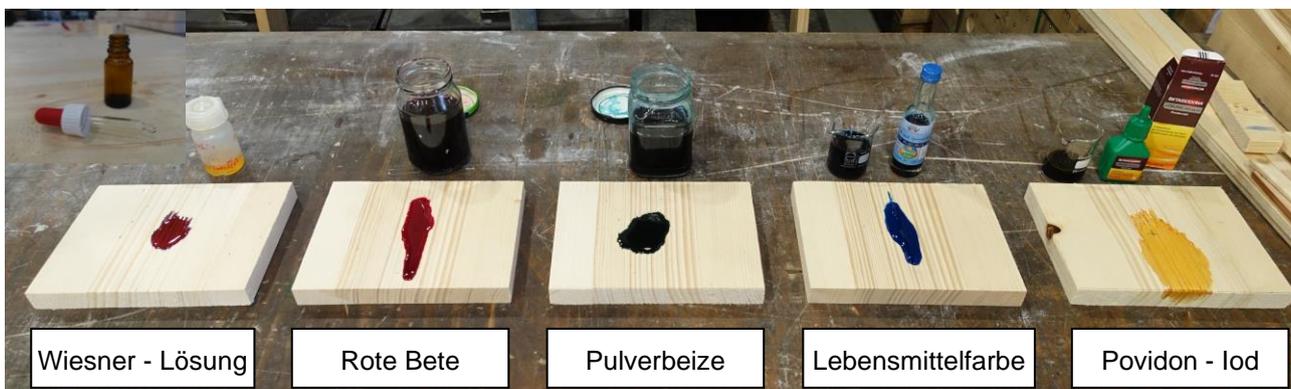


Abbildung 4-9: Versuchsaufbau zur Farbfindung (nach 8 mal 10 Tropfen/Stunde)

Wiesner – Lösung: Der aus Phloroglucin, Ethanol und konzentrierter Salzsäure bestehende Indikator wird im Holzbau unter anderem für das Ausfindig machen des Holzfaserbruchanteils bei bruchmechanischen Untersuchungen genutzt (Koller, 2020).

Rote – Bete: Rote Bete enthält den Farbstoff Betanin (Schauer, 2017). Eine Rübe Rote Bete wird in 500 ml Wasser und 2 Esslöffel Essigessenz ausgekocht und die dabei entstehende farbige Flüssigkeit für den Versuch benutzt.

Pulverbeize: Hellgrüne (Farbnummer: 157), wasserlösliche Pulverbeize des Herstellers Clou (Clou-Shop, 2022) wird gemäß der Gebrauchsanweisung zubereitet.

Lebensmittelfarbe: 40 ml destilliertes Wasser wird mit 5 ml blauer Lebensmittelfarbe der *Rosenheimer Gourmet Manufaktur* (RGM GmbH, 2019) vermengt. Durch das Zusammenbringen mit Wasser soll erreicht werden, dass die Feuchteausbreitung hauptsächlich durch die Eigenschaften des Wassers beeinflusst wird.

Povidon – Iod: 40 ml destilliertes Wasser werden mit 150 Tropfen Povidon – Iod einer *Betaisodona – Lösung* (HERMES Arzneimittel GmbH, 2020) gemischt. Analog zur Lebensmittelfarbe soll durch das Vermengen mit Wasser die farbgebende Flüssigkeit sich weitestgehend unverfälscht ähnlich klarem Wasser verhalten. Die reine *Betaisodona – Lösung* ist viskoser als Wasser.

#### 4.2.2 Versuchsergebnisse und Schlussfolgerung

##### Wiesner – Lösung:

Der lila Indikator zieht im Vergleich zu den anderen vier farbgebenden Stoffen mit maximal 3,5 Millimetern scheinbar am tiefsten in die Holzprobe mit ein. Die flächige Ausbreitung an der Oberfläche ist am geringsten. Das liegt vermutlich am in der Lösung enthaltenen Ethanol, welches wie bereits erläutert (vgl. Kapitel 2.2.3) einen höheren Aufnahmekoeffizienten aufweist als reines Wasser (Zillig, 2009). Diese zügigere Aufnahme ist auch während der Versuchsdurchführung bemerkbar. Während beim Auftropfen der zweiten 10 Tropfen die ersten 10 Tropfen sowohl bei der Roten Bete, der Lebensmittelfarbe als auch der Beize noch größtenteils an der Oberfläche der Probekörper vorhanden sind, sind die Tropfen auf der Probe mit der Wiesner – Lösung komplett eingezogen. Weiterhin ist zu beobachten, dass sich nach 24 Stunden Kristalle auf der Oberfläche bilden. Abbildung 4-10 zeigt den aufgeschnittenen Probekörper. Das Holzfeuchtemessgerät ist am vorliegenden Holzstück nicht in der Lage, eine Holzfeuchte zu messen und einen Messwert anzugeben. Aufgrund der Forschungsfrage, die das Ausbreitverhalten von Wasser untersuchen soll, wird die Wiesner – Lösung wegen ihrer fehlenden Vergleichbarkeit zu Wasser ausgeschlossen.

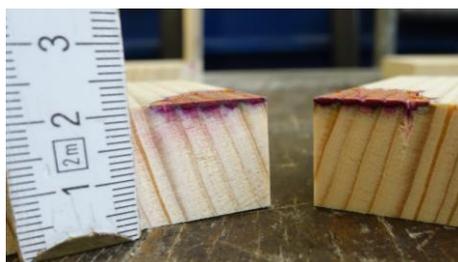


Abbildung 4-10: Holzprobe mit Wiesner - Lösung

### Rote Bete:

Die Tropfen der ausgekochten Roten Bete ziehen im Gegensatz zur Wiesner – Lösung nur langsam ein. Nach Versuchsende erreicht der Farbstoff zudem keine tieferen Stellen als 1 mm unter der Oberfläche. In Abbildung 4-11 ist der mit Rote Bete beaufschlagte aufgeschnittene Probekörper zu sehen. Eine Holzfeuchtemessung unterhalb des roten Bereichs mit 1 cm tief eingeschlagenen Dorne ergibt einen Wert von  $u = 15,7 \%$ .

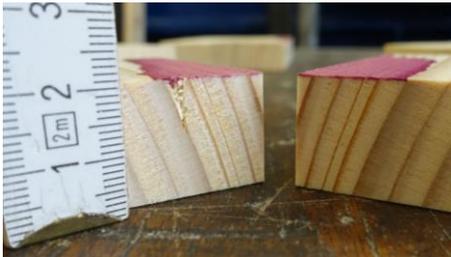


Abbildung 4-11: Holzprobe mit Rote Bete

### Pulverbeize:

Die Beize verhält sich während des Versuchs ähnlich der Lösung mit der Roten Bete. Allerdings ist die Beize nach Ende der Versuchsdurchführung im Schnittbild quer zur Faser bis zu 2,5 mm tief in das Holz eingedrungen. Es wird eine Holzfeuchte von 46,3 % gemessen. Abbildung 4-12 zeigt den zersägten Prüfkörper der Pulverbeize.



Abbildung 4-12: Holzprobe mit Pulverbeize

### Lebensmittelfarbe:

Das mit der Lebensmittelfarbe versehene Holzstück, siehe Abbildung 4-13, nimmt die Tropfen in gleicher Geschwindigkeit wie bei den beiden zuvor beschriebenen Farbstoffen auf, aber es ist ein nur marginal erhöhter Holzfeuchtegehalt von 12,7 % festzustellen. Die maximale Eindringtiefe beträgt rund 2 mm.

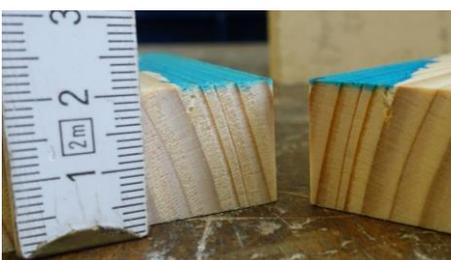


Abbildung 4-13: Holzprobe mit Lebensmittelfarbe

### Povidon – Iod:

Die Povidon – Iod – Lösung reagiert anders als die restlichen vier farbgebenden Stoffe. Im Gegensatz zu den anderen Farbstoffen ist hier kaum eine Oberflächenspannung bzw. eine entstehende Lache erkennbar und die Holzprobe saugt die stündlich aufgetropften Tropfen der gelbbraunen Flüssigkeit jedes Mal innerhalb von 30 min bis 45 min auf. Der Ursprung des schnellen Aufsaugens wird in der Molekülstruktur vermutet. Obwohl die Tropfen vergleichsweise schnell einziehen, ist im Querschnitt des zerteilten Prüfkörpers außer an der Oberfläche keine Verfärbung ersichtlich, wie Abbildung 4-14 zeigt. Daher und aufgrund des nicht dem Wasser entsprechenden Verhaltens wird das Povidon -Iod nicht als geeigneter Farbstoff für den zweiten Tropfversuch angesehen. Die Holzfeuchtemessung ergibt einen der Anfangsfeuchte leicht erhöhten Wert von  $u = 12,3 \%$ .

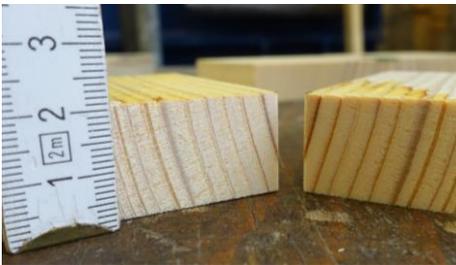


Abbildung 4-14: Holzprobe mit Povidon - Iod

Die gemessenen Eindringtiefen und Holzfeuchten müssen ebenso wie im ersten Tropfversuch mit Vorsicht interpretiert werden. Durch das Zerschneiden der Prüfkörper mit der Kreissäge entsteht einerseits Wärme, die zur Verdunstung der Feuchte führen bzw. dadurch die Holzfeuchtemessung beeinträchtigen könnte, und andererseits kann das rotierende Sägeblatt die Restfeuchtigkeit an der Oberfläche mit in den Querschnitt verschmieren. Weiter kann ebenso vermutet werden, dass sich die Wassermoleküle teils vom Farbstoff trennen und die Feuchte selbst tiefer eindringt.

Da die Wiesner – Lösung und das Povidon - Iod aufgrund der bereits genannten Gründe ausgeschlossen werden, wird aus den verbleibenden drei farbgebenden Stoffen die Beize für den zweiten Tropfversuch gewählt, weil diese im Schnittbild quer zur Faser am weitesten eingezogen zu sein scheint. Die Rote Bete wird nicht genutzt, da diese scheinbar weniger tief in das Holz eindringt als die Beize oder die Lebensmittelfarbe. Ein weiterer Grund neben der Eindringtiefe, aus dem die Lebensmittelfarbe ausgeschlossen wird, ist der darin enthaltene Farbstoff *Patentblau V (E131)* (RGM GmbH, 2019), der der Gruppe der Triphenylmethanfarbstoffe zugeordnet werden kann (Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern, 2010). Hierzu gehören in der Regel auch die Farbstoffe, die der handelsüblichen blauen Tinte ihre Farbe geben (Pöhls & Busker, 2015), wie sie in Tropfversuch I verwendet worden ist. Vor diesem Hintergrund erscheint der Vergleich des ersten Tropfversuchs und des Ergebnisses des mit Lebensmittelfarbe betropften Holzstückes überraschend, da sich die Eindringtiefen merklich unterscheiden. An dieser Stelle wäre ein tieferer Einblick in die Chemie der Farbstoffe, deren Wirkungsweisen und der mögliche Zusammenhang mit den eingesetzten Trägerstoffen interessant. Der Hersteller der genutzten Tinte gibt auf Nachfrage nach der Rezeptur mit den enthaltenen Farbstoffen und Additiven diese nicht bekannt. Um im zweiten Tropfversuch einen anderen farbgebenden Stoff zu nutzen, wird daher für den zweiten Versuch die Beize genutzt.

### 4.3 Tropfversuch II mit Beize

#### 4.3.1 Optimierte Methodik Tropfversuch II

Bis auf zwei Modifikationen entspricht der zweite Tropfversuch genau dem Versuchsaufbau aus Kapitel 4.1. Zum einen wird anstelle der Tinte grüne Pulverbeize (Clou-Shop, 2022) als farbgebender Stoff genutzt. Diese wird gemäß den Herstellerangaben angemischt. Zum anderen wird die Holzplatte vor Versuchsbeginn gewogen. Der Hintergedanke ist dabei, im Anschluss an den Versuch anhand des Gewichtunterschieds von vorher zu nachher die Eindringtiefe rechnerisch abzuschätzen, sofern visuell erneut kein Farbstoff im Inneren des Holzes festzustellen ist. Der Prüfkörper weist die gleichen Eigenschaften der Platte aus Tropfversuch I auf. Da die Waage der Prüfanstalt der TU München, welche zudem mit einer Toleranz von 0,1 Gramm arbeitet, nur Gewichte bis maximal 30 kg messen kann, wird die 10 cm hohe BSP – Platte mit den Gesamtmaßen von 0,85 m (oberste Lamellenlage in Faserrichtung) auf 1,00 m der Breite nach in drei Stücke zerteilt und gewogen. Die beiden äußeren Teile betragen in der Breite jeweils 25 cm und wiegen 9,1455 kg und 9,1700 kg. Der mittlere Teil, der direkt mit den Tropfen beaufschlagt wird, misst 50 cm in der Breite und beläuft sich auf ein Gewicht von 18,1418 kg. Damit die Fugen zwischen den einzelnen Elementen keinen wesentlichen Einfluss auf das Versuchsergebnis nehmen können, spannen zwei Schraubzwingen die Plattenteile zu einem Stück zusammen. Die Versuchsdurchführung erfolgt im 24 – stündigen Zeitraum von 08. – 09.06.2022 ab 10:32 Uhr. Holzfeuchtemessungen an sechs verschiedenen Stellen vor Beginn des Versuchs ergeben einen Durchschnittswert von 12,0 %. Ferner entspricht die Versuchsdurchführung dem analogen Aufbau und Ablauf aus Tropfversuch I.

#### 4.3.2 Versuchsergebnisse Tropfversuch II

Zu Beginn des Tropfversuchs ist eine schnelle, stark longitudinal ausgeprägte Ausbreitung der grünen Beize zu beobachten. Der deutlich erkennbare, grün eingefärbte Bereich auf der Oberfläche ist nach einer Stunde Versuchszeit in etwa 9,5 cm weiter ausgebreitet als die flüssige Lache der Beize und weist insgesamt eine maximale longitudinale Ausdehnung von circa 25,0 cm auf. Quer zur Faser breitet sich die grün eingefärbte Oberfläche kaum schneller aus als die wässrige Schicht und die beiden Bereiche decken sich mit einer maximalen transversalen Weite von rund 5,5 cm nahezu ab. Abbildung 4-15 zeigt die Feuchteausbreitung nach 60 Minuten. In dieser Abbildung wird zudem besonders deutlich, dass sich die grüne Oberfläche in den hell erscheinenden Zellen des Frühholzes schneller ausdehnt als im dichteren Spätholz. Die flüssige Beize folgt dem bis dato entstandenen grünen Bereich an der Oberfläche.



Abbildung 4-15: Feuchteausbreitung nach 1 h

Ebenso wie im ersten Tropfversuch entsprechen die ermittelten Ausbreitmaße auf halbe Zentimeter gerundeten Werten. Eine Ausnahme bilden die finalen Ausdehnungen. Analog zum Tropfversuch I werden in Anhang 10.2.2 in stündlichen Abständen über den gesamten Zeitraum der Versuchsdurchführung Standbilder der Webcam – Aufnahmen inklusive den maximalen Ausbreitmaßen der grün eingefärbten Oberfläche gezeigt.

Circa 1,5 Stunden nach Versuchsbeginn nimmt die Ausbreitgeschwindigkeit der grünen Ausdehnung an der Oberfläche ab und die wässrige Lache nähert sich dieser an. Das bedeutet, dass die flüssige Beize den eingefärbten Bereich beinahe vollständig einholt, sodass nach rund 3,5 Stunden nur noch ein geringer Unterschied zwischen den beiden Ausdehnungen besteht, wie in Abbildung 4-16 dargestellt ist.



Abbildung 4-16: Feuchteausbreitung nach 3,5 h

Dieses Verhältnis nimmt im Verlauf der Versuchsdurchführung weiter ab, da die flüssige Lache stetig an Fläche zunimmt, während die Fläche des grün eingefärbten Bereichs im Totalen in etwa konstant bleibt. Der sich grün auf der Oberfläche ausbreitende Fleck ist schließlich beinahe gänzlich von der wässrigen Lache bedeckt.

Nachdem nach ungefähr 4 Stunden Tropfzeit die in den Webcam – Aufnahmen oben liegende Seite der longitudinalen Ausdehnung einen Ast erreicht, stockt die Ausbreitung an dieser Stelle. Daraufhin ist zu beobachten, dass sich der vorwiegende Zuwachs der farbigen Fläche auf die in Faserrichtung gegenüberliegende Seite, das heißt von der Webcam aus gesehen nach unten (siehe Abbildung 4-17), verlagert. Im oberen Bereich um den Ast breitet sich der grüne Bereich im weiteren Zeitverlauf

bis zum Ende des Versuchs longitudinal nur noch knapp 2 cm weiter aus, nachdem die Farbe seitlich am Ast vorbeigezogen ist.

Insgesamt ist durchwegs über den Versuchszeitraum eine starke longitudinale Ausprägung zu beobachten. In den ersten 14 Stunden, bevor der Farbstoff sich in Richtung einer Fuge bewegt, beträgt die maximale Ausdehnung in Faserrichtung das circa 4,5- bis 6- fache der Ausbreitung quer zur Faser. Dort verhindern die Spätholzzahrringe ein kontinuierliches Weiterziehen. Mittels einer geometrischen Form ist das grün eingefärbte Areal nicht zu beschreiben.

