

PAUL SCHERRER INSTITUT  • • • • • Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau	ETH Eidgenössische Technische Hochschule Zürich Swiss Federal Institute of Technology Zurich IfB Institut für Baustoffe Institute for Building Materials
---	---

Schlussbericht

Projekt 2012.13

Sorptionsverhalten von beschichteten Holzbauteilen unter spezieller Berücksichtigung des physikalischen Holzschutzes

Projektleitung:

Prof. Dr. Peter Niemz (ETH, IfB, Holzphysik)

Prof. Dr. Thomas Volkmer (BFH)

Dr. David Mannes (PSI Villigen)

Industriepartner:

Bosshard + Co. AG; Lack- und Farbenfabrik
Kabe Farben GmbH
Karl Bubenhofer AG
Keimfarben GmbH

Bearbeiter: Martin Glaunsinger

Berner Fachhochschule, Biel

Zürich, 28. Februar 2014

Bundesamt für Umwelt BAFU

Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung

Bearbeitungszeit: 15.2.2013 – 28.2.2014



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Kurzfassung

Holz ist ein kapillarporöser Stoff, der in Abhängigkeit von relativer Luftfeuchte und Temperatur mehr oder weniger Feuchte aufnimmt oder abgibt und ständig zu einer Ausgleichsfeuchte hin strebt. Innerhalb des Holzes findet dieser Wassertransport von Gebieten hoher Feuchte zu Gebieten niedriger Feuchte statt. Dieser Transport von Feuchtigkeit hängt stark von der Rohdichte und der Materialfeuchte des Holzes ab.

Holzbauteile im Aussenbereich sind mehr oder weniger der freien Bewitterung ausgesetzt. Um die Langlebigkeit zu gewährleisten und den ästhetischen Ansprüchen zu genügen, können sie vor schädigenden Einflüssen geschützt werden. Ein Holzschutz kann konstruktiv, chemisch oder physikalisch erfolgen. Da der physikalische Holzschutz im Vergleich zum konstruktiven, einen geringeren technischen Aufwand erfordert und im Vergleich zum chemischen umweltfreundlicher und nachhaltiger ist, ist er weit verbreitet. Beschichtungssysteme sind i. d. R. diffusionsdichter als Holz und beeinflussen das Verhalten der Wasseraufnahme deutlich. Ausserdem müssen Beschichtungen das Quellen und Schwinden des Holzes aufnehmen. Was zu Beschädigungen in Form von Mikrorissen bis hin zu grossflächigen Abplatzungen führen kann. Über Fehlstellen in der Beschichtung kann Feuchtigkeit schnell und tief ins Holz eindringen, danach jedoch nur langsam wieder nach aussen diffundieren. Was zu sehr hohen Feuchtekonzentrationen im Holz führen kann. Diese erhöhte Feuchtigkeit fördert im Holz die biogene Holzerstörung dadurch, dass sie eine Grundlage für holzerzetzende Lebewesen bildet. Die auftretenden Schäden durch Holzabbau reichen von Verfärbungen bis hin zu Materialversagen.

Um das Verständnis über das Verhalten von Feuchtigkeit in beschichtetem Holz zu vertiefen, wurde der Feuchtigkeitstransport in Abhängigkeit von Quantität und Qualität der eingesetzten Beschichtungssysteme untersucht. Zudem wurde der Einfluss von Beschädigungen in der Beschichtung betrachtet. Ausserdem wurden Wasseraufnahme- und Diffusionskennwerte ermittelt und anschliessend Neutronenradiografie- und Neutronentomografiemessungen durchgeführt, um lokale Feuchteansammlungen im Holz hoch aufgelöst darzustellen. Zusätzlich sind Versuche zur Nasshaftfestigkeit der Beschichtungen durchgeführt worden.

Die Analyse der Beschichtung selbst zeigt, dass die Holzoberfläche stark zerklüftet ist, was dazu führt, dass sie stellenweise mit mehr oder weniger Lack bedeckt ist. Dadurch variiert die Trockenschichtdicke stark. Geringe Auftragsmengen führen dazu, dass hervorstehende Zellwandteile nicht vom Lack bedeckt sind, Lufteinschlüsse nehmen mit der Lackauftragsmenge zu. Diese Defekte, in der Beschichtung, reduzieren den Diffusionswiderstand

Steigt die Materialfeuchte in einer Fehlstelle an, sinkt der Diffusionswiderstand wiederum und Wasser dringt schnell und tief ein. Trocknet das Holz an der Fehlstelle, steigt der Diffusionswiderstand wieder rasch an und das Wasser kann nicht mehr schnell durch die Beschädigung nach aussen diffundieren. Der Diffusionsstrom reisst ab und die Feuchte verbleibt im Holz.

Die Feuchteprofile der Neutronentransmissionsmessungen zeigen, dass sich der Diffusionsstrom nach aussen nicht unter der Beschichtung staut. Die Tomografie gibt das Eindringen von Wasser an einem definierten Bohrloch wieder, wobei zu Beginn schnell eine grössere Menge Wasser eindringen kann.

Mit zunehmender Holzfeuchte sinkt die Haftfestigkeit der Beschichtung auf dem Substrat. Wasser unter der Beschichtung führt zu einer um 48% reduzierten Haftung.

Abstract

Wood, a capillary and porous material, absorbs or desorbs water depending on the surrounding humidity and temperature. During this reaction, the moisture flows from areas of high moisture content to areas with lower content within the wood structure.

This process is called diffusion and depends on the density and moisture content of the sample.

Outdoor timber structures are exposed to weathering. To ensure longevity and to satisfy the aesthetic demands in wood products outdoor, they must be protected from the influence of water. A protection can be applied constructive, chemically or physically. Physical protection of wood requires a lower technical effort than constructive protection. Compared to chemical protection the physical one is environmentally friendlier and sustainable. Physical wood protection, such as coating systems, is common and widely used. Coatings have a higher diffusion resistance than wood and thus change the behavior of water absorption and moisture flow. The coating is exposed to weathering and also must endure the swelling and shrinking of the wood. This may lead to damages in the coating layer, which range from micro cracks to large-scale spalling. Moisture can quickly penetrate deep into the wood through damaged surfaces, but only moves slowly out of the wood in case of drying. This may lead to a moisture content of over 20%.

This increased moisture content provides a basis for wood decomposing organisms and therefore promotes the biogenic destruction of it. The decomposition of wood results in damages ranging from discoloration to material failure.

To increase knowledge about the behavior of moisture in coated wood, the water transport was investigated in relation to quantity and quality of coating systems. In addition, the influence of damage of coatings is also considered.

Therefore water absorption and diffusion characteristics were determined. Neutron radiography and neutron tomography measurements were carried out to study local moisture accumulations with a high resolution. Moreover, the adhesive strength of coatings was determined for different moisture conditions. The analysis of the coating thickness shows that the wood surface is very corrugated; the surface is therefore covered with lacquer at differing degrees. Thus, the coating thickness varies greatly.

Air voids in the coating layer increase with the applied quantity of lacquer and reduce the diffusion resistance. The dependency of water sorption and diffusion characteristics on wood moisture content explains the increasing accretion of moisture in wood under a defect in the coating. If coated wood has a defect it absorbs water in this area. There the wood humidity increases and the water vapor resistance decreases. Therefore water penetrates quickly and deeply into the wood. If it is dried afterwards, the wood will first desorb the water in the region of the defect, leading to a increase of the water vapor resistance in this area. Subsequently the diffusion stops and the moisture remains inside the wood. The moisture profiles of the neutron transmission measurements show that if the direction of the diffusion is to the outside, no moisture is accumulating underneath a coating.

The neutron tomographies show that water penetrates wood through a drilled hole. The process starts rapidly and slows with increasing water content in the sample.

Additionally, the penetration of water through a defect in the coating strongly depends on the injured wood structures. Water is mainly transported in the direction of the injured capillaries. The adhesive strength of the coating on the substrate is reduced with increasing moisture content. Water underneath the coating reduces the adhesion by 48%.

To verify that the humidity in wood is increased through defects, the drying process of such defects should be examined more closely

A neutron tomography that records the water absorption and drying, could garner a deeper understanding of the underlying processes.

A periodic humidification and dehumidification on a defect in a coating could potentially show how the moistening works.

Inhalt

Kurzfassung	ii
Abstract	iii
Vorwort	vii
1 Einleitung	
1.1 Ausgangslage	1
1.2 Zielstellung	3
1.3 Vorgehensweise	4
2 Stand des Wissens	
1.1 Interaktion von Holz und Wasser	6
2.1 Holzabbau	11
2.2 Beschichtungssysteme im Aussenbereich	13
2.3 Neutron Imaging	15
3 Material	
3.1 Beschichtungen	18
3.2 Fichte	19
3.3 Übersicht Probenumfang	19
3.4 Kennwerte des Feuchtetransports	21
3.4.1 Definierte Beschädigung an Beschichtungen	21
3.5 Neutronenradiografie	22
3.5.1 Diffusion von Wasserdampf	22
3.5.2 Neutronenradiografie bei Wassereinwirkung an Beschädigung	22
3.6 Neutronentomografie	23
3.6.1 Neutronentomografie bei Wassereinwirkung an Beschädigung	23
3.7 Nasshaftfestigkeit	23

4	Methoden	
4.1	Beschichtungen	
4.1.1	Applikation der Beschichtung	24
4.1.2	Beurteilung der Beschichtung	24
4.2	Kennwerte des Feuchtetransports	26
4.2.1	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ	27
4.2.2	Wasseraufnahmekoeffizient A_w	30
4.2.3	Diffusionskoeffizient D	31
4.3	Neutronenradiografie	32
4.3.1	Diffusion von Wasserdampf	32
4.3.2	Eindringen von Wasser an Beschädigung	37
4.4	Neutronentomografie	38
4.4.1	Neutronentomografie bei Wassereinwirkung an Beschädigung	38
4.5	Nasshaftfestigkeit	39
5	Ergebnisse und Diskussion	
5.1	Beschichtung	40
5.1.1	Trockenschichtdicke	40
5.1.2	Beurteilung der Beschichtung	41
5.2	Kennwerte des Feuchtetransportes	45
5.2.1	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ	45
5.2.2	Wasseraufnahmekoeffizient A_w	50
5.2.3	Diffusionskoeffizient D	52
5.3	Weitere Kennwerte	54
5.4	Neutronenradiografie	57
5.4.1	Diffusion von Wasserdampf	57
5.4.2	Eindringen von Wasser an Beschädigungen	60
5.5	Neutronentomografie bei Wassereinwirkung an Beschädigung	62
5.6	Nasshaftfestigkeit und Bruchbilder	65
6	Zusammenfassung	68
7	Kurzfassung	Fehler! Textmarke nicht definiert.

8 Verzeichnisse

8.1	Literaturverzeichnis.....	70
8.2	Abbildungsverzeichnis.....	72
8.3	Tabellenverzeichnis	74
8.4	Normenverzeichnis	75

Vorwort

Die Berner Fachhochschule in Biel sieht für den Studiengang Bachelor of Science in Holztechnik ein Praktikum vor. Dieses habe ich an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich am Institut für Baustoffe, Gruppe Holzphysik, absolviert. Innerhalb dieses Praktikums habe ich die nun vorliegende Arbeit verfasst.

Holz ist mir, da ich aus einer Schreinerfamilie stamme, von Kindesbeinen an vertraut. Das Beschichten von Holz und die damit verbundenen Probleme sind mir spätestens seit meiner Schreinerlehre bekannt. Als Holzbildhauer habe ich ausserdem einen starken Bezug zur Dauerhaftigkeit von Holz im Aussenbereich. Das Arbeiten an dieser Thesis hat mein Verständnis für Holz und Beschichtungen weiter vertieft und mich persönlich weiter gebracht. Auch die Arbeit in der Holzphysikgruppe und mit den beteiligten Partnern, dem Paul Scherrer Institut und der Berner Fachhochschule gewährten mir lehrreiche Einblicke in die Welt der Forschung.

Bedanken möchte ich mich deshalb beim Bundesamt für Umwelt und dem Fond zur Förderung der Wald- und Holzforschung für die Projektfinanzierung.

Weiter bedanke ich mich bei den beteiligten Industriepartnern namentlich bei der Bosshard + Co. AG, der Kabe Farben GmbH, der Karl Bubenhofer AG sowie der Keimfarben GmbH für die kostenlose Bereitstellung der verschiedenen Beschichtungssysteme.

Ein herzliches Dankeschön an Herrn Prof. Dr. Niemz und die Kollegen der Arbeitsgruppe Holzphysik des Instituts für Baustoffe an der ETH Zürich für die gute Zusammenarbeit und das kollegiale Arbeitsklima.

Ein weiterer Dank geht an Herrn Dr. Eberhard Lehmann und Herrn Dr. David Mannes von der Neutron Imaging and Activation Group am Paul Scherrer Institut in Villingen für die Möglichkeit die Anlagen zu nutzen und die Unterstützung beim Auswerten der Neutronentransmissionsmessungen.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Dr. Thomas Volkmer und Frau Dr. Marion Noël die mir als Betreuer zur Seite standen und immer Zeit für mich gefunden haben.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Das Forschungsprojekt des Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung vom Bundesamt für Umwelt BAFU, wird in der Arbeitsgruppe Holzphysik am Institut für Baustoffe der ETH Zürich durchgeführt. Beteiligte Partner sind das Paul Scherrer Institut in Villingen (PSI) und die Berner Fachhochschule Architektur Holz und Bau in Biel (BFH AHB).

Mit der zunehmenden Industrialisierung änderte sich auch der ästhetische Anspruch des Menschen. Glatte, glänzende Oberflächen waren lange Zeit der privilegierten Oberschicht vorbehalten, heutzutage sind diese auch an Massenprodukten zu finden. Diese Entwicklung führte dazu, dass der Markt optisch einwandfreie Oberflächen in gleichbleibender Qualität verlangt. Die Oberfläche von unbehandeltem Holz verändert jedoch mit der Zeit ihre Beschaffenheit und Farbe. Gründe dafür sind UV-Strahlung, Temperatur und freie Bewitterung. Direkte Sonneneinstrahlung, kann vor allem im Sommer, während des Tagesverlaufes, zu sehr hohen Temperaturschwankungen an Aussenbauteilen führen. Diese Temperaturdifferenzen, sowie der Einfluss von Wasser lassen Holz Quellen und Schwinden. In der Folge entstehen Risse im Holz und in der Beschichtung und lassen Wasser sehr leicht eindringen. Dadurch findet ein Auffeuchten des Holzes statt und ein Mikroklima entsteht. Was den biotischen Holzabbau fördert. Holz ist diesen Einflüssen im Aussenbereich verstärkt ausgesetzt. Einige Holzarten sind für den Aussenbereich besser geeignet als andere. Die Norm DIN EN 350-2 teilt Holzarten in Dauerhaftigkeitsklassen ein (Tabelle 1.1).

Tabelle 1.1: Dauerhaftigkeitsklassen einiger Holzarten nach DIN 350-2 [8]

Holzart	Dauerhaftigkeitsklasse
Robinie (<i>Robinia pseudoacacia</i> L.)	1-2 sehr dauerhaft bis dauerhaft
Eiche (<i>Quercus robur</i> L.)	2 dauerhaft
Lärche (<i>Larix decidua</i> Mill.)	3-4 mässig bis wenig dauerhaft
Fichte (<i>Picea abies</i> Karsten)	4 wenig dauerhaft
Roskastanie (<i>Aesculus hippocastaneum</i> L.)	5 nicht dauerhaft

Abbildung 1.1 zeigt die Folgen einer 11-jährigen Bewitterung anhand einer Holzart der Dauerhaftigkeitsklasse 5 „nicht dauerhaft“. Die Skulptur aus Roskastanien ist ca. 1m hoch und hat einen Durchmesser von ca. 30cm. Bei der Fertigstellung 2002 lag die Holzfeuchte im Bereich der Fasersättigung (23%) die Skulptur war rissfrei. Vier Jahre später zeigten sich tiefe Risse und eine deutliche Verfärbung infolge des vorangeschrittenen Holzabbaus. Die Oberfläche ist zum Teil mit Algen und Moos bewachsen. Weitere sieben Jahre später war ein weiter fortgeschrittener Pilzbefall zu beobachten, während sich vorhandene Risse vergrößert hatten und neue hinzukamen.



Abbildung 1.1: Alterungsprozess einer Gartenskulptur aus Roskastanie

Bei sehr dauerhaften und dauerhaften Holzarten wie z.B. Robinie, Edelkastanie und Eiche tritt eine Schädigung nicht so rasch ein. So kann die Robinie viele Jahre unbehandelt im Freien überdauern. Trotz dieser hohen natürlichen Dauerhaftigkeit fängt sie schon nach kurzer Zeit an grau zu werden. Auch an trockenen und geschützten Stellen kann sie sich rasch hellgrau bis silbergrau verfärben und bekommt feine Oberflächenrisse ohne, dass ein eigentlicher Holzabbau statt findet.

Erhöhte Feuchtigkeit im Holz bildet die Grundlage für holzersetzende Organismen und fördert eine biogene Holzzerstörung. Der echte Hausschwamm kann sich bereits ab einer Holzfeuchte von ca. 22% und Temperaturen über 5°C ansiedeln (Sutter, 2002). Die auftretenden Schäden reichen von Rissbildung bis hin zu Materialversagen.

Um Holz vor Feuchtigkeit und somit vor Holzabbau zu schützen werden Beschichtungen eingesetzt. Sie reduzieren im Allgemeinen die Wasseraufnahme von Holz. Durch Risse und Abplatzungen in der Beschichtung können dennoch grosse Mengen Wasser eindringen. Auf Abbildung 1.2 sind solche Schadensbilder zu erkennen. Die Abplatzungen der Farbe im unteren Teil einer vertikalen Fassadenschalung (links), mit Nut und Kamm, lassen Wasser ins Holz eindringen. Es sind Feuchteansammlungen um die Risse herum erkennbar. Ein Holzabbau findet statt, wie die Verfärbungen im freigelegten Holz zeigen. Rechts sind Abplatzungen und die Bildung von Rissen aufgrund einer Blasenbildung an der Deckschicht zusehen, unter dem Decklack ist die Grundierung sichtbar.



Abbildung 1.2: Schadensfälle an vertikalen Fassadenschalungen

Die wesentliche Aufgabe eines Holzschutzes ist allgemein, Holz vor Wasser und freier Bewitterung zu schützen, um die optischen und technischen Anforderungen ausreichend lange zu gewährleisten..

1.2 Zielstellung

Um die Innovation von Holzschutzprodukten im Aussenbereich zu fördern, ist ein erweitertes Verständnis über das Verhalten von Feuchtigkeit in beschichtetem Holz notwendig. Dafür müssen Kenntnisse über den Feuchtigkeitstransport und eventuelle Feuchtekonzentrationen in behandeltem Holz vertieft werden. Dabei soll die Qualität der Trockenschichtdicke und der Einfluss von Beschädigungen genauer untersucht werden. Des Weiteren müssen der Zeitfaktor, die Richtung des Diffusionsstroms und der Umstand, ob Wasserdampf oder Wasser wirken, besonderes beachtet werden. Aus diesem Anspruch heraus ergibt sich folgende Zielstellung:

Aussagen zum Feuchtetransport und der Feuchteverteilung in beschichtetem Holz unter Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften, sowie der Schichtdicke und der Qualität der Beschichtung. Lokale Feuchtekonzentrationen werden mit Hilfe von Neutronentomografie und Neutronenradiografie am Paul Scherrer Institut in Villingen aufgezeichnet.

Meilensteine:

- Quantitative und qualitative Beschreibung verschiedener Beschichtungssysteme, um Feuchtaufnahme und Feuchtetransports zu interpretieren.
- Ermitteln der Abhängigkeit zwischen Trockenschichtdicke und Kennwerten des Feuchtetransports durch eine Variation der Auftragsmenge.
- Bestimmung des Einflusses von Beschädigungen in der Beschichtung auf die Aufnahme und Abgabe von Feuchtigkeit.
- Untersuchung der Sorptions- und Diffusionskennwerte von beschichtetem Holz, sowie das Darstellen der Feuchtaufnahme und des Feuchtdurchflusses.
- Untersuchungen zum Diffusionsverhalten in Abhängigkeit der Beschichtung, mittels Neutronenradiografie.
- Dreidimensionales Abbilden der Feuchteverteilung innerhalb beschichteten Holzes an einer Beschädigung mit Hilfe der Neutronentomografie.
- Eruiieren der Veränderung der Adhäsion zwischen Holz und Beschichtungssystem unter Einfluss von Feuchtigkeit, durch Bestimmen der Nasshaftfestigkeit.

1.3 Vorgehensweise

Es werden vier verschiedene Beschichtungssysteme für die Anwendung im Aussenbereich verwendet. Durch Variation der Auftragsmenge werden definierte Trockenschichtdicken generiert. Neben der vom Hersteller empfohlenen Auftragsmenge wird, die Hälfte der empfohlenen Menge appliziert, um eine Beschichtung mit zu gering aufgetragenem Lack wiederzugeben. Eine zu dick aufgetragene Beschichtung entsteht durch Auftrag der doppelten Lackmenge. Die Trockenschichtdicke hat einen entscheidenden Einfluss auf das Eindringverhalten von Feuchtigkeit. Mit zunehmender Trockenschichtdicke nimmt im Allgemeinen das Eindringvermögen ab. Die Beschichtung wird weiter durch eine mikroskopische Analyse qualitativ und quantitativ untersucht. Um die Transportvorgänge von Wasser in beschichteter Fichte zu untersuchen, wird als Kennwert der Wasseraufnahmekoeffizient A_w nach DIN EN ISO 15 148 ermittelt [2]. Des Weiteren wird die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ gemäss Norm DIN EN ISO 12 572 untersucht [3]. Ein Feuchtestrom wird in zwei Richtungen betrachtet. Durch die Beschichtung ins Holz und vom Holz durch die Beschichtung. Diese Diffusionsrichtungen werden durch drehen der einseitig beschichteten Proben definiert.

Verbindungsmittel wie Schrauben und Nägel beschädigen i.d.R. eine Beschichtung. Deshalb wird der Einfluss von Beschädigungen genauer betrachtet. Hierfür werden definierte Schadstellen in Form eines Klingenschnittes und eines Sägeschnittes in die Beschichtung eingebracht.

Neutron Imaging als Werkzeug der zerstörungsfreien Materialprüfung ermöglicht das lokale Abbilden von Feuchteprozessen zu verschiedenen Zeitpunkten bei hoher Ortsauflösung. Neutronenradiografie bildet dabei die Feuchte zweidimensional ab und Neutronentomografie zeigt die Feuchteverteilung dreidimensional. Die nötigen Einrichtungen stehen am Paul Scherrer Institut in Villingen zur Verfügung. In Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Neutron Imaging and Activation werden die Versuche dort durchgeführt.

Abplatzungen und Blasenbildung entstehen durch Feuchte unter der Beschichtung. Diese reduzieren die Adhäsion. Um die Reduktion der Adhäsion bei verschiedenen Feuchtearten zu untersuchen werden nach DIN EN ISO 4624 Abreissversuche zur Beurteilung der Haftfestigkeit durchgeführt [5]. Drei Konditionierungen geben dabei verschiedene Feuchteinflüsse wieder. Im Normalklima konditionierte Proben zeigen die Haftfestigkeit auf Holz im ausgeglichenen Zustand. Im Dampfdruckgefälle wird ein Diffusionsstrom vom Holz durch die Beschichtung generiert. Ausserdem wird eine Wassersäule auf beschichtete Fichte aufgesetzt, um das Anlagerung von freiem Wasser unter der Beschichtung herbei zu führen. Die Vorgehensweise ist in Tabelle 1.2 zusammengefasst.

Tabelle 1.2: Versuchsgliederung

Bestimmung der Trockenschichtdicke	
- Beschichtungssysteme 1, 2, 3 und 4	
- <u>3 Auftragsmengen</u>	
halbe Auftragsmenge	
empfohlene Auftragsmenge	
doppelte Auftragsmenge	
Sorptions- und Diffusionskennwerte	
- 2 Versuchsaufbauten (Dry- und Wet-Cup)	
- Beschichtungssysteme 1, 2, 3 und 4	
- <u>3 Auftragsmengen</u>	
halbe Auftragsmenge	
empfohlene Auftragsmenge	
doppelte Auftragsmenge	
- <u>2 Diffusionsstromrichtungen</u>	
beschichtete Fläche zum Normalklima ausgerichtet	
beschichtete Fläche zum Cup-Inneren ausgerichtet	
- 3 Wiederholungen je Variante	
mit Klingenschnitt in Beschichtung	
- Wet-Cup	
- Beschichtungssysteme 1, 2, 3 und 4	
- empfohlene Auftragsmenge	
- <u>2 Diffusionsstromrichtungen durch Drehen der Proben</u>	
beschichtete Fläche zum Normalklima hin ausgerichtet	
beschichtete Fläche zum Cup-Inneren hin ausgerichtet	
Neutronenradiografie (zweidimensional)	
Proben mit Dampfdruckgefälle über den Probenquerschnitt	Proben mit Wassersäule auf der Beschichtung
- diffusionsoffene Beschichtung (System 4)	- mit Klingenschnitt in Beschichtung
- diffusionsdichte Beschichtung (System 3)	- mit Sägeschnitt in Beschichtung
- ohne Beschichtung	- ohne Beschichtung
- 2 Wiederholungen je Variante	- diffusionsdichte Beschichtung (System 3)
Neutronentomografie (dreidimensional)	
- mit Bohrung in Beschichtung	
- diffusionsdichte Beschichtung (System 3)	
- empfohlene Auftragsmenge	
Bestimmung des Nasshaftfestigkeit mit Abreissversuchen	
- 3 Konditionierungsarten	
im Normalklima	
mit Dampfdruckgefälle	
mit Wassersäule	
- Beschichtungssysteme 1, 2, 3 und 4	
- empfohlene Auftragsmenge	
- 5 Wiederholungen je Variante	

2 Stand des Wissens

Als vielseitiger, insbesondere aber nachwachsender Rohstoff ist Holz bis heute eines der wichtigsten Pflanzenprodukte als Rohstoff für die Weiterverarbeitung zu Bauprodukten, aber auch als ein regenerativer Energieträger. Die Eigenschaften von Holz sind geprägt durch seine organische Natur, seine Porosität, seine Anisotropie und seine Hygroskopizität. Holzeigenschaften sind grundsätzlich artspezifisch, variieren aber auch innerhalb einer Art bedingt durch seine Herkunft. Die Kenntnisse dieser Eigenschaften bilden ein relativ grosses Wissensgebiet.

1.1 Interaktion von Holz und Wasser

Holz ist ein anisotropes, kapillarporöses Material. Das bedeutet, dass die Holzeigenschaften aufgrund des strukturellen Aufbaus richtungsabhängig sind. Die Struktur wird dabei hauptsächlich von langgestreckten Hohlräumen, den Kapillaren, gebildet. Der Zellhohlraum wird als Lumen bezeichnet. Der kapillare Aufbau und die chemischen Baustoffe machen es hygroskopisch. In den Hohlräumen wird Wasser transportiert und gespeichert. Die Struktur wird bei der Fichte durch Tracheiden und Parenchyme gebildet. Zwischen den Gefässen regeln Tüpfel den Wasserstrom im lebenden Baum. Die Zellwände dieser Strukturen bestehen aus Lignin, Cellulose und Hemicellulose. In den chemischen Bestandteilen dieser Stoffe befinden sich OH-Gruppen. An diesen kann sich Wasser durch van-der-Waals-Kräfte anlagern. Abbildung 2.1 zeigt die hierarchische Struktur von Nadelholz.