Rund 19 Stunden nach Versuchsbeginn erreicht die grüne Flüssigkeit eine nicht schmalseitenverklebte Fuge zwischen zwei Lamellen der BSP – Platte. Sobald die Lache den Rand des circa 1 mm schmalen Spalts übertritt, breitet sich der Indikator abrupt entlang der Fuge aus. Innerhalb von 90 Minuten ist eine maximale Ausprägung der grünen Einfärbung von etwa 51,0 cm zu erkennen. Abbildung 4-17 zeigt jeweils den Zeitpunkt vor dem Erreichen der Fuge und nach dem Erlangen der maximal sichtbaren Ausprägung des grünen Farbstoffs um die Fuge. Oberflächlich ist in den restlichen 3,5 Stunden des Versuchs nach dem Stand der rechten Darstellung bezüglich der flächigen Ausdehnung nahezu kein Anwachsen mehr zu beobachten. Um die Fuge herum ist erneut zwischen einer lediglich grün eingefärbten, vorausseilenden Fläche und einer grünen, flüssigen Lache zu differenzieren.

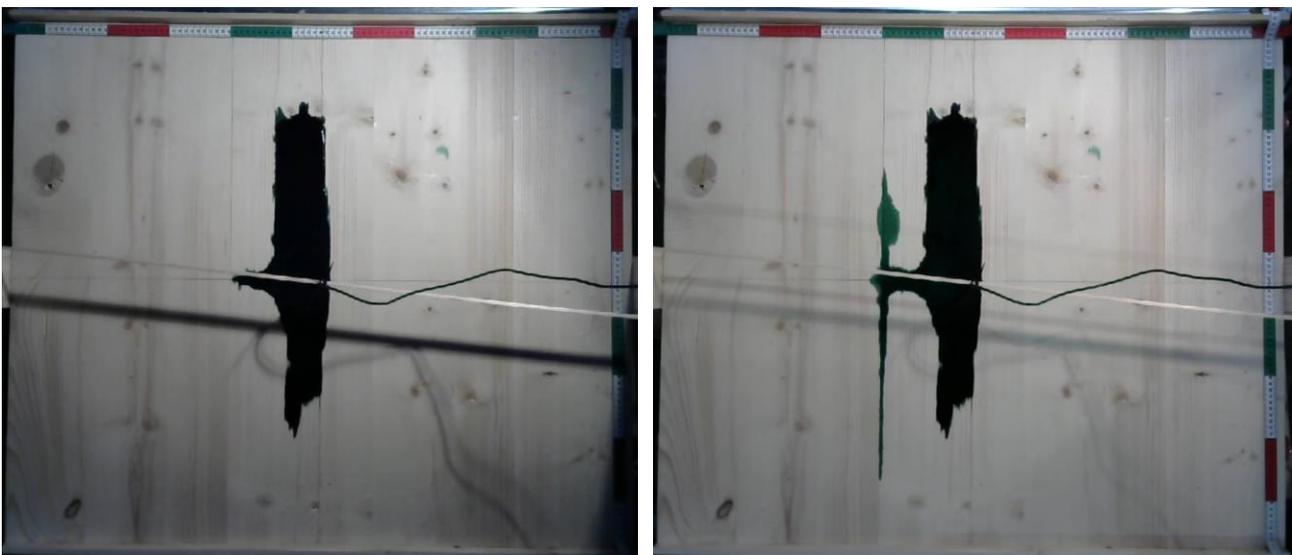


Abbildung 4-17: Feuchteausbreitung nach 19 h (links) und 20,5 h (rechts) aus Webcam – Aufnahme

Während sich die grüne Fläche in den letzten 3,5 Stunden des Versuchszeitraums kaum mehr ausbreitet, ist zu beobachten, dass sich in dieser Zeit allerdings die bestehende grüne Lache in ihrem Auftreten verändert. Zum Ende des Versuchszeitraums hin kann nicht mehr direkt von einer Lache gesprochen werden. Der ehemals flüssige Fleck ist eher mit einem geleeartigen Farbfilm ohne wässrige Eigenschaften vergleichbar. Zudem erscheint die Fläche im Laufe der Zeit immer dunkler, gegen Ende nahezu schwarz. Bei genauer Betrachtung der vom Farbstoff beeinflussten Fuge ist weiterhin zu erkennen, dass der Spalt im farbigen Bereich teilweise grün gefüllt ist. Abbildung 4-18 dokumentiert die finale Farbstoffausbreitung nach 24 Stunden.

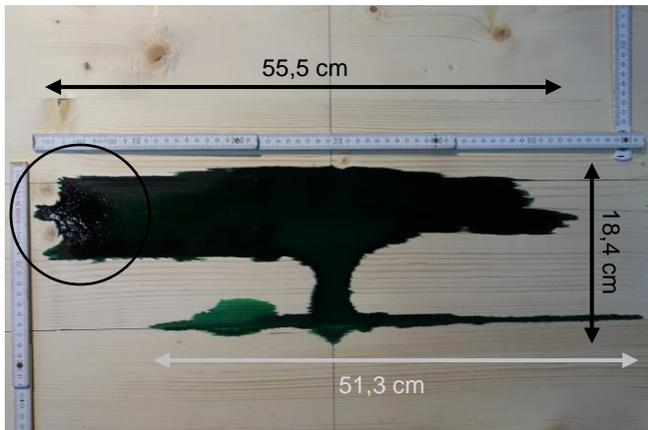


Abbildung 4-18: Finale Feuchteausbreitung nach 24 h (Tropfversuch II)

In Faserrichtung beträgt die maximale Ausdehnung der auf der Lamelle liegenden grünen Fläche unabhängig von der Ausbreitung in der Fuge 55,5 cm, während quer zur Faser 18,4 cm gemessen werden. An der Oberfläche entlang der Fuge weist der Indikator eine Ausbreitung von 51,3 cm auf. Die Aufnahme stellt den Probekörper vor dem Abtupfen des an der Oberfläche verbleibenden Farbfilms dar. Innerhalb des schwarzen Kreises wird deutlich, dass es sich bei der schimmernd erscheinenden Lache um keine wässrige Flüssigkeit mehr handelt, sondern vielmehr um eine annähernd geleeartige Masse.

Nachdem die Schraubzwingen um die dreiteilige BSP – Platte gelöst worden sind, sind an verschiedenen Stellen seitlich an den Rändern der Plattenteile verteilt grüne Flecken zu beobachten, wie Abbildung 4-19 zeigt. Ein erneutes Wiegen nach der Versuchsdurchführung ergibt für die beiden schmäleren 25 cm – Streifen 9,1488 kg und 9,1751 kg. Das Gewicht des mittig liegenden, breiteren Stücks beträgt nach dem Versuch 18,1691 kg. Insgesamt entspricht das einer absoluten Massenzunahme von 35,7 g.

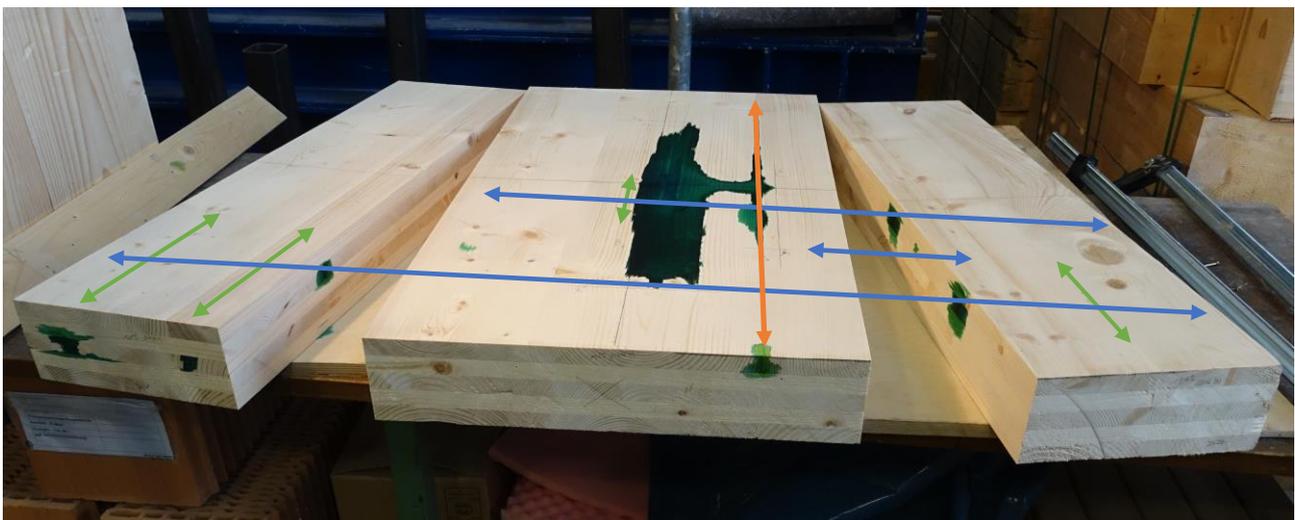


Abbildung 4-19: Die dreiteilige BSP - Platte nach dem Tropfversuch II mit Darlegung des Transportweges des grünen Farbstoffes (orange: Fuge in der ersten Lage; blau: Fugen/Riss in der zweiten Lage; grün: Fugen/Riss/Hohlraum in der dritten Lage)

Zusätzlich erläutert die Abbildung den zurückgelegten Weg der mit dem grünen Farbstoff versehene Feuchte, welcher mittels farbiger Pfeile veranschaulicht wird und nach dem Zerschneiden der einzelnen Plattenteile in kleinere Stücke ersichtlich wird. Die Farbe gelangt durch den Spalt zwischen den obersten Lamellen (oranjer Pfeil) in die 2. Lage der BSP – Platte. In den Kreuzungspunkten zwischen zwei Fugen bzw. zwischen einer Fuge und einem Riss innerhalb einer Lamelle breitet sich die eingefärbte Feuchte jeweils immer eine Schicht tiefer aus. In Abbildung 4-19 entspricht das den Schnittpunkten der eingefügten Pfeile. In der 2. Lage zieht die Feuchte rechtwinklig zur obersten Lage an drei Stellen durch die Holzplatte (blaue Pfeile). Die zwei langen blauen Pfeile stellen jeweils die Ausbreitung in einer nicht schmalseitenverklebten Fuge dar, entlang des kurzen Pfeils dazwischen befindet sich ein Riss, in den der grüne Farbstoff ebenfalls eingedrungen ist. Weiter sind zusätzlich auch vier kürzere Stellen in der 3. Brettlage zu beobachten, in denen sich der Indikator ausgebreitet hat (hellgrüne Pfeile). Die mit Hilfe des zweiten von links und des rechten grünen Pfeils dargestellten Ausbreitungswege verlaufen dabei entlang einer Fuge zwischen zwei Lamellen. Der ganz links liegende Pfeil entspricht einem über die ganze Höhe der Lamelle gehenden, grün eingefärbten Riss. Der vierte grüne Pfeil in der 3. Brettlage wird rein zufällig beim Zerteilen der Prüfplatte entdeckt. Dabei handelt es sich um einen Hohlraum am unteren Ende der 2. Lage, welcher in Abbildung 4-20 (links) mit einem schwarzen Ellipse gekennzeichnet ist. Vorerst scheint es sogar, als hätte die unter dem Hohlraum liegende Lamelle die Beize über die ganze Höhe aufgesogen und zudem teilweise die 4. Brettlage darunter quer zur Faser grün miteingefärbt. Die Gegenseite dieses Schnittbildes zeigt ebenso eine grün gesprenkelte Hirnholzseite. Ein weiterer, 1 cm breiter Kappschnitt quer zum Hohlraum einige Tage nach dem Versuchsende legt dar, dass in der 3. Brettlage im Bereich nahe des Hohlraums außer an dessen Oberfläche keine weitere grüne Einfärbung vorhanden ist. Diese ist nur im kurz nach Versuchsende erhaltenen Schnittbild zu beobachten.

Weiterhin ist erwähnenswert, dass sich die grün eingefärbte Feuchtigkeit neben den unverklebten Fugen auffallend flächig zwischen den zusammengespannten Teilen der Holzplatte bzw. zwischen dem Plattenrand und der Einfassung ausbreitet (vgl. Abbildung 4-19).

Außerdem ist, wie in Abbildung 4-20 zu sehen, entgegen den Exkursionsergebnissen und ähnlich dem Ergebnis des Tintenversuchs quer zur Faser wiederum keine Eindringtiefe zu beobachten. Die durchschnittliche Eindringtiefe an der Oberfläche beträgt bei Verwendung der grünen Pulverbeize lediglich einige wenige zehntel Millimeter.

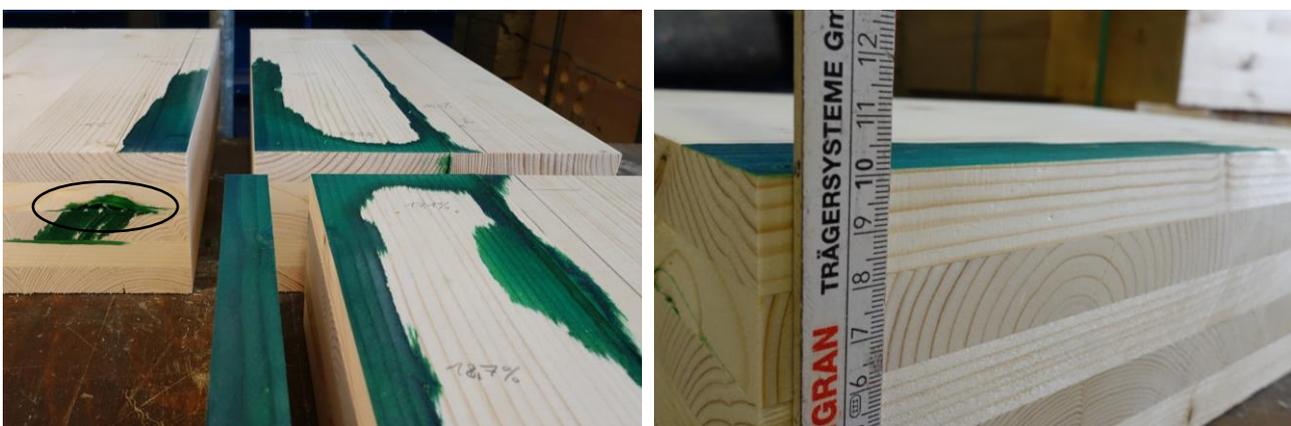


Abbildung 4-20: Zerteilter Probekörper nach Versuchsende (Tropfversuch II)

Ergänzend werden erneut zur groben Abschätzung einige Holzfeuchtemessungen durchgeführt. Wie im ersten Tropfversuch werden die Dorne hierfür in etwa 1,5 cm tief eingestochen. Verglichen mit der durchschnittlichen Anfangsfeuchte von 12,0 % werden bis auf eine Ausnahme sowohl an der oberen als auch an der unteren Seite über die ganze Platte verteilt nur erhöhte Holzfeuchten gemessen. So weisen auch nicht eingefärbte Stellen, die sich nahe eines eingefärbten Bereichs befinden, wie etwa in Lamellen oberhalb von nachweislich von der Feuchte betroffenen Fugen, Messwerte von 13,8 % bis 16,4 % auf. Abbildung 4-21 zeigt beispielhaft einige der ermittelten Holzfeuchtemesswerte.

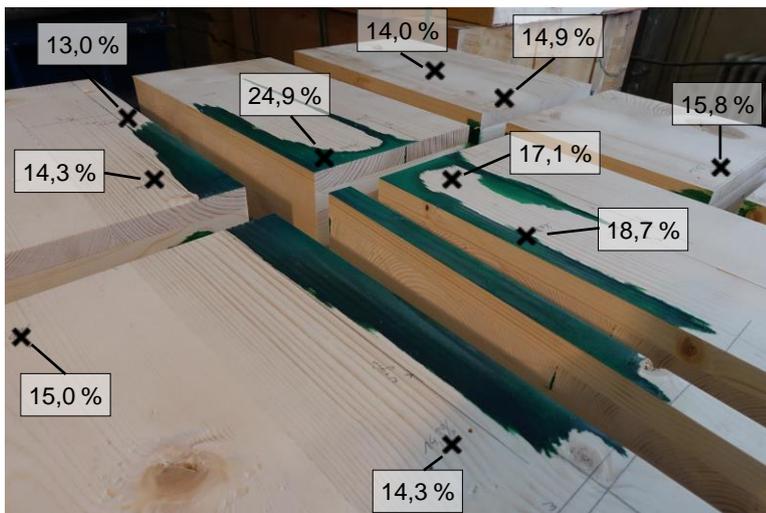


Abbildung 4-21: Beispielhafte Holzfeuchtemesswerte

Eine merkliche Volumenzunahme infolge der Feuchteaufnahme ist mit Ausnahme um den Bereich entlang der Fuge in der 1. Lamellenlage nirgends festzustellen. Die begrenzenden Ränder der Fuge sind im Bereich der grünen Färbung im Vergleich zu Plattenmitte um weniger als 1 mm erhöht.

Neben den Versuchsergebnissen bleibt zuletzt zu erwähnen, dass die Infusionspumpe im 24 – stündigen Versuchszeitraum vier Mal einen Luft – bzw. Tropfalarm abgesetzt hat. Als Folge dessen und der Behebung der Alarme wird die Betropfung der Holzplatte im zweiten Tropfversuch für insgesamt 40 Minuten ausgesetzt.

## 5 Diskussion der Versuchsergebnisse im Vergleich mit den Resultaten der rechnerbasierten Simulationen

Eine Validierung der numerischen Simulationsergebnisse ist mit den erhaltenen Resultaten aus den praktischen Versuchsdurchführungen nur bedingt gelungen. Es wird deutlich, dass ein Vergleich der Holzfeuchteverläufe der rechnerbasierten Simulationen mit dem in den Tropfversuchen beobachteten Ausbreitverhalten der Farbstoffe in Holz nur in Ansätzen durchgeführt werden kann. Dies liegt zum einen am stark ausgeprägten Ausbreitverhalten in den Fugen des Brettsperrholzes, zum anderen am nicht Eindringen der Farbstoffe ins Innere der Probekörper. Die beobachteten Resultate der beiden Tropfversuche untereinander weisen im Allgemeinen vergleichbare Kernaussagen auf. Die ersichtlichen Eindringtiefen der Farbstoffe werden dabei kritisch hinterfragt und diskutiert. Eine finale Aussage bezüglich der Gültigkeit der tatsächlichen Eindringtiefe kann nicht getroffen werden.