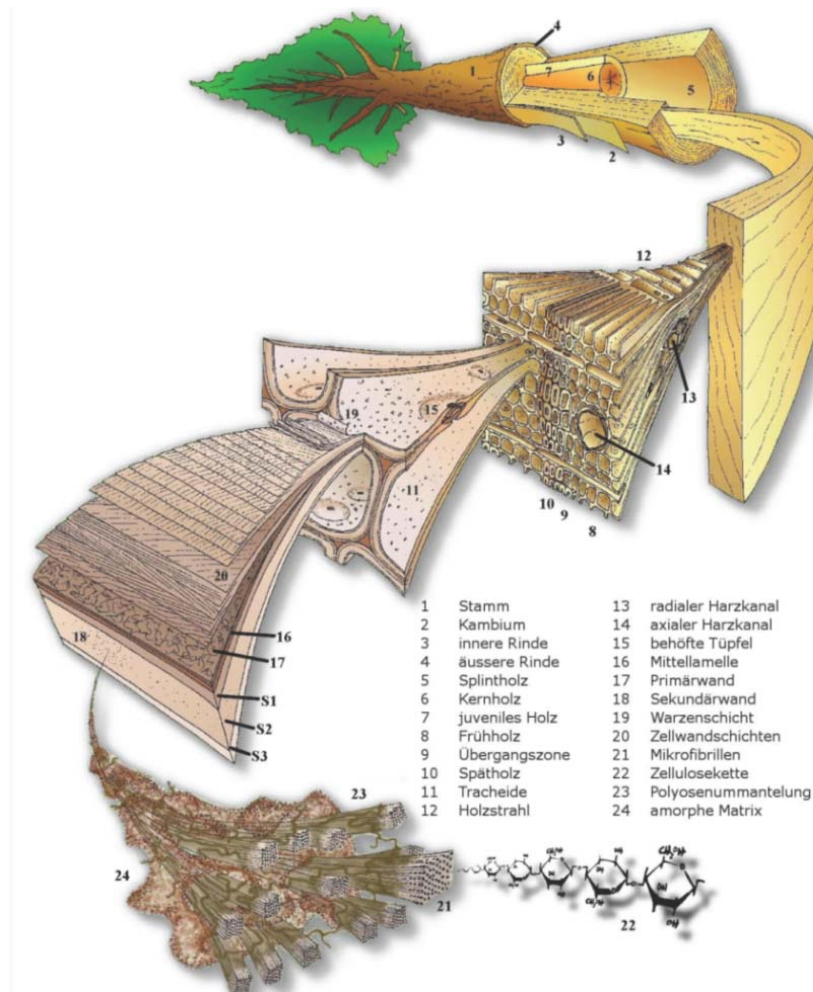


Abbildung 2.1: Hierarchische Struktur von Nadelholz (Forschungszentrum für Holztechnologie der Universität von Canterbury, Christchurch, Neuseeland)

Aus dieser Struktur resultieren drei anatomischen Hauptrichtungen: Longitudinal (L), Radial (R) und Tangential (T). Diese drei Richtungen spannen drei Ebenen auf. Die LR-, die LT- und die RT-Ebene. Weicht eine Ausrichtung von einer Hauptrichtung ab, wird die Abweichung in Grad zu einer der Richtungen angegeben. So wird die Richtung x auf Abbildung 2.2 mit RT45° bezeichnet.

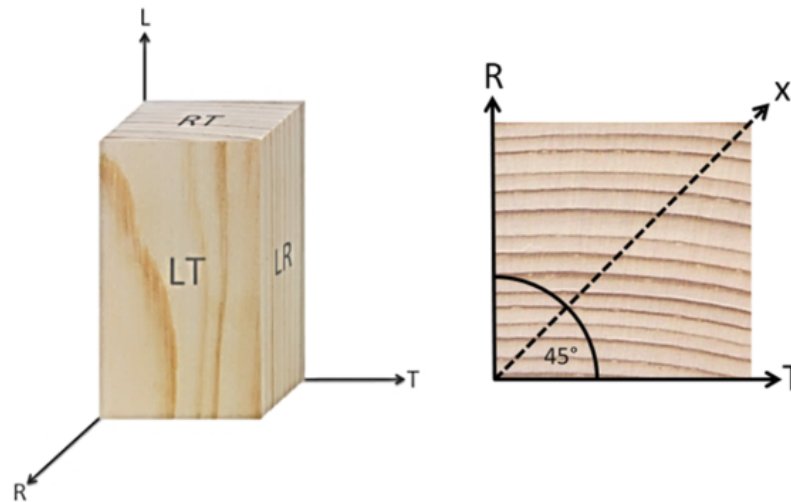


Abbildung 2.2: Anatomische Richtungen im Holz

Holz strebt quasi ständig einer Ausgleichsfeuchte zu, welche abhängig ist von der relativen Feuchte des umgebenden Mediums, der Temperatur und dem herrschenden Luftdruck. Abbildung 2.3 zeigt diesen Zusammenhang am Beispiel von Sitka Fichte (*Picea sitchensis*).

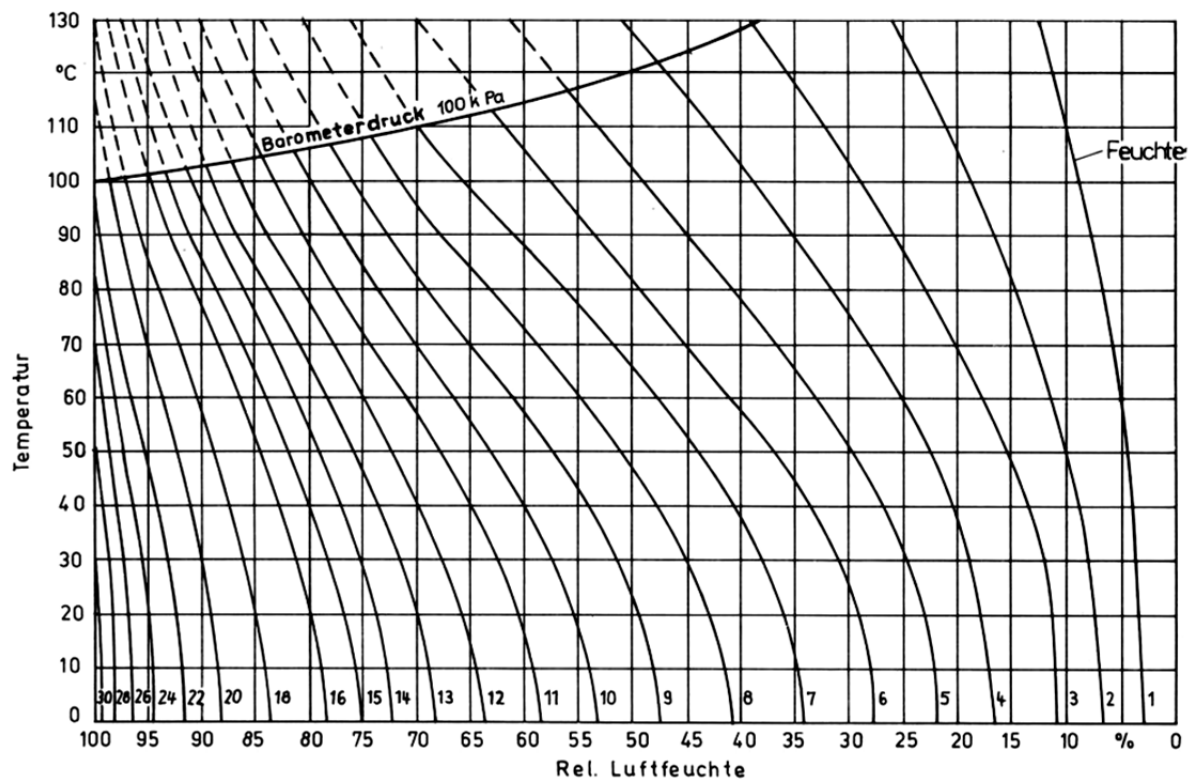


Abbildung 2.3: Ausgleichsfeuchte Sitka-Fichte (Niemz, 1993)

Die Bindungsarten von Wassers in Holz werden in Chemisorption, Adsorption, Kapillarkondensation und freie Einlagerungen unterteilt. Die Chemisorption bezeichnet die Aufnahme von Wassermolekülen in die Celluloseketten und findet zwischen 0% und 7% Holzfeuchte statt. Die Adsorption beschreibt das Anlagern von Wasser im Mikrosystem zwischen 7% und 15%. Die Kapillarkondensation, zwischen 15% und 30%, ist das Auskondensieren von Wasser an der Oberfläche der Kapillare. Bei ca. 30% Holzfeuchte ist der Fasersättigungspunkt (FSP) erreicht. Das heisst die Zellwände Wasser gesättigt. Es beginnt die Einlagerung Wasser in den Zellhohlräumen (Niemz, 1993). Abbildung 2.4 zeigt diese Bindungsarten.

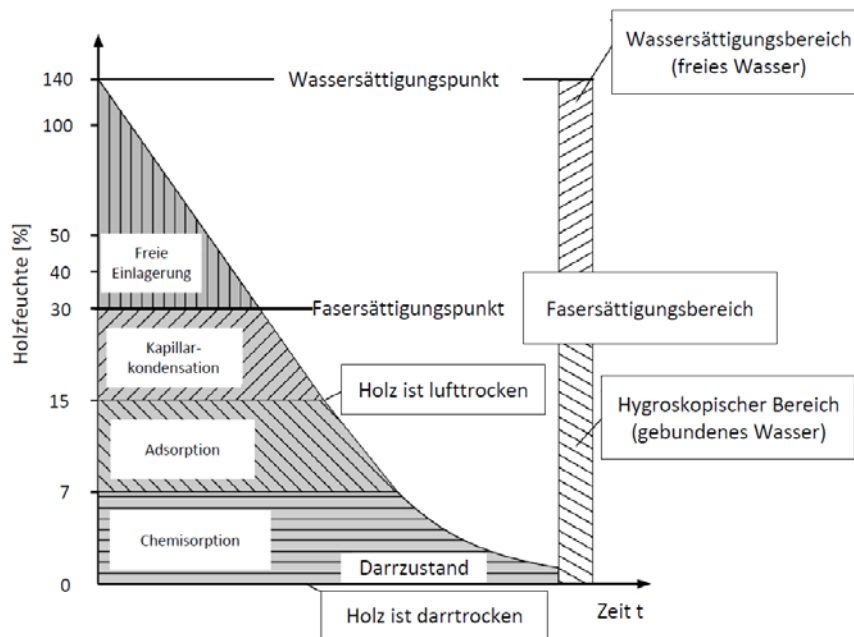


Abbildung 2.4: Bindungsformen von Wasser im Holz (Niemz, 1993)

Die Holzfeuchte gibt an, wie viel Wasser im Verhältnis zur Darrdichte im Holz enthalten ist. Sie wird nach der Norm DIN 52183 „Prüfung von Holz: Bestimmung des Feuchtegehalts“ wie folgt berechnet [4] (Gleichung 2.1)

$$u = \frac{m_u - m_{dtr}}{m_{dtr}}$$

Gleichung 2.1

Dabei ist:

u	Die Holzfeuchte	[%]
m_u	Die Masse der feuchten Probe	[kg]
m_{dtr}	Die Masse der darrtrockenen Probe	[kg]

In der Physik unterteilt man die Bewegung von Stoffen i. A. in Sorption, Desorption und Diffusion. Sorption ist dabei die Wasseraufnahme und die Desorption die Abgabe. Als Diffusion wird die Bewegung von Teilchen bezeichnet, sobald ein Konzentrationsunterschied zwischen zwei Bereichen besteht. Die Diffusion ist ein gerichteter Prozess, da die Teilchen von Bereichen höherer Konzentration nach Bereichen niedrigerer Konzentration diffundieren. Dieser Prozess findet solange statt bis ein Konzentrationsausgleich eintritt (Kuchling, 2011). Die Diffusion kann in drei verschiedene Arten unterteilt werden: Die Selbstdiffusion, die Gegendiffusion und die klassische Fick'sche Diffusion. Die Selbstdiffusion findet nur innerhalb derselben Substanz statt z. B. in Flüssigkeiten oder Gasen. Die Gegendiffusion findet entlang entgegengesetzter Gradienten statt und ist somit ein Stoffaustausch in beide Richtungen. Bei der Fick'sche Diffusion findet ein Stoffausgleich entlang eines Gradienten statt. Diese Diffusion kommt bei der Interaktion von Wasser und Holz zum Tragen und

wird mit dem ersten und dem zweiten Fick'sche Gesetz beschrieben. Die Diffusionsstromdichte ist die Grösse, die angibt wie viele Teilchen eines Stoffes, eine bestimmte Fläche eines anderen Stoffes durchfliessen. Das erste Fick'sche Gesetz beschreibt dabei die Geschwindigkeit dieses Vorganges, entlang eines Konzentrationsgradienten, in einer bestimmten Richtung (Foell, 2009). Das erste Fick'sche Gesetz berechnet sich nach Gleichung 2.2.

$$J = -D \cdot \nabla_c$$

Gleichung 2.2

Dabei ist:

J	die Diffusionsstromdichte	$[\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$
D	der Diffusionskoeffizient	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
∇_c	der Gradient der Teilchenkonzentration	$[-]$

Der Gradient der Teilchenkonzentration wird mit Hilfe der in Abbildung 2.5 dargestellten Feuchtekonzentrationen $c(x_1)$ und $c(x_2)$ sowie der Referenzebene gebildet.

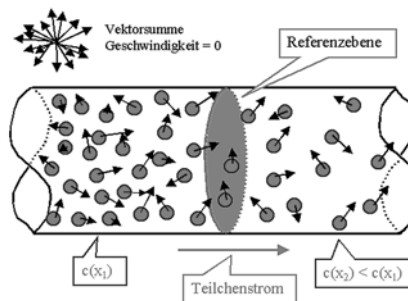


Abbildung 2.5: Erstes Fick'sches Gesetz (Foell, 2009)

Das zweite Fick'sche Gesetz beschreibt die Konzentrationsänderung eines Stoffes als Funktion der Zeit und des Ortes und wird in Form der Kontinuitätsgleichung für den dreidimensionalen Fall nach Gleichung 2.3 berechnet (Fick, 1855).

$$\frac{\partial_c}{\partial_t} = \nabla_c \cdot (D \cdot \nabla_c)$$

Gleichung 2.3

Dabei ist:

∂_c / ∂_t	Konzentrationsunterschied bezogen auf den Ort c und die Zeit t	$[-]$
D	Der Diffusionskoeffizient	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
∇_c	Der Gradient der Teilchenkonzentration	$[-]$

Schematisch kann der dreidimensionale Fall wie in Abbildung 2.6 dargestellt werden. Dabei wird die Referenzebene durch ein Referenzvolumen mit der Feuchtekonzentration $c(x)$ ersetzt. In dieses Volumen diffundiert der Feuchtestrom $j(x)$. Im Volumen verändert sich dessen Teilchenstromdichte, so dass er beim Herausdiffundieren, aus dem Volumen, als Feuchtestrom $j(x+dx)$ bezeichnet wird.

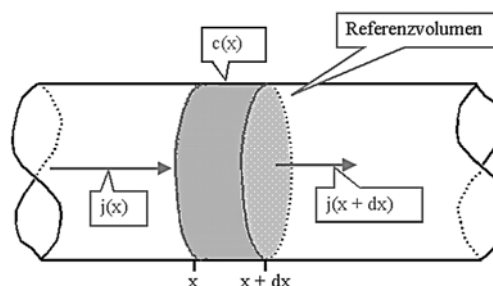


Abbildung 2.6: Zweites Fick'sches Gesetz (Foell, 2009)

Feuchtigkeit in Form von Wasserdampf diffundiert, wenn ein Konzentrationsgefälle über einen Querschnitt anliegt. Während Fick dies auf die Feuchtekonzentration bezieht, verwendet Siau einen Gradienten aufgrund eines Potentialunterschiedes des Wasserdampfpartialdrucks (Siau, 1995). Wadsö stellte 1993 eine Feuchte- und Dickenabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten bei Fichte fest (Wadsö, 1993a) (Wadsö, 1993b). Daraus schloss er auf ein „nicht Fick’sches“ Sorptionsverhalten bei Holz. Nach Wadsö kann die Diffusionsstromdichte für Holz, bei der Konzentration c und dem Partialdruck p , mit einer Kombination der Fick’schen Gesetze beschrieben werden (Wadsö, 1994) (Gleichung 2.4.)

$$J = -D_c(c, p) \cdot \frac{\partial c}{\partial x} - D_p(p, c) \cdot \frac{\partial p}{\partial x}$$

Gleichung 2.4

Frandsen entwickelte 2007 ein „Multi-Fick’sches“ Feuchtetransportmodell um die „Nicht-Fick’schen“ Effekte in Holz zu beschreiben (Frandsen, et al., 2007) (Gleichung 2.5 und Gleichung 2.6):

$$\frac{\partial c_v}{\partial t} = \nabla_c \cdot (D_v \cdot \nabla_{c_v}) + \dot{c}$$

Gleichung 2.5

$$\frac{\partial c_b}{\partial t} = \nabla_c \cdot (D_b \cdot \nabla_{c_b}) + \dot{c}$$

Gleichung 2.6

Er unterscheidet dabei die Dampfphase v und die gebundene Wasserphase b , welche zu einer Sorptionsrate $\dot{c}$ führen. In Abbildung 2.7 ist der „multi- Fick’sche“ Feuchtetransport schematisch abgebildet. Links der Transport innerhalb des Holzes zeigt, wie Diffusion durch Lumen und durch Zellwände stattfindet. Die Feuchte gelangt dabei entweder durch die Zellwand, oder durch Tüpfel von einem Hohlraum in den nächsten. An den Zellwänden wird die ankommende Feuchte durch Sorption aufgenommen, diffundiert durch die Zellwand und wird auf der anderen Seite durch Adsorption wieder abgegeben. Rechts ist der Übergang des Feuchtestroms der Luft ins Holz dargestellt.

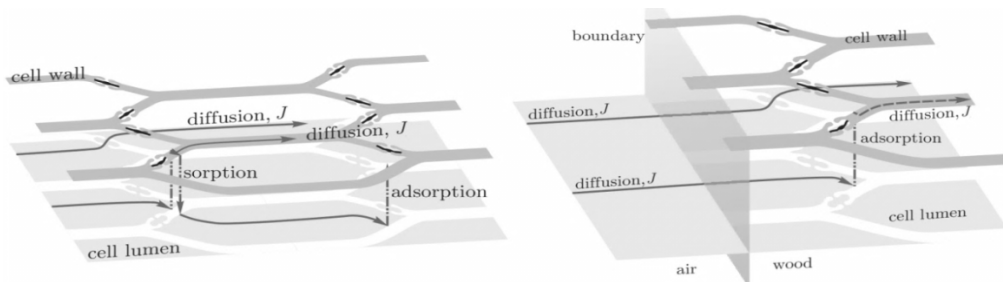


Abbildung 2.7: Multi-Fickscher Wassertransport nach Frandsen (Frandsen, et al., 2007)

Anhand dieser Darstellung wird deutlich, dass die Anisotropie des Holzes eine entscheidende Rolle spielt. Siau zählt Porosität, Zellwandaufbau, Kapillarität zu den wesentlichen Faktoren der Feuchtebewegung (Siau, 1971). Sonderegger 2011 zeigt die Richtungsabhängigkeit des Diffusionsstroms bei Fichte (Sonderegger, 2011) (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Richtungsabhängiger μ -Wert von Fichte (Sonderegger, 2011)

Richtung	μ [-]
Longitudinal	3.7
Radial	41.8
Tangential	35.0

2.1 Holzabbau

Unter dem physikalischen Holzschutz werden Massnahmen verstanden, die eine Zerstörung von Holz durch Pilze, Insekten oder Meerestiere verhüten und eine möglichst lange Gebrauchsdauer gewährleisten [8]. Die Zerstörung von Holz bedeutet, dass es entweder in seine Grundbausteine aufgeschlüsselt oder durch andere Einflüsse abgetragen wird. In Abbildung 2.8 sind die verschiedenen Holzabbauarten aufgelistet.

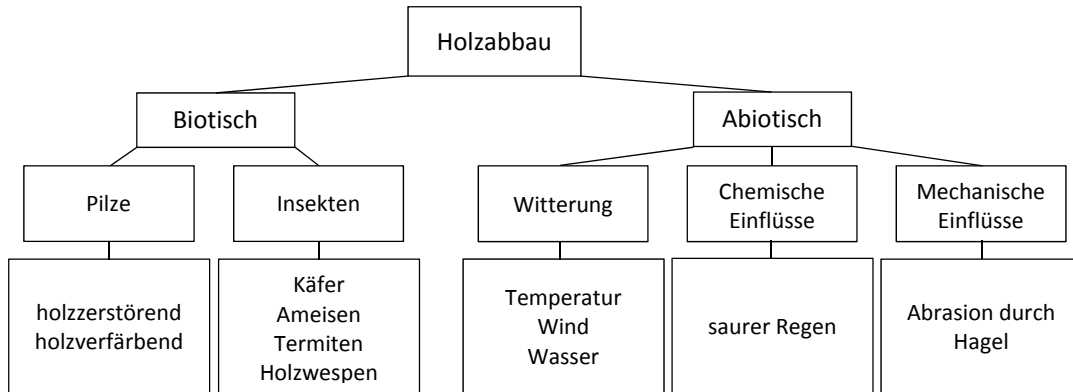


Abbildung 2.8: Gliederung des Holzabbaus (Rothkamm, et al., 2003)

Den Holzabbau durch Lebewesen nennt man biotischen Abbau. Das Abtragen von Holz durch Einflüsse wie Temperatur, UV-Strahlung, Witterungseinflüsse, sowie chemische und mechanische Einflüsse wird als abiotischer Holzabbau bezeichnet. UV-Strahlung zersetzt das Lignin an der Oberfläche von unbehandeltem Holz. Regen wäscht dann die Restprodukte dieser Zersetzung ab und zurück bleibt Cellulose. Diese ist ohne das Lignin sehr anfällig auf Wasser und wird von Algen, Flechten oder Moos befallen (Sutter, 2002). Holz vor Abbau zu schützen, heisst somit es in erster Linie vor Feuchtigkeit zu schützen. Eine erhöhte Holzfeuchte steigert auch das Risiko eines biotischen Abbaus. Feuchteansammlungen in beschichtetem Holz können zu einem Pilzbefall führen, der zum Teil von aussen nicht erkannt werden kann.

Die abiotischen Abbauarten sind sehr leicht zu erkennen, da sie vor allem an der Oberfläche stattfinden. Ein Insektenbefall wird i.d.R. erst erkannt, wenn sich die Larven zu flugfähigen Insekten entwickelt haben und das Holz durch Ausfluglöcher verlassen. Diese holzerstörenden Insekten werden in Frischholz-, Faulholz- und Trockenholz insekten eingeteilt. Frischholz insekten befallen den lebenden Baum oder frisch eingeschlagenes Holz. Die Faulholz insekten befallen Holz im Zersetzungsprozess, während Trockenholz insekten lufttrockenes Holz bevorzugen. Sie können bereits ab einer Holzfeuchte von ca. 10% auftreten. Pilzbefall wird oft erst sichtbar, wenn ein sogenannter Fruchtkörper an der Oberfläche entsteht. Die Pilze werden in holzverfärbend und holzerstörende Pilze unterteilt. Zu den holzverfärbenden zählen Schimmelpilze, aber auch verschiedene Bläuepilze (Abbildung 2.11). Der Schimmelpilz wächst bei Holz nur auf der Oberfläche und schädigt es nicht. Bläuepilze wachsen im Holz und bauen ebenfalls keine Holzmasse ab.

Die holzerstörenden Pilze werden eingeteilt in Weiss-, Braun- und Moderfäulepilze. Weiss- und Braunfäule treten ab einer Holzfeuchte von 22% auf. Die Moderfäule tritt erst ab einer Feuchte von 55% auf. (Sutter, 2002).

Abbildung 2.9 zeigt Weissfäule bei Buche, links sind die Hyphen 24 Wochen nach Pilzbefall in den Gefässen zu sehen, rechts die verfärbten Demarkationslinien.

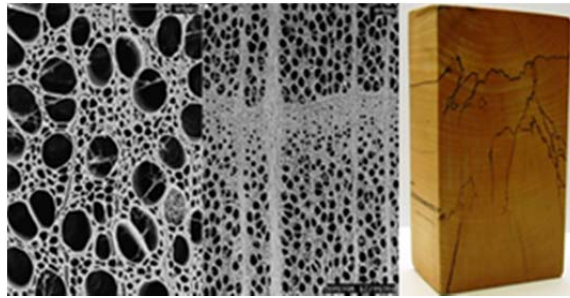


Abbildung 2.9: Weissfäule bei Buche makro- und mikroskopische Aufnahmen (ETH Gruppe Holzphysik interne Daten)

Die Braunfäule in Abbildung 2.10 erscheint braun weil sie Cellulose abbaut und dunkles Lignin zurückbleibt. Auf der rechten Aufnahme sind die Hyphen und der Abbau der Zellwände zu erkennen. Die mikroskopischen Abbildungen zeigen das Holz 24 Wochen nach Pilzbefall.

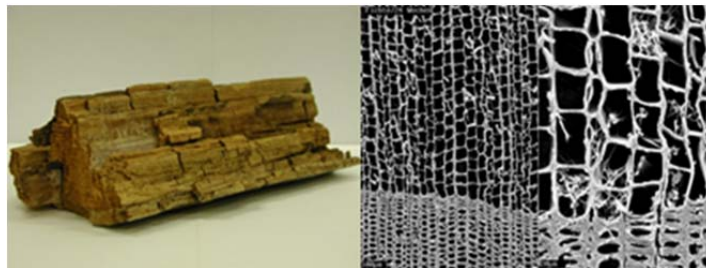


Abbildung 2.10: Braunfäule bei Fichte makro- und mikroskopische Aufnahmen (ETH Gruppe Holzphysik interne Daten)

Abbildung 2.11 zeigt Bläuepilz und Moderfäule. Die Moderfäule baut in den Zellwänden i. d. R. Lignin und Cellulose gleichermassen ab. Sie kommt häufig bei verbautem Holz mit Erdkontakt vor.



Abbildung 2.11: Links Bläuepilz in Kiefersplintholz, rechts Moderfäule (ETH Gruppe Holzphysik interne Daten)

Holz hat eine natürliche Widerstandsfähigkeit gegen den Abbau, der neben dem Feuchtegehalt auch von der Rohdichte und den Holzinhaltsstoffen abhängt. In Tabelle 2.2 sind einige Holzarten nach ihrer natürlichen Dauerhaftigkeit abgebildet.

Tabelle 2.2: Dauerhaftigkeit verschiedener Holzarten in Jahren (Leisse, 2002)

Holzart	Lebensdauer in Jahren	
	im Freien unter Dach	im Freien bewittert
Robinie (<i>Robinia pseudoacacia</i> L.)	200	150
Eiche (<i>Quercus robur</i> L.)	150	100
Lärche (<i>Larix decidua</i> Mill.)	120	65
Fichte (<i>Picea abies</i> Karst.)	60	55
Birke (<i>Betula pendula</i> Roth)	20	20

2.2 Beschichtungssysteme im Aussenbereich

Holz wird im Aussenbereich in verschiedenen Formen eingesetzt. Im Holzverbrauch Schweiz 2012 werden folgende Produktgruppen unter der Rubrik „Holz im Aussenbereich“ zusammengefasst (Neubauer-Letsch et al. 2012):

- Unterstände
- Gartenhäuser
- Terrassen/Pergolen
- Zäune
- Spieleinrichtungen
- Palisaden
- Sonstige

Aufgrund dieser exponierten Lage sind nachfolgend aufgeführte Holzbauteile ebenfalls als „im Aussenbereich verbaute Holzelemente“ anzusehen (Neubauer-Letsch et al., 2012):

- Fenster
- Rahmenverbreiterungen
- Wintergärten
- Beschattungssysteme
- Aussentüren
- Tore
- Fassade

Bauteile können, zwischen Innenraum-und Aussenklima, als Trennung zweier Klima fungieren. Wenn sich die Luftfeuchte innen und aussen unterscheidet, kommt es zu einem Diffusionsstrom durch das Bauteil hindurch. Erschwerend kommt hinzu, dass das Bauteil auf der Aussenseite der freien Bewitterung ausgesetzt ist. Spritzwasser, Schlagregen benetzen die Oberfläche und Wassertropfen bleiben lange Zeit auf der Oberfläche stehen. Auf Abbildung 2.12 ist Wasser auf einer beschichteten Fassade zu sehen, sowie die Folgen einer bewitterten Beschichtung an einem Holzzaun.



Abbildung 2.12: V.l.n.r. Wasser auf einer Fassadenschalung, Nadelholzzaun mit starkem Holzabbau

Das Design moderner Gebäude ist meist kubisch, mit geschlossenen Flächen, ohne hervorstehende Konstruktionen. Diese Gebäudeformen lassen keinen schützenden Dachüberstand zu. Ein solches Gebäude ist auf Abbildung 2.13 links zu sehen. Auf der Rechten Seite wird der Einfluss eines Dachüberstandes auf die Beschichtung deutlich. Während direkt unter dem Dach die Beschichtung auf der Schalung noch erhalten ist, ist sie etwas tiefer quasi nicht mehr vorhanden.



Abbildung 2.13: V.l.n.r. kubisches Gebäude mit Holzfassade, Schutz durch Dachüberstand

Ein chemischer Holzschutz ist aus Umweltschutzgründen oft unerwünscht. Die in der Beschichtung enthaltenen Toxine können vom Regen ausgewaschen werden. Mit dem Wasser gelangen sie ins Erdreich und weiter ins Grundwasser und in Flüsse und Seen. Lebewesen nehmen Wasser auf und mit ihm die Toxine.

Eine Beschichtung hält zum einen Wasser vom direkten Kontakt mit Holz ab, zum anderen reduziert sie den Diffusionsstrom. Ausserdem kann das Beschichten von Holz vor UV-Strahlung schützen und als dekoratives Element dienen. Zusätzlich können Schutzlacke mit Bioziden ausgerüstet werden (Rothkamm, et al., 2003). Holzschutzmassnahmen gliedern sich wie in Abbildung 2.14.

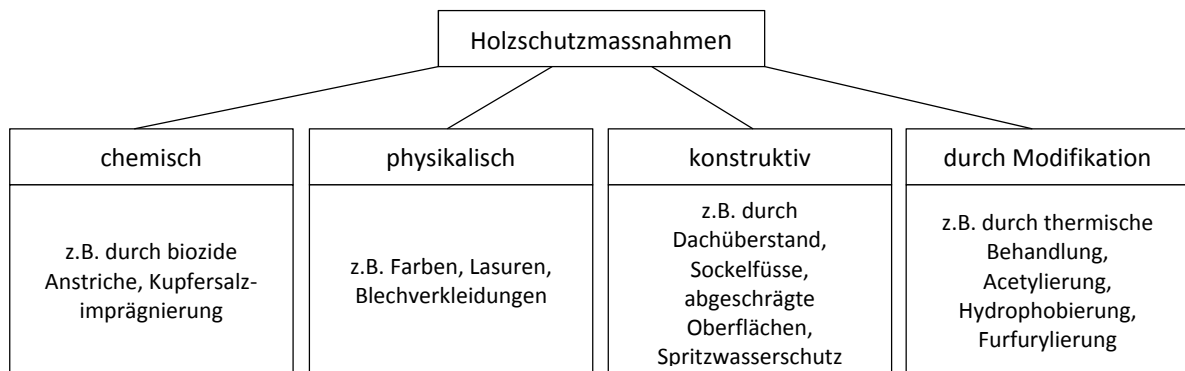


Abbildung 2.14: Gliederung von Holzschutzmassnahmen (Wagenführ, 2008) (Volkmer, 2007)

Beschichtungssysteme können grundsätzlich nach der Art der Filmbildung unterteilt werden, in: physikalisch aushärtende Systeme (Trocknung), chemisch härtende Systeme (Trocknung und Härtung) und Strahlungshärtung (Strahlenchemische Härtung). Beim der physikalischen Trocknung bildet sich die Trockenschicht durch das Verdampfen eines Lösemittels. Beim chemischen Härten bilden funktionelle Gruppen mehrdimensionale Verbindungen, ausgelöst durch den Verdunstungsvorgang des Lösemittels. Bei der Strahlungshärtung wird die Vernetzungsreaktion durch Strahlung initiiert. Dabei werden alle Bestandteile des flüssigen Lackes in den Lackfilm eingebunden. Es findet keine Verdunstung von Lösemitteln statt (Rothkamm, et al., 2003).

Die physikalisch härtenden Systeme können sehr gut mit Wasser als Lösemittel umgesetzt werden. Die Qualität wasserbasierender System hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Dennoch stehen viele Anwender diesen Systemen skeptisch gegenüber, da sie in der Vergangenheit für Weisschleier und stumpfe Oberflächen bekannt waren.

2.3 Neutron Imaging

Mit Neutronen ist es möglich Strukturen abzubilden, dabei können diese statisch oder in Bewegung erfasst werden. Die Strukturen werden durch die Wechselwirkung zwischen den Elementen und den Neutronen sichtbar. Wasserstoff hat einen besonders hohen Kontrast. Dadurch können organische Materialien und darin enthaltenes Wasser mit einer hohen Ortsauflösung abgebildet werden. Mannes et al. zeigt 2007 anhand von Fichtenproben, dass mit Neutron Imaging eine bessere Auflösungen bei kürzeren Belichtungszeiten als bei Röntgenmessungen erreicht werden können. Im Jahr 2009 verglich er den theoretischen Schwächungskoeffizienten bei der Neutronenmessung mit einem experimentell ermittelten Wert für Holz (Mannes, et al., 2009). Damit war eine weitere Grundlage zum Messen von Holz mit Neutronen gelegt. Das folgende Bild (Abbildung 2.15) zeigt eine Buddhastatue aus dem 15. Jahrhundert. Durch Neutron Imaging wurden im Innern befindlichen organischen Weihegaben gefunden ohne die Figur zu beschädigen.



Abbildung 2.15: Links Messingstatue, rechts mit Neutronen erzeugtes Schattenbild (Paul Scherer Institut)

Neutron Imaging ist eine sogenannte Transmissionsmessung. Ein Detektor erfasst die Intensität eines Neutronenstrahls, der zuvor durch ein Objekt geleitet wurde. Die Intensität des Strahles vor Eintritt in das Objekt ist höher als danach. Diese Strahlungsdifferenz entsteht durch Interaktion der Neutronen mit dem Atomkern und bildet ein zweidimensionales Schattenbild ab. Die Vereinfachte Darstellung dieses Vorganges ist in Abbildung 2.16 zu sehen. Der einfallende Neutronenstrahl $I_0(E)$ wird durch eine Holzprobe mit der Dicke z geleitet. Danach wird der übertragene Neutronenstrahl $I(E)$ von einem Detektor erfasst.

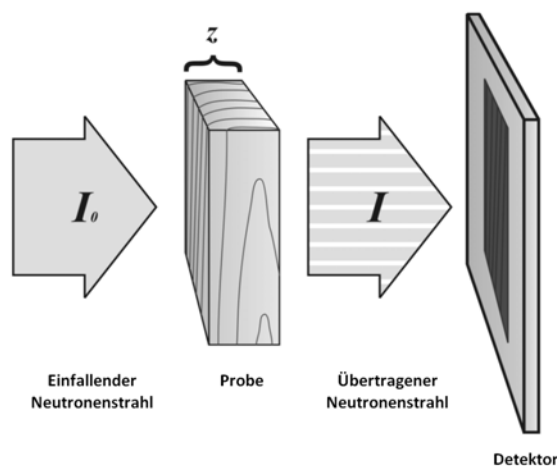


Abbildung 2.16: Vereinfachte Darstellung des Neutron Imaging (Mannes, 2009).

Wasser lässt sich mittels Neutron Imaging deshalb gut abbilden, weil Wasserstoff den Neutronenstrom stark abschwächt (Abbildung 2.17). Hier liegt der wesentliche Vorteil des Neutron Imaging gegenüber Röntgenstrahlen. Röntgenstrahlen zeigen Wechselwirkung mit den Elektronen in der Atomhülle. Dadurch steigt mit der Ordnungszahl des Elementes auch die Abschwächung des Röntgenstrahls. Neutronen hingegen haben eine grosse Wechselwirkung mit Wasserstoff. Dadurch

ist es möglich, sie für bildgebende Verfahren zur Untersuchung von organischem Material einzusetzen, da bereits geringe Mengen wasserstoffhaltigen Materials hohe Kontraste liefern (Paul Scherrer Institut, Villingen, 2010).

Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
↓ Period																		
1	H 1.008																	He 4.003
2	Li 6.941	Be 9.012											B 10.811	C 12.011	N 14.007	O 15.999	F 18.998	Ne 20.180
3	Na 22.990	Mg 24.305											Al 26.982	Si 28.086	P 30.974	S 32.065	Cl 35.453	Ar 39.948
4	K 39.098	Ca 40.078	Sc 44.956	Ti 47.88	V 50.942	Cr 52.004	Mn 54.938	Fe 55.845	Co 58.933	Ni 58.693	Cu 63.546	Zn 65.38	Ga 69.723	Ge 72.63	As 74.922	Se 78.96	Br 79.904	Kr 83.798
5	Rb 85.468	Sr 87.62	Y 88.906	Zr 91.224	Nb 92.906	Mo 95.94	Tc 98.906	Ru 101.07	Rh 102.91	Pd 106.42	Ag 107.87	Cd 112.41	In 114.82	Sn 118.71	Sb 121.76	Te 127.6	I 126.91	Xe 131.29
6	Cs 132.91	Ba 137.33		Hf 178.49	Ta 180.95	W 183.84	Re 186.21	Os 190.23	Ir 192.22	Pt 195.08	Au 196.97	Hg 200.59	Tl 204.38	Pb 207.2	Bi 208.98	Po 209	At 210	Rn 222
7	Fr -	Ra 226		Rf -	Db -	Sg -	Bh -	Hs -	Mt -	Ds -	Rg -	Uub -	Uut -	Uuq -	Uup -	Uuh -	Uus -	Uuo -
Lanthanides			La 138.91	Ce 140.12	Pr 140.91	Nd 144.24	Pm 145	Sm 150.36	Eu 151.96	Gd 157.25	Tb 158.93	Dy 162.50	Ho 164.93	Er 167.26	Tm 168.93	Yb 173.05	Lu 174.97	
Actinides			Ac -	Th 232.04	Pa 231.04	U 238.03	Np 237.05	Pu 244.06	Am 243.06	Cm 247.07	Bk -	Cf -	Es -	Fm -	Md -	No -	Lr -	

Abbildung 2.17: Wechselwirkung von Neutronen mit Elementen (Paul Scherrer Institut, Villingen, 2010).

Um einen Neutronenstrom zu generieren, gibt es neben der Kernspaltung auch die Möglichkeit der Spallation. Bei diesem Vorgang werden die Atomkerne von Blei durch Protonen beschleunigt und dazu angeregt Neutronen „abzudampfen“. Dies geschieht nicht durch den Aufprall sondern dadurch, dass der Schwermetallkern durch das Proton energetisch angeregt wird und seine Energie reduziert. Dabei gibt der angeregte Kern 10 bis 20 Neutronen ab (Paul Scherrer Institut, Villingen, 2010). In Abbildung 2.18 ist dieser Vorgang schematisch dargestellt. Im Gegensatz zur Kernreaktion findet keine weitere Kettenreaktion durch die „abgedampften“ Neutronen statt (Wenzik, 2010).

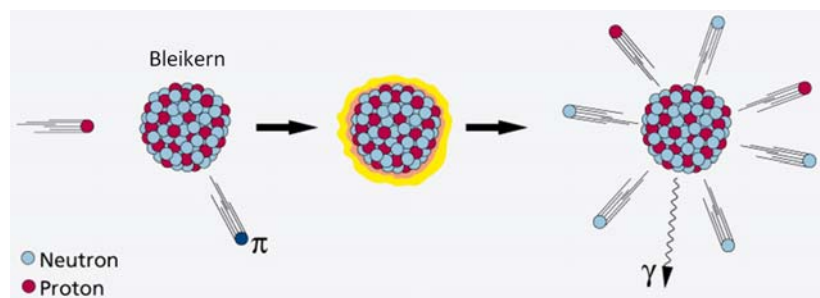


Abbildung 2.18: Schematische Darstellung der Spallation zur Gewinnung freier Neutronen (www.psi.ch)

Die so gewonnenen Neutronen sind noch zu schnell um für Neutron Imaging verwendet zu werden. Deshalb werden sie durch Kollision mit Schwerwassermolekülen im Moderator tank abgebremst. Von dort gelangen sie direkt zum Messplatz (Paul Scherrer Institut). Die Abbildung 2.19 zeigt den Cockroft-Walton-Beschleuniger und die Spallationsquelle in der sich das Target befindet.



Abbildung 2.19: Links Cockroft-Walton-Beschleuniger, rechts Spallationsquelle SINQ

Als Ergebnis einer solchen Neutronenmessung erhält man ein Schattenbild. Diese werden mit den sogenannten *Open Beam* und *Dark Current* Bildern referenziert. Beim *Open Beam* wird die Strahlungsintensität ohne Abschwächung, also ohne eine Probe im Strahl gemessen. Beim *Dark Current* wird eine Aufnahme ohne Neutronenstrahl gemacht. Somit gibt die *Open Beam* Messung den maximalen Helligkeitswert des ungeschwächten Strahls und die *Dark Current* das Hintergrundrauschen der Kamera an. Durch diese Referenzierung erhält man ein bereinigtes Schattenbild.

Neutronentransmissionsmessungen können auch dreidimensional angewendet werden. Dabei wird die Probe schrittweise um die Rotationsachse gedreht. Für dieses Verfahren liegt die Computertomografie von Hounsfield 1973 zugrunde, bei der die Messungen aus unterschiedlichen Winkeln durchgeführt werden (Hounsfield, 1973). Durch Transformation werden die fehlenden Werte zwischen den gemessenen Winkeln berechnet und ein dreidimensionales Bild erstellt. Köhler entwickelte ein Verfahren mit weniger Winkelpositionen (Köhler, 2004). Dabei werden die Winkel im Verhältnis des goldenen Schnittes unterteilt. Wiederholt wird der grösste verbleibende Winkel nach dem goldenen Schnitt geteilt. So erhält man mit weniger Messungen eine grössere Genauigkeit. Das Verfahren ist schneller und kann für Prozesse angewendet werden. Abbildung 2.20 zeigt einige dieser Winkelpositionen.

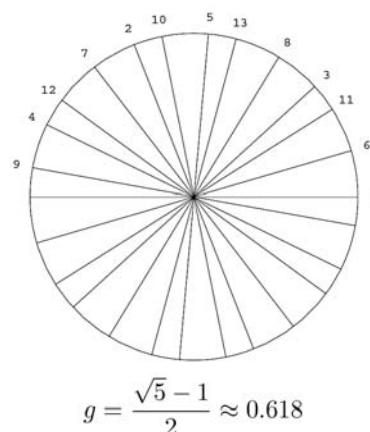


Abbildung 2.20: Winkelpositionen der Golden Ratio Messmethode (Köhler, 2004)

2001 weist Lehmann darauf hin, dass die Neutronenradiografie sehr gut zum Nachweis des Feuchtetransportes im Holz geeignet ist (Lehman, et al., 2001). 2002 kann Niemz nachweisen, dass sich Eckverbindungen durch zyklische Quell- und Schwindbeanspruchung des Holzes langsam öffnen (Niemz, et al., 2002). Mannes bildet 2006 die Wasseraufnahme von Eckverbindungen mit Neutronenmessungen ab (Mannes, et al., 2006). Des Weiteren zeigt er Diffusionsprozesse in Buche und Fichte und kann den Diffusionskoeffizienten in longitudinaler Richtung ermitteln (Mannes, et al., 2009). 2010 kann Sonderegger mit Neutronenmessungen nachweisen wie die Diffusion in verklebten Mehrschichtplatten abläuft (Sonderegger, et al., 2010). Mannes kann 2012 Feuchteansammlungen bei der kapillaren Wasseraufnahme an Klebstofffugen nachweisen (Mannes, et al., 2012).

3 Material

3.1 Beschichtungen

Die ausgewählten Farbsysteme sind alle für Nadelholz im Aussenbereich geeignet und bestehen aus einer Grundierung mit einem weissen Decklack. Für alle Systeme muss der Untergrund sauber, staubfrei und trocken sein. Der Lackauftrag erfolgt mit einem Pinsel. Tabelle 3.1 zeigt die Systeme mit Angaben über Festkörpergehalt, Rohdichte und der vom Hersteller empfohlenen Auftragsmenge.

Tabelle 3.1: Beschichtungssysteme

System	Bezeichnung	Hersteller	FK	ρ	AM
1	Arbezol Hydro- Grundierung BP	Bosshard + Co. AG	18.0	1020	0.150
	Arbezol Industrie- Finish	Lack- und Farbenfabrik	40.0	1010	0.135
2	Solocryl Tauchgrund	Kabe Farben GmbH	36.0	1250	0.150
	Solocryl Topcoat	Karl Bubenhofer AG	41.0	1300	0.350
3	Aquapur Grip	Kabe Farben GmbH	60.0	1400	0.125
	Aquasatin PU	Karl Bubenhofer AG	50.0	1300	0.125
4	Keim Lignosil- Base Gebinde	Keimfarben GmbH	54.5	889	0.089
	Keim Lignosil- Color weiss		55.0	1400	0.100
FK	Festkörperanteil [%]				
ρ	Rohdichte [kg/m³]				
AM	Auftragsmenge [kg/m²]				

Beschichtungssystem 1 wird vom Hersteller als „feuchtigkeitsregulierend“ bezeichnet. System 2 soll sich durch geringe Wasserdurchlässigkeit nach DIN 927-5 auszeichnen. System 4 wird als besonders „diffusionsoffen“ mit hervorragendem Feuchteschutz bezeichnet und verfügt über eine diffusionsäquivalente Luftschichtdicke von < 0.5m nach DIN EN ISO 12 572 [3]. Ausser der Grundierung von System 4 können alle Systeme mit Wasser verdünnt werden. Die Grundierung von System 4 wird zudem mit 10% Keim Lignosil-Base-DL verdünnt. Grundierung und Decklack werden jeweils ein Mal aufgetragen. Die Arbezol Hydro-Grundierung BP (Beschichtungssystem 1) ist eine farblose Grundierung mit fungiziden Inhaltsstoffen. Als Endlack zu diesem Haftgrund wird das Arbezol Industrie-Finish verwendet. Eine Grundierung zur industriellen Anwendung für Holzfenster ist der Solocryl Tauchgrund (Beschichtungssystem 2). Der Solocryl Topcoat wird vom Hersteller als „dauerelastisch“ bezeichnet. Aquapur Grip kann ausserdem als Haftvermittler auf alten Anstrichen verwendet werden. Beschichtungssystem 4 bildet eine Ausnahme, da der Decklack aus einer silikatische Farbbeschichtung mit mineralischen Bestandteilen besteht.

3.2 Fichte

Die Fichte (*Picea abies* L. Karst.) ist ein immergrüner Nadelbaum, dessen Verbreitungsgebiet sich von den Mittelgebirgen Süd- und Mitteleuropas bis nach Russland erstreckt. Dort ist sie oft in den borealen Nadelwäldern mit Tanne und Kiefer verbreitet. Da sie feuchte Böden in kühlen Regionen bevorzugt, ist sie in Südeuropa vor allem in Höhenlagen zwischen 600 und 2100 m. ü. M. heimisch. Diese als extremer Flachwurzler bekannte Baumart ist besonders Sturmschaden anfällig. Die Fichte findet vor allem im Bausektor als konstruktives Element Verwendung.

Die Fichte weist eine deutliche Jahrringgrenze zwischen dem weisslichen Frühholz und dem rötlichen Spätholz auf. Der Übergang von Früh- zu Spätholz innerhalb eines Jahrrings ist dagegen allmählich (Gfeller, et al., 2005). Die Fichte gehört zu den Reifholzbäumen und gilt als gut zu bearbeiten. Sie lässt sich gut zu beizen und eignet sich ebenso für Lasur- und Deckanstriche (Wagenführ, 2007). In Tabelle 3.2 sind einige Materialkennwerte der Fichte abgebildet.

Tabelle 3.2: Ausgewählte Materialkennwerte von Fichte (Wagenführ, 2007)

Fichte (<i>Picea abies</i> L. Karst.)		
Bezeichnung	Kennwert	Einheit
Rohdichte $\rho_{12...15}$	330...470...680	[kg/m ³]
Darrdichte ρ_0	300...430...640	[kg/m ³]
Porenanteil c	71	[%]
Schwindmass $\beta_{\text{longitudinal}}$	0.3	[%]
Schwindmass β_{radial}	3.5...3.7	[%]
Schwindmass $\beta_{\text{tangential}}$	7.8...8.0	[%]

Mit 71% besitzt Fichte einen relativ grossen Porenanteil. Bei anderen Nadelhölzern, wie Lärche und Kiefer, liegt der dieser etwas über 60 %. Allerdings haben Lärche und Kiefer auch höhere Rohdichten. Nadelhölzer mit ähnlichen Rohdichten weisen auch ähnliche Porenanteile auf. Die Weissstanne mit einer Rohdichte von ca. 459kg/m³ hat einen Porenanteil von 73%, die Weymouthskiefer einen von 75% bei einer Rohdichte von ca. 400kg/m³ (Wagenführ, 2007).

3.3 Übersicht Probenumfang

Alle Proben werden mit einer Jahrringneigung von 45°, hergestellt. Eine Fassadenschalung besteht i.d.R. aus Seitenbrettern. Die Jahrringausrichtung zur Brettoberfläche liegt dabei zwischen tangential und radial, also einer Jahrringneigung zwischen 0° und 90°. Eine Jahrringneigung von 45° liegt zwischen diesen beiden Richtungen. Die in den Versuchen verwendete Fichte hat eine Normalrohndichte von 405kg/m³(Tabelle 3.3).

Tabelle 3.3: Roh- und Darrdichte des verwendeten Fichtenholzes

	$\bar{x}$ [kg/m ³]	s [kg/m ³]	v [%]
Rohdichte $\rho_{12...15}$	405	30	7.4
Darrdichte ρ_0	369	26	7.0

$\bar{x}$ der Mittelwert

s die Standardabweichung

v der Variationskoeffizient

Zur Herstellung der Proben wird ausschliesslich fehlerfreies Holz verwendet. Die Proben werden alle aus Brettern eines Stammes geschnitten. Tabelle 3.4 zeigt den Probenumfang der verschiedenen Versuche.

Tabelle 3.4: Probenumfang aller Versuche

Schichtdickenmessungen	
- 4 Beschichtungssysteme	24 Proben
- 3 Auftragsmengen	
- 2 Proben	
Messung des Diffusionswiderstandes und der Wasserdampfsorption	
- 2 Versuchsanordnungen (Dry- und Wet-Cup)	144 Proben
- 4 Beschichtungssysteme	
- 3 Auftragsmengen	
- 2 Ausrichtungen der beschichteten Flächen	
- 3 Wiederholungen je Variante	
Mit Klingenschnitt in Beschichtung	8 Proben
- Wet-Cup	
- 4 Beschichtungssysteme	
- Empfohlene Auftragsmenge	
- 2 Ausrichtungen der beschichteten Flächen	
Messung der Feuchteverteilung mit Neutronenradiografie	
Proben mit Dampfdruckgefälle über den Probenquerschnitt	6 Proben
- Referenzprobe ohne Beschichtung	
- 2 Wiederholungen je Variante	
- 2 Beschichtungssysteme 3 und 4	
Proben mit Wassersäule auf beschädigter Beschichtung	3 Proben
- Mit Klingenschnitt in Beschichtung	
- Mit Sägeschnitt in Beschichtung	
- Referenzprobe ohne Beschichtung	
Neutronentomografie bei Wassereinwirkung an Beschädigung	
- 1 Beschichtungssystem	1 Probe
- Probe mit Bohrloch	
Bestimmung des Nasshaftfestigkeit mit Abreissversuchen	
- 3 Konditionierungsarten	60 Proben
- 4 Beschichtungssysteme	
- 5 Wiederholungen je Variante	

3.4 Kennwerte des Feuchtetransports

Um die Kennwerte des Feuchtetransports zu ermitteln, wird in Anlehnung an DIN ISO 12 572 vorgegangen [3]. Für die Dry- und Wet-Cup Messungen haben die Prüfkörper einen Durchmesser von 140 mm und sind ca. 10 mm dick. Die Beschichtung wird einmal zum Cup-Inneren und einmal zum Prüfraum (Normalklima 20°C/65% rel. LF) gerichtet.. Zusätzlich werden von jedem System beschädigte Proben getestet. Die Proben gliedern sich wie folgt (Tabelle 3.5):

Tabelle 3.5: Probenumfang der Wet- und Dry-Cup Versuche

Versuchsverfahren	Dry-Cup Wet-Cup	2
Ausrichtung der Beschichtung	zum Normalklima zum Cup-Inneren	2
Beschichtungssysteme	1	4
	2	
	3	
	4	
Auftragsmenge	halb empfohlen doppelt	3
Wiederholung je Variante		3
Summe aller beschichteten Varianten	$(2 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 3) =$	144
Referenzprobe ^a	Dry-Cup Wet-Cup	6
beschädigte ^b	4 Beschichtungssysteme	35
	2 Ausrichtungen der	
	8 Beschichtungen	
Summe der Proben		185
^a drei Wiederholungen		
^b keine Wiederholungen		

3.4.1 Definierte Beschädigung an Beschichtungen

Die definierte Beschädigung wird mit einem Klingenschnitt und einem Sägeschnitt zugefügt. Der Klingenschnitt wird an einem umfunktionierten Mikrotom ausgeführt. Die Probe wird mit dem Schlitten über die Spitze einer Mikrotomklinge gezogen. Der Schnitt befindet sich quer zur Faser auf der Probenmitte und ist ca. 0.5mm tief (Abbildung 3.1).