In den numerischen Simulationen wird die Annahme getroffen, die Feuchte würde schlagartig nach dem Auftreffen aufgenommen werden. In den beiden Tropfversuchen wird hingegen beobachtet, dass die vom Farbstoff – Wasser – Gemisch beeinflusste Fläche in zwei Bereiche zu unterteilen ist: Zum einen ist in beiden Tropfversuchen über den kompletten Versuchszeitraum hinweg eine Lache auf der Oberfläche der BSP – Platte zu sehen und zum anderen wird dieser wässrige Bereich größtenteils von einer eingefärbten Oberflächenschicht umrahmt. Insbesondere in Faserrichtung eilt der eingefärbte Bereich der Lache voraus. Im ersten Tropfversuch mit der Tinte ist dieses Verhalten über die ganzen 24 Stunden zu verzeichnen. Im zweiten Tropfversuch holt die wässrige Lache der Pulverbeize die grün eingefärbte oberflächennahe Schicht nach circa 4 Stunden nahezu ein und der eingefärbte Bereich macht unter Vernachlässigung der Betrachtung der Fuge nur noch einen kleinen Anteil im Vergleich zur Gesamtfläche aus. Quer zur Faserrichtung ist dieses Phänomen der voraus-eilenden farbigen Oberflächenschicht nicht durchgängig um die Lache herum zu beobachten bzw. weniger deutlich ausgeprägt als in Faserrichtung. Im Allgemeinen breiten sich die Lache und der eingefärbte Bereich nicht symmetrisch auf der Platte aus, sondern dehnen sich, was vermutlich Unebenheiten und Inhomogenitäten geschuldet ist, trotz ebener Ausrichtung teilweise ohne erkennbare Systematik aus (vgl. Anhang 10.2). Im ersten Tropfversuch kann bis zum Zeitpunkt des Erreichens der Fuge die Ausbreitung des Farbstoffs als in etwa elliptisch beschrieben werden.

Weiterhin wird in der Simulation die Annahme getroffen, die Ausbreitung der Wasserfläche verhält sich kreisförmig. In der Praxis ist jedoch eine starke Ausprägung in Faserrichtung ersichtlich. Das Verhältnis zwischen der an der Oberfläche erkennbaren longitudinalen Ausbreitung zur farbigen Ausbreitung quer zur Faser schwankt beim 24 – stündigen Versuch mit der Tinte bis zum Eintritt in die Fuge nach 13,5 Stunden circa von 2,3 bis 3,1 zu 1. Im Tropfversuch II weist das Verhältnis bis zu diesem Zeitpunkt Werte zwischen 4,5 und 7,8 zu 1 auf. Die zugehörigen Ausbreitmaße sind in Anhang 10.2 zu finden. Der theoretische Durchmesser des gesättigten Kreises in den FEM – Berechnungen beträgt 51,2 cm. In den praktischen Versuchen sind weit kleinere von der Feuchte beeinflusste Flächen festzustellen, da sich zwar die Ausbreitung in Faserrichtung in beiden Fällen ebenfalls auf etwa 50 cm erstreckt, quer zur Faser allerdings lediglich auf 18,3 cm bzw. 18,4 cm. Dabei entsprechen die gemessenen Ausbreitmaße der Tropfversuche bereits dem eingefärbten, nicht direkt vom flüssigen Farbstoff berührten Bereich, während sich die Ausbreitmaße der

Simulationen auf den Bereich der Wasserlache beziehen. Zusätzlich ist vor allem zu Beginn der praktischen Versuchsdurchführungen zu beobachten, dass die Ausbreitung nicht gleichförmig über die Oberfläche, sondern bevorzugt in den Zellen des Frühholzes stattfindet.

Diese Beobachtungen widersprechen zu großen Teilen den in den Simulationen verwendeten Annahmen. Unabhängig vom Verhalten um die Fugen zwischen den Lamellen verhält sich das Ausbreitmuster der Flüssigkeiten nicht kreisförmig, sondern mit deutlicher longitudinaler Ausprägung. Die Faserrichtung bzw. die Jahrringe und die damit einhergehende Unterteilung in Früh – und Spätholz gibt den Indikatoren eine Ausbreitungsrichtung vor. Die Spätholzzellen sowie auch die Markröhre im Tropfversuch I stellen scheinbare Sperrschichten dar, die von der Flüssigkeit nur schwer oder überhaupt nicht überwunden werden können. Die weniger dichten Frühholzzellen hingegen leiten die Wassermoleküle an der Oberfläche schneller weiter. Diese Beobachtung deckt sich mit denen von Schönburg (2009) und Weber (2022). Beim Feuchteinzug in das Hirnholz ist demgegenüber ein konträres Verhalten zu erkennen. Hierbei dringt die Feuchte im Spätholz weiter in die Holzprobe ein als im Frühholz, wie der hirnholzseitige Kappschnitt der äußersten Lamelle im ersten Tropfversuch zeigt (vgl. Abbildung 4-8). Das entspricht auch den Ausführungen in Kapitel 2.2.3, wonach der Wassertransport in den Spätholzzellen aufgrund der kleineren Lumen – Durchmesser und weniger Tüpfelverklebungen schneller voranschreiten soll als in den Zellen des Frühholzes (Siau, 1984; Spear et al., 2018; Zillig, 2009). Weiterhin beeinflussen vorhandene Inhomogenitäten, wie zum Beispiel Äste, den Verlauf der oberflächlichen Farbstoffausbreitung, aber auch den der flüssigen Lache. Die Äste scheinen einen äußerst hohen Widerstand für den Weitertransport der Feuchte aufzuweisen, sodass die Farbe bzw. die Lache diese jeweils erst umgehen, bevor die Oberfläche dort farbig erscheint. Im Versuch mit dem Tinte – Wasser – Gemisch ist beispielsweise oberhalb eines Astes auch nach 24 Stunden noch keine Pfütze vorzufinden, jedoch umrundet die Lache den Ast nahezu (vgl. Abbildung 4-5). Allerdings ist es hier auch möglich, dass potenzielle Unebenheiten an der obersten Lamelle den Verlauf der Lache lenken. Ebenso kann durch das vorherige Abschleifen der Probekörper nicht gewährleistet werden, dass die BSP – Platten jeweils eine absolut ebene Oberfläche aufweisen. Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass die strukturellen, makroskopischen Eigenschaften des anisotropen Holzes einen prägenden Einfluss auf das oberflächen-nahe Feuchteausbreitverhalten haben. An dieser Stelle kann argumentiert werden, dass dies eine Vorhersage der Entwicklung einer ebensolchen wässrigen Lache und der Ausbreitung der oberflächlichen Feuchte generell unmöglich macht, da jedes natürliche Holzbauteil andere strukturelle Merkmale aufweisen wird. Daher müsste eine größer angelegte Versuchsreihe für weitere Rückschlüsse auf mögliche Zusammenhänge zwischen der Feuchteausbreitung und strukturellen Holzmerkmalen unternommen werden. Sobald ein Ausbreitungsmuster von Wasser auf der Oberfläche zu erkennen ist, kann dementsprechend im Anschluss die Simulation mit einer angepassten Berechnung des gesättigten Oberflächenbereichs, in dem vorzugsweise konkret zwischen dem eingefärbten Bereich an der Oberfläche und dem Bereich der Wasserlache unterschieden wird, angepasst werden. Bezüglich der Flächenberechnung des feuchteeinwirkenden Bereichs, die für die in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen entwickelt worden ist, lässt sich zusammenfassen, dass diese nur geringfügig der Praxis entspricht. Sowohl die Annahme der kreisförmigen Ausbreitung als auch des sofortigen Aufsaugens ist nicht korrekt. Darüber hinaus kann hinsichtlich der Materialkennwerte des Holzes vermutet werden, dass durch das Auftreten von oberflächlich eingefärbten Bereichen ohne

darüber liegender Wasserlache der Oberflächenemissionskoeffizient relevanter zu sein scheint als ursprünglich durch die Simulationsergebnisse angenommen. Voraussichtlich tritt an den Stellen, an denen die oberflächennahe Schicht eine der Ausgleichsfeuchte erhöhte Holzfeuchte aufweist, ein Feuchtestrom an die Umgebung auf. Hierfür spricht zudem, dass nach dem Auftropfen von 144,0 g die Massenzunahme nach Versuchsende lediglich 35,7 g beträgt.

In Bezug auf die transversale Eindringtiefe variieren die Simulationsergebnisse in Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten von 3 cm bis über die komplette Plattendicke von 20 cm. Eine Validierung der Simulationen mittels der praktischen Versuche und eine damit einhergehende entsprechende Einordnung des Diffusionskoeffizienten in einen realistischen Wertebereich, der in den Tropfversuchen vorliegen könnte, ist an dieser Stelle nur vage möglich, da nach dem Zerteilen der Probekörper quer zur Faser keine Eindringtiefen der Indikatoren festzustellen sind und die Aussagekraft der Farbstoffausbreitung kritisch hinterfragt werden muss. Die zerschnittenen Holzplatten weisen den aufgetropften Farbstoff nur oberflächlich auf. Mit Ausnahme der Bereiche um die nicht schmalseitenverklebten Fugen dringen die Tinte und die Beize nicht in das Innere des Prüfkörpers ein. Während die Tinte nach Versuchsende nur in der Fuge zwischen den Lamellen der 1. Brettlage vorzufinden ist, durchdringt die Beize die unverklebten Fugen teilweise bis zur 3. Lage und erreicht an unterschiedlichen Stellen alle vier Randseiten der Platte. Demgegenüber ist zu beobachten, dass der Farbstoff hirnholzseitig im Gegensatz zur transversalen Richtung durchaus einzieht. Bei der Tintenlösung beträgt der Einzug nach circa 9 Stunden (von Stunde 16 bis Stunde 24) in das Hirnholz in etwa 2 cm, wie durch den Kappschnitt des Tintenprobekörpers (vgl. Abbildung 4-8) gezeigt wird. In den Fugen selbst stellt sich eine äußerst zügige Feuchteausbreitung ein, welche hinsichtlich der Feuchteausbreitung und resultierender Schadensbilder vermutlich von größerer baupraktischer Bedeutung ist als die Ausbreitung innerhalb der Holzstruktur selbst, zudem sich der Farbstoff der Beize auch über sich kreuzende Fugen bis zu einer Tiefe von 6 cm ausbreitet. Entlang einer Fuge hat sich auf diese Weise die grüne Flüssigkeit innerhalb von nur 90 Minuten über etwa einen halben Meter ausgedehnt. Das lässt darauf schließen, dass die kapillare Ausbreitung im Vergleich zur Ausbreitung innerhalb der Holzstruktur selbst um ein Vielfaches schneller verläuft.

Die den Versuchsdurchführungen entnommenen Erkenntnisse in Hinsicht auf die Eindringtiefe sollten kritisch hinterfragt werden. Wie in Kapitel 4.1.3 bereits erwähnt, könnte eine Trennung der Farbpigmente und der Wassermoleküle stattgefunden haben. Dafür, dass die Feuchte tiefer eindringt als der Farbstoff, sprechen verschiedene Argumente. Beispielsweise weisen die gemessenen Holzfeuchtwerte in 1,5 cm Tiefe nahezu alle einen gegenüber der Anfangsfeuchte erhöhten Wert auf. Auch wenn die ermittelten Holzfeuchtwerte womöglich nicht den tatsächlich vorliegenden Holzfeuchtwerten entsprechen, kann deren Messung als grober Anhaltspunkt betrachtet werden. Sowohl unterhalb der während des Versuchs lokalisierbaren Lache als auch jeweils einige Zentimeter um den eingefärbten Bereich herum werden höhere Holzfeuchten ermittelt als zu Beginn der Versuchsdurchführung. Der Maximalwert im ersten Tropfversuch I liegt bei 25,0 %, der im Tropfversuch II bei 24,9 %. Beide Werte sind jeweils in 1,5 cm Tiefe ungefähr im Mittelpunkt der Platte nahe der Stelle zu finden, an der die Tropfen aufgekommen sind. Weiterhin spricht für die unter anderem auch von Weber (2022) vermutete These der Trennung von Tinte und Wasser, dass die Blaufärbung um die Lache herum im Laufe der Versuchsdurchführung kontinuierlich dunkler wird und dass sich am Ende der 24 Stunden der Rand der farbigen Einfärbung zusätzlich in einem dunkleren blau absetzt.

Analog ist im Tropfversuch mit der Beize zu nennen, dass am Ende der Versuchsdurchführung anstelle einer Lache lediglich noch eine geleeartige Masse ohne wässrige Eigenschaften an der Oberfläche der Platte zu erkennen ist. Das könnte bedeuten, dass sich die farbigen Pigmente der Beize abgesetzt haben und sich die Wassermoleküle ohne dem Farbstoff weiter ausgebreitet haben. Ein weiterer Erklärungsansatz des am Ende vorhandenen geleeartigen Farbfilms ist eine auftretende Verdunstung der Feuchte an die Umgebung. In Bezug auf die Ursache einer möglichen Trennung der Tinte vom Wasser vermutet Weber (2022) eine Wechselwirkung zwischen den chemischen Bestandteilen des Holzes und des Methylblaus der Tinte. Die Molekülgröße und ein damit einhergehendes Ausfiltern der Farbstoffpartikel können als Ursache der Trennung schätzungsweise ausgeschlossen werden. Ein Tüpfel weist in der Regel einen Durchmesser von 0,1 bis 0,7  $\mu\text{m}$  auf, während das Farbstoffmolekül des Methylblaus lediglich Größen im Nanometer – Bereich aufweist (Niemz & Sonderegger, 2021; Weber, 2022). Ob sich die Farbstoffe tatsächlich von den Wassermolekülen trennen, kann an dieser Stelle allerdings weder bestätigt noch dementiert werden. Demgegenüber sprechen einige Indizien gegen eine höhere als nur der oberflächlich beobachteten Eindringtiefe der Feuchte. Die Holzfeuchtemessungen mit dem elektronischen Widerstandsmessgerät sind lediglich Anhaltspunkte einer existierenden Holzfeuchte. Es kann nicht mit Sicherheit bestätigt werden, dass die Holzfeuchten zwischen den Dornen in 1,5 cm Tiefe vorliegen. Ebenso könnte die Wegstrecke über den feuchteren, oberflächennahen Bereich gemessen werden. Als weiteres Argument gegen ein tieferes Einziehen der Feuchte kann eine ausbleibende Quellung genannt werden. Lediglich im Bereich entlang der eingefärbten Fugen der obersten Lamellenlage ist eine geringe feuchtebedingte Volumenzunahme zu beobachten. Eine Ausnahme stellt hingegen die Quellung von 2,5 mm im Bereich der blau eingefärbten Fuge am hirnholzseitigen Plattenrand an der mit der Tinte beaufschlagten Holzplatte dar (siehe Abbildung 4-8). In der Plattenmitte ist an dieser Fuge jedoch kaum mehr eine Volumenzunahme ersichtlich ( $< 0,5 \text{ mm}$ ).

Allerdings stellt sich die Frage, ob sich selbst bei einer höheren Eindringtiefe, beispielsweise über die komplette Lamelle hinweg, überhaupt eine Quellung bemerkbar machen würde. Der mittlere Rechenwert für das Quellmaß quer zur Faser von Vollholz liegt bei 0,25 % pro % Holzfeuchteänderung (Albert et al., 2018). Selbst bei einer maximal möglichen Volumenzunahme von zu Beginn  $u = 12 \%$  bis zur Fasersättigung von 29 % über die 20 mm dicke Lamelle entspricht das lediglich  $20 \text{ mm} \cdot 0,0025 \cdot 17 = 0,85 \text{ mm}$ . Allerdings steht dies im Widerspruch zu den ermittelten 2,5 mm am Plattenrand. Der Grund hierfür kann nicht abschließend geklärt werden. Die Überlegung, die den Wassermolekülen gegenüber größeren Farbstoffpartikel verursachen ein erhöhte Volumenzunahme kann insofern ausgeschlossen werden, da sich das Volumen nach der Rücktrocknung wieder im Ursprungszustand zu vor dem Tropfversuch befindet. Inwieweit die Verklebung diffusionsoffen ist und die weiteren Lamellenlagen dadurch Einfluss auf die Quellung haben, ist in der bisherigen Forschung umstritten. Hier gehen je nach Forschungsarbeit die Meinungen von 1/50 bis 1/500 der Durchlässigkeit des Vollholzes bis zur vollständigen Dampfundurchlässigkeit aus (Afshari & Malek, 2022). Man kann weiterhin davon ausgehen, dass im Allgemeinen kein aussagekräftiger Zusammenhang zwischen Quellung und Eindringtiefe zu ermitteln ist, da die Wassermenge innerhalb der 24 Stunden für eine vollständige Holzfeuchtezunahme von der Ausgleichsfeuchte bis zur Fasersättigung von 29 % schlicht nicht ausreicht, wie durch nachfolgende Erläuterungen zusätzlich ersichtlich wird.

Der ursprüngliche Gedanke der Massenwägung im zweiten Tropfversuch war es, die Eindringtiefe ähnlich den Simulationsergebnissen analytisch zu berechnen, sofern die Beize erneut nicht in das Innere der BSP – Platte eindringen sollte, und so den transversalen Feuchteeintrag abzuschätzen. Aufgrund des erhaltenen Resultates mit der starken Ausbreitung in den Fugen, ist diese Vorgehensweise nicht möglich. Trotz dessen wird im Folgenden versucht, diesen Sachverhalt mathematisch anzugehen, indem mit Hilfe des Wasseraufnahmekoeffizienten die aufgenommene Feuchtemenge unterhalb der Wasserlache und die damit von der Feuchte beeinflusste Tiefe abgeschätzt wird. Anhand Gleichung (3-1) wird angenommen, dass innerhalb von 24 Stunden in etwa 0,07 g/cm<sup>2</sup> Feuchte aufgenommen werden können. Das kommt in etwa dem knapp 1,5 – fachen des erdachten 50 mg Tropfen pro cm<sup>2</sup> gleich. Geht man von einem mittleren Holzfeuchtegehalt von 106 %, was dem Mittelwert von  $u_{eq} = 12 \%$  und  $u_{max} = 200 \%$  entspricht, einer darrtrockenen Dichte von  $u_0 = 411 \text{ kg/m}^3$  sowie einer Dichte der Gleichgewichtsfeuchte von  $u_{12} = 460 \text{ kg/m}^3$  (vgl. Kapitel 2.3.5) aus, erhält man mit Hilfe der abgeleiteten Gleichung (2-1) eine erhöhte Holzfeuchte bis in 1,8 mm Tiefe, wie durch Gleichung (5-1) berechnet wird.

$$106 \% = \frac{\text{Schichtdicke} \cdot \left(0,460 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right] - 0,411 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right]\right) + 0,07[\text{g}]}{\text{Schichtdicke} \cdot 0,411 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right]} \quad (5-1)$$

Geht man von einer durchschnittlichen Holzfeuchte über die Eindringtiefe von nur 29 % aus, wodurch eine mögliche Volumenzunahme maximal werden würde, beträgt die von den aufgetroffenen Tropfen beeinflusste Schichtdicke nach Gleichung (5-1) etwa 1 cm. Dadurch wird unter Berücksichtigung der vorhergehenden Ausführungen deutlich, dass selbst im Fall der Vernachlässigung der Verdunstung eine sichtbare Volumenzunahme auch bei tieferem Eindringen äußerst unwahrscheinlich ist. Die Quellung würde in diesem Fall  $10 \text{ mm} \cdot 0,0025 \cdot 17 = 0,425 \text{ mm}$  betragen.

Die Gesamtmasse der beaufschlagten Tropfen in den 24 – stündigen Tropfversuchen entspricht 144,0 g. Tatsächlich wurde allerdings im zweiten Tropfversuch nur eine Massenzunahme von 35,7 g festgestellt. Mit der zusätzlichen Information, dass nach Ende der 24 Stunden kaum noch eine abzutropfende Wassermasse an der Oberfläche vorhanden war, lässt das darauf schließen, dass ein deutliches Volumen verdunstet sein muss. Überschlägt man nun die vermutliche Eindringtiefe unter Berücksichtigung des prozentualen Anteils mit 35,7 g/144,0 g bezüglich der aufgetropften Menge von 0,07 g/cm<sup>2</sup>, erhält man mittels Gleichung (5-1) und einem mittleren Holzfeuchtegehalt von 106 % lediglich eine Eindringtiefe von 0,4 mm. Das entspricht nahezu keinem Eindringen in das Innere der Prüfkörper und die beobachtete könnten wiederum doch der tatsächlichen Eindringtiefe gleichkommen. Eine finale Einschätzung über die Gültigkeit der sichtbar eingefärbten Eindringtiefe kann letzten Endes aber nicht abgegeben werden.

Vergleicht man in diesem Zusammenhang die Tropfversuche mit den Simulationsergebnissen, scheinen die Resultate bei Verwendung der minimalen Diffusionskoeffizienten am realistischsten zu sein. Die Ergebnisse mit den maximalen Diffusionskoeffizienten scheinen aufgrund der Eindringtiefe unrealistisch, da sogar in den Simulationsergebnissen der maximalen Diffusionskoeffizienten und maximalen Oberflächenemissionskoeffizienten die Eindringtiefe nach 24 Stunden 13 cm betragen würde. Auch bei den rechnergestützten Ergebnissen mit den mittleren Diffusionskoeffizienten weist die Eindringtiefe nach einem Tag in etwa 3 – 4 cm auf, was in Folge der ausgeführten Erläuterungen

unwahrscheinlich hoch erscheint. Aufgrund des Ausbreitens des Farbstoffes in der Fuge und der womöglich nicht bekannten Eindringtiefe ist eine Evaluierung bezüglich der Diffusionskoeffizienten in Bezug auf die Simulationen abschließend nicht möglich. Um eine der Realität näherkommende Simulation zu modellieren, müsste weiterhin die tatsächliche Eindringtiefe bekannt sein, um für das Modell geeignete Diffusionskoeffizienten bestimmen und einpflegen zu können. Aufgrund der möglichen Relevanz der Verdunstung an die Umgebung, wie sie aus Tropfversuch II abgeleitet wurde, sollte diese ebenso genauer untersucht und ein entsprechender Proportionalitätsfaktor der Oberflächenemission über den kompletten Holzfeuchtbereich hinweg ermittelt werden.

Es lässt sich also verzeichnen, dass einige maßgebende abweichende Beobachtungen zwischen den Simulationen und den praktischen Versuchen bemerkbar sind. Die Gründe dafür liegen einerseits in den unausgereiften Simulationen als auch andererseits an den materiellen Abweichungen der Tropfversuche im Gegensatz zu den numerischen Berechnungen. Die Limitationen bzw. Stärken der Simulationen werden bereits in Kapitel 3.3 ausführlich diskutiert. Dabei wird unter anderem auf die unzureichend exakte Modellierung des Werkstoffs Holz, auf die durch den begrenzt vorhandenen Festplattenspeicher bedingte grobe Netzfeinheit des Modells sowie auf die nur bedingt für die Berechnung gültigen Kennwerte eingegangen. Bezüglich der Tropfversuche war es nicht möglich, eine Holzplatte ähnlich dem modellierten Körper zu nutzen, da eine Vollholzplatte mit diesen Dimensionen nicht existiert. Durch die Wahl von nicht schmalseitenverklebten BSP – Platten waren für die flüssigen Indikatoren Fugen vorhanden, die die Feuchteausbreitung und damit den Verlauf der Tropfversuche stark beeinflusst haben. Außerdem muss beachtet werden, dass ein mit Tinte oder Pulverbeize vermengtes Wasser unter Umständen abweichende Eigenschaften gegenüber reinem Wasser aufweisen kann. Weiterhin wird durch das Zerteilen der Prüfkörper nach Versuchsende ein weiterer Eingriff in den Versuchsaufbau vorgenommen. So kann durch das Zerteilen mit der Kreissäge durch die noch feuchte, farbige Oberfläche das zu beobachtende Ergebnis verfälscht werden. Auf diese Weise könnten die Widersprüche der Ergebnisse aus dem Tropfversuch II und der des Farbfindungsversuchs mit der Beize erklärt werden. Das rotierende Sägeblatt verwischt möglicherweise die Farben während des Schnittes, wodurch die Eindringtiefen der im Exkurs dargestellten Proben tiefer erscheinen, als sie tatsächlich sind. Dieser Effekt hat vermutlich auch in Bezug auf den Hohlraum im zweiten Tropfversuch gewirkt, als zunächst auch die dritte und im Ansatz sogar vierte Brettlage von der Farbe beeinflusst zu sein schien. Ein einige Wochen nach dem Farbfindungsversuch (vgl. Kapitel 4.2) durchgeführter Schnitt durch den Probekörper der Beize widerspricht allerdings dieser Vermutung in Zusammenhang mit der oberflächlichen Eindringtiefe. Auch im Schnittbild der später durchgeführten Probenteilung ist eine Eindringtiefe von in etwa 2 mm erkennbar. Der Grund für die verschiedenen Eindringtiefen des gleichen Indikators bei den beiden Versuchen bleibt unergründet. Des Weiteren muss erwähnt werden, dass die selbstgemischte Pulverbeize dem Infusionssystem Schwierigkeiten bereitet hat. Aufgrund von Fehlermeldungen der Infusionspumpe musste das Infusionsbesteck im Laufe des zweiten Tropfversuchs fünf Mal durchgespült werden, da die Beize die Tropfkammer verstopft hatte, sodass über einen Zeitraum von insgesamt 40 Minuten die Holzplatte nicht betropft wurde.

Allerdings sind der vorliegenden Arbeit auch durchaus einige Erkenntnisse zu entnehmen. So werden durch rechnergestützte FEM – Berechnungen die unterschiedlich weiten Feuchteausbreitungen verschiedener in der Literatur vorgefundenen Diffusionskoeffizienten in Kombination mit

unterschiedlichen Werten des Oberflächenemissionskoeffizienten ersichtlich. Durch die Ausarbeitung eines konkreten Modells wird das Schadensbild eines tropfenden Haustechnikanschlusses nach 14 Tagen nachgeahmt und deren Aussagekraft diskutiert. Mit Hilfe der durchgeführten Tropfversuche können die Simulationen zwar nur bedingt validiert werden, aber es stellt einen Annäherungsversuch an die in der Praxis vorliegenden Gegebenheiten dar. Insbesondere das im Vergleich zum Holzinneeren um ein Vielfaches schnellere, kapillare Ausbreiten entlang der Fugen erscheint ebenso wie das schnellere Einziehen der Feuchte in die Hirnholzseite von baupraktischer Relevanz, obwohl diese Erkenntnisse zu Beginn nicht das ursprüngliche Ziel der Arbeit waren. Außerdem wird durch die Simulationen und durch Wägungen der zweiten BSP – Platte gezeigt, dass die Oberflächenemission, entgegen den Ergebnissen der numerischen Simulationen, durchaus eine Rolle spielen könnte. Der Wert des tatsächlichen Diffusionskoeffizienten befindet sich vermutlich im Bereich der minimalen in den Simulationen genutzten Werte. Für eine in der Praxis verwendbare Vorhersage eines Schadensbildes streuen die Literaturwerte jedoch zu stark. Des Weiteren müsste bezüglich der Simulation die Flächengeometrie der Feuchteeinwirkung entsprechend einer stärker in Faserichtung verlaufenden Ausbreitung angepasst werden.

## 6 Fazit und Ausblick

Sowohl für die Forschung als auch für die Baupraxis können trotz der geringen Vergleichbarkeit von Simulationsergebnissen und Versuchsergebnissen durchaus relevante Rückschlüsse gezogen werden. Zu nennen ist hierbei die äußerst schnelle, kapillare Ausbreitung entlang der Fugen, wodurch innerhalb von 1,5 Stunden Strecken von einem halben Meter zurückgelegt werden. Dies führt in einem ähnlich dem Versuchsaufbau wirkenden Schadensfall beispielsweise in einer verbauten BSP – Decke eines Wohngebäudes vermutlich dazu, dass innerhalb weniger Tage große Teile der Geschossdecke von der Feuchte betroffen sind. Unabhängig von der tatsächlichen Eindringtiefe in das Holz selbst kann vermutet werden, dass die Lache früher oder später einen vorhandenen Spalt erreicht und sich anschließend primär entlang dieser Fugen über das Holzbauteil ausbreitet. Dementsprechend kann es sein, dass auch innerhalb eines nur kurzen Zeitraums über das rapide Ausbreiten entlang der Fugen eine große, nicht absehbare Dimension der BSP – Platte von Feuchte betroffen und sanierungsbedürftig wird. Des Weiteren ist auch die stetig anwachsende Wasserlache, welche infolge des nicht sofortigen Aufnehmens der Tropfen entsteht, von Bedeutung. Erreicht die wässrige Fläche eine Bauteilfugung, die unter anderem eine Hirnholzseite aufweist, wird unabhängig der Eindringtiefe der Wasserlache quer zur Faser hirnholzseitig Feuchtigkeit aufgenommen, die sich, wie im Tropfversuch mit der Tinte zu beobachten war, ins Innere des Bauteils ausbreitet. Bleibt der Schaden über längere Zeit unentdeckt, kann diese Feuchteaufnahme je nach Ausmaß weitreichende Sanierungen zur Folge haben. Zusätzlich wird durch die Existenz von freiem Wasser innerhalb eines Holzbauteils die Bildung von holzerstörenden Pilzen ermöglicht (Ammer, 1964). Auch in Bezug auf solche Schadensfälle würden Untersuchungen und zweckgemäße Simulationen einen konstruktiven Beitrag für Wissenschaft und Praxis leisten. Interessant wäre weiterhin, inwiefern sich die Feuchte an einer BSP – Platte mit schmalseitig verklebten Lamellen verhält. In den Tropfversuchen findet die Ausbreitung nur entlang der nicht verklebten Fugen statt. An solchen Beispielen erscheint das Wissen über den Feuchtetransport innerhalb der Holzstruktur und das Erstellen einer aussagekräftigen Simulation durchaus nützlich.

Es muss betont werden, dass es sich bei den rechnergestützten Simulationen und praktischen Untersuchungen um einen anfänglichen Feldversuch handelt, um das Ausbreitverhalten von Wasser und Feuchte auf und in Holz abzuschätzen. Da insbesondere die Diffusionskoeffizienten zu sehr streuen, um eine aussagekräftige Vorhersage treffen zu können, sollten vorerst praktische Versuche hinsichtlich geeigneter Transportkoeffizienten durchgeführt werden. Die in der vorliegenden Arbeit benutzte Vorgehensweise mit den Wasser – Farbstoff – Gemischen wird dabei allerdings nicht weiterempfohlen, da das Ergebnis bezüglich der Eindringtiefe und einer möglichen Trennung von Wasser und Farbpartikel nur begrenzt Aussagekraft hat. Sinnvoller wäre es, beispielsweise anstelle von normalem Wasser schweres Wasser ( $D_2O$ ) zu verwenden, welches beispielsweise im Anschluss an den Versuch mittels einer sogenannten infraroten Schwingungsspektroskopie am unzerteilten Probekörper lokalisiert werden kann (Thybring et al., 2018). Als weitere zu testende Methode, mit der der Feuchtegehalt im Anschluss eines Tropfversuchs zerstörungsfrei gemessen werden könnte, ist die Magnetresonanztomographie (Mori et al., 2019). Mit der bereits erwähnten Neutronenradiographie, wie sie unter anderem Sonderegger et al. (2010) zur Bestimmung von Diffusionskoeffizienten verwenden, kann eine weitere Möglichkeit der zerstörungsfreien Visualisierung des Wassergehaltes

als mögliche Messmethode getestet werden. Interessant wäre an dieser Stelle in Bezug auf weitere Versuchsdurchführungen zudem eine Variation der aufgetropften Menge pro Zeit. Darüber hinaus sollten weitere Informationen bezüglich des Feuchtetransportes an verklebten, aber auch unverklebten Fugen erlangt werden. Hierbei ist sowohl die Richtung entlang der Fuge als auch die Diffusion rechtwinklig zur Fuge von Interesse. Mit den daraus erhaltenen Informationen gilt es anschließend, geeignete Diffusions – und Oberflächenemissionskoeffizienten zu identifizieren. Weiterhin muss in einer weiterführenden Simulation die Form und die Fläche der Feuchteeinwirkung der Tropfenmenge entsprechend angepasst werden.

Neben der Optimierung der Versuchsdurchführung und der Visualisierung der Feuchteausbreitung in der Struktur des Holzes sollte also vorerst insbesondere ein Augenmerk auf die Erforschung von exakten Diffusions – und Oberflächenemissionskoeffizienten gelegt werden. Insbesondere für die Verdunstung braucht es aussagekräftige Materialkennwerte, die sowohl im hygroskopischen als auch im kapillaren Bereich Geltung besitzen. Die aktuellen in der Literatur vorzufindenden Transportkoeffizienten sind nicht ausreichend, um quantifizierbare Aussagen über den Feuchtetransport in Holz treffen zu können. Eine Validierung mit Hilfe einer praktischen Versuchsdurchführung ist nur im Ansatz gelungen. Bezüglich der Simulationsergebnisse kann abschließend beurteilt werden, dass akkurate Eingabeparameter bezüglich der Qualität des Modells von entscheidender Bedeutung sind, da die Ergebnisse der Simulationen teilweise enorm schwanken. Das finale Ziel sollte sein, mittels einer genauen Vorhersage des Ausbreitverhaltens von Wasser auf und innerhalb von Holzbauteilen ressourcenschonende und ökonomische Sanierungen ermöglichen zu können. Hierbei soll Grundlagenforschung wie in dieser Arbeit helfen, um ein umfassenderes Verständnis für das System Wasser – Holz zu entwickeln.

## 7 Literaturverzeichnis

- DIN EN 13183-1 (Juli 2002). *Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz: Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren, Deutsche Fassung EN 13183-1:2002.*
- DIN EN 13183-2 (Juli 2002). *Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz: Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstands-Messverfahren, Deutsche Fassung EN 13183-2:2002.*
- DIN EN 13183-3 (Juni 2005). *Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz: Teil 3: Schätzung durch kapazitives Messverfahren, Deutsche Fassung EN 13183-3:2002.*
- DIN 68364 (Mai 2003). *Kennwerte von Holzarten: Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten.*
- DIN EN 1991-1-1 (Dezember 2010). *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.*
- DIN EN 1991-1-1/NA (August 2013). *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten: Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.*
- DIN 1988-200 (Mai 2012). *Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen: Teil 200: Installation Typ A (geschlossenes System) – Planung, Bauteile, Apparate, Werkstoffe; Technische Regel des DVGW.*
- DIN EN ISO 12572 (Mai 2017). *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Verfahren mit einem Prüfgefäß (ISO 12572:2016); Deutsche Fassung EN ISO 12572:2016 (D).*
- DIN EN ISO 15148 (Dezember 2018). *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten: Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizient bei teilweisem Eintauchen (ISO 15148:2002 + Amd 1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 15148:2002 + A1:2016.*
- Aas, G. (2017, September). Die Fichte (Picea Abies): Verwandtschaft, Morphologie und Ökologie. *LWF-Wissen (80)*, 13–19. <https://www.lwf.bayern.de/service/publikationen/012446/index.php>
- Afshari, Z. & Malek, S. (2022). Moisture transport in laminated wood and bamboo composites bonded with thin adhesive layers – A numerical study. *Construction and Building Materials*, 340, 127597. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127597>
- Albert, A., Schneider, K.-J. & Goris, A. (Hrsg.). (2018). *Bautabellen für Ingenieure: Mit Berechnungshinweisen und Beispielen* (23. Auflage). Bundesanzeiger Verlag.