Abbildung 3.1: V.l.n.r. Schlittenmikrotom, Detail, Klingenschnitt

Der Sägeschnitt wird an der Formatkreissäge gesägt. Die Schnitttiefe wird so gewählt, dass die Beschichtung komplett entfernt wird. Die Breite des Schnittes ist durch die Sägeblattstärke vorgegeben und beträgt 3mm. Diese Proben werden nur im Wet-Cup Verfahren getestet. Da festgestellt werden soll, inwieweit sich die Beschädigung einer Beschichtung auf die Aufnahme von Wasser auswirkt.

3.5 Neutronenradiografie

3.5.1 Diffusion von Wasserdampf

Bei diesem Versuch wird das Feuchteprofil beschichteter Proben während der Diffusion in Abhängigkeit der Zeit gemessen. Der Probenumfang setzt sich, wie in Tabelle 3.6 zusammen.

Tabelle 3.6: Probengliederung der Neutronenradiografie zur Feuchtemessung

	Lackauftragsmenge	Probenanzahl
Beschichtungssystem 3	empfohlen	2
Beschichtungssystem 4	empfohlen	2
unbeschichtete (Referenz)	-	2

Es werden Beschichtungssystem 3 und Beschichtungssystem 4 bei empfohlener Auftragsmenge sowie ein unbeschichtete Probe getestet. Von jeder Variante werden je zwei Zwillingsproben hergestellt und untersucht. Die dafür verwendeten Prüfkörper sind 50mm lang, 10mm breit und 30mm dick. Sie werden vor Versuchsbeginn im Normalklima bis zur Massekonstanz konditioniert (Tabelle 3.7).

Tabelle 3.7: Holzfeuchte und Darrdichte vor Versuchsstart (Diffusion)

	Feuchte vor Versuch[%]	Darrdichte[kg/m ³]
Referenz	14	414
Beschichtungssystem 3	14	387
Beschichtungssystem 4	14	371

3.5.2 Neutronenradiografie bei Wassereinwirkung an Beschädigung

Bei diesem Versuch wird das Eindringverhalten von Wasser an unterschiedlich grossen Beschädigungen untersucht. Dabei werden die Prüfflächen einer Wassersäule ausgesetzt und abgelichtet. In einem Vorversuch wurde eine Probe mit unbeschädigter Beschichtung gemessen. Dabei konnte keine Feuchteaufnahme durch die Beschichtung festgestellt werden. Beide Beschädigungen liegen quer zur Faser, auf der Mitte der Probenlänge (Abbildung 3.2). Die Proben sind 50mm lang, 10mm breit und 15mm hoch.



Abbildung 3.2: Links Refrenzprobe, Mitte Klingenschnitt, rechts Sägeschnitt

Bei Versuchsstart hatten die Proben eine Ausgleichsfeuchtefeuchte zwischen 8% und 10% (Tabelle 3.8).

Tabelle 3.8: Holzfeuchte und Darrdichte vor Versuchsstart (Wassersäule)

	Feuchte vor Versuch[%]	Rohdichte [kg/m ³]
unbeschichtete	9	434
mit Sägeschnitt	10	409
mit Klingenschnitt	8	418

3.6 Neutronentomografie

3.6.1 Neutronentomografie bei Wassereinwirkung an Beschädigung

Für die dreidimensionale Messung wird in die Beschichtung ein 1mm tiefes Loch mit einem Durchmesser von 2mm gebohrt. Die Probe hat einen Durchmesser von 15mm und ist 15mm hoch.

3.7 Nasshaftfestigkeit

Die Abreissversuche zur Beurteilung der Haftfestigkeit von Lack auf Holz werden in Anlehnung an DIN EN ISO 4624 durchgeführt. Dabei wird ein Prüfstempel der auf die Beschichtung aufgeklebt ist vom Substrat abgezogen. Die Norm sieht vor die Proben 16 Stunden lang bei $23\pm 2^\circ\text{C}$ und $50\pm 5\%$ rel. LF zu konditionieren [5]. Die Abweichung zur Norm besteht darin, dass die Proben unterschiedlich konditioniert werden um verschiedene Feuchtearten im Holz zu generieren. Zum einen werden Proben im Normalklima bis zur Massekonstanz konditioniert, zum anderen wird zwei Stunden vor der Prüfung Wasser in die Freischneidenut um den aufgeklebten Prüfstempel gegeben. Dadurch dringt das Wasser direkt unter der Beschichtung in das Holz ein (Wasseraufnahme parallel zur Faserrichtung). Hierfür werden Wet -Cup Versuche durchgeführt. Dabei wird die Beschichtung zum Normalklima hin gerichtet, so dass der entstehende Diffusionsstrom von unten durch das Holz gegen die Beschichtung fließt. Ergänzend werden Proben die einem Diffusionsstrom ausgesetzt sind geprüft. Abbildung 3.3 zeigt die Konditionierungsarten.

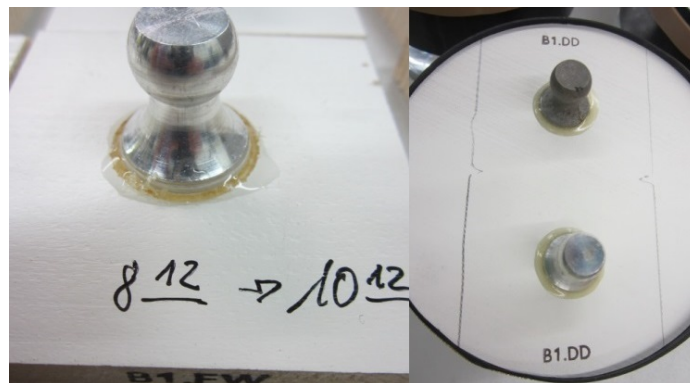


Abbildung 3.3: V.l.n.r. Prüfstempel mit Wasser in Freischneidenut, Prüfstempel auf Wet-Cup

Aus den Konditionierungsarten und den Beschichtungssystemen ergibt sich die in Tabelle 3.9 abgebildete Gliederung.

Tabelle 3.9: Probengliederung der Nasshaftfestigkeitsversuche.

Beschichtungssystem	Klimatisierung	Wiederholung
1	im Normalklima konditioniert	5
	mit Wasser behandelt	5
	mit Dampfdruckgefälle konditioniert	5
2	im Normalklima konditioniert	5
	mit Wasser behandelt	5
	mit Dampfdruckgefälle konditioniert	5
3	im Normalklima konditioniert	5
	mit Wasser behandelt	5
	mit Dampfdruckgefälle konditioniert	5
4	im Normalklima konditioniert	5
	mit Wasser behandelt	5
	mit Dampfdruckgefälle konditioniert	5
Summe der Probenkörper		60

4 Methoden

Für die Versuche werden die Prüfkörper im Normalklima bei 20°C und 65% rel. LF konditioniert. Die Proben der Neutronenmessungen mit Dampfdruckgefälle über dem Probenquerschnitt, befinden sich nur zwischen den Messungen im Normalklima. Bei der Neutronenradiografie und der Neutronentomografie war der Prüfraum selbst nicht klimatisiert.

4.1 Beschichtungen

4.1.1 Applikation der Beschichtung

Die Applikation der Beschichtungssysteme und die Vorbereitung des Substrates wurde für alle Versuche identisch durchgeführt. Das Holz wird bis zur Massekonstanz nach DIN EN 318 konditioniert [7]. Nach dem Hobeln im 3-Stufenschliff mit den Körnungen 100, 120 und 180 geschliffen und grundiert. Der Lackfilm wird dabei gleichmässig über die Fläche verteilt. Die Massenzunahme bezogen auf die Fläche ergibt die Lackauftragsmenge in kg/m². Es werden drei Auftragsmengen appliziert. Die halbe, die empfohlene und die doppelte Auftragsmenge. Nachdem die Grundierung ausgehärtet ist, wird mit 280 Körnung ein Zwischenschliff vorgenommen, die Oberfläche entstaubt und der Decklack aufgetragen.

4.1.2 Beurteilung der Beschichtung

Nach dem der Anstrich ausgehärtet ist, findet die Probenentnahme statt. Es werden von jeder Beschichtungsvariante zwei Stichproben aus einem Brett entnommen. Die Proben werden 10cm vom Brettende aus der Mitte herausgesägt und sind 2cm x 2cm gross. Die Dicke wird auf 2mm verringert. Die Proben werden stehend in einen Zylinder gestellt und mit gelb eingefärbten Epoxidharz aufgefüllt. Nach dem Aushärten werden die Proben aus den Formen genommen und auf der Sichtfläche geschliffen und poliert. (Abbildung 4.1).



Abbildung 4.1: Proben für Mikroskopie

Die StruersTegraForce-3/TegraPol-25 ist eine Schleif-Poliermaschine die vier bis acht Proben gleichzeitig bearbeiten kann. Der Reihe nach wird mit Körnung 220, 800, 2400 geschliffen. Anschliessend erfolgt eine Politur mit Schleifflies und Emulsion (Abbildung 4.2).



Abbildung 4.2: Poliermaschine

Mittels einer Probenpresse werden die Proben auf einen Glasträger gepresst, worauf sie durch die Verwendung einer flexiblen Masse (rot) haften. Beim Verpressen ist darauf zu achten, dass sich zwischen dem Druckstempel und der polierten Probenoberfläche ein Tuch befindet, dass ein zerkratzen der Fläche verhindert. Der Glasträger wird auf dem Objektisch des Mikroskops fixiert (Abbildung 4.3).

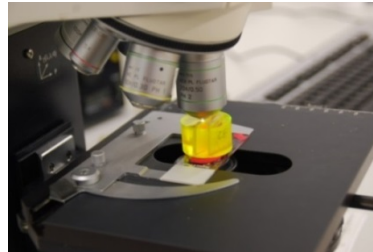


Abbildung 4.3: Mikroskop

An zwei Aufnahmen je Variante wird zehn Mal die Dicke der Beschichtung bestimmt, so dass 20 Messwerte vorliegen. Aus diesen wird ein Mittelwert der Trockenschichtdicke gebildet. Abbildung 4.4 zeigt ein Beispiel.

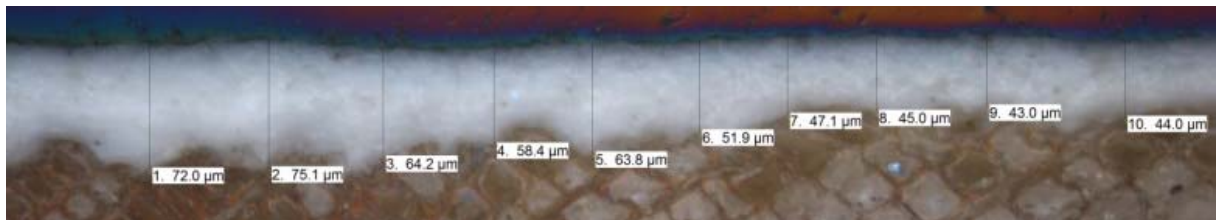


Abbildung 4.4: Bestimmung der Trockenschichtdicke

Die Proben für die Bestimmung der Schichtdicke gliedern sich wie in Tabelle 4.1.

Tabelle 4.1: Probengliederung zur Bestimmung der Schichtdicke

Probengliederung Mikroskopie		
Beschichtungssystem	1	4
	2	
	3	
	4	
Auftragsmengen	halbe	3
	empfohlene doppelte	
Wiederholungen je Variante		2
Summe der Proben		<u>24</u>

4.2 Kennwerte des Feuchtetransports

Um die Kennwerte des Feuchtetransports zu ermitteln, wird in Anlehnung an die Norm DIN ISO 12 572 vorgegangen [3]. Die Versuche finden im Normalklima bei 65% rel. LF und 20°C statt. Bei der Dry- und Wet-Cup Prüfung wird in einem wasserdampfdichten Gefäß ein trockenes bzw. feuchtes Klima generiert. Dazu wird das Trocknungsmittel Silica-Gel und demineralisiertes Wasser verwendet. Die Gefäße werden bis auf 15mm $\pm$ 5mm befüllt. Werden die Cups verschlossen, stellt sich in der Luftschicht bei den Dry-Cups eine relative Luftfeuchte von ca. 0% und bei den Wet-Cups eine von ca. 100% ein. Dadurch entsteht ein Diffusionsstrom durch die Prüfscheibe. Abbildung 4.5 zeigt die Richtung des Diffusionsstromes.

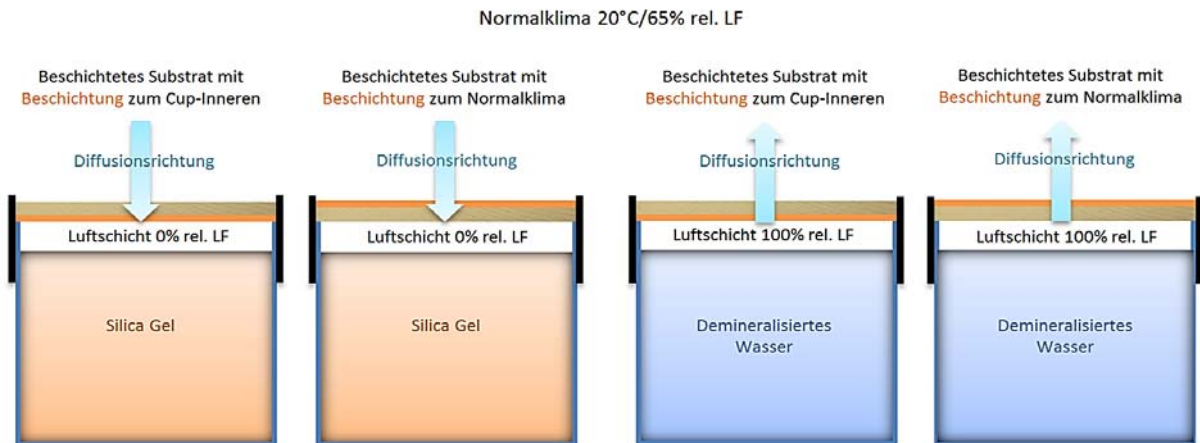


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit den vier Anordnungstypen zur Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes.

Bei der Wet-Cup-Methode nimmt die Probe bis zur Massekonstanz Feuchtigkeit auf. Dann setzt ein Diffusionsstrom vom Cup-Inneren durch die Probe in das Normalklima ein. Der Cup verliert dadurch Masse. Beim Dry-Cup gibt die Probe bis zur Massekonstanz Feuchtigkeit ab. Daraufhin beginnt ein Diffusionsstrom vom Normalklima durch die Probe ins Cup-Innere. Dort nimmt das Trocknungsmittel die Feuchtigkeit auf und der Versuchsaufbau nimmt an Gewicht zu. Die Massenänderung wird durch wiederholtes Wiegen bestimmt. Bis zum Erreichen einer Massekonstanz wird die Sorptionsrate bestimmt (Abbildung 4.6).



Abbildung 4.6: V.l.n.r. Wet- und Dry-Cup, Proben im Normalklima, Bestimmung der Masseabnahme der Probe bei Dry-Cup

Gummimanschetten die über die Kante des Probekörpers und die Aussenseite des Gefäßes gespannt werden dichten den Versuchsaufbau ab. Anhand einer unbeschichteten Probe wird eruiert inwieweit Sorption und Diffusion differenzierbar sind. Hierfür wird die Probe zuerst auf eine Wet-Cup und nach Massekonstanz auf eine Dry-Cup gesetzt. Bei der Wet-Cup wird der Masseverlust des Cupinhalts und die Massezunahme der Probe gemessen.

In der Luftschicht zwischen Cup und Prüfscheibe wird eine Messsonde eingebracht um die Luftfeuchte im Cup-Inneren zu ermitteln (Abbildung 4.7).



Abbildung 4.7: Luftfeuchtemessung in Dry- und Wet-Cup

4.2.1 Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl wird nach DIN EN ISO 12 572 [3] berechnet. Die Masseänderung der Prüfscheibe wird über der Zeit abgetragen und eine Regressionsgerade durch die Werte gelegt. Mit Gleichung 4.1 wird die Massenänderungen pro Zeit bestimmt.

$$\Delta \dot{m}_{12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1}$$

Gleichung 4.1

Dabei ist:

$\Delta \dot{m}_{12}$	die Massenänderung je Zeiteinheit für eine Einzelbestimmung	[kg/s]
m_1	die Masse zur Zeit t_1	[kg]
m_2	die Masse zur Zeit t_2	[kg]
t_1, t_2	die aufeinanderfolgenden Zeiten der Massebestimmungen	[s]

Die Steigung der Regressionsgerade entspricht dem Diffusionsstrom durch den Prüfkörper. Die Wasserdampfdiffusionsstromdichte gibt den Diffusionsstrom pro Fläche an (Gleichung 4.2).

$$g = \frac{G}{A}$$

Gleichung 4.2

Dabei ist:

g	die Wasserdampfdiffusionsstromdichte	[kg/(m ² ·s)]
G	Entspricht $\Delta \dot{m}_{12}$	[kg/s]
A	die durchschnittliche Fläche aus oberer und unterer Prüffläche	[m ²]

Der Wasserdampfdiffusionsdurchlasskoeffizient gibt den Diffusionsstrom bezogen auf die Fläche und die Dampfdruckdifferenz wieder (Gleichung 4.3).

$$W = \frac{G}{A \cdot \Delta p_v}$$

Gleichung 4.3

Dabei ist:

W	der Wasserdampfdiffusionsdurchlasskoeffizient	[kg/(m ² ·s·Pa)]
G	entspricht $\Delta \dot{m}_{12}$	[kg/s]
A	die durchschnittliche Fläche aus oberer und unterer Prüffläche	[m ²]
Δp_v	die Dampfdruckdifferenz über dem Probekörper (Dry-Cup 1519.02Pa, Wet-Cup 817.93Pa)	[Pa]

Der Wasserdampfdiffusionsdurchlasswiderstand ist der Kehrwert des Wasserdampfdiffusionsdurchlasskoeffizient (Gleichung 4.4).

$$Z = \frac{1}{W}$$

Gleichung 4.4

Dabei ist:

Z	der Wasserdampfdiffusionsdurchlasswiderstand	[(m ² ·s·Pa)/kg]
W	der Wasserdampfdiffusionsdurchlasskoeffizient	[kg/(m ² ·s·Pa)]

Dabei wird die Druckdifferenz aus der Differenz vom Cup-Inneren zum Normalklima, wie in Gleichung 4.5 beschrieben, berechnet.

$$\Delta p_v = p_C - p_N$$

Dabei wird p_N und p_C bei Temperaturen über 0° wie folgt berechnet:

$$p_{sat} = \varphi \cdot 610.5 \cdot e^{\frac{17.269 \cdot \theta}{237.3 + \theta}}$$

Gleichung 4.5

Dabei ist:

Δp_v	die Dampfdruckdifferenz über den Probekörper (Dry-Cup 1519.02Pa, Wet-Cup 817.93Pa)	[Pa]
p_N	der Wasserdampfdruck des Normalklimaraums	[Pa]
p_C	der Wasserdampfdruck im Cup-Inneren	[Pa]
φ	die relative Luftfeuchte (Dry-Cup 0%, Wet-Cup 100%, Klimaraum 65%)	[%]
θ	die Temperatur	[°C]

Der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient ergibt sich durch die Multiplikation des Wasserdampfdiffusionsdurchlasskoeffizienten mit Dicke der Probe (Gleichung 4.6)

$$\delta_p = W \cdot d$$

Gleichung 4.6

Dabei ist:

δ_p	der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Probe	[kg/(m·s·Pa)]
W	der Wasserdampfdiffusionsdurchlasskoeffizient	[kg/(m ² ·s·Pa)]
d	die durchschnittliche Probendicke	[m]

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl gibt das Verhältnis des Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten der Luft zum berechneten Wert wieder (Gleichung 4.).

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$$

Gleichung 4.7

Dabei ist:

μ	die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]
δ_a	der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient von Luft	[kg/(m·s·Pa)]
δ_p	der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Probe bezogen auf den Dampfteildruck	[kg/(m·s·Pa)]

Die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke wird mit Hilfe der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl und der Probendicke berechnet (Gleichung 4.8).

$$s_d = \mu \cdot d$$

Gleichung 4.8

Dabei ist:

s_d	die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke	[m]
μ	die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]
d	die durchschnittliche Probendicke	[m]

Der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient von Luft bezogen auf den Dampfteildruck wird nach der Schirmer'schen Formel berechnet (Gleichung 4.).

$$\delta_a = \frac{0.083 \cdot p_0}{R_v \cdot T \cdot p} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{1.81}$$

Gleichung 4.9

Dabei ist:

δ_a	der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient von Luft	[kg/(m·s·Pa)]
R_v	die Gaskonstante für Wasserdampf	[N·m/(kg·K)]
T	die Temperatur	[°C]
p	der mittlere Luftdruck im Klimaraum (965hPa)	[hPa]
p_0	der Atmosphärendruck (1013.25hPa)	[hPa]

^a wird ermittelt aus ETH internen Daten, Institut für Atmosphäre und Klima ETH, Meteostation Standort Höggerberg Zürich, 541m.ü.M

4.2.2 Wasseraufnahmekoeffizient A_w

Nach DIN EN ISO 15 148 ist der Wasseraufnahmekoeffizient „die von einem Probekörper je Flächeneinheit und Wurzel aus der Zeit aufgenommene Wassermenge“ [2]. Die wesentlichen Faktoren die dazu benötigt werden, sind die Wasseraufnahme und die Zeit. Da diese Faktoren bei der Bestimmung des μ -Wertes nach DIN EN ISO 12 572 erfasst werden kann der Wasseraufnahmekoeffizient auch bei der Aufnahme von dampfförmigem Wasser berechnet werden (Brombacher, et al., 2012). Zunächst wird die Massenänderung pro Fläche nach Gleichung 4.10 berechnet.

$$\Delta m_t = \frac{m_t - m_i}{A}$$

Gleichung 4.10

Dabei ist:

Δm_t	die flächenbezogene Massenzunahme nach der Zeit t	[kg/m ²]
m_t	die Masse des Probekörpers nach der Zeit t	[kg]
m_i	die Masse des Probekörpers nach der Zeit i	[kg]
A	die wasseraufnehmende/wasserabgebende Fläche	[m ²]

Nach einer anfänglichen Stabilisierungsphase wird eine Regressionsgerade durch die Δm_t -Werte gelegt. Die Steigung dieser Geraden entspricht dem Wasseraufnahmekoeffizienten (Gleichung 4.11).

$$A_w = \frac{\Delta m'_{tf} - \Delta m'_{ti}}{\sqrt{t_f} - \sqrt{t_{ti}}}$$

Gleichung 4.11

Dabei ist:

A_w	der Wasseraufnahmekoeffizient	[kg _{Wasser} /(m ² ·s ^{1/2})]
$\Delta m'_{tf}$	der Wert auf der Regressionsgeraden zur Zeit t_f	[kg/m ²]
$\Delta m'_{ti}$	der Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der y-Achse	[kg/m ²]
t_f	die Zeit	[s]

Mit der dazugehörigen Rohdichte kann der dichtebereinigte Wasseraufnahmekoeffizient berechnet werden (Gleichung 4.12).

$$a_w = \frac{A_w}{\rho_{12...15}}$$

Gleichung 4.4

Dabei ist:

a_w	der dichtebereinigte Wasseraufnahmekoeffizient	[kg _{Wasser} /(m ² ·s ^{1/2})·m ³ /kg _{Holz}]
A_w	der Wasseraufnahmekoeffizient	[kg _{Wasser} /(m ² ·s ^{1/2})]
$\rho_{12...15}$	die Rohdichte der Probe im Normalklima vor der Prüfung	[kg/m ³]

4.2.3 Diffusionskoeffizient D

Mit Hilfe des Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Probe, bezogen auf den Dampfteildruck, kann nach Siau 1995 der Diffusionskoeffizient berechnet werden. Dieser beschreibt die Eigenschaft von Holz, Diffusion zuzulassen und gibt damit dessen Diffusivität an (Gleichung 4.13).

$$D = \frac{\delta_p \cdot p_0 \cdot V}{m_0} \cdot \frac{\Delta H}{\Delta M}$$

Gleichung 4.5

Dabei ist:

D	Der Diffusionskoeffizient	[m ² ·s]
δ_a	der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient von Luft	[kg/(m ² ·s·Pa)]
p_0	der Normalluftdruck (Luftdruck an der Erdoberfläche)	[hPa]
V	Volumen bei Massekonstanz	[m ³]
m_0	Masse in darrtrockenem Zustand	[kg]
ΔH	Änderung der relativen Luftfeuchte (Dry-Cup 65%, Wet-Cup 35%)	[%]
ΔM	Änderung der Materialfeuchte	[%]

4.3 Neutronenradiografie

Die zweidimensionalen Transmissionsmessungen mit Neutronen liefern ein Feuchteprofil über einen Probenquerschnitt. Um eine Prüfkörper zu messen, wird er in den Neutronenstrahl gestellt. Hinter dem Messkörper befindet sich ein Detektor, welcher i. d. R. aus einem Szintillator-Digital-Kamera-System besteht (Abbildung 4.8). Der Szintillator wird durch Neutronen angeregt und emittiert Licht. Hierdurch wird die Intensität des Neutronensignals in Licht umgewandelt und kann von einer Kamera über einen Spiegel aufgenommen werden.

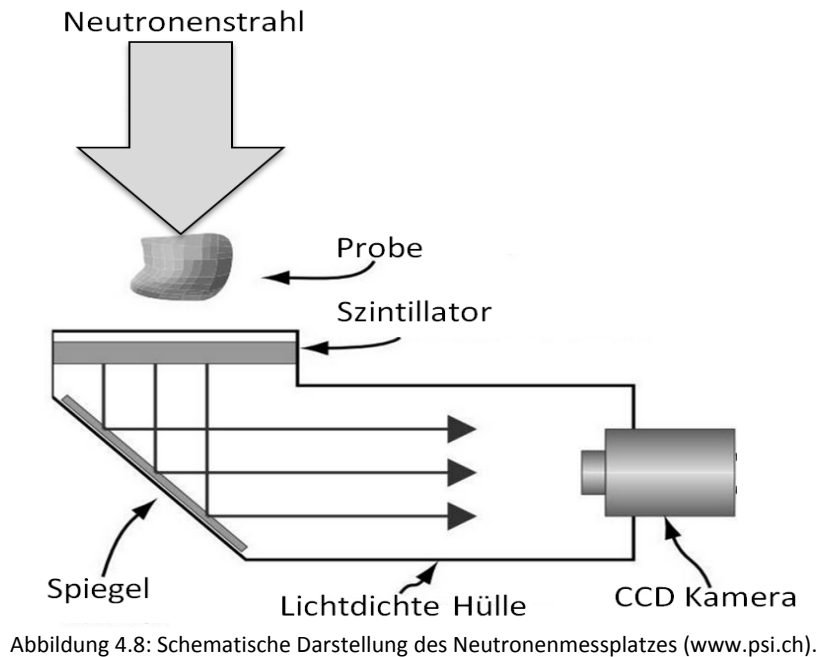


Abbildung 4.8: Schematische Darstellung des Neutronenmessplatzes (www.psi.ch).