- Amaro, N., Ouzidan, F., Atmani, R., Moubarak, F., El Kouali, M, Talbi, M. & El Brouzi, A. (2020). Modeling of absorption process of the water by the wood in two-dimensions. *Mediterranean Journal of Chemistry*, 9(6), 478–484. <https://doi.org/10.13171/mjc9602001181125na>
- Ammer, U. (1964). Über den Zusammenhang zwischen Holzfeuchtigkeit und Holzzerstörung durch Pilze. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 22(2), 47 - 51.
- Angst, V. & Malo, K. A. (2010). Moisture induced stresses perpendicular to the grain in glulam: Review and evaluation of the relative importance of models and parameters. *Holzforschung*, 64(5), 609 - 617. <https://doi.org/10.1515/HF.2010.089>
- Ansys, Inc. (2021). *Ansys Workbench 2021 R2* (Version 21.2.0) [Computer software].
- Avramidis, S. (2018). Bound water migration in wood. *Advances in the drying of wood, COST E15*.
- 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>
- Baehr, H. D. & Stephan, K. (2016). *Wärme- und Stoffübertragung* (9. Aufl.). *Lehrbuch*. Springer Vieweg.
- Böhner, G. (1976). Zur Wasserdampf- und Luftdurchlässigkeit verschiedener unbehandelte und thermisch behandelte Hölzer. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 34(8), 295–307. <https://doi.org/10.1007/BF02610959>
- Brunauer, S., Emmett, P. H. & Teller, E. (1938). Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society*, 60(2), 309–319. <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>
- Chen, Y., Choong, E. T. & Wetzel, D. M. (1995). Evaluation of Diffusion Coefficient and Surface Emission Coefficient by an Optimization Technique. *Wood and Fiber Science*, 27(2), 178–182. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/281>
- Chen, Y., Choong, E. T. & Wetzel, D. M. (1996). A numerical analysis technique to evaluate the moisture-dependent diffusion coefficient on moisture movement during drying. *Wood and Fiber Science*, 28(3), 338-345.
- Choong, E. T. & Skaar, C. (1972). Diffusivity and Surface Emissivity in Wood Drying. *Wood and Fiber Science*, 4(2), 80–86.
- Čiegis, R. & Starikovičius, V. (2002). Mathematical Modeling Of Wood Drying Process. *Mathematical Modelling and Analysis*, 7(2), 177–190. <https://doi.org/10.3846/13926292.2002.9637190>
- Clou-Shop. (2022). *Wasserbeize in Pulver - Beutel: Farbe: 157 hellgrün*. <https://www.clou-shop.eu/holzbeizen/pulverbeizen/pulverbeize.html> (zuletzt geprüft am 24.06.2022)

- Cloutier, A. & Fortin, Y. (1993). A model of moisture movement in wood based on water potential and the determination of the effective water conductivity. *Wood Science and Technology*, 27(2), 95 – 114. <https://doi.org/10.1007/BF00206228>
- Comstock, G. L. (1970). Directional permeability of softwoods. *Wood Fiber*(4), 283-289.
- Crank, J. (1976). *The mathematics of diffusion* (2. ed., reprint). Clarendon Press.
- Cunningham, M. J., Keey, R. B. & Kerdelmelidis, C. (1989). Isothermal Moisture Transfer Coefficients in Pinus Radiata Above the Fiber-Saturation Point, Using the Moment Method. *Wood and Fiber Science*, 21(2), 112-122.
- dataholz.eu. (2022). *Bauteil Geschossdecke*. <https://www.dataholz.eu/bauteile/geschossdecke.htm> (zuletzt geprüft am 24.06.2022)
- Dent, R. W. (1977). A Multilayer Theory for Gas Sorption. *Textile Research Journal*, 47(2), 145–152. <https://doi.org/10.1177/004051757704700213>
- El Kouali, M [M.] & Vergnaud, J. M. (1991). Modeling the process of absorption and desorption of water above and below the fiber saturation point. *Wood Science and Technology*, 25(5), 327–339. <https://doi.org/10.1007/BF00226172>
- Emaminasab, M., Tarmian, A., Oladi, R., Pourtahmasi, K. & Avramidis, S. (2017). Fluid permeability in poplar tension and normal wood in relation to ray and vessel properties. *Wood Science and Technology*, 51(2), 261–272. <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0860-y>
- Eriksson, J., Johansson, H. & Danvind, J. (2006). Numerical Determination of Diffusion Coefficients in Wood Using Data From CT-Scanning. *Wood and Fiber Science*(2), 334–344. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1405>
- Fleischmann, A., Oppl, S., Schmidt, W. & Stary, C. (Hrsg.). (2018). *Ganzheitliche Digitalisierung von Prozessen*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-22648-0>
- Fleischmann, A., Oppl, S., Schmidt, W. & Stary, C. (2018). Modelle. In A. Fleischmann, S. Oppl, W. Schmidt & C. Stary (Hrsg.), *Ganzheitliche Digitalisierung von Prozessen* (S. 19–69). Springer Fachmedien Wiesbaden. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-22648-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-658-22648-0_2)
- Fortuin, G. (2003). *Anwendung mathematischer Modelle zur Beschreibung der technischen Konvektionstrocknung von Schnittholz* [Dissertation]. Universität Hamburg, Hamburg.
- Frandsen, H. L., Damkilde, L [Lars] & 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>

- Gamper, A., Dietsch, P. & Merk, M. (2013). *Gebäudeklima - Langzeitmessung zur Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtegradienten in Holzbauteilen*. Forschungsinitiative ZukunftBau: F 2816. Fraunhofer-IRB-Verl.
- Gebhardt, C. (2018). *Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench: Einführung in die lineare und nicht-lineare Mechanik* (3., aktualisierte Auflage). Hanser. <http://www.hanser-fachbuch.de/9783446450011>
- Hafner, A., Rüter, S., Ebert, S., Schäfer, S., König, H., Cristofaro, L., Diederichs, S., Kleinhenz, M. & Krechel, M. (April 2017). *Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden: Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau)*. Bochum. Ruhr-Universität Bochum.
- Häfner, F., Sames, D. & Voigt, H.-D. (1992). *Wärme- und Stofftransport: Mathematische Methoden*. Springer-Lehrbuch. Springer.
- Hailwood, A. J. & Horrobin S. (1946). Adsorption of water by polymers: Analysis in term of a simple model. *Transactions of the Farady Society*, 42(B), 84–102.
- Hanvongjirawat, W. (2003). *Permeabilität von Holzwerkstoffmatten* [Dissertation, Staats- und Universitätsbibliothek Hamburg Carl von Ossietzky, Universität Hamburg]. ediss.sub.uni-hamburg.de. <https://ediss.sub.uni-hamburg.de/handle/ediss/323?mode=full>
- HERMES Arzneimittel GmbH. (2020). *Betaisodona-Lösung: Produktbeschreibung*. <https://www.betaisodona.de/wundversorgung/produkte/betaisodona-loesung> (zuletzt geprüft am 24.06.2022)
- Holm & Krus, M. (1998). Bestimmung des Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung aus einfachen Trocknungsversuchen und rechnerischer Anpassung. *Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen*, 4(Nr.1), 31–52.
- Holm, A. H. (2001). *Ermittlung der Genauigkeit von instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen mittels eines stochastischen Konzeptes* [Dissertation]. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Houška, M. & Koc, P. (2000). Sorptive Stress Estimation: An Important Key to the Mechano-Sorptive Effect in Wood. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 4(1), 81–98. <https://doi.org/10.1023/A:1009897822196>
- Hozjan, T. & Svensson, S. (2011). Theoretical analysis of moisture transport in wood as an open porous hygroscopic material. *Holzforschung*, 65(1), 97–102. <https://doi.org/10.1515/HF.2010.122>

- Hukka, A. (1999). The Effective Diffusion Coefficient and Mass Transfer Coefficient of Nordic Softwoods as Calculated from Direct Drying Experiments. *Holzforschung*, 53(5), 534–540. <https://doi.org/10.1515/HF.1999.088>
- Kießl, K. & Möller, U. (1989). Zur Berechnung des Feuchteverhaltens von Bauteilen aus Holz und Holzwerkstoffen: Selektion feuchtetechnischer Stoffeigenschaften. *Holz als Roh- und Werkstoff*(47), 317–322.
- Kisseloff, P. (1969, Juli). Feuchtigkeitsbewegung und Wärmeleitung in Holz. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 27(7), 246-253.
- Klopfer, H. (1974). *Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen: Insbesondere in Baustoffen, Kunststoffen, Beschichtungen*. Zugl.: Stuttgart, Univ., Habil.-Schr., 1972. Bauverlag
- Koc, P. & Houška, M. (2002). Characterization of the sorptive properties of spruce wood by the Inverse Identification Method. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 60(4), 265–270. <https://doi.org/10.1007/s00107-002-0311-3>
- Koc, P., Houška, M. & Štok, B. (2003). Computer Aided Identification of the Moisture Transport Parameters in Spruce Wood. *Holzforschung - International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*, 57(5), 533–538. <https://doi.org/10.1515/HF.2003.079>
- Koller, S. (2020). *Ein Beitrag zur Bestimmung des Holzfaserbruchanteils bei Holz-Scherversuchen* [Masterarbeit]. Technische Universität München, München.
- Kollmann, F. (1982). *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe* (2. Aufl.; Reprint [d. Ausg.] Berlin [u.a.] 1951). Springer.
- Koponen, H. (1987). Moisture Diffusion Coefficients of Wood. In A. S. Mujumdar (Hrsg.), *Drying: International Drying Symposium* (225-232). Hemisphere Publishing; Springer.
- Krabbenhof, K. & Damkilde, L [L.] (2004). A model for non-fickian moisture transfer in wood. *Materials and Structures*, 37(9), 615–622. <https://doi.org/10.1007/BF02483291>
- Kucharczyk, A. & Pawlik, K. (2020). Modelling and Experimental Study of Moisture Transport in Wood, Taking into Account Diffusion and the Accompanying Adsorption of Water Vapour by Cell Walls. *Materials (Basel, Switzerland)*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/ma14010017>
- Künzel, H. M. (1994). *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten* [Dissertation]. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Liu, J. Y. (1989). A New Method for Separating Diffusion Coefficient and Surface Emission Coefficient. *Wood and Fiber Science*, 21(2), 133–141. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1478>

- Liu, J. Y. & Simpson, W. T. (1996). Mathematical Relationship Between Surface Emission and Diffusion Coefficients. *Drying Technology*, 14(3-4), 677–699.  
<https://doi.org/10.1080/07373939608917120>
- Liu, J. Y. & Simpson, W. T. (1999). Two-Stage Moisture Diffusion In Wood With Constant Transport Coefficients. *Drying Technology*, 17(1-2), 257–269.  
<https://doi.org/10.1080/07373939908917528>
- Liu, J. Y., Simpson, W. T. & Verrill, S. P. (2001). An Inverse Moisture Diffusion Algorithm for the Determination of Diffusion Coefficient. *Drying Technology*, 19(8), 1555–1568.  
<https://doi.org/10.1081/DRT-100107259>
- Mannes, D., Sonderegger, W., Hering, S., Lehmann, E. & Niemz, P. (2009). Non-destructive determination and quantification of diffusion processes in wood by means of neutron imaging. *Holzforschung*, 63(5). <https://doi.org/10.1515/HF.2009.100>
- Mindrup, K. (2019). *Raumklimatisierung durch thermisch aktivierte Massivholzelemente: Konzeptentwicklung, Leistungsbetrachtung und Ableitung von Auslegungswerkzeugen* [Dissertation]. TU München, München.
- Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern (Hrsg.). (April 2010). *Lebensmittelzusatzstoffe: was E-Nummern wirklich bedeuten*.
- Mori, M., Kuhara, S., Kobayashi, K., Suzuki, S., Yamada, M. & Senoo, A. (2019). Non-destructive tree-ring measurements using a clinical 3T-MRI for archaeology. *Dendrochronologia*, 57, 125630. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.125630>
- Mounji, H., Bouzon, J. & Vergnaud, J. M. (1991). Modelling the process of absorption and desorption of water in two dimensions (transverse) in a square wood beam. *Wood Science and Technology*, 26, 23-37.
- Mujumdar, A. S. (Hrsg.). (1987). *Drying: International Drying Symposium*. Hemisphere Publishing; Springer.
- Murr, A. (2021). *Water Vapour Sorption and Moisture Transport in and Across Fibre Direction of Wood*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1054651/v1>
- Nadler, K. C., Choong, E. T. & Wetzel, D. M. (1985). Mathematical Modeling of the Diffusion of Water in Wood During Drying. *Wood and Fiber Science*, 17(3), 404-423.
- Neroth, G. & Vollenschaar, D. (Hrsg.). (2011). *Praxis. Wendehorst Baustoffkunde: Grundlagen - Baustoffe - Oberflächenschutz* (27. Aufl.). Vieweg + Teubner.
- Niemz, P. (Januar 2005). *Physik des Holzes*.

- Niemz, P. (2016). *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/116599> <https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-010635628>
- Niemz, P., Mannes, D., Herbers, Y. & Koch, W. (2010). Untersuchungen zum Wasseraufnahmekoeffizienten von Holz bei Variation von Holzart und Flüssigkeit. *Bauphysik*, 32(3), 149–153. <https://doi.org/10.1002/bapi.201010018>
- Niemz, P. & Sonderegger, W. U. (2021). *Holzphysik: Eigenschaften, Prüfung und Kennwerte* (2., aktualisierte Auflage). Hanser.
- Niemz, P., Sonderegger, W. U., Häring, D., Joščák, M. & Krackler, V. (2012). Untersuchungen zur Wasseraufnahme von Vollholz und Holzwerkstoffen. *Bauphysik*, 34(3), 101–106. <https://doi.org/10.1002/bapi.201200014>
- Olek, W., Perré, P. & Weres, J. (2005). Inverse analysis of the transient bound water diffusion in wood. *Holzforschung*, 59(1), 38–45. <https://doi.org/10.1515/HF.2005.007>
- Olek, W. & Weres, J. (2007). Effects of the method of identification of the diffusion coefficient on accuracy of modeling bound water transfer in wood. *Transport in Porous Media*, 66(1-2), 135–144. <https://doi.org/10.1007/s11242-006-9010-6>
- Pang, S. (1997). Relationship Between A Diffusion Model and A Transport Model For Softwood Drying. *Wood and Fiber Science*, 29(1), S58–67. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/716>
- Pöhls, C. & Busker, M. (2015). Experimente mit blauer Tinte. *CHEMKON*, 22(3), 138–141. <https://doi.org/10.1002/ckon.201410253>
- Popper, R. & Niemz, P. (2009). Wasserdampfsorptionsverhalten ausgewählter heimischer und überseeischer Holzarten. *Bauphysik*, 31(2), 117–121. <https://doi.org/10.1002/bapi.200910017>
- Popper, R., Niemz, P. & Croptier, S. (2009). Adsorption and desorption measurements on selected exotic wood species: Analysis with the Hailwood-Horrobin model to describe the sorption hysteresis. *Wood Research*, 54(4), 43–56.
- Popper, R., Niemz, P. & Eberle, G. (2008). Die Holz/Wasser Interaktion am Beispiel ausgewählter fremdländischer Holzarten: Das hypothetische Hydratwasser. *Bauphysik*, 30(5), 333–339.
- RGM Gmbh. (2019). *Lebensmittelfarben flüssig BLAU*. <https://rosenheimer-gourmet-manufaktur.com/produkte/lebensmittelfarben> (zuletzt geprüft am 24.06.2022)
- Richter, K. & Ehmcke, G. (2017, September). Das Holz der Fichte: Eigenschaften und Verwendung. *LWF-Wissen* (80), 117–124. <https://www.lwf.bayern.de/service/publikationen/012446/index.php>

- Rosen, H. N. (1978). The Influence of External Resistance on Moisture Adsorption Rates in Wood. *Wood and Fiber Science*, 10(3), 218–228. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1228>
- Rosenkilde, A. & Söderström, O. (1997). Measurements of moisture transport coefficients in wood during drying.
- Rozas, C., Tomaselli, I. & Zanoelo, E. F. (2009). Internal mass transfer coefficient during drying of softwood (*Pinus elliottii* Engelm.) boards. *Wood Science and Technology*, 43(5-6), 361–373. <https://doi.org/10.1007/s00226-008-0223-4>
- Salin, J.-G. (2008). Drying of Liquid Water in Wood as Influenced by the Capillary Fiber Network. *Drying Technology*, 26(5), 560–567. <https://doi.org/10.1080/07373930801944747>
- Schaffrath, J. (2015). *Untersuchungen zu Feuchtetransportvorgängen und feuchteinduzierten Verformungen sowie Spannungen bei Betrachtung verschiedener Holzarten und unterschiedlicher klimatischer Randbedingungen* [Dissertation]. Technische Universität München, München.
- Schauer, A. (2017). *Farbstoffe in Lebensmitteln: und deren Relevanz im Chemie Unterricht* [Diplomarbeit]. Karl-Franzens-Universität Graz, Graz.
- Schewior-Popp, S., Sitzmann, F. & Ullrich, L. (2021). *Thiemes Pflege: Das Lehrbuch für Pflegendende in der Ausbildung*. Georg Thieme Verlag KG. <https://doi.org/10.1055/b000000432>
- Schönburg, K. (2009). *Holzoberflächen am Bauwerk: Eigenschaften, Bearbeitung, Gestaltung* (1. Aufl.). *Bauwesen*. Fraunhofer IRB Verl.
- Siau, J. F. (1984). *Transport processes in wood. Springer series in wood science: Bd. 2*. Springer.
- Siau, J. F & Avramidis, S. (1996). The surface emission coefficient of wood. *Wood Science and Technology*, 28(2), 178-185. <https://www.semanticscholar.org/paper/The-surface-emission-coefficient-of-wood-Siau-Avramidis/71ea6ac74d9737e81451157193db31d588428bb9>
- Simpson, W. T. & Liu, J. Y. (1997). An optimization technique to determine red oak surface and internal moisture transfer coefficients during drying. *Wood and Fiber Science*, 29(4), 312-318.
- Skaar, C. (1988). *Wood-water relations. Springer series in wood science*. Springer.
- Söderström, O. & Salin, J.-G. (1993). On Determination of Surface Emission Factors in Wood Drying. *Holzforschung - International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*, 47(5), 391–397. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1993.47.5.391>
- Sonderegger, W. U. (2011). *Experimental and theoretical investigations on the heat and water transport in wood and wood-based materials* [Doctoral Thesis, ETH Zurich]. DataCite. <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/152766>

- Sonderegger, W. U., 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. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 68(3), 341–350. <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0463-5>
- Spear, M., Holmberg, J., Nath, S., Waugh, W., Pitman, A., Mason, P., Curling, S. & Ormondroyd, G. (2018). Fluid flow in wood: Investigation of the influence of laser incision parameters on uptake and flow paths in four wood species. *TIMBER 2018*. <https://pure-portal.coventry.ac.uk/en/publications/fluid-flow-in-wood-investigation-of-the-influence-of-laser-incisi>
- Stamm, A. J. (1946). Passage of Liquids, Vapors and Dissolved Materials Through Wood. *Technical Bulletin*(No. 929).
- Stamm, A. J. (1967). Movement of Fluids in Wood - Part I: Flow of Fluids in Wood. *Wood Science and Technology*(Vol. 1), 122-141.
- Stamm, A. J. (1967). Movement of Fluids in Wood - Part II: Diffusion. *Wood Science and Technology*(Vol. 1), 205–230.
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2021, 26. Juli). *Bauen und Wohnen: Baugenehmigungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden nach überwiegend verwendetem Baustoff Lange Reihen z. T. ab 1980*.
- Thybring, E. E., Kymäläinen, M. & Rautkari, L. (2018). Experimental techniques for characterising water in wood covering the range from dry to fully water-saturated. *Wood Science and Technology*, 52(2), 297–329. <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0977-7>
- Time, B. (1998). *Hygroscopic Moisture Transport in Wood* [Dissertation].
- Tremblay, C., Cloutier, A. & Fortin, Y. (2000). Experimental determination of the convective heat and mass transfer coefficients for wood drying. *Wood Science and Technology*, 34(3), 253–276. <https://doi.org/10.1007/s002260000045>
- Tuttle, F. (1925). A mathematical theory of the drying of wood drying of wood. *Journal of the Franklin Institute*, 200(5), 609–614. [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(25\)90713-2](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(25)90713-2)
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (November 2019). *Monitoringbericht 2019: zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel*. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe. <https://www.bmu.de/pressemitteilung/klimawandel-in-deutschland-neuer-monitoringbericht-belegt-weitreichende-folgen>
- Vanek, M. & Teischinger, A. (1989, Januar). Diffusionskoeffizienten und Diffusionswiderstandszahlen von verschiedenen Holzarten. *Holzforschung und Holzverwertung*(1), 3-6.