4.3.1 Diffusion von Wasserdampf

Es werden fünf Messungen an fünf verschiedenen Tagen durchgeführt. Die erste Messung findet ohne einen Feuchtestrom durch die Proben statt. Diese Messung bildet die Proben im ausgeglichenen Feuchtezustand ab und wird für die Referenzierung der späteren Werte benötigt. Daraufhin wird der Versuch gestartet, das heisst der Versuchsaufbau wird mit Wasser befüllt und ins Normalklima gestellt. Der Tag des Versuchsstarts ist der Tag Null. Dann werden die Proben nach vier, zehn, 25 und 41 Tagen gemessen. Um einen Diffusionsstrom durch die Probe aufzubauen, wird ein Dampfdruckgefälle über den Probenquerschnitt generiert. Abbildung 4.9 zeigt die schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.

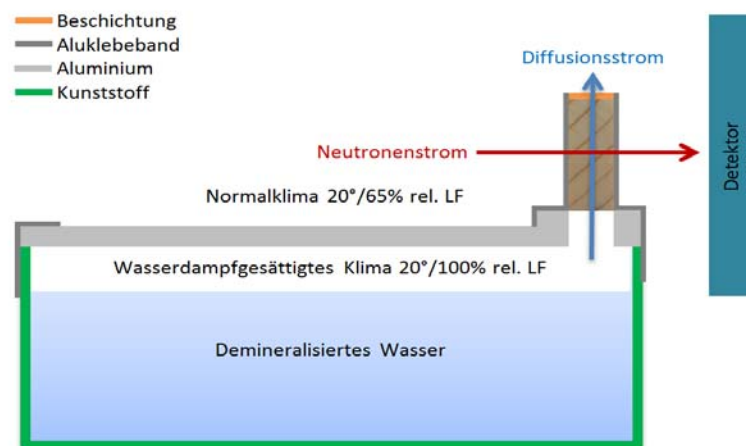


Abbildung 4.9: Schematischer Versuchsaufbau der Neutronenradiografie zur Feuchtemessung

Der Wasserbehälter wird bis auf 5mm mit demineralisiertem Wasser befüllt. In der Luftschicht über dem Wasser entsteht ein wasserdampfgesättigtes Klima von annähernd 100 % rel. LF. Der Behälter wird mit einer Aluminiumplatte abgedeckt und mit Aluklebeband versiegelt. Der Dampfstrom erfolgt zuerst durch das Holz und dann durch die Beschichtung. Der Neutronenstrom durchstrahlt die Probe über den gesamten Querschnitt. Der Behälter besteht aus Aluminium da dieser wasserdampfdiffusionsdicht ist und Neutronen nur wenig bis gar nicht abschwächt. Pro Versuchsaufbau werden 2 Proben gemessen. Auf Abbildung 4.10 und Abbildung 4.11 ist der Versuchsbehälter zu sehen.

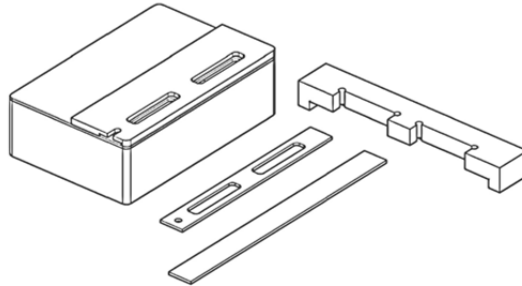


Abbildung 4.10: Teile des Versuchsaufbaus v.l.n.r. Behälter mit Abdeckung, Schieber für geöffneten und Schieber für geschlossenen Zustand, Schablone zum Ausrichten

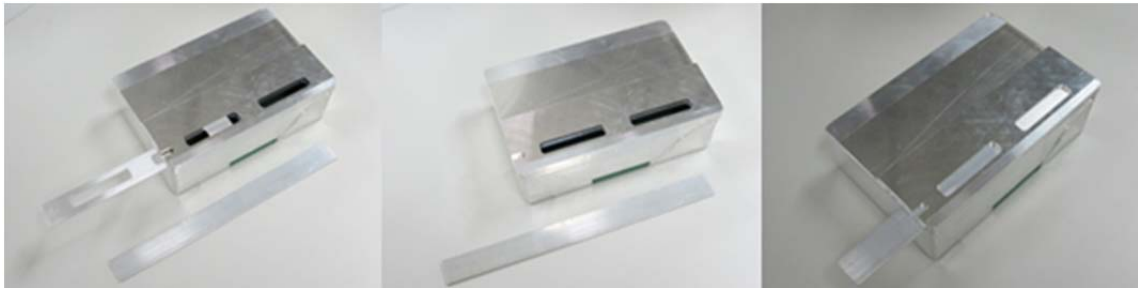


Abbildung 4.11: Versuchsbehälter mit Schieber zum Verschliessen

Die Proben werden seitenparallel zum Behälter auf die Öffnungen der Aluminiumplatte gesetzt. Da die gemessenen Schattenbilder zur jeweiligen Messung am Tag Null referenziert werden, muss gewährleistet sein, dass sich die Proben bei jeder Messung in derselben Position befinden. Dies geschieht mit Hilfe einer Vorrichtung die am Detektor befestigt wird. Auf der Fläche dieser Vorrichtung befinden sich vier Löcher in die die Füße des Kunststoffbehälters einrasten. Alle seitliche Flächen der Proben, alle Fugen am Kunststoffbehälter und am Aluminiumaufbau werden mit Aluminiumklebeband versiegelt. (Abbildung 4.12).

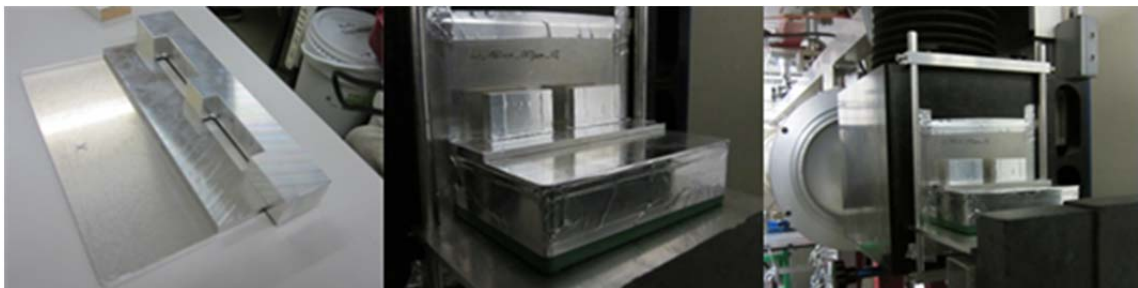


Abbildung 4.12: Rechts Schablone zum Ausrichten der der Proben, linkes Messplatz beim Versuch

Abbildung 4.13 zeigt ein Schattenbild einer Referenzprobe. Beide Proben zeichnen sich deutlich vor dem Hintergrund ab.

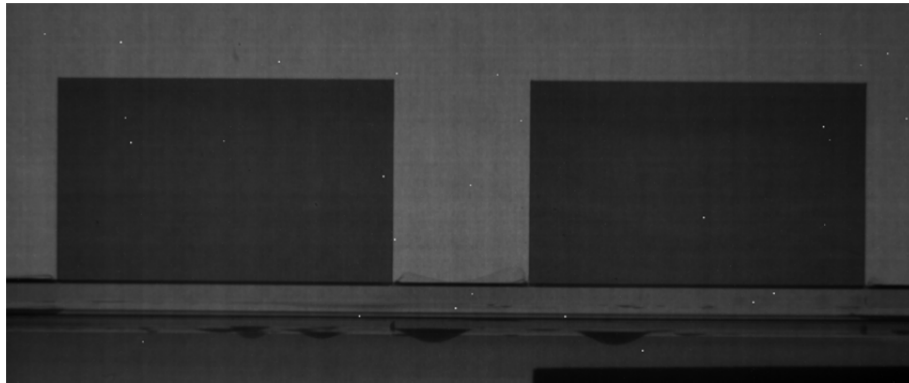


Abbildung 4.13: Unbearbeitetes Schattenbild

Die so erhaltenen Schattenbilder werden weiter mit dem Freeware Programm „Fiji“ bearbeitet (Fiji.sc, 2013). Zuerst werden die Weisspunkte entfernt, welche von γ -Strahlung her rühren. Dann werden die Aufnahme mit der *Open Beam* und der *Dark Current* Messung referenziert um das Rauschen ,infolge der im Raum vorhanden Luftfeuchte, durch die Kamera zu eliminieren. Die so bearbeiteten Bilder werden zu einer Serie geordnet und zueinander ausgerichtet, dass sie deckungsgleich übereinander liegen. Diese Bilder können anschliessend mit der Referenzmessung zum Zeitpunkt Null über eine definierte Holzfeuchte weiter verrechnet werden. Dabei wird der Grauwert jedes Pixels durch den Grauwert des entsprechenden Pixels zum Zeitpunkt Null geteilt. Das so erhaltene Schattenbild gibt die Differenz zwischen den einzelnen Messungen an. Die Differenz kann als Feuchteänderung angenommen werden, da alle anderen Faktoren konstant gehalten wurden. In Abbildung 4.14 ist eine fertig bearbeitete Messung zu sehen. Es handelt sich dabei um eine der Proben aus Abbildung 4.13. Dort ist zu erkennen, dass die Probe im unteren Teil dunkler ist. Diese Ansammlung von Graupunkten entspricht dem Feuchtezuwachs zur Referenzmessung. Die so erhaltenen Schattenbilder werden noch weiter verarbeitet. Mit den als Zahlenwerten ausgelesenen Grauwerten wird ein Feuchteprofil erstellt. Das Quellen der Proben durch die Feuchteänderung ist anhand der weissen und schwarzen Linien um die Probe zu erkennen.

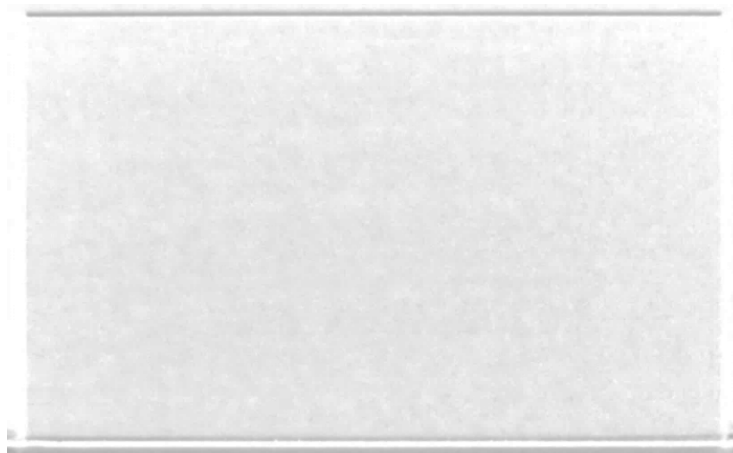


Abbildung 4.14: Bearbeitetes Schattenbild

In der Annahme, dass es sich um einen monoenergetischen Strahl handelt und die Probendicke z gegen Null strebt, kann der Prozess der Transmissionsmessung mit dem linearen Abschwächungsgesetz beschrieben werden (Mannes, 2009) (Gleichung 4.14).

$$I(E) = I_0(E) \cdot e^{-\Sigma(E) \cdot z}$$

Gleichung 4.6

Dabei ist:

$I(E)$	die Strahlungsintensität nach der Probe	[-]
$I_0(E)$	die Strahlungsintensität vor der Probe	[-]
$-\Sigma(E)$	der Schwächungskoeffizient	[1/cm]
z	die Dicke der Probe	[cm]

Wobei I_0 dem einfallenden Strahl vor dem abschwächenden Objekt und I dem abgeschwächten Strahl hinter dem abschwächenden Objekt, entspricht. Die Dicke des Materials in Strahlrichtung wird mit z beschrieben und Σ steht für den Neutronenschwächungskoeffizienten des Materials. Σ wird berechnet, in dem σ , der mikroskopische Wirkungsquerschnitt der die Wahrscheinlichkeit angibt mit der ein Neutron mit einem Atomkern interagiert, mit N , der Atomdichte des Materials, multipliziert wird (Mannes, 2009)(Gleichung 4.15).

$$\Sigma = \sigma \cdot N$$

Gleichung 4.15

Dabei ist:

Σ	der Schwächungskoeffizient	[1/cm]
σ	mikroskopischer Wirkungsquerschnitt	[cm ²]
N	die Atomdichte (Anzahl der Atomkerne pro Volumen)	[1/cm ³]

Der Transmissionskoeffizient wird aus den beiden Strahlungsintensitäten berechnet (4.16).

$$T = \frac{I(E)}{I(E)_0}$$

Gleichung 4.7

Dabei ist:

T	der Transmission	[-]
$I(E)$	die Strahlungsintensität nach der Probe	[-]
$I_0(E)$	die Strahlungsintensität vor der Probe	[-]

Wasser hat unter den Bedingungen an der Imaging-Anlage NEUTRA am PSI, einen Schwächungskoeffizienten von 3.6 1/cm (Mannes, 2009). Einsetzen des Schwächungskoeffizienten von Wasser und der ausgelesenen Grauwerten in Gleichung 4.17 ergibt die Wasserschichtdickenänderung.

$$T = e^{-\Sigma \cdot \Delta d}$$

$$\Delta d = -\frac{\ln(T)}{\Sigma}$$

Gleichung 4.17

Dabei ist:

Δd	die Wasserschichtdickenänderung	[cm]
T	der Transmissionskoeffizient	[-]
Σ	der Schwächungskoeffizient (Wasser 3.6 1/cm)	[1/cm]

Mit Gleichung 4. wird die Holzfeuchte berechnet. Dabei entspricht die Wassermasse der Wasserschichtdickenänderung (Gleichung 4.18).

$$u = \frac{m_w}{m_0} \cdot 100\%$$

Gleichung 4.18

Dabei ist:

u	die gravimetrische Holzfeuchte	[%]
m_w	die Wassermasse	[g]
m_0	die darftgetrocknete Holzmasse	[g]

Die Wasserschichtdickenänderung bezieht sich auf die Einheit 1x1, da sie pro Pixel x Pixel gemessen wird. Die Dichte von Wassers ist 1 g/cm³. Diese Werte werden in die Formel eingesetzt und gekürzt. Als Ergebnis wird die Wasserschichtdickenänderung für die Wassermasse in Gleichung 4.19 eingesetzt.

$$\begin{aligned} m_w &= V_w \cdot \rho_w \\ m_w &= 1\text{cm} \cdot 1\text{cm} \cdot \Delta d \text{ cm} \cdot 1\text{g/cm}^3 \\ m_w &= \Delta d \end{aligned}$$

Gleichung 4.19

Dabei ist:

m_w	die Wassermasse	[g]
V_w	das Volumen des Wassers	[cm ³]
ρ_w	die Dichte des Wassers	[g/cm ³]
Δd	die Wasserschichtdicke	[cm]

4.3.2 Eindringen von Wasser an Beschädigung

Der Versuchsaufbau wird auf ein Podest vor den Detektor gestellt und während der gesamten Messzeit nicht bewegt. Die Messungen werden automatisch alle drei Minuten vorgenommen und dauern ca. 16 Stunden. Dabei wird ein beschädigter Probekörper einer Wassersäule ausgesetzt. Den nötigen Druck um die Abdichtung zwischen Prüfkörper und Versuchsaufbau zu gewährleisten bringen zwei Schrauben (Hellblau) auf. Die beschichtete Fläche entspricht der orangenen Fläche in der schematischen Abbildung 4.15.

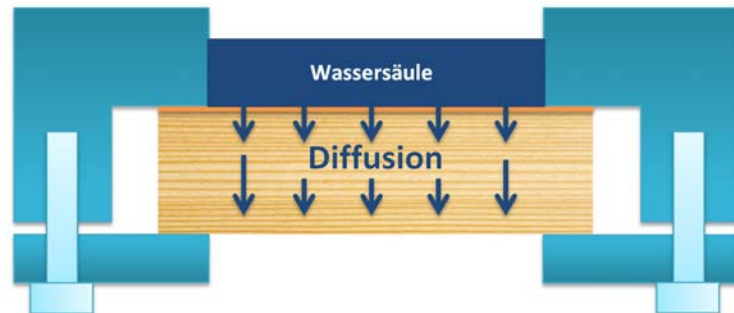


Abbildung 4.15: Schematische Versuchsaufbau zum Eindringverhalten von Wasser mittels Neutronenradiografie

Der gesamte Aufbau ist in Aluminium gefertigt. Die Seiten der Probe, welche nicht zur Vorrichtungsoffnung zeigen, werden mit Aluminiumklebeband versiegelt. So entsteht ein Diffusionsstrom von der Wassersäule durch die beschädigten Beschichtungen ins Holz. Abbildung 4.16 zeigt eine mit einem Sägeschnitt beschädigte Probe während der Messung als Schattenbild. Die dunkle Wassersäule über der Probe und der Einfüllschlauch von oben sind deutlich zu erkennen.

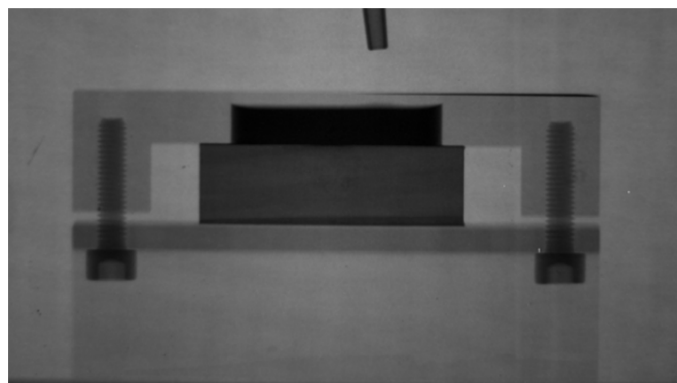


Abbildung 4.16: Unbearbeitetes Schattenbild (Sägeschnitt)

Nach der Referenzierung und der Division durch die Messung zum Zeitpunkt Null bleibt ein Schattenbild, das die Feuchteänderung als Grauwerte wiedergibt (Abbildung 4.17).

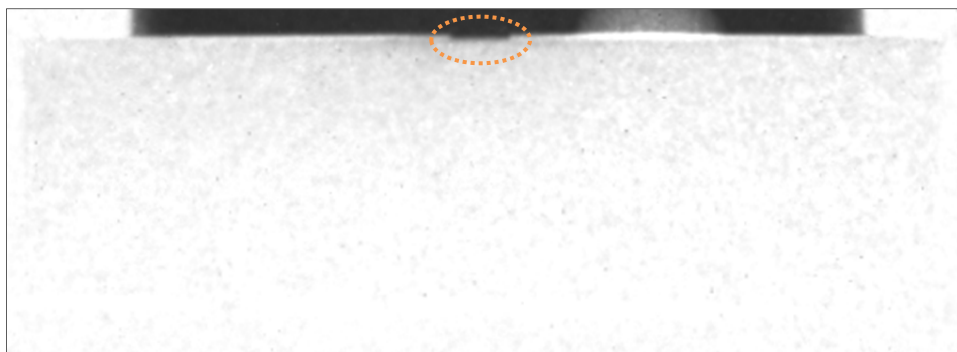


Abbildung 4.17: Bearbeitetes Schattenbild (Sägeschnitt)

4.4 Neutronentomografie

4.4.1 Neutronentomografie bei Wassereinwirkung an Beschädigung

Um das Eindringen von Wasser in Holz mit einer beschädigten Beschichtung dreidimensional abbilden zu können, wird die Neutronentomografie durchgeführt. Dabei wird eine beschichtete und beschädigte Probe einer Wassersäule ausgesetzt. Abbildung 4.18 zeigt dies schematisch.



Abbildung 4.18: Schematischer Versuchsaufbau

Die Mantelfläche der Probe wird mit Aluminiumklebeband versiegelt und in eine Aluminiumhülse gestellt. In die Hülse wird ein Aufsatz eingeschraubt, der in der Mitte eine 10mm Bohrung aufweist. Die Oberseite der Probe wird vom Aussenrand her 2.5 mm überdeckt und abgedichtet. In das Bohrloch wird während des Versuchs demineralisiertes Wasser eingebracht. Der Versuchsaufbau wird auf einen gesteuerten Schrittmotor montiert (Abbildung 4.19).



Abbildung 4.19: Probe im geöffneten Versuchsaufbau

Während der Messung werden die nach dem Golden Ratio-Verfahren gedreht. Die gemessenen Schattenbilder werden nach einem von Kaestner entwickelten Verfahren rekonstruiert (Kaestner, et al., 2011). Dafür wird das Programm MuhRec verwendet. Die so erhaltenen 58 Schnittbildern bestehen aus den oberen 5.8mm der Probe. Jedes Schnittbild bildet einen 0.1mm dicken Querschnitt ab. Abbildung 4.20 zeigt v.l.n.r. ein zweidimensionales Schattenbild der Probe und ein Schnittbild des 0.1mm des Querschnitts wiedergibt.

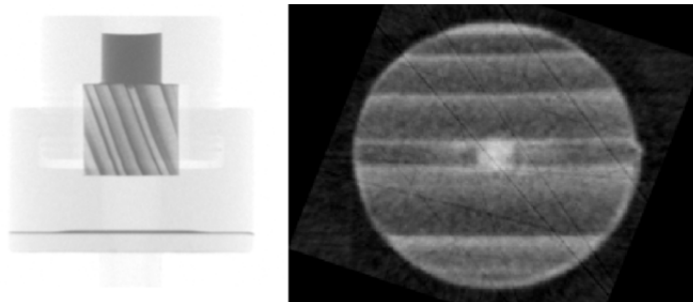


Abbildung 4.20: Bearbeitetes Schattenbild

4.5 Nasshaftfestigkeit

Beim Abreissversuch zur Beurteilung der Haftfestigkeit werden auf beschichtete Proben Prüfstempel mit Epoxidharz aufgeklebt. Nachdem der Klebstoff ausgehärtet ist werden die Prüfstempel mit einer Lochsäge freigeschnitten (Abbildung 4.21).



Abbildung 4.21: Freigeschnittener Prüfstempel

Danach wird der Prüfstempel an der Material-Prüfmaschine Zwick Roell abgezogen. Dabei werden die Proben von unten gegen eine Metallplatte gehalten, wobei der Prüfstempel durch eine kreisrunde Öffnung ragt und in eine Kupplung einrastet, die zwischen den Spannbacken fixiert ist (Abbildung 4.22).

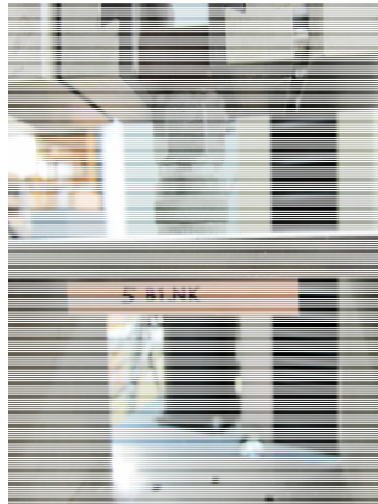


Abbildung 4.22: Probe im Zugversuch

Die Zugvorrichtung fährt nach oben bis eine Vorkraft von 2N erreicht wird. Daraufhin beginnt der eigentliche Versuch. Am Stempel wird bis zum Bruch mit einer Geschwindigkeit von 0.7mm/min gezogen. Aus der maximalen Kraft und der Fläche des Prüfstempels wird die Abreisfestigkeit berechnet (Gleichung 4.20).

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Gleichung 4.20

Dabei ist:

σ	die Abreissfestigkeit	[N/mm ²]
F	die Abreisskraft	[N]
A	die Fläche des Prüfstempels	[mm ²]

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Beschichtung

Die folgenden Ergebnisse werden unter Berücksichtigung der effektiv gemessenen Trockenschichtdicke diskutiert.

5.1.1 Trockenschichtdicke

In Tabelle 5.1 ist der Mittelwert der gemessenen Schichtdicke aufgelistet. Bei Betrachtung fällt auf die Varianz der Schichtdicke sehr gross ist und sich ein definiertes Applizieren im Mikrometerbereich nicht gewährleisten lässt.

Tabelle 5.1: Gemessene Schichtdicke

Auftragsmenge	Beschichtungs- system 1			Beschichtungs- system 2			Beschichtungs- system 3			Beschichtungs- system 4		
	1/2	1	2	1/2	1	2	1/2	1	2	1/2	1	2
$\bar{x}$ [μm]	26	52	69	49	101	281	50	69	98	184	195	411
s [μm]	4	5	16	6	13	68	13	10	13	16	7	20
VarK [%]	15	9	23	13	13	24	27	14	13	9	3	5
Min. [μm]	21	45	51	41	78	193	22	54	77	153	185	382
Max. [μm]	34	61	100	59	120	367	70	82	123	205	207	458
1/2	halbe Auftragsmenge											
1	empfohlene Auftragsmenge											
2	doppelte Auftragsmenge											

5.1.2 Beurteilung der Beschichtung

Die mikroskopischen Aufnahmen zur Bestimmung der Schichtdicke verdeutlichen die Unterschiede, die über die Auftragsmenge generierten Trockenschichtdicke. Abbildung 5.1 zeigt die drei Trockenschichtdicken von System 1. Unter der Beschichtung ist die zerklüftete Holzoberfläche deutlich erkennbar.



Abbildung 5.1: Beschichtungssystem 1 (v.l.n.r. 26µm, 52 µm, 55 µm)

Auf Abbildung 5.2 sind Lufteinschlüsse und sogenannte Kavitäten zu erkennen. Diese Lufteinschlüsse treten während dem Aushärten auf. Die Beschichtung härtet dabei an der Oberfläche aus und verhindert, dass aufsteigende Luftblasen nach aussen entweichen können. Dieses Fehlerbild ist typisch für eine zu dick aufgetragene Beschichtung (doppelte Auftragsmenge) und führt zu einer erhöhten Fehlstellenwahrscheinlichkeit. Selbst bei 105 µm Trockenschichtdicke (Auftragsmenge nach Herstellerangabe) sind einige Lufteinschlüsse erkennbar.

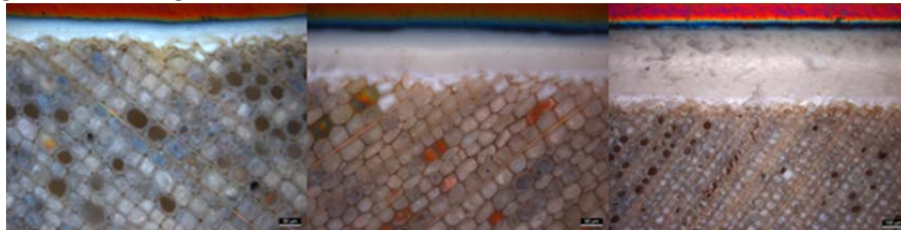


Abbildung 5.2: Beschichtungssystem 2 (v.l.n.r. 62µm, 105 µm, 196 µm)

Bei Beschichtungssystem 3 ist der Übergang zwischen Grundierung und Decklack auf allen Aufnahmen sehr deutlich zu erkennen (Abbildung 5.3). Obwohl System 3 diese eindeutige Grenze aufweist, erreicht es beim Nasshaftfestigkeitsversuch die höchste Festigkeit.

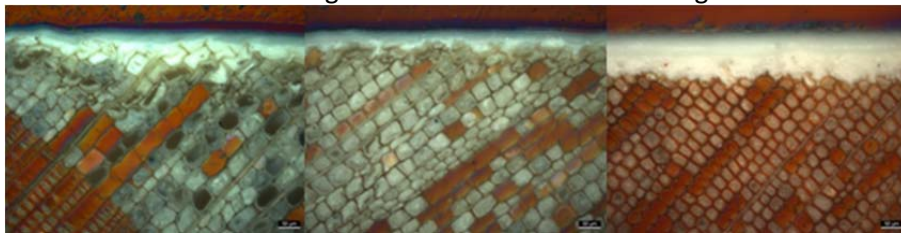


Abbildung 5.3: Beschichtungssystem 3 (v.l.n.r. 61 µm, 81 µm, 97µm)

Auf den Aufnahmen von Beschichtungssystem 4 ist der Übergang zwischen Grundierung und Decklack noch deutlicher (Abbildung 5.4). Es ist sogar eine Trennlinie zwischen den Grundierungen zu erkennen. Diese einzelnen Schichten führen dazu, dass der Bruch beim Nasshaftfestigkeitsversuch mehrheitlich zwischen diesen Schichten stattfindet. Was die innere Festigkeit des Systems wiedergibt. Dadurch weist System 4 auch die niedrigste Nasshaftfestig auf. Zudem sind in diesem Decklack die mineralischen Bestandteile erkennbar.

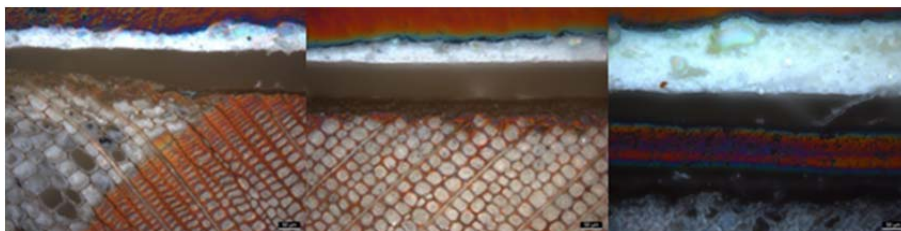


Abbildung 5.4: Beschichtungssystem 4 (v.l.n.r. 198 µm, 207µm, 375 µm)

Beim Beschichtungssystem 1 ist erkennbar, dass die zum Teil hervorstehenden Zellwandteile bei halber Auftragsmenge nicht von der Beschichtung bedeckt werden (Abbildung 5.5).

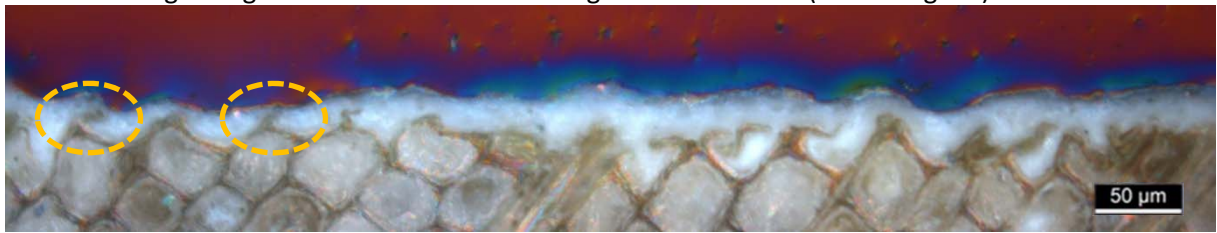


Abbildung 5.5: Beschichtungssystem 1 (26µm)

Bei den anderen Systemen sind diese Zellteile vollständig von der Beschichtung bedeckt. Was in Abbildung 5.6 am Beispiel bei Beschichtungssystem 2 erkennbar ist.

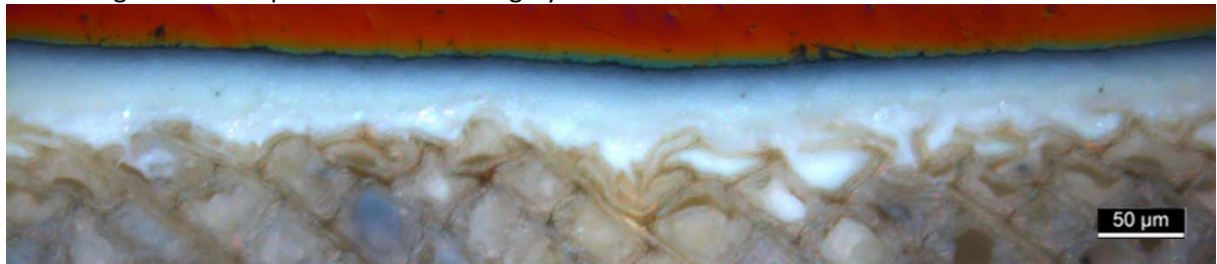


Abbildung 5.6: Beschichtungssystem 2 (62µm)

Bei halber Auftragsmenge ist zu erkennen, dass Teile der Holzstruktur nahe an der Oberfläche liegen. Diese Stellen schwächen die Beschichtung. Es ist anzunehmen, dass Risse zuerst an solchen Stellen auftreten (Abbildung 5.7).

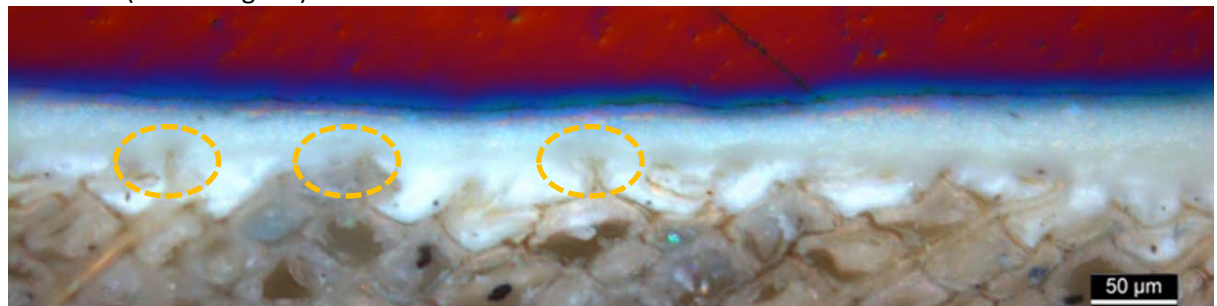


Abbildung 5.7: Beschichtungssystem 2 (62µm)

Abbildung 5.8 zeigt Beschichtungssystem 2 bei doppelter Schichtdicke. Es sind deutliche Kavitäten in der Beschichtung zu erkennen. Die Lufteinschlüsse liegen hauptsächlich im oberen Bereich. Ein eindeutiges Zeichen dafür, dass die Blasen von einer bereits ausgehärteten Schicht auf der Oberfläche am Austreten aus dem flüssigen Material gehindert wurden.



Abbildung 5.8: Beschichtungssystem 2 (196µm)

Bei der empfohlenen Auftragsmenge ist jedoch eine erwünschte gleichmässig bedeckte Holzstruktur zu sehen (Abbildung 5.9).

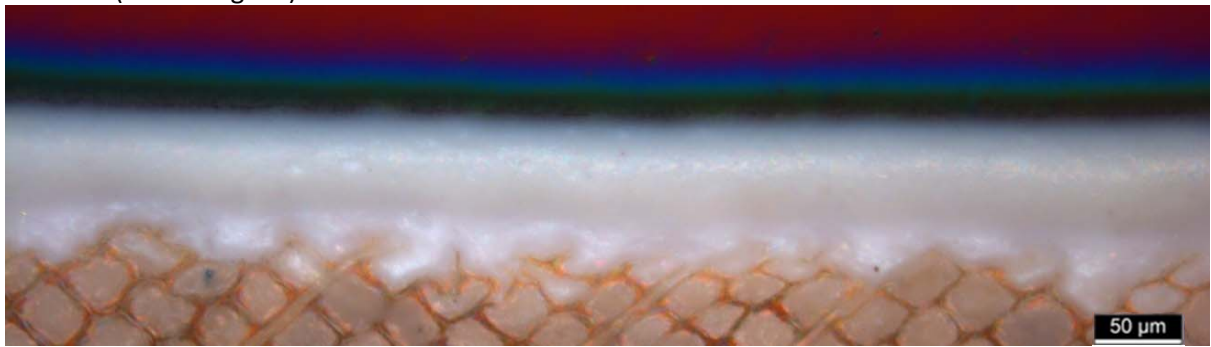


Abbildung 5.9: Beschichtungssystem 2 (105µm)

Die Abbildung 5.10 bis Abbildung 5.13 zeigen den Vergleich zwischen Oberfläche und Querschnitt. Dabei zeigt sich, dass alle Systeme Hohlräume an der Oberfläche aufweisen.

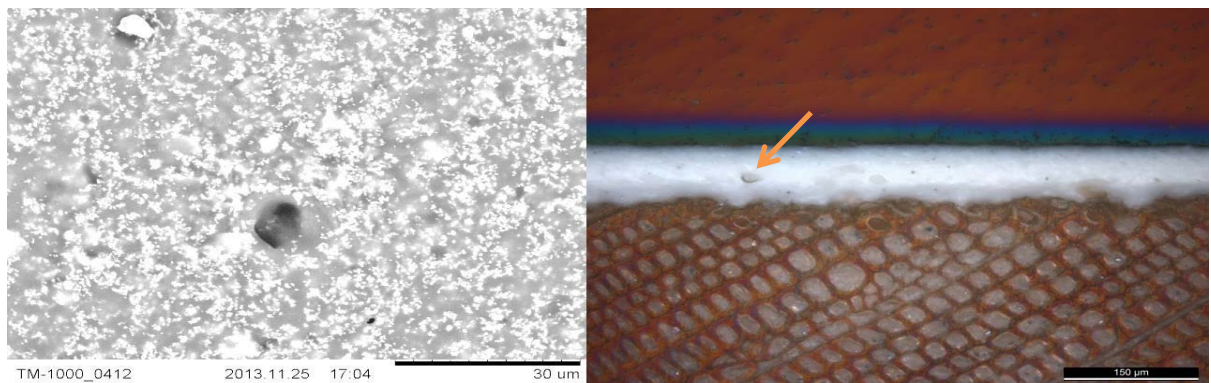


Abbildung 5.10: Beschichtungssystem 1 (52µm) REM Aufnahme (Volkmer, 2013)

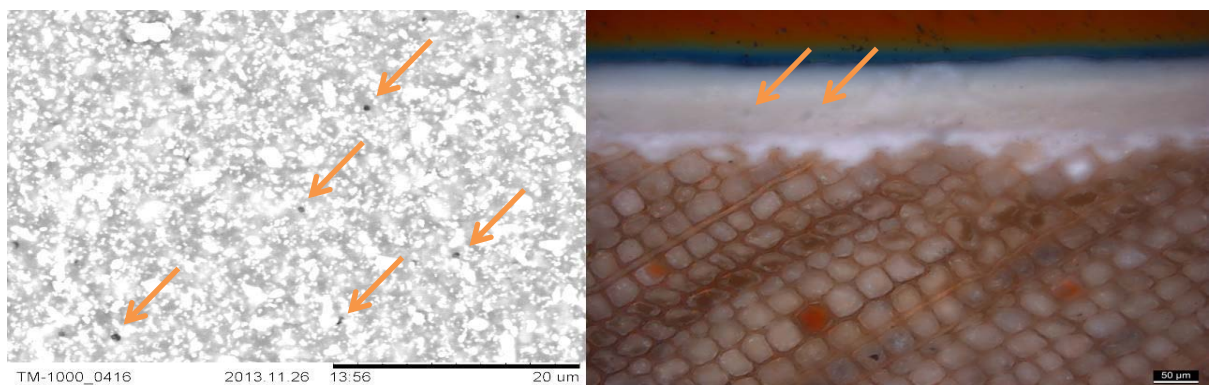


Abbildung 5.11: Beschichtungssystem 2 (105µm) REM Aufnahme (Volkmer, 2013)

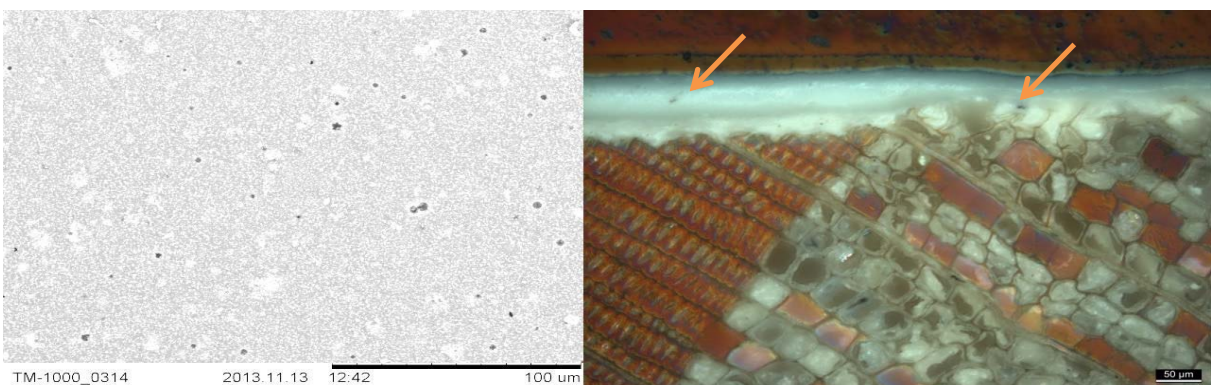


Abbildung 5.12: Beschichtungssystem 3 (61µm) REM Aufnahme (Volkmer, 2013)

Bei Beschichtungssystem 4 sind zudem deutliche Risse auf den REM Aufnahmen zu erkennen. Welche auf Querschnittsbildern nicht zu erkennen sind. Dieses System weist im Gegensatz zu den anderen keine Kavitäten auf. Die Risse im Decklack sind auf das Aushärten des mineralischen Decklackes zurückzuführen.

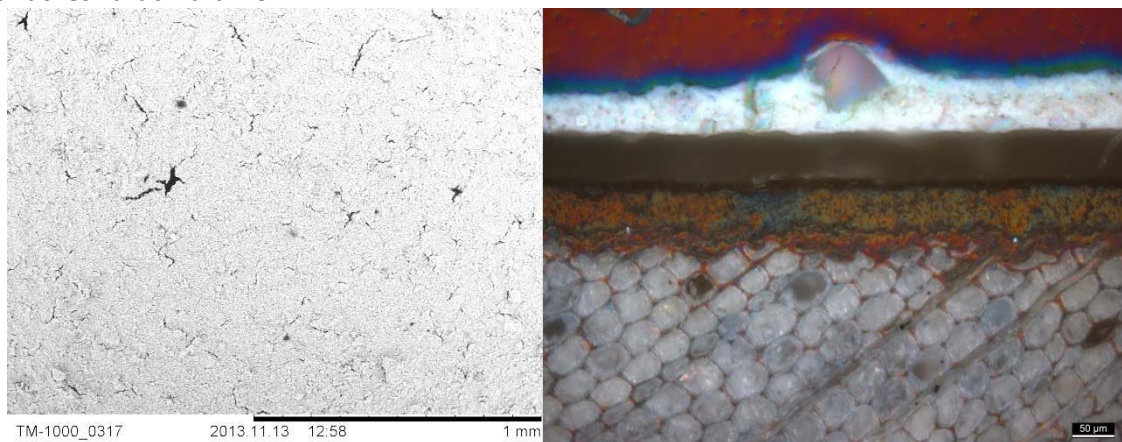


Abbildung 5.13: Beschichtungssystem 4 (198µm) REM Aufnahme (Volkmer, 2013)

Das Beschichtungssystem 4 zeigt nach dem Wet-Cup Versuche mit Ausrichtung zum Feuchtklima einen deutlichen Schimmelpilzbefall. Die beschichtete Oberfläche war zu diesem Zeitpunkt 14 Tage lang einer relativen Luftfeuchte von ca. 90% bei 20°C ausgesetzt. Der Befall ist auf die mineralischen Bestandteile im Decklack zurückzuführen. Sie bieten dem Schimmel bessere Wachstumsbedingungen. Die anderen Beschichtungssysteme zeigten keinen Schimmelpilzbefall.

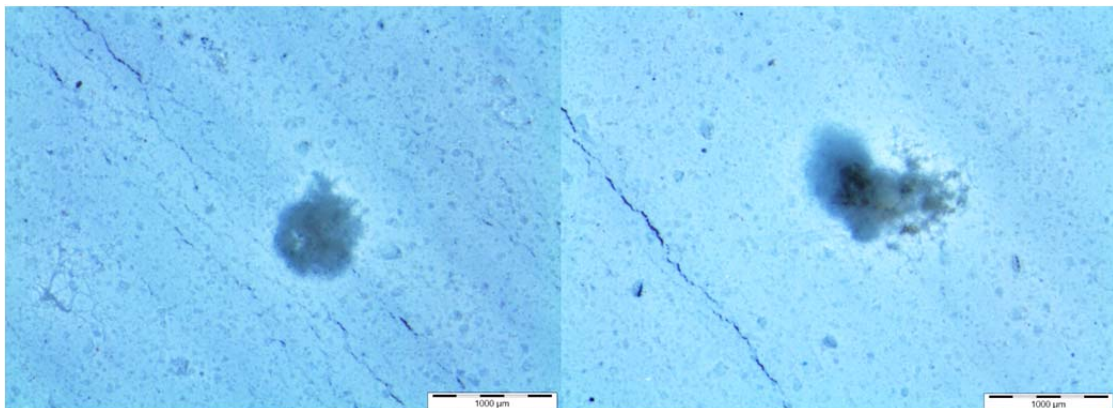


Abbildung 5.14: Schimmelpilz bei Beschichtungssystem 4.

5.2 Kennwerte des Feuchtetransportes

5.2.1 Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ

Abbildung 5.15 zeigt die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ der Dry-Cup Messung. Dabei werden jeweils die Werte der Proben mit Beschichtung zum Normalklima mit jenen der Beschichtung zum Cup-Inneren gegenübergestellt. Was bei Ausrichtung der Beschichtung zum Normalklima einer Feuchtaufnahme und bei der Ausrichtung zum Cup-Inneren einer Feuchteabgabe entspricht.

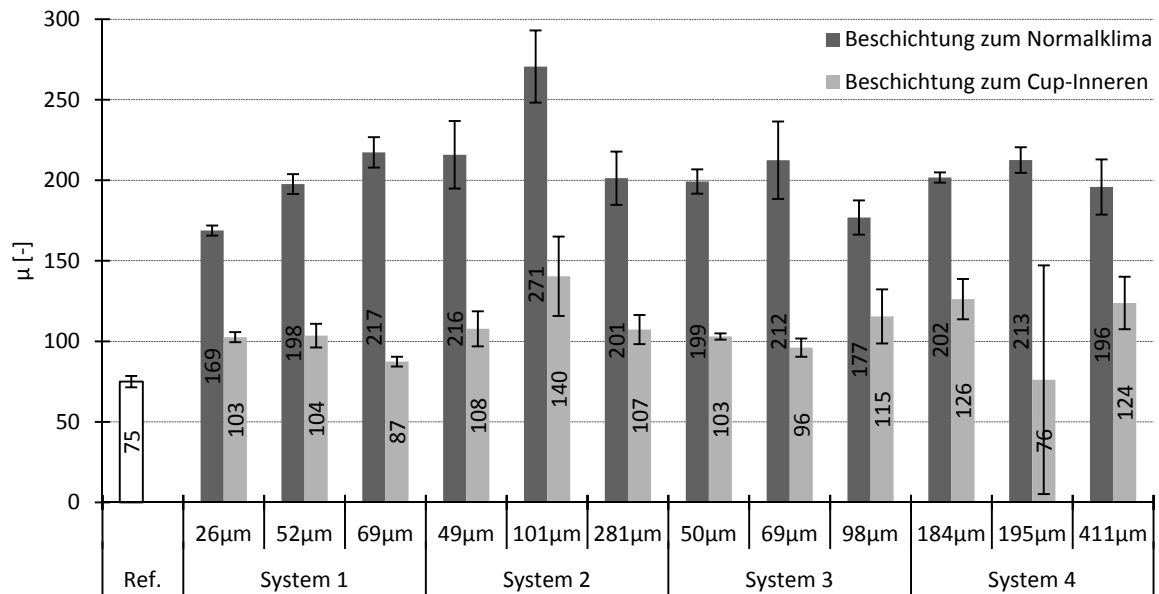


Abbildung 5.15: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (Dry-Cup)

Die Werte aller beschichteten Proben liegen wie erwartet höher als die der unbeschichteten Referenz. Es zeigt sich, dass der Diffusionswiderstand mit der Erhöhung der Beschichtungsstärke deutlich zunimmt. Zudem kann die Erkenntnis aus der Beurteilung der Trockenschichtdicke, dass eine zu dick aufgetragene Lackschicht zu Kavitäten und Rissen in der Beschichtung führt bestätigt werden. Was sich bei den Systemen 2, 3 und 4 bei der doppelten Auftragsmenge in Form eines deutlich kleineren μ -Wertes zeigt. Bei Betrachtung der Werte bei Beschichtung zum Normalklima zeigt sich sogar, dass die doppelte Auftragsmenge diffusionsoffener ist, als die halbe vom Hersteller empfohlene Menge. Der Mittelwert über alle Systeme in Tabelle 5.2 zeigt, dass der μ -Wert bei der Beschichtung zum Normalklima rund doppelt so groß ist wie bei der Ausrichtung zum Cup-Inneren.

Tabelle 5.2: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (Dry-Cup)

Beschichtung	μ [-]	s [-]	u_{Messende} [%]
zum Normalklima	206	25	9
zum Cup-Inneren	107	17	11

Zudem ist der Unterschied bei der Holzfeuchte nach Messende relativ groß. Bei den Proben mit Beschichtung zum Normalklima ist das Holz dem trockenen Cup-Inneren ungeschützt ausgesetzt, was zu einer leichten Reduzierung der Holzfeuchte führt.

Die μ -Werte der Wet-Cups sind in Abbildung 5.16 dargestellt. Die Ausrichtung der Proben mit Beschichtung zum Normalklima entspricht hier einer Feuchteabgabe und bei Ausrichtung zum Cup-Inneren einer Fechteaufnahme.

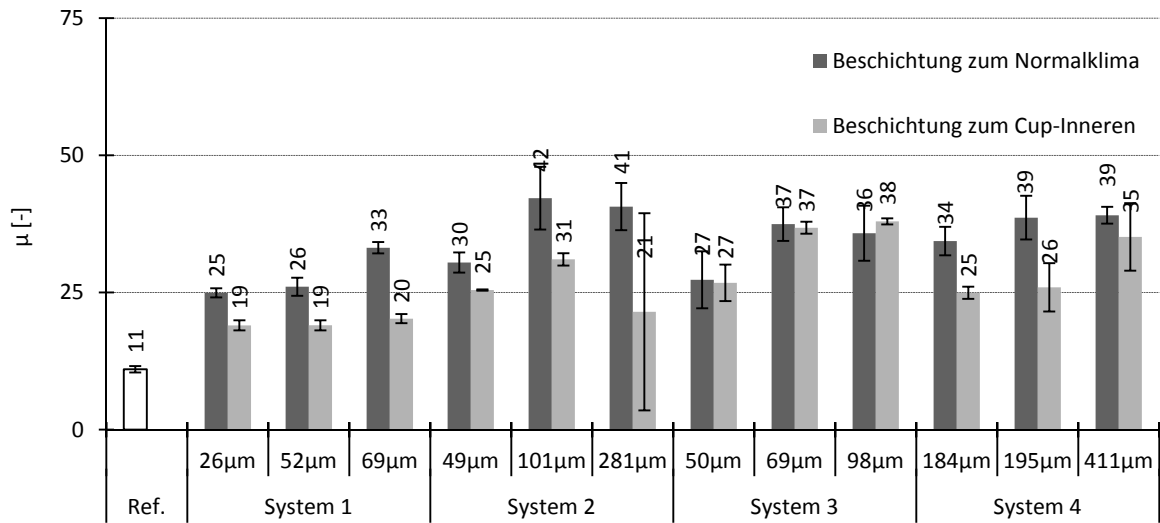


Abbildung 5.16: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (Beschichtung zum Cup-Inneren)

Auch hier zeigt sich eine ähnliche Tendenz und der Diffusionswiderstand nimmt mit Erhöhung der Beschichtungsstärke zu. Ebenso wie bei den Dry-Cup Versuchen zeigt sich eine Reduktion der μ -Werte bei den Systemen 2, 3 und 4 infolge der zu dick aufgetragenen Lackschicht. Die μ -Werte in Tabelle 5.3 zeigen, dass der Einfluss der Ausrichtung der Beschichtung im Wet-Cup Versuch weniger deutlich ist. Einzig bei der Holzfeuchte nach der Messung ist der Einfluss der Ausrichtung größer als bei den Dry-Cup Messungen.

Tabelle 5.3: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (Beschichtung zum Cup-Inneren)

Beschichtung	μ [-]	s [-]	u_{Messende} [%]
zum Normalklima	34	6	24
zum Cup-Inneren	27	7	16

Abbildung 5.17 zeigt den Unterschied der μ -Werte zwischen beschädigten (Klingenschnitt) und unbeschädigten Proben bei gleicher Auftragsmenge. Diese Ergebnisse wurden im Wet-Cup Versuch ermittelt bei Beschichtung zum Normalklima.

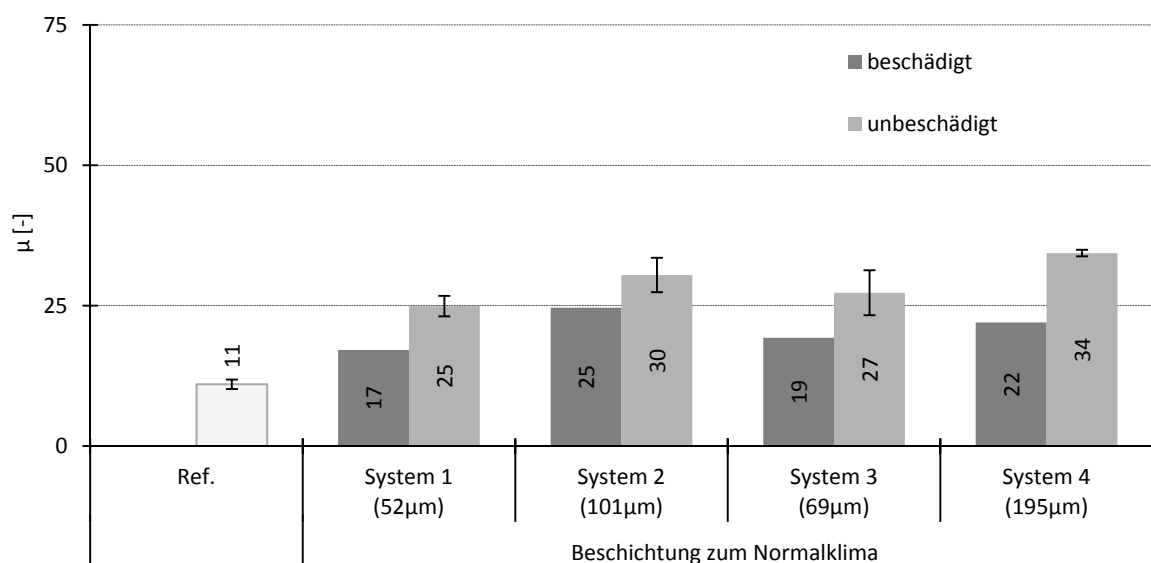


Abbildung 5.17: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (Klingenschnitt)

Das Diagramm zeigt, dass eine Beschädigung in der Beschichtung den Diffusionswiderstand deutlich reduziert. Was auch bei der Betrachtung des Mittelwertes in Tabelle 5.4 auffällt.