- Voigt, H., Krischer, O. & Schauss, H. (1940). Die Feuchtigkeitsbewegung bei der Verdunstungstrocknung von Holz. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 3(10), 305–321.  
<https://doi.org/10.1007/BF02718022>
- Wadsö, L. (1993). Studies of water vapor transport and sorption in wood. *Report TVBM*, 1013.
- Weber, S. (2022). *Ermittlung der Feuchteausbreitung und Rücktrocknung auf Holzoberflächen anhand von Versuchen* [Bachelorarbeit]. Technische Universität München, München.
- Winter, S. (2019, 25. April). *V01+02: Einführung - Holz und seine Eigenschaften*. TU München. Studienfach Holzbau Grundmodul, München.
- Zillig, W. (2009). *Moisture transport in wood using a multiscale approach* [Dissertation]. Katholieke Universiteit Leuven, Leuven.
- Zürcher, E. & Niemz, P. (2011). *Holz: Struktur und Eigenschaften: Skript zur Vorlesung*. ETH Zürich; Berner Fachhochschule.

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Links: Makroskopischer Aufbau aus (Winter, 2019); rechts: Mikroskopischer Aufbau nach (Zürcher & Niemz, 2011) .....	5
Abbildung 2-2: Links: Schema der Flüssigkeitsbewegung durch Tüpfel und Tracheiden aus (Kollmann, 1982); rechts: Schematischer Aufbau einer Zellwand aus (Fortuin, 2003) .....	7
Abbildung 2-3: Die Bereiche der Holzfeuchte in Anlehnung an (Winter, 2019) .....	8
Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der Bindungsformen des Wassers im Holz aus (Niemz & Sonderegger, 2021) .....	10
Abbildung 2-5: Phasen der Sorptionsisothermen einschließlich dem Prinzip des Hysteresseffektes aus (Niemz & Sonderegger, 2021) .....	12
Abbildung 2-6: Kurve zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten aus (DIN EN ISO 15148) .....	13
Abbildung 2-7: Wasseraufnahme in transversaler Richtung mit $A_W = 0,00238 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$ .....	15
Abbildung 2-8: Transportwege der Feuchte im Holz in Anlehnung an (Čiegis & Starikovičius, 2002) .....	17
Abbildung 2-9: Schematische Darstellung der vier primären Pfade des transversalen Feuchtetransports aus (Skaar, 1988) .....	22
Abbildung 2-10: Feuchtetransportmodell aus (Krabbenhoft & Damkilde, 2004) .....	24
Abbildung 2-11: Links: Schematische Darstellung des Feuchtetransportes mit longitudinalem und tangentialem Pfad nach (Comstock, 1970); rechts: Tracheiden inklusive Tüpfel nach (Kollmann, 1982) .....	26
Abbildung 2-12: Zusammenstellung radialer und tangentialer sowie transversaler Diffusionskoeffizienten aus der Literatur .....	35
Abbildung 2-13: Zusammenstellung longitudinaler Diffusionskoeffizienten aus der Literatur .....	36
Abbildung 2-14: Diffusionskoeffizienten nach (Cunningham et al., 1989): links: bei 30 °C; rechts: bei 17 °C .....	37
Abbildung 3-1: Gegenüberstellung Diffusion und Wärmeleitung aus (Schaffrath, 2015) .....	40
Abbildung 3-2: Veranschaulichung der aufgetroffenen Wassermenge in [kg] in Abhängigkeit der Zeit t in [s] .....	42

Abbildung 3-3: Geometrie zur Feuchtesimulation.....	44
Abbildung 3-4: Aufbau der Simulation im Ansys – Projektmanager .....	45
Abbildung 3-5: Eingabe der Materialparameter am Beispiel der minimalen Diffusionskoeffizienten .....	46
Abbildung 3-6: Simulierter Holzfeuchteverlauf nach 14 Tagen; links: bei Verwendung der minimalen Diffusionskoeffizienten; rechts: bei Verwendung der maximalen Diffusionskoeffizienten .....	48
Abbildung 3-7: Simulierter Holzfeuchteverlauf nach 14 Tagen unter Verwendung der mittleren Diffusionskoeffizienten .....	48
Abbildung 3-8: Simulierter Holzfeuchteverlauf nach 14 Tagen mit minimalen Diffusionskoeffizienten; links: bei Verwendung des maximalen Oberflächenemissionskoeffizienten; rechts: bei Verwendung des minimalen Oberflächenemissionskoeffizienten.....	49
Abbildung 3-9: Simulierter Holzfeuchteverlauf nach 14 Tagen mit mittleren Diffusionskoeffizienten; links: bei Verwendung des maximalen Oberflächenemissionskoeffizienten; rechts: bei Verwendung des minimalen Oberflächenemissionskoeffizienten .....	50
Abbildung 3-10: Simulierter Holzfeuchteverlauf nach 14 Tagen mit maximalen Diffusionskoeffizienten; links: bei Verwendung des maximalen Oberflächenemissionskoeffizienten; rechts: bei Verwendung des minimalen Oberflächenemissionskoeffizienten.....	50
Abbildung 4-1: Versuchsaufbau für Tropfversuch I mit Tinte .....	57
Abbildung 4-2: Feuchteausbreitung nach 5 h (links) und 10 h (rechts).....	58
Abbildung 4-3: Darstellung zur Verdeutlichung der bevorzugten Ausbreitung im Frühholz und der dunkler werdenden Sättigung (nach 22 h).....	59
Abbildung 4-4: Feuchteausbreitung nach 13,5 h (links) und 16 h (rechts) aus Webcam – Aufnahme .....	60
Abbildung 4-5: Finale Feuchteausbreitung nach 24 h (Tropfversuch I).....	60
Abbildung 4-6: Zerteilter Probekörper nach Versuchsende (Tropfversuch I) .....	61
Abbildung 4-7: Links: Holzfeuchtemesswerte in 1,5 cm Messtiefe; rechts: Veranschaulichung der Holzfeuchtemessung mit dem verwendeten Messgerät .....	61
Abbildung 4-8: Schnittbild quer zur Fuge .....	62

Abbildung 4-9: Versuchsaufbau zur Farbfindung (nach 8 mal 10 Tropfen/Stunde).....	63
Abbildung 4-10: Holzprobe mit Wiesner - Lösung .....	64
Abbildung 4-11: Holzprobe mit Rote Bete .....	65
Abbildung 4-12: Holzprobe mit Pulverbeize.....	65
Abbildung 4-13: Holzprobe mit Lebensmittelfarbe .....	65
Abbildung 4-14: Holzprobe mit Povidon - Iod .....	66
Abbildung 4-15: Feuchteausbreitung nach 1 h .....	68
Abbildung 4-16: Feuchteausbreitung nach 3,5 h .....	68
Abbildung 4-17: Feuchteausbreitung nach 19 h (links) und 20,5 h (rechts) aus Webcam – Aufnahme .....	69
Abbildung 4-18: Finale Feuchteausbreitung nach 24 h (Tropfversuch II).....	70
Abbildung 4-19: Die dreiteilige BSP - Platte nach dem Tropfversuch II mit Darlegung des Transportweges des grünen Farbstoffes.....	70
Abbildung 4-20: Zerteilter Probekörper nach Versuchsende (Tropfversuch II) .....	71
Abbildung 4-21: Beispielhafte Holzfeuchtemesswerte .....	72

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Wasseraufnahmekoeffizienten aus der Literatur der Holzart Fichte (picea abies).....	14
Tabelle 2-2: Zusammenstellung von Oberflächenemissionskoeffizienten aus der Literatur .....	38
Tabelle 3-1: Flächenberechnung am Beispiel der ersten zehn Tropfen.....	43
Tabelle 3-2: Übersicht über die für die Simulationen gewählten Diffusionskoeffizienten.....	47

## 10 Anhang

### 10.1 Beispielhafte Zwischenergebnisse einer Feuchtesimulation

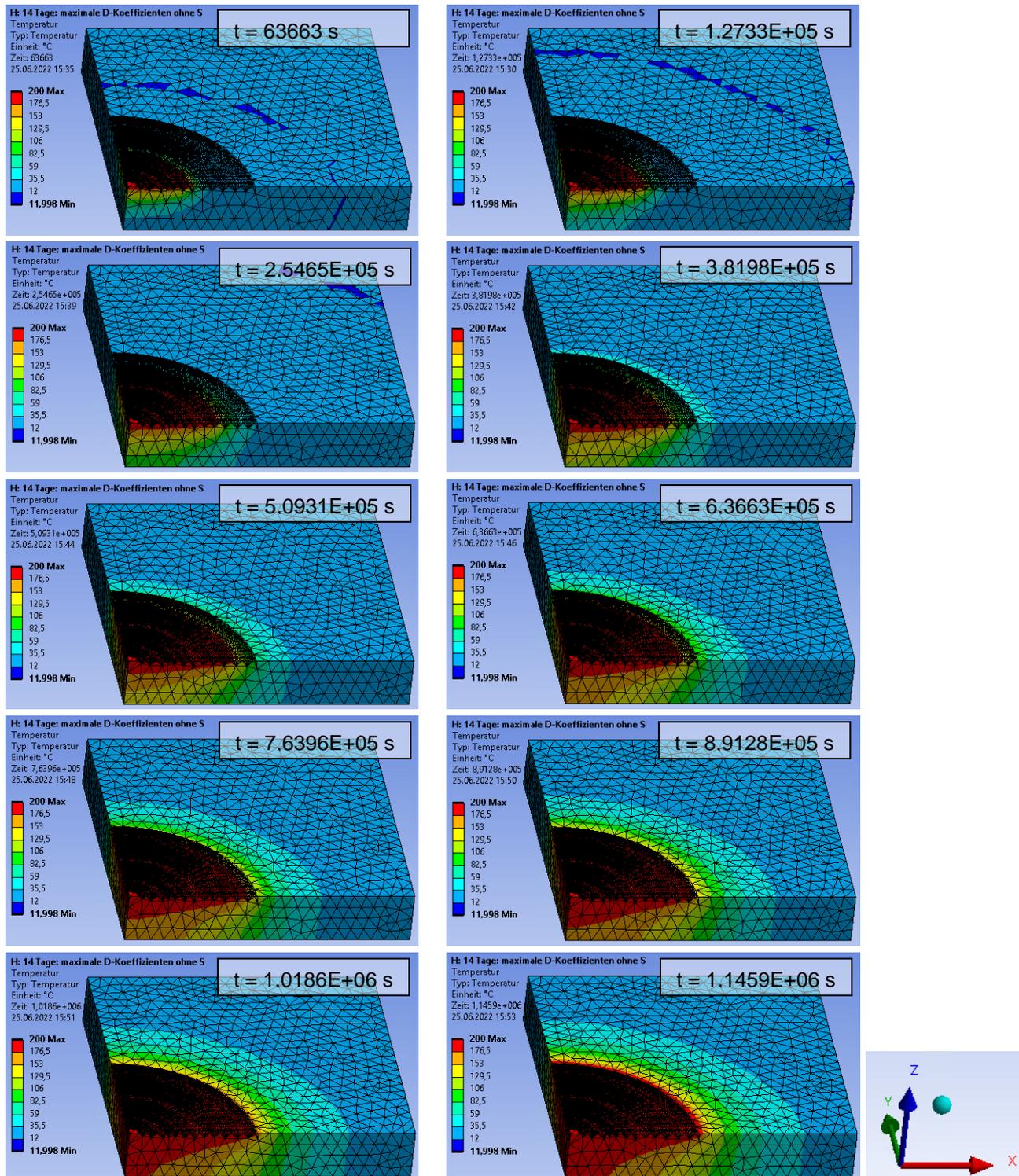
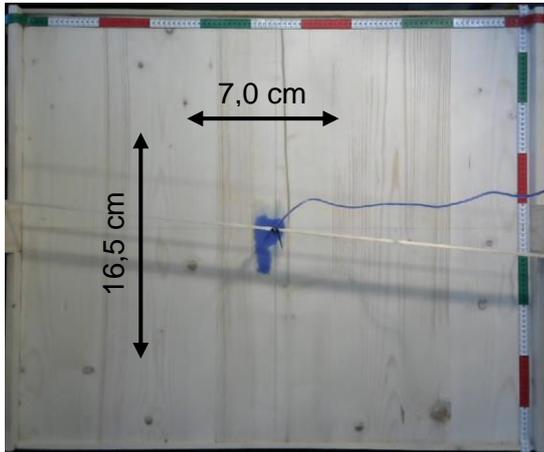


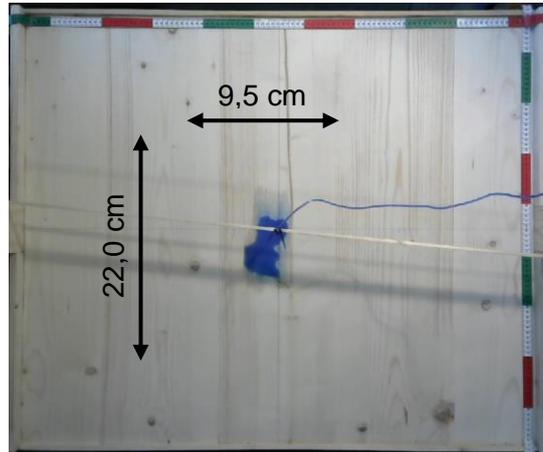
Abbildung 10-1: Verlauf einer Feuchtesimulation bei Verwendung des maximalen Diffusionskoeffizienten unter Vernachlässigung des Oberflächenemissionskoeffizienten (in Leserichtung)

## 10.2 Anhänge zu den praktischen Versuchsdurchführungen

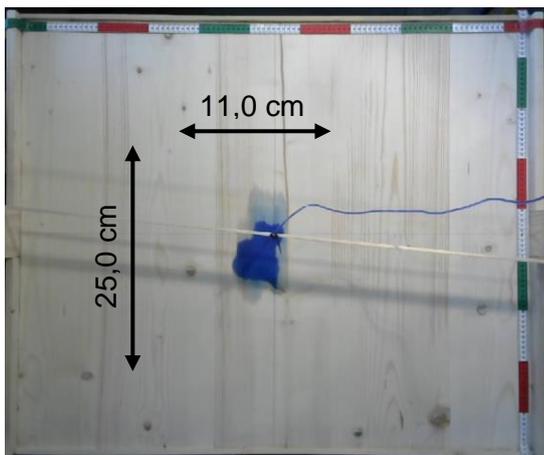
### 10.2.1 Tropfversuch I mit Tinte



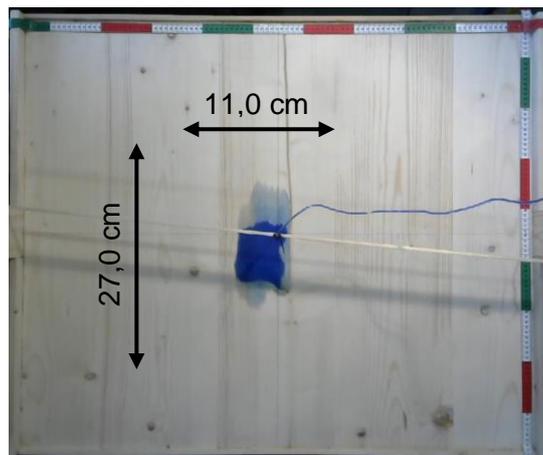
1. Stunde



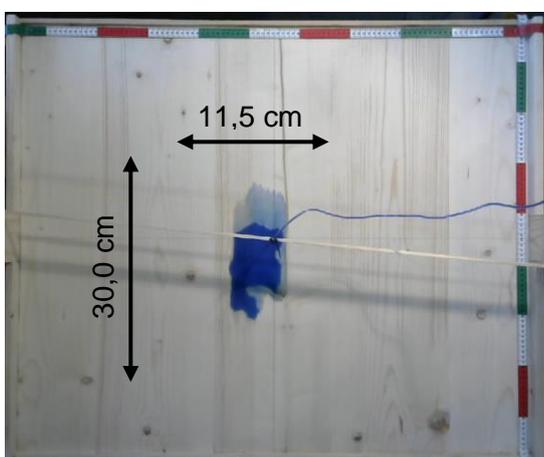
2. Stunde



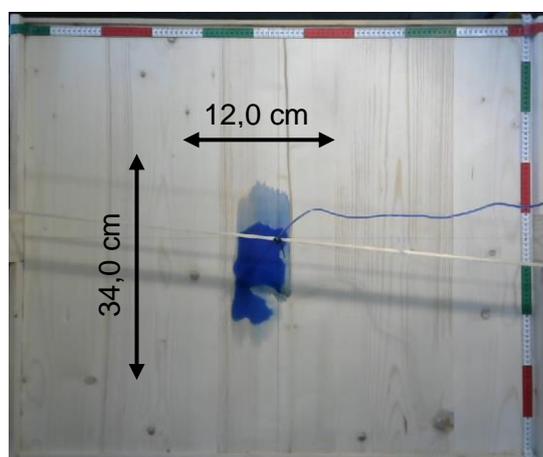
3. Stunde



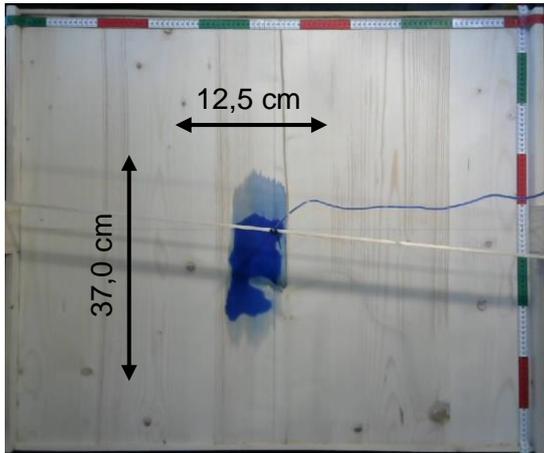
4. Stunde



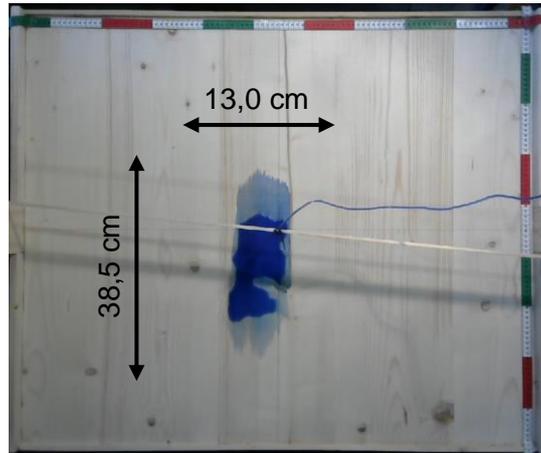
5. Stunde



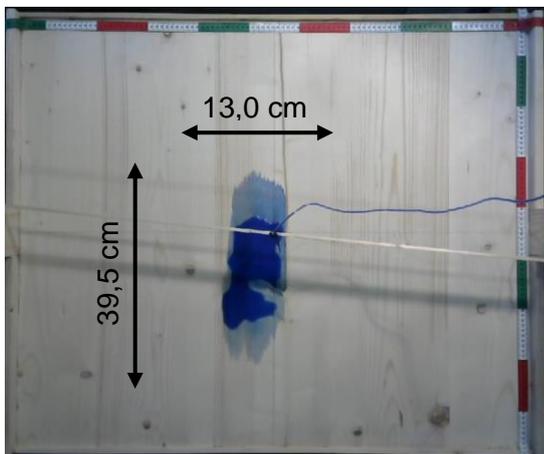
6. Stunde



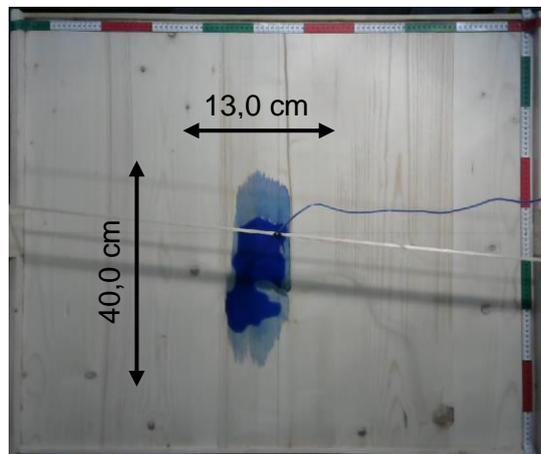
7. Stunde



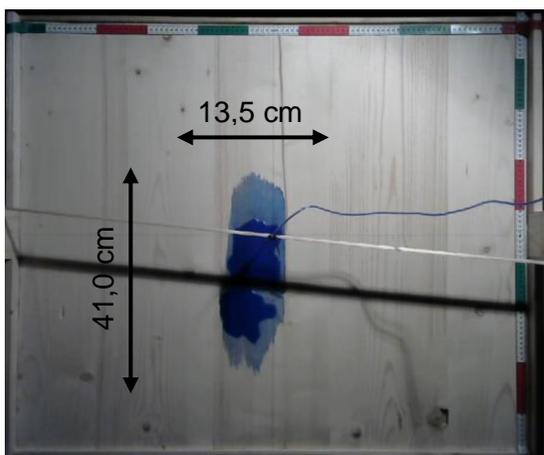
8. Stunde



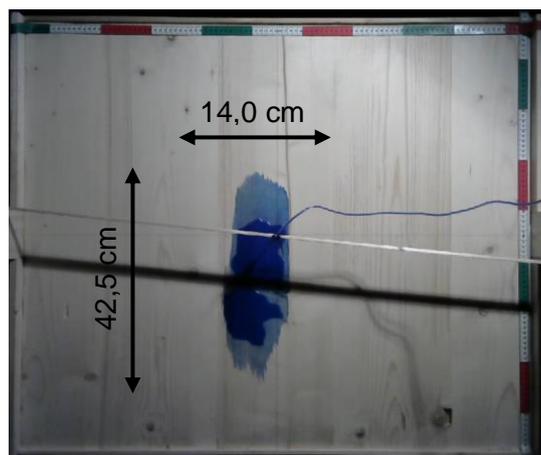
9. Stunde



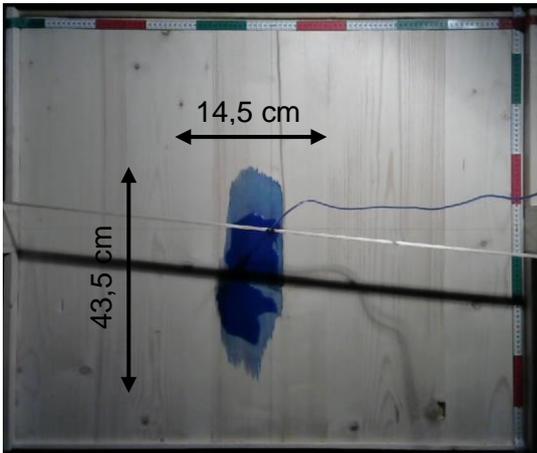
10. Stunde



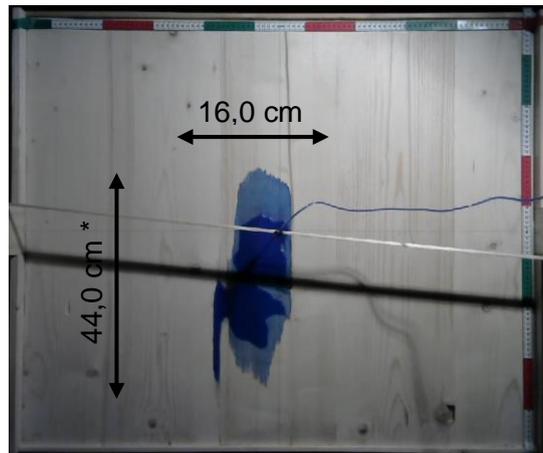
11. Stunde



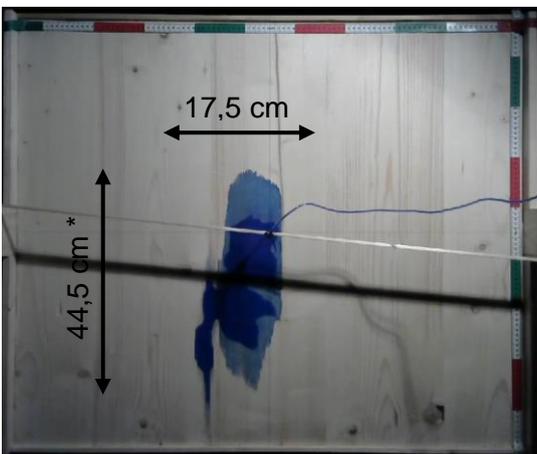
12. Stunde



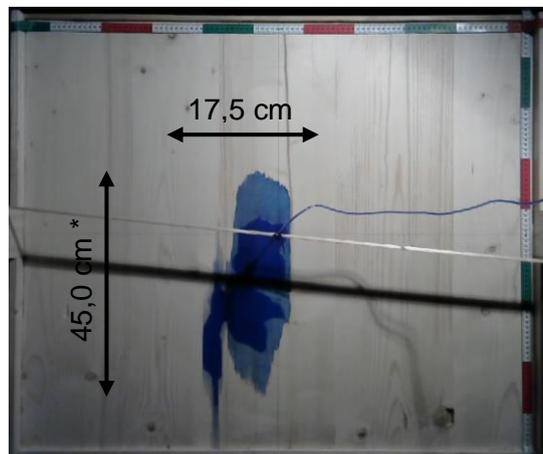
13. Stunde



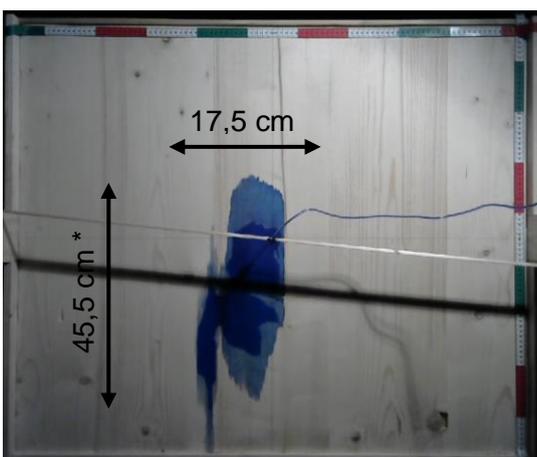
14. Stunde



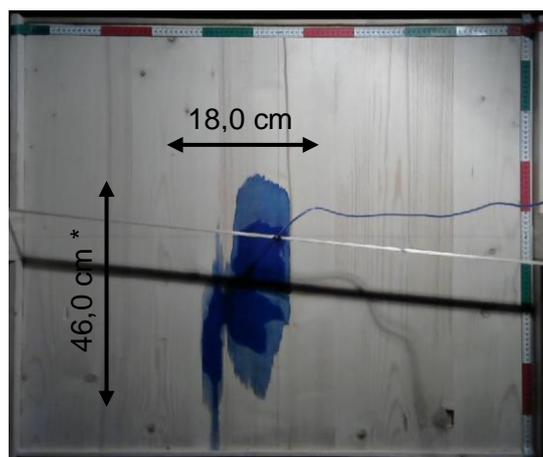
15. Stunde



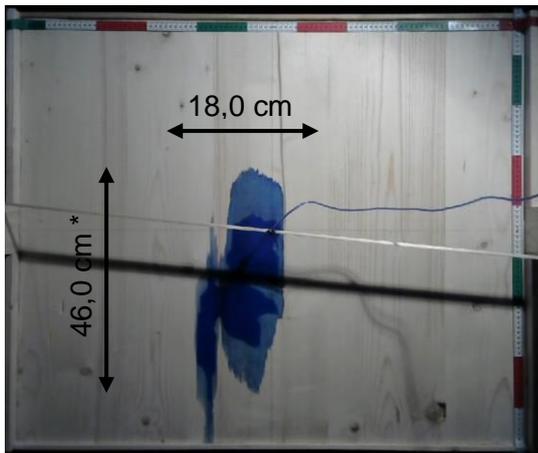
16. Stunde



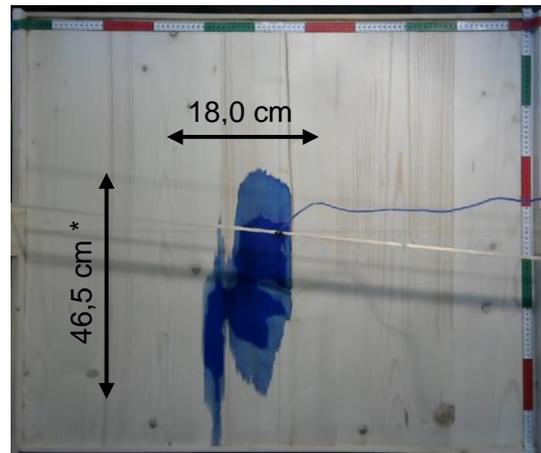
17. Stunde



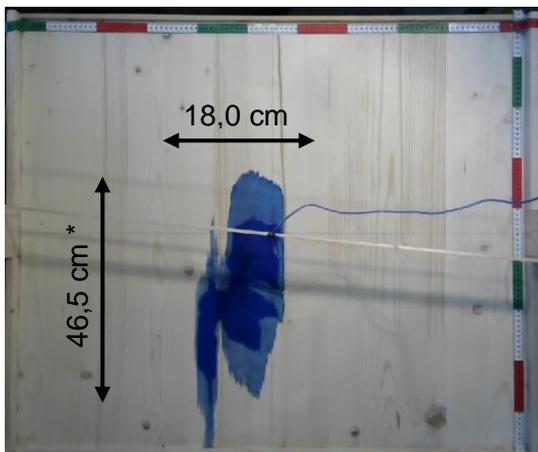
18. Stunde



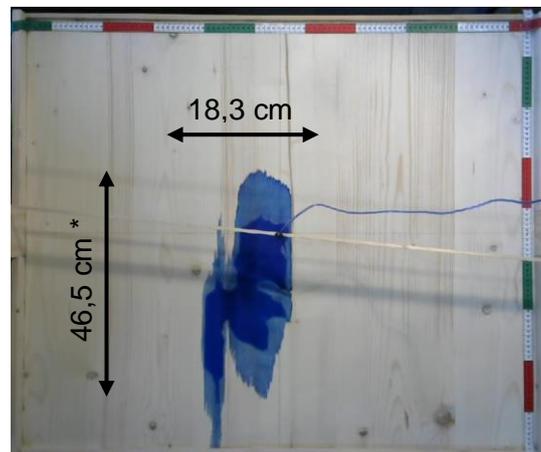
19. Stunde



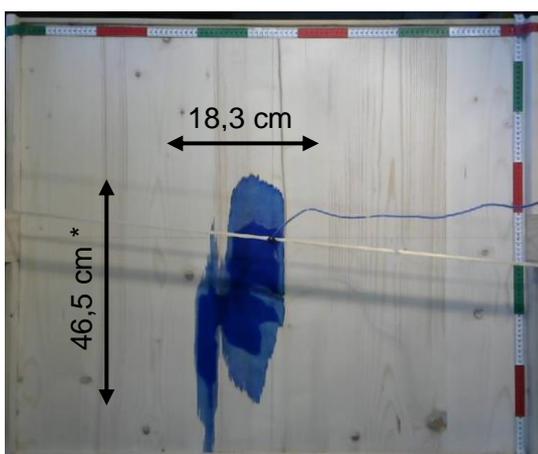
20. Stunde



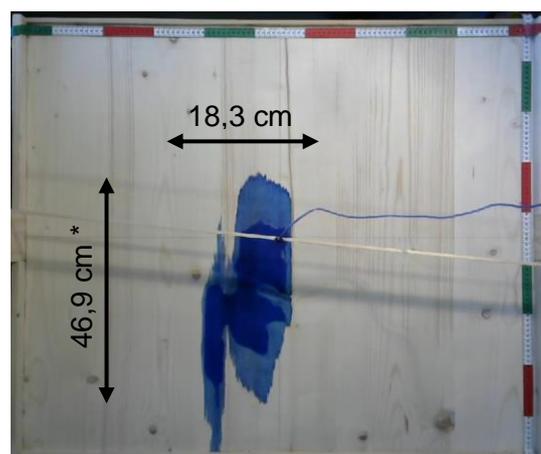
21. Stunde



22. Stunde



23. Stunde

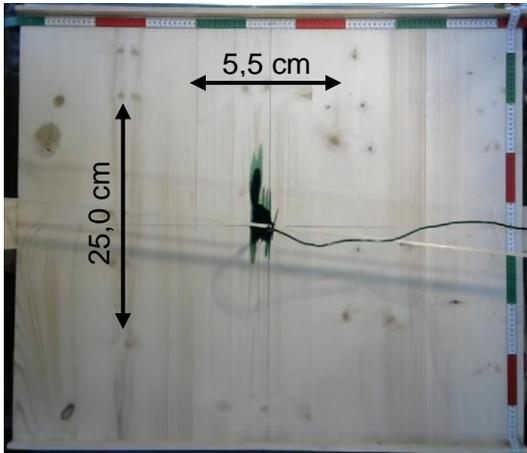


24. Stunde

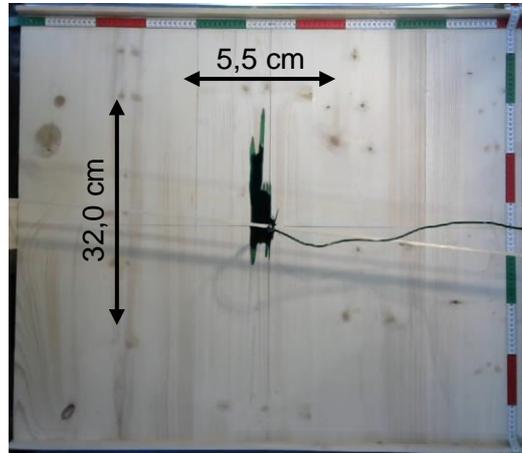
\*) longitudinale Ausbreitmaße beziehen sich ausschließlich auf die blau eingefärbte Fläche rechts

Abbildung 10-2: Stündliche Feuchteausbreitung inklusive auf halbe Zentimeter gerundete Maße des blau eingefärbten Bereiches (Tropfversuch I)