Tabelle 5.4: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (Klingenschnitt)

	μ [-]	s [-]	u_{Messende} [%]
beschädigt	21	3	23
unbeschädigt	29	4	24

Die Abhängigkeit des Diffusionswiderstandes vom Feuchtegehalt ist in Abbildung 5.18 abgebildet. Die Werte aus Niemz 1993 sind für unbehandelte Fichte. Die Werte von Vanek et al. für unbehandelte Fichte mit 45° Jahrringneigung (Vanek, et al., 1989). Die Kurve aus eigenen Messungen liegt über den aus der Literatur und bestätigt nicht nur den Einfluss der Holzfeuchte, sondern auch den Einfluss der Beschichtung auf den Wasserdampfdiffusionswiderstand. Die Kurve aus den eigenen Messungen verläuft parallel, über der Kurve von Vanek und zeigt die Erhöhung des μ -Wertes durch das Beschichten eindeutig.

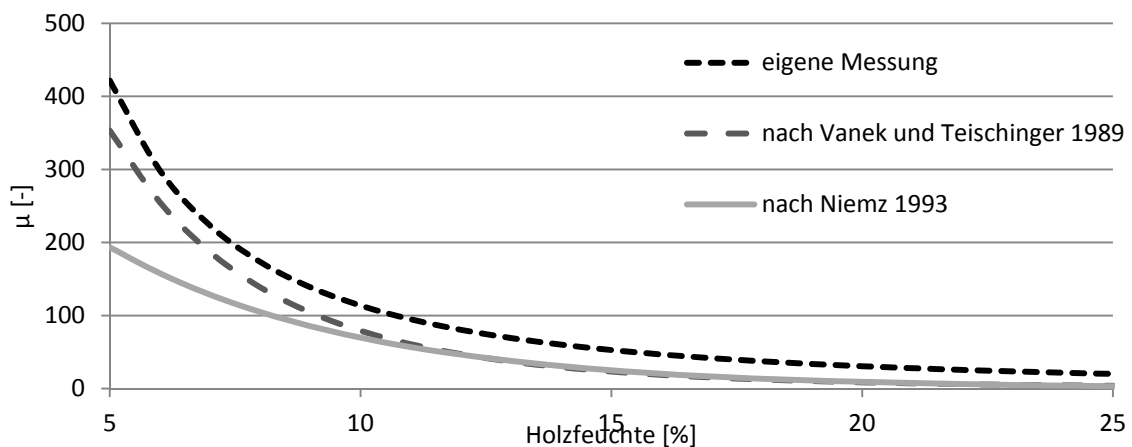


Abbildung 5.18: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl in Abhängigkeit der Holzfeuchte (Vanek, et al., 1989) (Niemz, 1993)

In der Literatur wird die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ oft unabhängig von der Messmethode angegeben. Meist wird ein Mittelwert aus den Wet- und Dry-Cup Werten gebildet. Die Referenzprobe mit einem Dry-Cup Wert von 75 und einem Wet-Cup Wert von 11 ergeben so einen gemittelten μ -Wert von 43, mit 95% Konfidenzintervall für diesen Mittelwert von ± 10 (Abbildung 5.19).

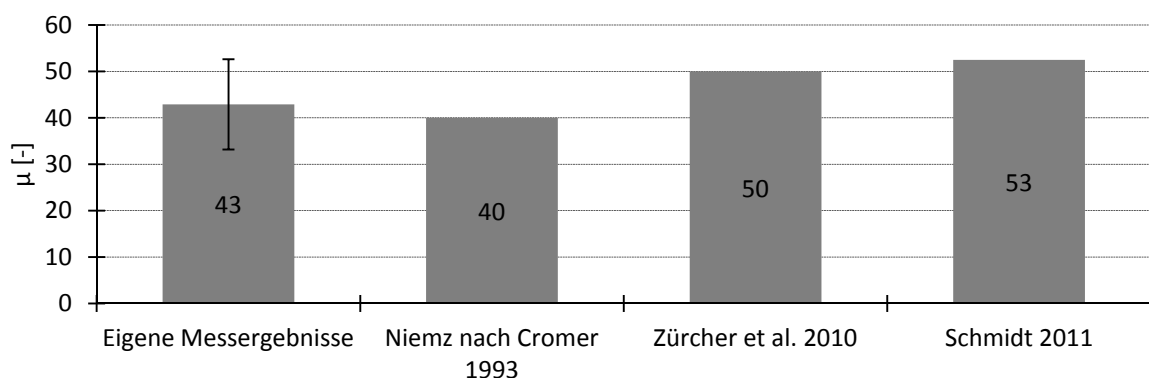


Abbildung 5.19: Vergleich der μ -Werte für unbehandelte Fichte

Die Werte von Niemz und Zürcher innerhalb eines 95% Vertrauensintervalles für den Mittelwert (Niemz, 1993), (Zürcher, et al., 2010). Einzig der Wert von Schmidt liegt an der oberen Grenze (Schmidt, 2011).

Effektive Luftfeuchte beim Dry- und Wet-Cup Versuch

Die Ermittlung der Luftfeuchte im Cup-Inneren zeigt, dass sich nach ca. 24h eine relativ stabile Luftfeuchte in den Cups einstellt (Abbildung 5.20).

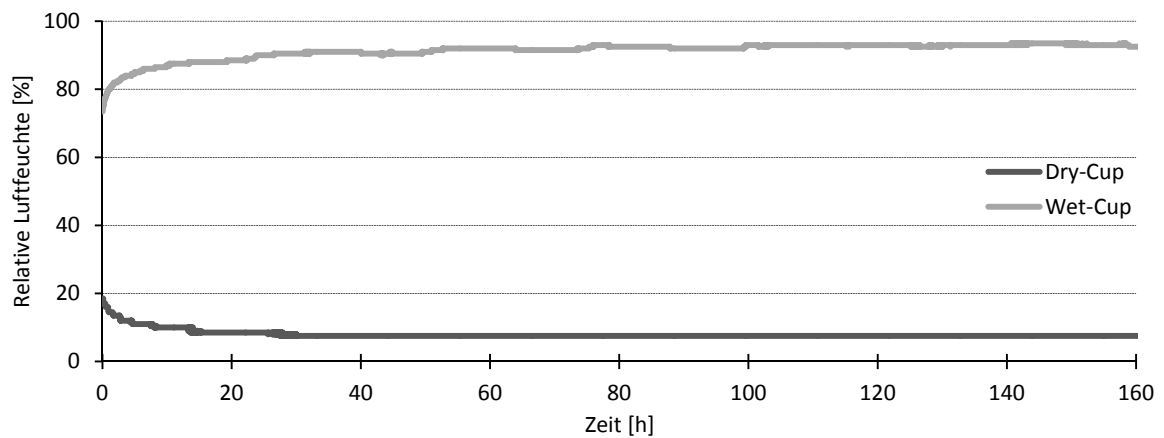


Abbildung 5.20: Relative Luftfeuchten im Cup-Inneren bei Dry- und Wet-Cup.

Um die Masseänderung der Probe zu bestimmen, wird diese von der Cup heruntergenommen und die Feuchteaufnahme in Form Sorption bestimmt. Dies geschieht in der Regel alle 24h bis eine Massenkonzanz eintritt. Ist die Massenkonzanz eingetreten heisst das, dass ein gleichbleibender Diffusionsstrom durch den Prüfkörper hindurch fliesst. Um den Diffusionsstrom zu quantifizieren wird die Masseänderung des gesamten Versuchsaufbaus bestimmt. Um die Menge Wasser aus dem Glas durch die Prüfscheiben zu bestimmen. Die Werte sind in Tabelle 5.5 dargestellt.

Tabelle 5.5: Relative Luftfeuchte

			Relative Luftfeuchte [%]			
	Zeit	n	Min.	Max.	$\bar{x}$	s
Dry-Cup	t < 24h	1441	8.5	18.5	10.2	2.1
	t > 24h	8335	7.5	8.5	7.5	0.2
Wet-Cup	t < 24h	1441	73.5	90.0	86.3	2.8
	t > 24h	8335	90.0	93.5	92.2	0.9

Somit weichen die relativen Luftfeuchten in den Gläsern ca. 10% von den in den Norm verlangten 0 und 100% ab. Ausserdem zeigen die Versuche, dass die Cups mindestens 24h vor Beginn der Diffusionsmessung nicht mehr geöffnet werden sollten.

Differenzierung von Sorption und Diffusion

Die Ergebnisse des Versuchs zur Differenzierung von Sorption (Feuchtaufnahme der Probe) und Diffusion (Feuchtedurchgang durch Probe) sind in Abbildung 5.21 dargestellt. Um die Masseänderung der Probe zu bestimmen, wird diese vom Glas heruntergenommen und die Feuchtaufnahme in Form der Sorption bestimmt. Dies geschieht in der Regel alle 24h bis eine Massenkonzanz eintritt. Ist die Massenkonzanz eingetreten heisst das, dass ein gleichbleibender Diffusionsstrom durch den Prüfkörper hindurch fliesst und sich die Masse der Probe nicht weiter verändert. Um den Diffusionsstrom zu quantifizieren wird die Masseänderung des gesamten Versuchsaufbaus bestimmt. Was der Wassermenge aus dem Glass durch die Prüfscheiben entspricht.

Die Probe hat bei Versuchsbeginn eine Holzfeuchte von 12%. Es ist zu erkennen, dass bei Versuchsstart die Sorption sofort beginnt. Der Übergang zur Diffusion in einen stabilen Bereich tritt ab ca. 110h ein. Nach dem Wechsel auf eine Dry-Cup beginnt sofort die Desorption und der Feuchtestrom wechselt die Richtung. Nach ca. einem Tag ist die Sorption, diesmal in Form einer Massezunahme, wieder in einem linearen Bereich. Die Vorgabe der Norm Diffusion erst ab der Massenkonzanz zu messen erscheint sinnvoll, wenn man die Dauer der Stabilisierung des Diffusionsstroms nach Cupwechsel betrachtet (ca. 30h).

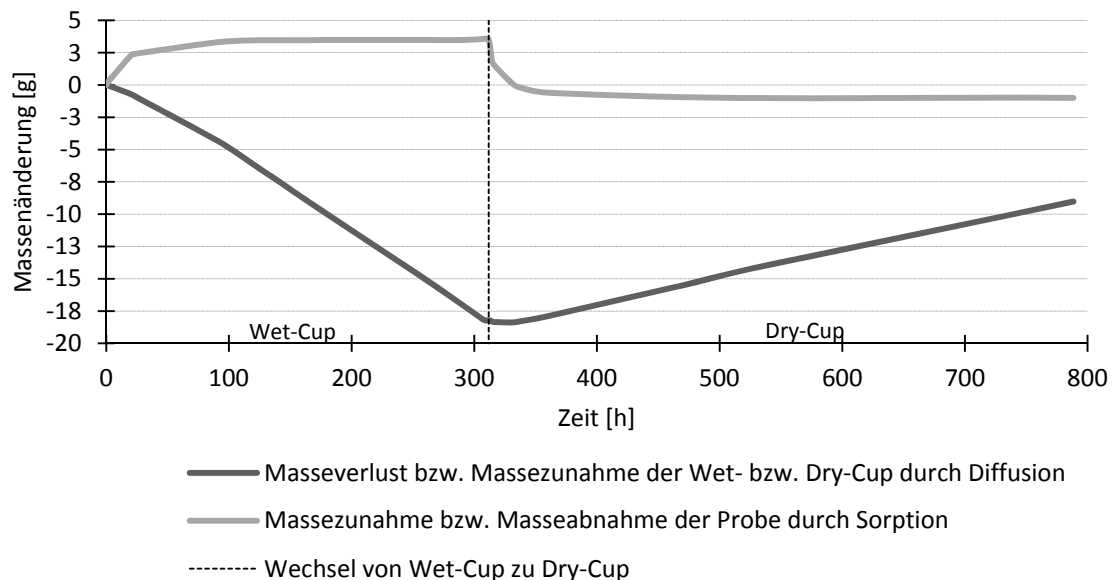


Abbildung 5.21: Zeitabhängige Massenänderung bei Wet-Cup dann bei Dry-Cup.

5.2.2 Wasseraufnahmekoeffizient A_w

Der Wasseraufnahmekoeffizient A_w wurde in Anlehnung an die DIN EN ISO 15148 bestimmt. Abbildung 5.22 zeigt die A_w -Werte der Dry-Cup Versuche. Bei den Proben mit der Beschichtung zum Normalklima erfolgt der Diffusionsstrom aus dem Holz durch die Beschichtung und bei Beschichtung zum Cup-Inneren durch die Beschichtung in das Holz.

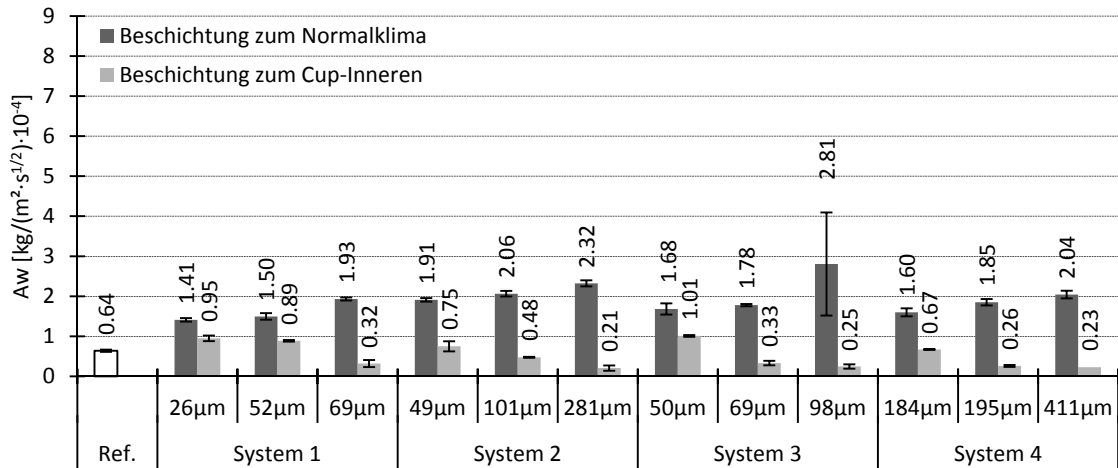


Abbildung 5.22: Wasserdampfaufnahmekoeffizienten (Dry-Cup)

Die A_w -Werte der Proben mit Beschichtung zum Cup-Inneren liegen deutlich unter denen mit Beschichtung zum Normalklima. Hier ist die Feuchteaufnahme durch die Beschichtung grösser als die Feuchteabgabe. Die Proben mit Beschichtung zum Normalklima sind ungeschützt dem trockenen Cup-Innen zugewandt, was ein Reduzieren der Holzfeuchte zur Folge hat. Umgekehrt ist das Holz mit Beschichtung zum Cup-Inneren dem feuchten Klima ausgesetzt, was die Holzfeuchte erhöht. Die Feuchteaufnahme durch die Beschichtung (Beschichtung zum Normalklima) nimmt, innerhalb der Systeme, mit der Schichtdicke zu. Wohingegen die Feuchteabgabe durch die Beschichtung mit zunehmender Schichtdicke, bei allen Beschichtungssystemen, abnimmt. Die Dry-Cup Messungen geben generell ein Austrocknen wieder. Bei Beschichtung zum Normalklima wird dieses Austrocknen mit zunehmender Schichtdicke stärker, weil durch die dichter werdende Lackschicht weniger Feuchte nachfließt. Umgekehrt wird das Austrocknen bei Beschichtung zum Cup-Inneren, durch die dichter werdenden Systeme erschwert und der A_w -Wert reduziert.

Abbildung 5.23 zeigt die A_w -Werte der Wet-Cup Messungen. Bei Beschichtung zum Normalklima entsprechen die Werte einem Diffusionsstrom bei Feuchteabgabe und bei Beschichtung zum Cup-Inneren einer Feuchteaufnahme.

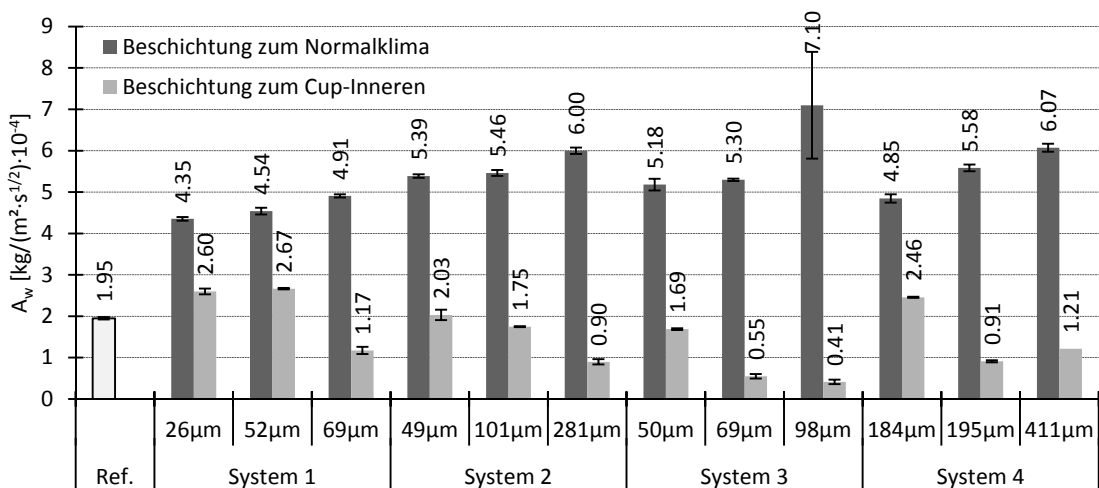


Abbildung 5.23: Wasserdampfaufnahmekoeffizienten (Wet-Cup)

Der Wasseraufnahmekoeffizient der Proben mit Beschichtung zum Normalklima, liegt deutlich über dem der Proben mit Beschichtung zum Cup-Inneren. Hier findet im Gegensatz zu den Dry-Cups eine stärkere Feuchteabgabe (aus dem Holz durch die Beschichtung) als eine Feuchteaufnahme (durch die Beschichtung in das Holz) statt. Unter relativ trockenen Bedingungen ist also die Feuchteaufnahme durch die Beschichtung grösser als die Feuchteabgabe unter feuchten Bedingungen. Auch hier nehmen die A_w -Werte der Proben mit Beschichtung zum Normalklima mit Erhöhung der Trockenschichtdicke zu. Da die Systeme mit zunehmender Schichtdicke dichter werden, verringert sich die Feuchteabgabe durch die Beschichtung und das Holz nimmt mehr Wasser auf. Bei Beschichtung zum Cup-Inneren nimmt der A_w -Wert mit zunehmender Schichtdicke ab. Der Einfluss der Schichtdicken ist Wet-Cup Versuch sehr deutlich.

In Abbildung 5.24 ist der Wasserdampfaufnahmekoeffizient von mit einem Klingenschnitt beschädigten Proben im Wet-Cup Versuch dargestellt.

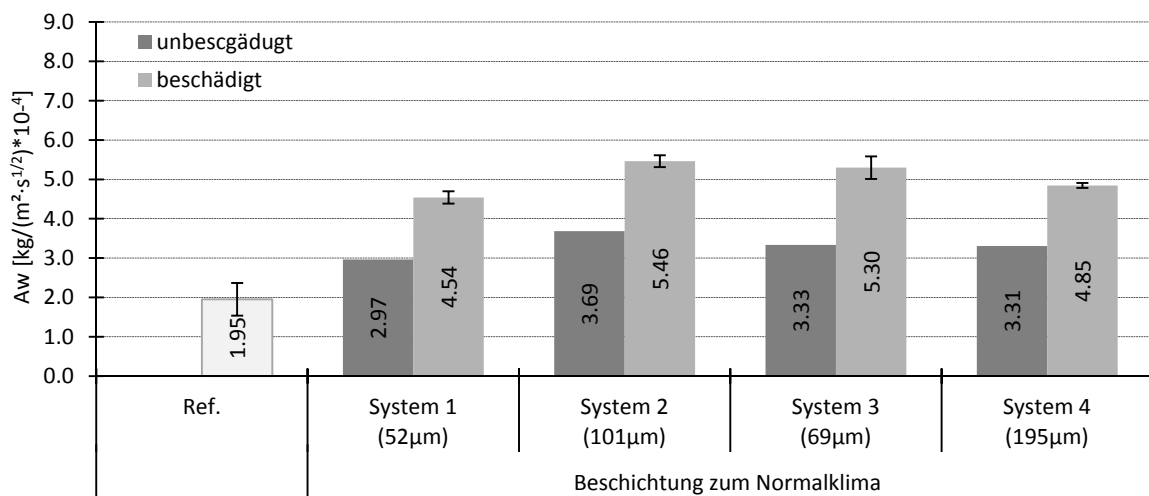


Abbildung 5.24: Wasserdampfaufnahmekoeffizienten (Klingenschnitt)

Die A_w -Werte der beschädigten Proben sind deutlicher höher, als die der unbeschädigten Proben. Durch die Beschädigung werden alle Systeme diffusionsoffner und die Feuchte kann leichter nach aussen durch das Holz und die Beschichtung diffundieren. Es zeigt sich deutlich, dass die Beschädigung zu einer erhöhten Wasseraufnahme führt.

5.2.3 Diffusionskoeffizient D

In Abbildung 5.25 sind die Diffusionskoeffizienten der Dry-Cup Messung abgebildet.

Der Diffusionskoeffizient gibt die Materialeigenschaft, wie stark ein Stoff Diffusion zulässt, unabhängig von der Messmethode und der Holzfeuchte an. Bei den Proben, die mit der Beschichtung zum Normalklima ausgerichtet sind, handelt es sich von der Richtung des Diffusionsstroms aus, um eine Feuchteabgabe und bei Proben mit Beschichtung zum Cup-Inneren um eine Feuchteaufnahme.

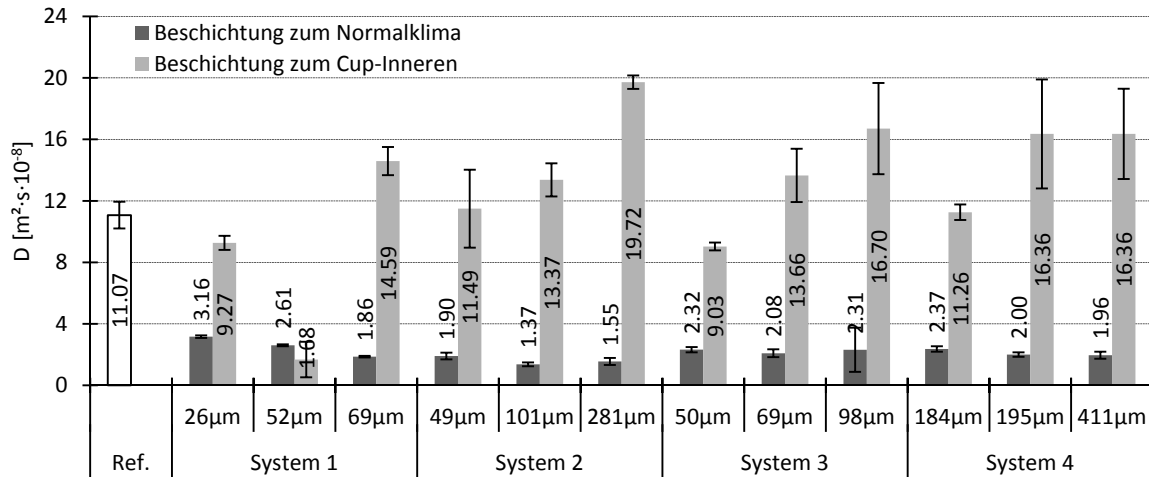


Abbildung 5.25: Diffusionskoeffizient (Dry-Cup)

Der Diffusionskoeffizient bei Beschichtung zum Normalklima ist deutlich kleiner als der bei Beschichtung zum Cup-Inneren. Der Einfluss der Beschichtung wird beim Vergleich mit der Referenzprobe deutlich. Die Werte der Proben mit Beschichtung zum Normalklima liegen unter der Referenz. Das bedeutet, dass hier die Diffusivität bei Feuchteaufnahme geringer ist als bei Feuchteabgabe. Eine Beschichtung reduziert, in diesem Fall die Diffusivität bei Feuchteaufnahme deutlich. Bei Feuchteabgabe nimmt sie, durch die Beschichtung, generell zu.

In Abbildung 5.26 sind die Diffusionskoeffizienten der Wet-Cups zu sehen. Bei den Proben mit Beschichtung zum Normalklima entsprechen die Werte einem Diffusionsstrom aus dem Holz durch die Beschichtung (Feuchteabgabe) und bei Beschichtung zum Cup-Inneren findet ein Diffusionsstrom durch die Beschichtung ins Holz (Feuchteaufnahme) statt.