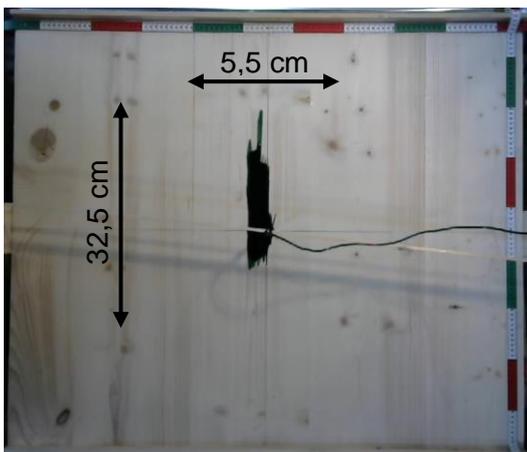
10.2.2 Tropfversuch II mit Beize



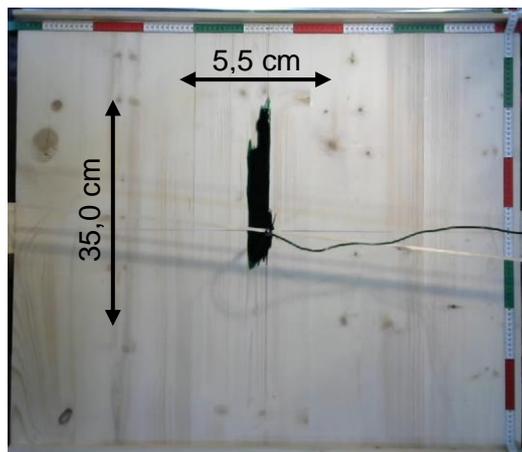
1. Stunde



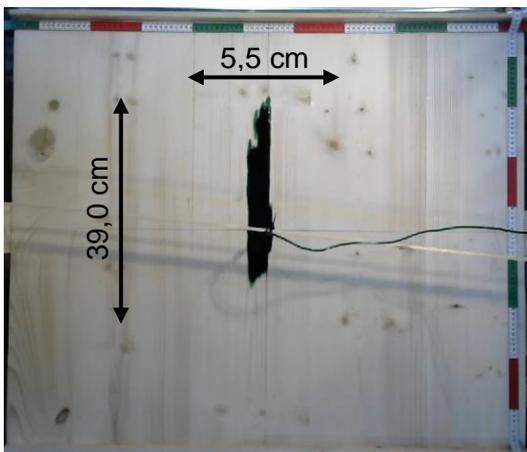
2. Stunde



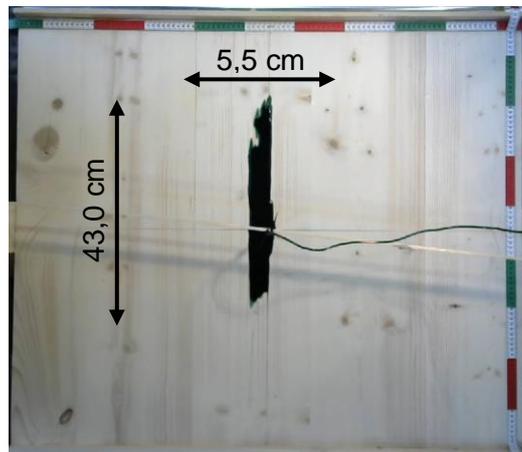
3. Stunde



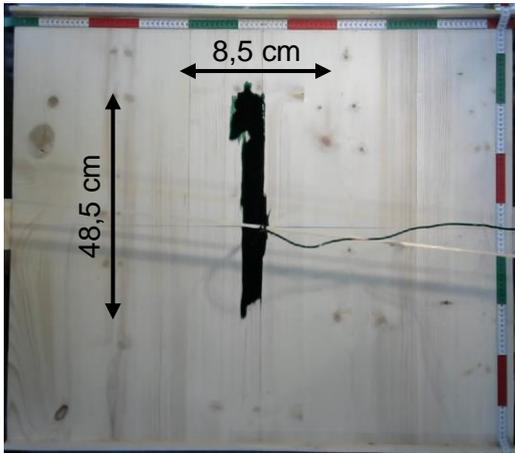
4. Stunde



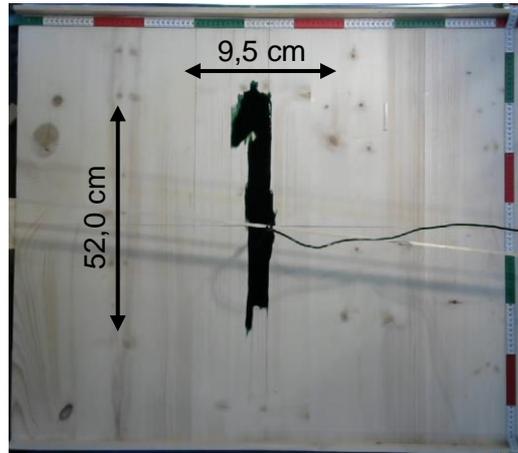
5. Stunde



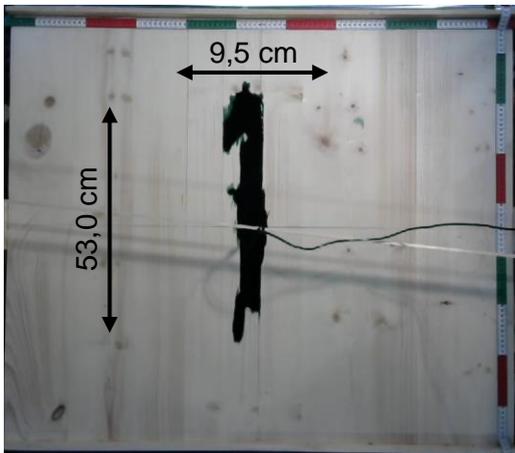
6. Stunde



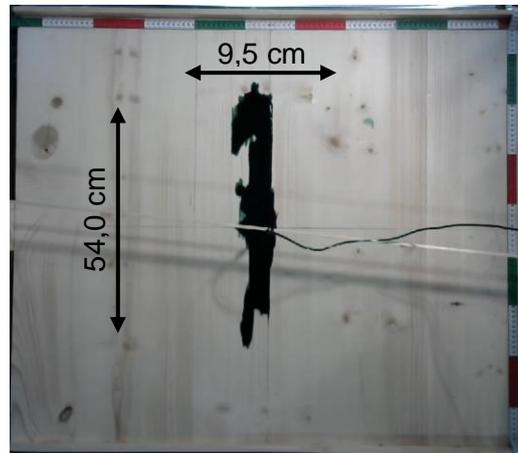
7. Stunde



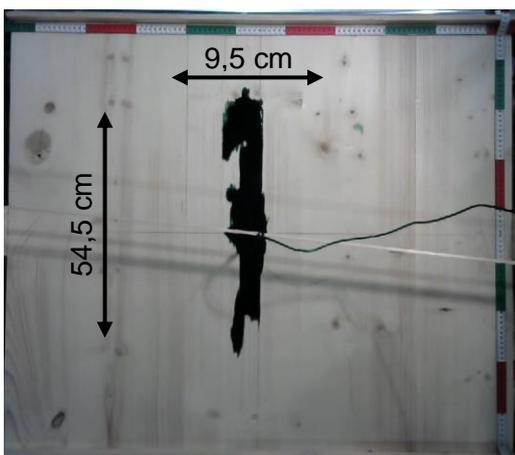
8. Stunde



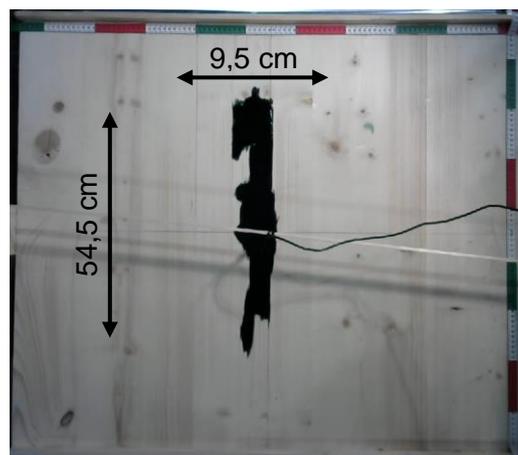
9. Stunde



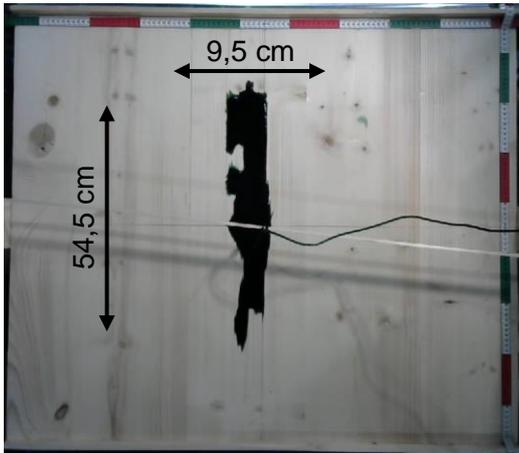
10. Stunde



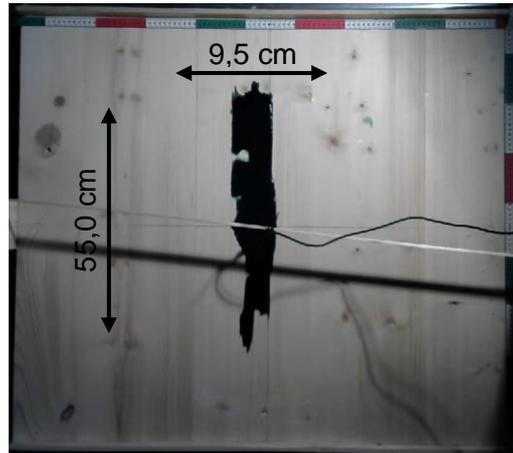
11. Stunde



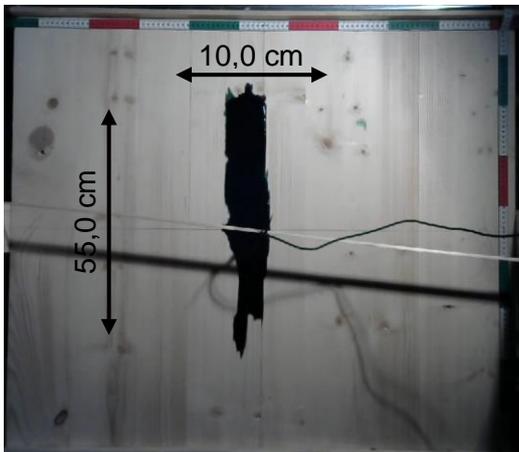
12. Stunde



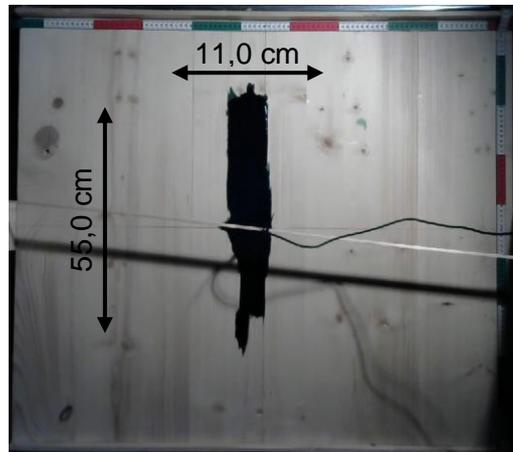
13. Stunde



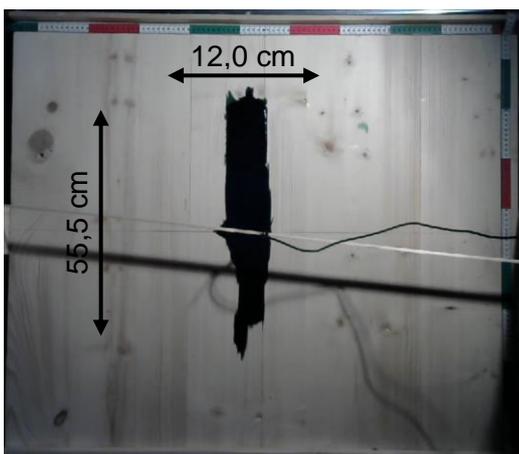
14. Stunde



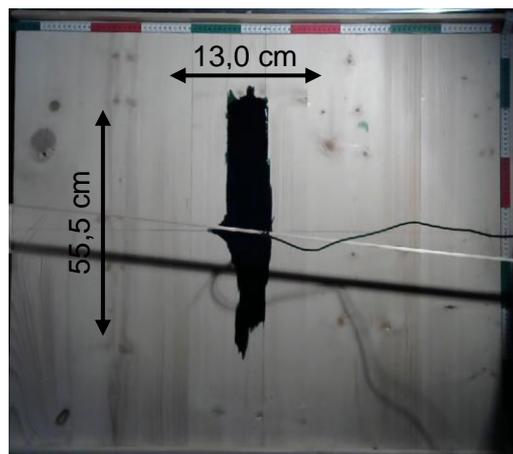
15. Stunde



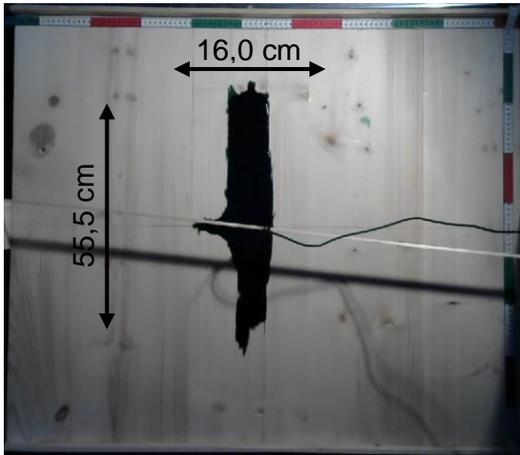
16. Stunde



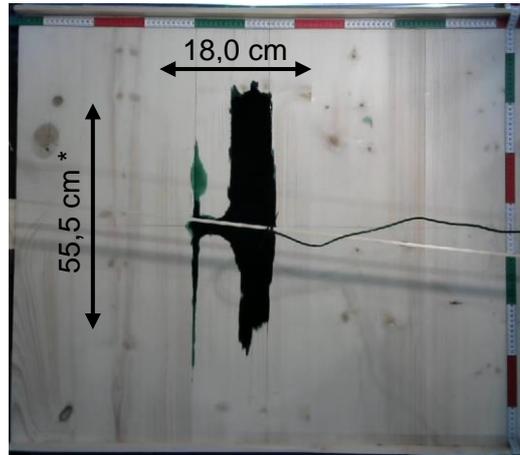
17. Stunde



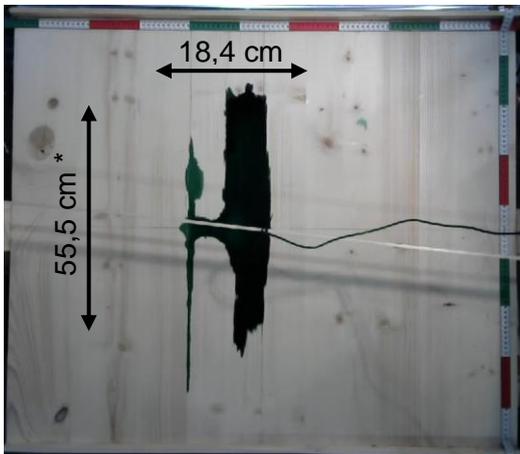
18. Stunde



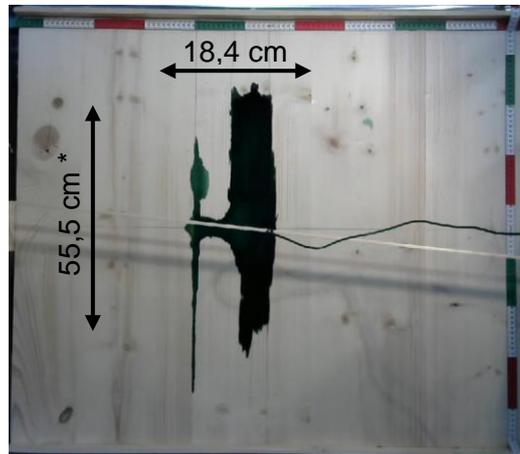
19. Stunde



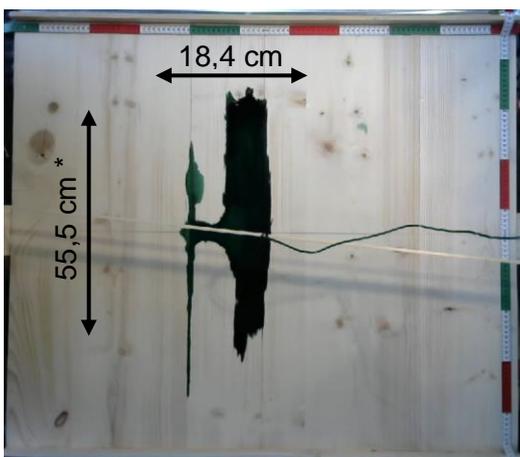
20. Stunde



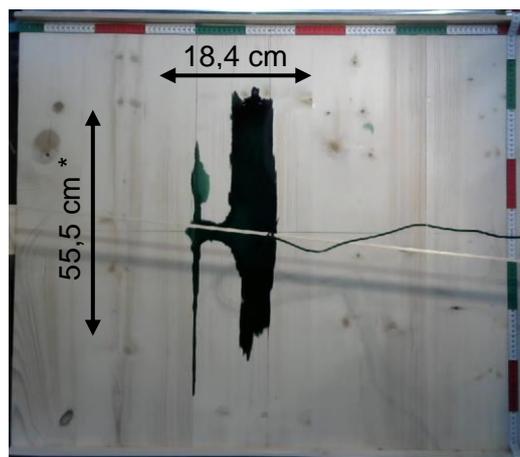
21. Stunde



22. Stunde



23. Stunde



24. Stunde

\*) longitudinale Ausbreitmaße beziehen sich ausschließlich auf die grün eingefärbte Fläche rechts

Abbildung 10-3: Stündliche Feuchteausbreitung inklusive auf halbe Zentimeter gerundete Maße des grün eingefärbten Bereiches (Tropfversuch II)

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

.....

Mathias Jagdhuber

München, 11. Juli 2022

## **Einverständniserklärung**

Ich bin damit einverstanden, dass meine Abschlussarbeit veröffentlicht sowie wissenschaftlich interessierten Personen oder Institutionen zur Verfügung gestellt und zitiert werden kann. Korrektur- oder Bewertungshinweise in meiner Arbeit dürfen nicht zitiert werden.

.....

Mathias Jagdhuber

München, 11. Juli 2022