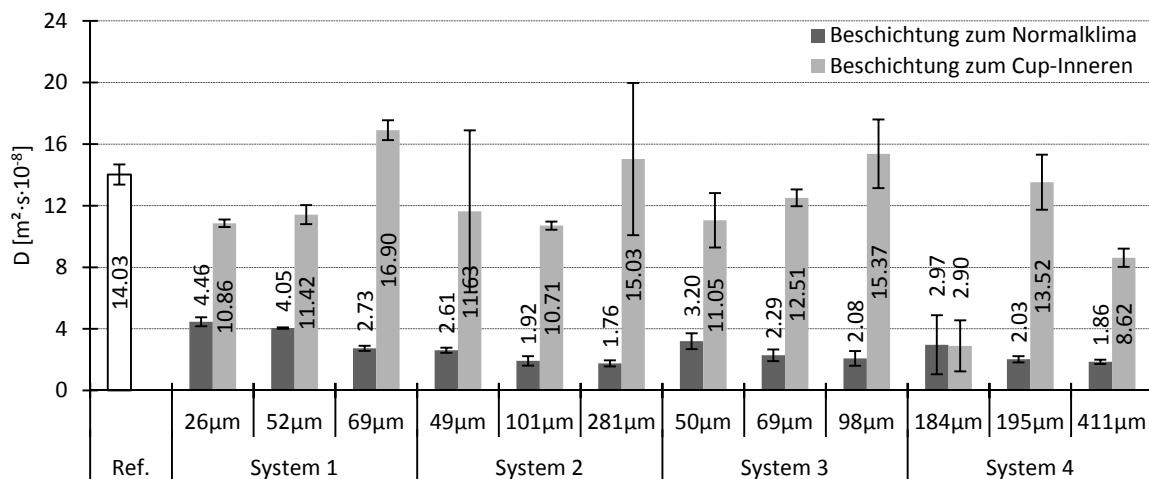
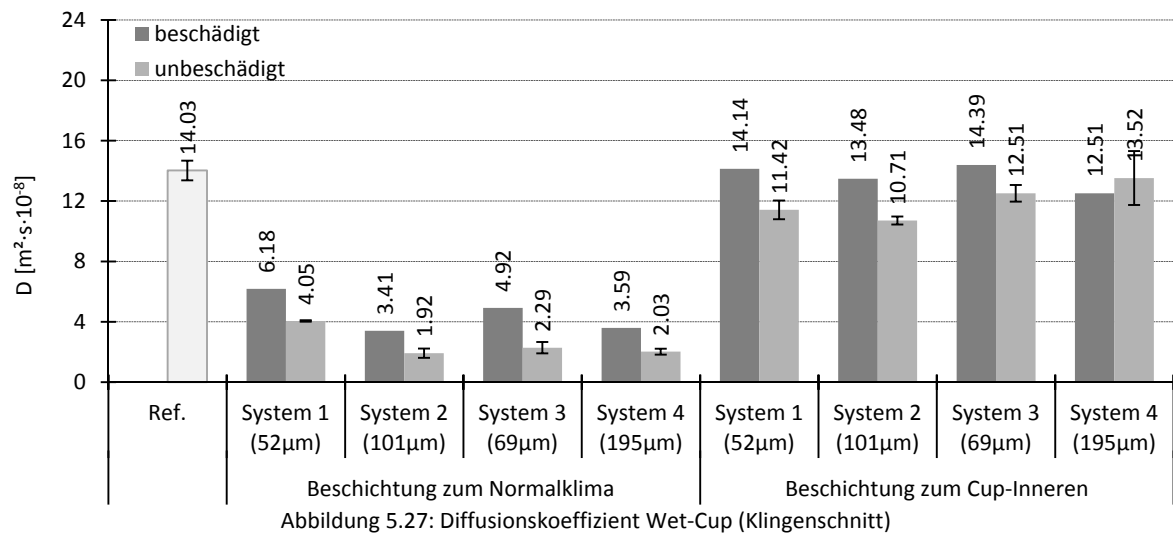


Abbildung 5.26: Diffusionskoeffizient (Wet-Cup)

Im Wet-Cup Versuch verringert die Beschichtung die Diffusivität bei Feuchteabgabe deutlich. Beim Vergleich der Wet-Cup Messungen mit den Dry-Cup Messungen fällt auf, dass sich die Werte der Proben mit Beschichtung zum Normalklima i.d.R. kaum unterscheiden. Auch ist die Diffusivität in beiden Fällen bei Feuchteaufnahme geringer als bei Feuchteabgabe.

Abbildung 5.27 zeigt den Diffusionskoeffizienten der mit einem Klingenschnitt beschädigten Proben im Wet-Cup Versuch. Hier entspricht die Beschichtung zum Cup-Inneren einer Feuchteaufnahme und Beschichtung zum Normalklima einer Feuchteabgabe.



Die beschädigten Proben liegen in beiden Diffusionsrichtungen deutlich höher als die unbeschädigten Proben. Eine Beschädigung führt auch hier zu einer deutlich erhöhten Diffusivität.

5.3 Weitere Kennwerte

Im Folgenden sind weitere Kennwerte des Feuchtetransports dargestellt. Ausserdem ist die Normaldichte und die Holzfeuchte vor und nach dem Versuch abgebildet. Tabelle 5.6 zeigt die Werte der Proben der Dry-Cup Versuche. Bei Beschichtung zum Normalklima trocknen die Proben mehr als bei Beschichtung zum Cup-Inneren. Es wird deutlich wie stark eine Beschichtung das Austrocknen behindert.

Tabelle 5.6: Kennwerte Dry-Cup

Dry-Cup								
System	T _d	ρ _{u1}	u ₁	u ₂	a _w	Z	g	s _d
Referenz		376	13	11	0.17	10.15	1.50	0.74
1	26	408	13	10	0.35	22.90	0.66	1.68
		392	13	12	0.24	13.89	1.09	1.02
	52	389	13	10	0.38	26.72	0.57	1.96
		383	13	11	0.23	14.12	1.08	1.03
	69	454	13	10	0.43	29.51	0.52	2.16
		396	13	11	0.08	11.93	1.27	0.87
2	49	411	13	9	0.47	29.23	0.52	2.14
		407	13	11	0.18	14.75	1.04	1.08
	101	406	13	8	0.51	36.78	0.41	2.70
		388	12	11	0.12	19.20	0.81	1.41
	281	489	13	8	0.47	27.25	0.56	2.00
		392	12	11	0.05	14.85	1.03	1.09
3	50	405	13	9	0.42	27.20	0.56	1.99
		403	13	11	0.25	14.01	1.08	1.03
	69	374	13	9	0.48	28.72	0.53	2.10
		375	9	8	0.09	13.15	1.16	0.96
	98	478	13	9	0.58	24.10	0.63	1.77
		398	12	11	0.06	15.76	0.97	1.15
4	184	404	13	9	0.40	27.59	0.55	2.02
		407	12	11	0.17	17.21	0.89	1.26
	195	393	13	8	0.47	29.04	0.52	2.13
		378	12	11	0.07	10.33	6.76	0.76
	411	430	12	8	0.48	27.20	0.56	1.99
		411	12	11	0.06	17.24	0.89	1.26
	Beschichtung zum Normalklima							
	Beschichtung zum Cup-Inneren							
T _d	die Trockenschichtdicke					[μm]		
ρ _{u1}	die Normalrohndichte					[kg/m ³]		
u ₁	der Feuchtegehalt vor der Messung (im Normalklima konditioniert)					[%]		
u ₂	der Feuchtegehalt nach der Messung					[%]		
a _w	der rohndichtebereinigte Wasseraufnahmekoeffizient					[kg/(m ² ·s ^{1/2}) · (m ³ /kg)·10 ⁻⁶]		
Z	der Wasserdampfdiffusionsdurchlasskoeffizient					[(m ² ·s·Pa)/kg·10 ⁵]		
g	die Wasserdampfdiffusionsstromdichte					[kg/(m ² ·s) ·10 ⁻⁶]		
s _d	die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke					[m]		

Die Ergebnisse der Wet-Cup Versuche werden in Tabelle 5.7 dargestellt. Die Holzfeuchten der Proben nach Versuchsende sind höher als die Dry-Cup Werte. Im technischen Merkblatt von Beschichtungssystem 4 wird ein im Wet-Cup Verfahren ermittelter s_d -Wert von $< 0.5\text{m}$ angegeben. Die s_d -Wert dieses Systems sind alle kleiner als 0.5m und bestätigen somit den angegebenen Wert.

Tabelle 5.7: Kennwerte Wet-Cup

Wet-Cup								
System	T_d	ρ_{u1}	u_1	u_2	a_w	Z	g	s_d
Referenz		373	13	20	0.52	1.46	5.60	0.11
1	26	410	13	21	1.06	3.43	2.39	0.25
		410	13	25	1.31	4.20	1.95	0.31
	52	402	13	24	1.29	3.78	2.21	0.28
		412	13	24	1.18	4.77	1.72	0.35
	69	388	13	17	0.67	2.60	3.15	0.19
		398	13	16	0.51	3.49	2.34	0.26
2	49	398	13	16	0.42	3.64	2.26	0.27
		411	12	14	0.60	3.44	2.38	0.25
	101	385	13	23	1.18	3.56	2.30	0.26
		386	13	25	1.41	5.83	1.42	0.43
	281	394	13	24	1.35	5.13	1.60	0.38
		412	13	25	1.36	5.37	1.53	0.39
3	50	377	13	17	0.71	2.61	3.14	0.19
		391	12	15	0.45	4.26	1.92	0.31
	69	378	13	15	0.15	5.06	1.62	0.37
		384	12	15	0.24	3.56	2.33	0.26
	98	449	13	23	1.10	4.56	1.79	0.33
		480	12	23	1.25	5.62	1.47	0.41
4	184	437	13	24	1.64	4.93	1.68	0.36
		468	12	23	1.30	5.48	1.49	0.40
	195	353	13	16	0.33	2.78	2.94	0.20
		431	18	20	0.21	3.01	4.79	0.22
	411	407	13	14	0.10	5.21	1.57	0.38
		410	12	15	0.30	4.94	1.68	0.36
	Beschichtung zum Normalklima							
	Beschichtung zum Cup-Inneren							
T_d	die Trockenschichtdicke					[μm]		
ρ_{u1}	die Normalrohddichte					[kg/m^3]		
u_1	der Feuchtegehalt vor der Messung (im Normalklima konditioniert)					[%]		
u_2	der Feuchtegehalt nach der Messung der rohddichtebereinigte					[%]		
a_w	Wasseraufnahmekoeffizient					[$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}) \cdot (\text{m}^3/\text{kg}) \cdot 10^{-6}$]		
Z	der Wasserdampfdiffusionsdurchlasskoeffizient					[$(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})/\text{kg} \cdot 10^5$]		
g	die Wasserdampfdiffusionsstromdichte					[$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \cdot 10^{-6}$]		
s_d	die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke					[m]		

Die Kennwerte der beschädigten Proben sind in Tabelle 5.8 abgebildet.

Tabelle 5.8: Kennwerte Referenzen und beschädigte Proben :Wet-Cup

System	T_d	ρ_{u1}	u_1	u_2	a_w	Z	g	s_d
Beschichtung zum Normalklima								
1	52	418	9	14	0.74	2.34	3.49	0.172
2	101	438	11	18	0.89	3.38	2.42	0.248
3	69	417	11	18	0.85	2.64	3.09	0.194
4	195	420	10	20	0.86	3.04	2.69	0.223
Beschichtung zum Cup-Inneren								
1	52	382	8	10	0.33	2.75	2.98	0.201
2	101	388	8	8	0.21	4.64	1.76	0.340
3	69	374	7	10	0.22	3.75	2.18	0.275
4	195	380	9	10	0.28	4.02	2.03	0.295
Referenzproben								
		373	10	14	0.52	1.46	5.60	0.107
T_d	Trockenschichtdicke				[μm]			
ρ_{u1}	Normalrohddichte				[kg/m^3]			
u_1	Feuchtegehalt vor der Messung (im Normalklima konditioniert)				[%]			
u_2	Feuchtegehalt nach der Messung				[%]			
a_w	rohddichtebereinigte Wasseraufnahmekoeffizient				[$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}) \cdot (\text{m}^3/\text{kg}) \cdot 10^{-6}$]			
Z	Wasserdampfdiffusionsdurchlasskoeffizient				[$(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})/\text{kg} \cdot 10^5$]			
g	Wasserdampfdiffusionsstromdichte				[$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \cdot 10^{-6}$]			
s_d	wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke				[m]			

5.4 Neutronenradiografie

5.4.1 Diffusion von Wasserdampf

In Abbildung 5.28 sind die Feuchteprofile über der Eindringtiefe abgebildet. Dabei entspricht die linke Diagrammseite der dem wasserdampfgesättigten Klima zugewandten Fläche und die rechte Seite der dem Normalklima zugewandten. Alle Proben zeigen hier ähnliche Diffusionseigenschaften. Die Holzfeuchte der unbeschichteten Proben ist nach 41 Tagen deutlich höher als die der Beschichteten.

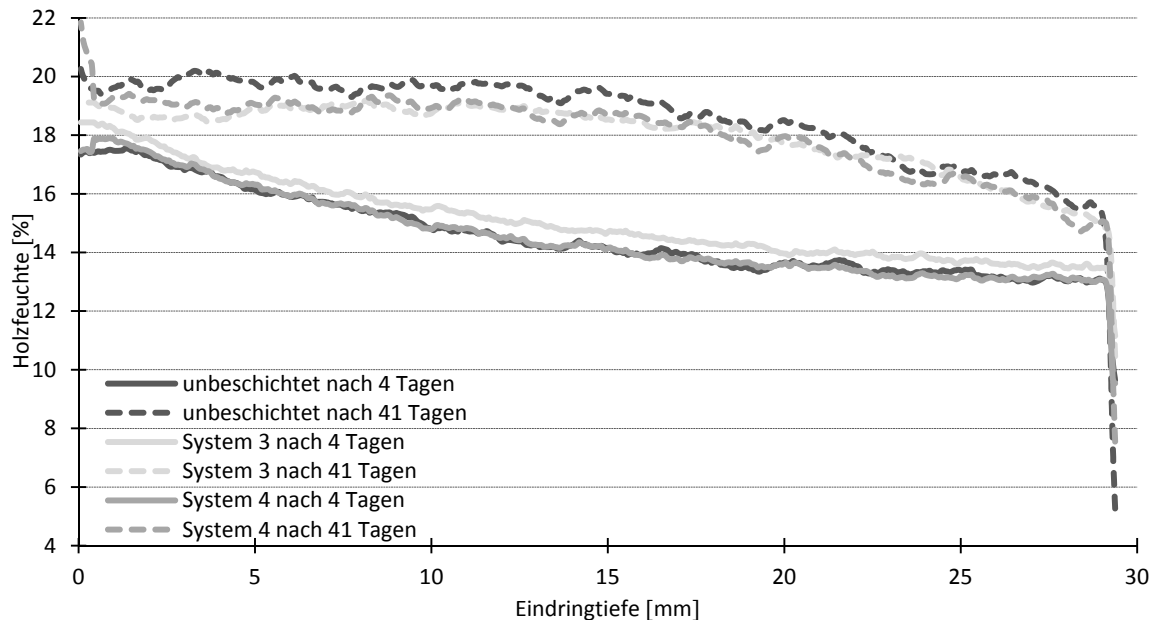


Abbildung 5.28: Feuchteprofile der Neutronenradiografie (Diffusion)

Die Grafik zeigt, dass sich nach 4 Tagen bereits ein Feuchtegradient aufgebaut hat, der von ca. 18% Holzfeuchte nach ca. 13% Feuchtegehalt verläuft. Dabei nimmt die Holzfeuchte mit steigender Eindringtiefe deutlich ab. Nach 41 Tagen stellt sich ein Feuchteverlauf über den Querschnitt von ca. 20% nach ca. 17% ein. Aus der Grafik ist zudem ersichtlich, dass es nicht zu einem Aufstauen der Feuchte unter der Beschichtung im Holz kommt. Vielmehr bestätigen die Ergebnisse den μ -Wert als Indikator der Feuchtestromreduktion. Eine Beschichtung erhöht den Diffusionswiderstand und reduziert somit den Feuchtestrom, staut ihn aber nicht auf.

In Abbildung 5.29 ist die durchschnittliche Holzfeuchte der Proben nach 4, 25 und 41 Tagen im Dampfdruckgefälle zu sehen. Alle Proben nehmen über den gesamten Zeitraum Feuchte auf. Nach 41 Tagen haben die beschichteten Proben einen geringeren Feuchtegehalt als die Unbeschichteten. Somit zeigt auch diese globale Betrachtung deutlich, dass eine Beschichtung langfristig den Feuchtestrom reduziert.

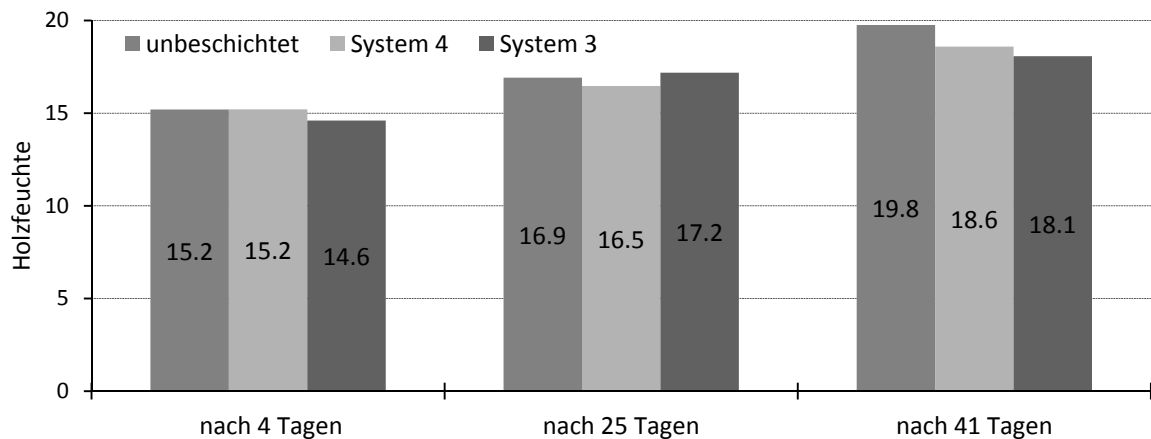


Abbildung 5.29: Zeitabhängige Holzfeuchte (Diffusion)

In Abbildung 5.30 ist der Verlauf der Holzfeuchte, bei 29mm Eindringtiefe in Abhängigkeit der Zeit abgebildet. Die Eindringtiefe ist in Diffusionsstromrichtung angegeben. Da die Proben 30mm hoch sind liegt dieser Punkt 1mm unter der Beschichtung. Tendenziell steigt die Feuchte aller Proben in diesem Punkt an. Beschichtungssystem 3 hat nach 41 Tagen eine um 1.6% höhere Feuchte als Beschichtungssystem 4 und die Referenz. Dass System 4 mit der Referenz identisch ist, unterstützt die Aussage des Herstellers, dass es sich um ein besonders diffusionsoffenes System handelt.

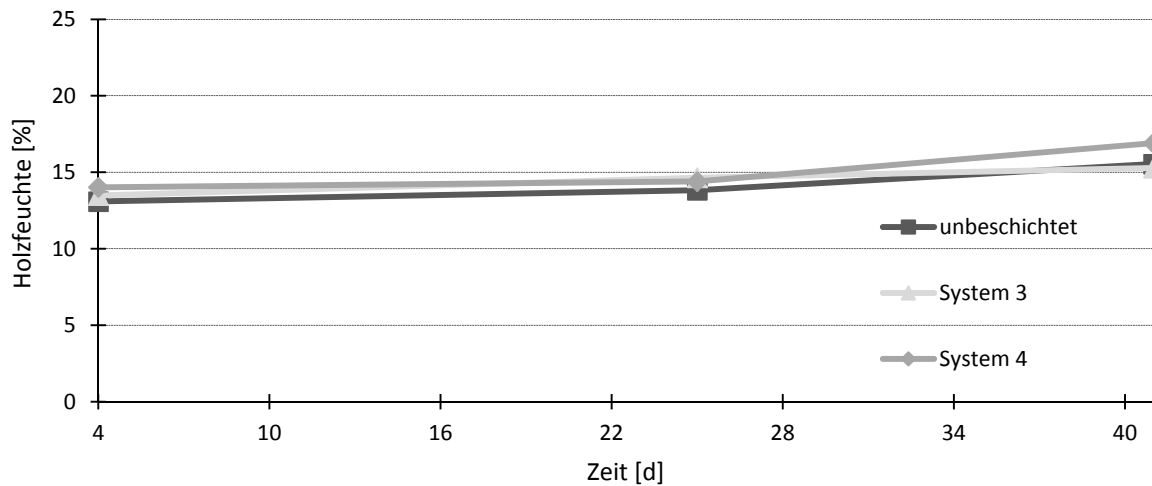


Abbildung 5.30: Holzfeuchte bei 29mm Eindringtiefe

Abbildung 5.31 zeigt die Holzfeuchte in Abhängigkeit der drei Messzeitpunkte bei 15mm Eindringtiefe in der Mitte der Probe. Alle Proben zeigen über den Zeitverlauf einen kontinuierlichen Anstieg der Holzfeuchte in der Probenmitte. Erst nach 41 Tagen zeigen sich leichte Unterschiede zwischen den Proben. System 4 hat den höchsten Wert mit 20.4%, gefolgt von der Referenz und System 3 mit 18.6%. Auch hier lässt System 4 einen stärkeren Diffusionsstrom als System 3 zu.

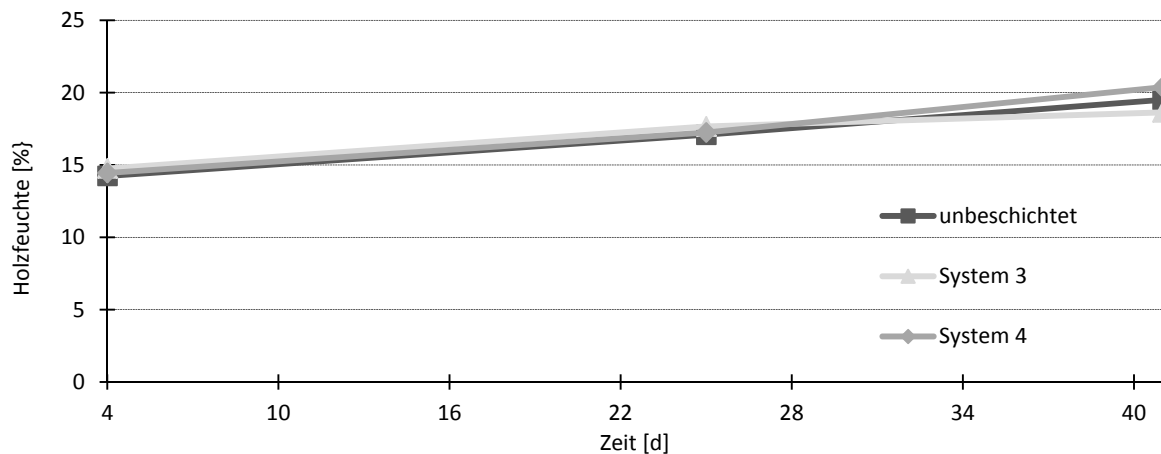


Abbildung 5.31: Holzfeuchte bei 15mm Eindringtiefe

Die Feuchten bei 1mm Eindringtiefe sind in Abbildung 5.32 abgebildet. Dieser Punkt liegt 1mm unter der dem wasserdampfgesättigten Klima ausgesetzten Fläche. System 4 zeigt auch hier nach 41 Tagen die höchste Feuchte mit 16.9%.

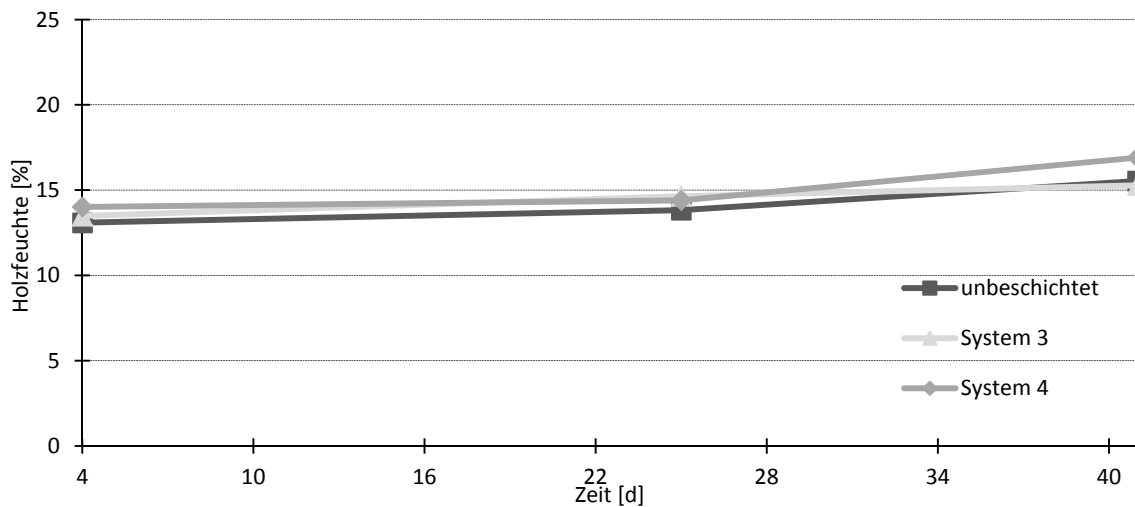


Abbildung 5.32: Holzfeuchte bei 1mm Eindringtiefe

In Abbildung 5.33 zeigt die Regressionsgerade durch den gemittelten Feuchteverlauf der unbeschichteten Proben. Der Korrelationskoeffizient R^2 ist mit 83% relativ hoch. Deshalb kann ein linearer Feuchtegradient mit einer Unsicherheit von 17% angenommen werden. Dieser verläuft von 20.8% nach 16.5% Holzfeuchte (hellgraue, gestrichelte Linie). Des Weiteren ist der Feuchtegradient, welcher sich nach Keylwerth einstellen sollte, zu sehen (Keylwerth, 1952). Dieser beginnt auf der wasserdampfgesättigten Seite bei 24.6% und sinkt auf 11.9% (schwarze, gestrichelte Linie). Die Abweichung der Keylwerth'schen Geraden zum Gradienten aus den eigenen Messungen ist offensichtlich. Bezogen auf die Fläche unter den Geraden, was der global betrachteten Holzfeuchte der Probe entspricht, haben die Keylwerth'schen Werte von der Geraden aus der eigenen Messungen eine Abweichung von -2.5%.

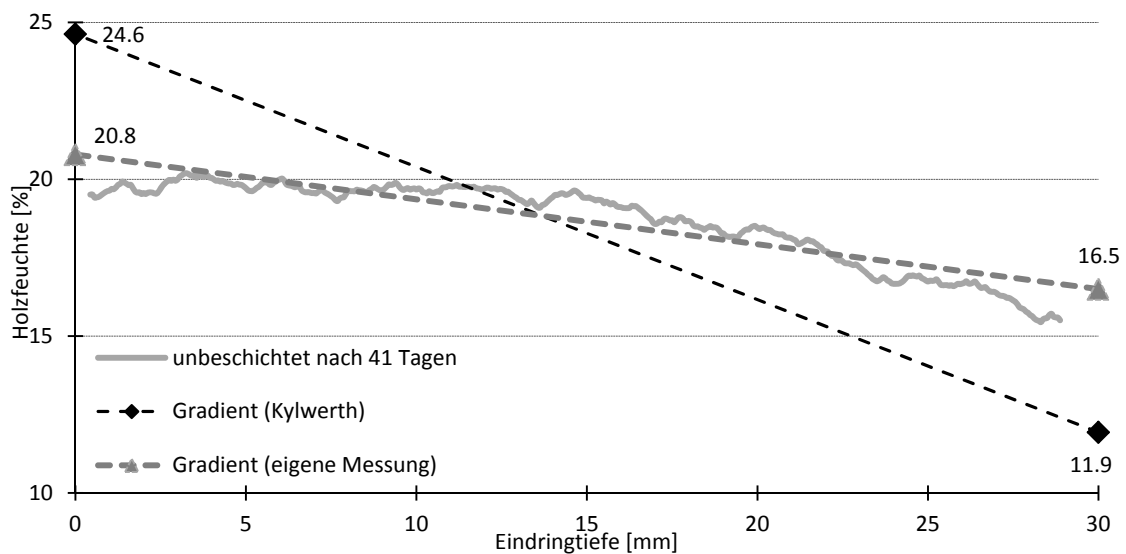


Abbildung 5.33: Vergleich Gradient der Referenzprobe bei 41 Tage mit Feuchtegradienten nach R. Keylwerth

Bei der Auswertung der Neutronenmessungen wurde eine eindeutig identifizierbare Grenze gewählt, da die Randbereiche quellen. Auf Abbildung 5.34 wird dieses Quellen, anhand der Hoch- und Tiefpunkte der Holzfeuchte, am Rand der Probe sichtbar.

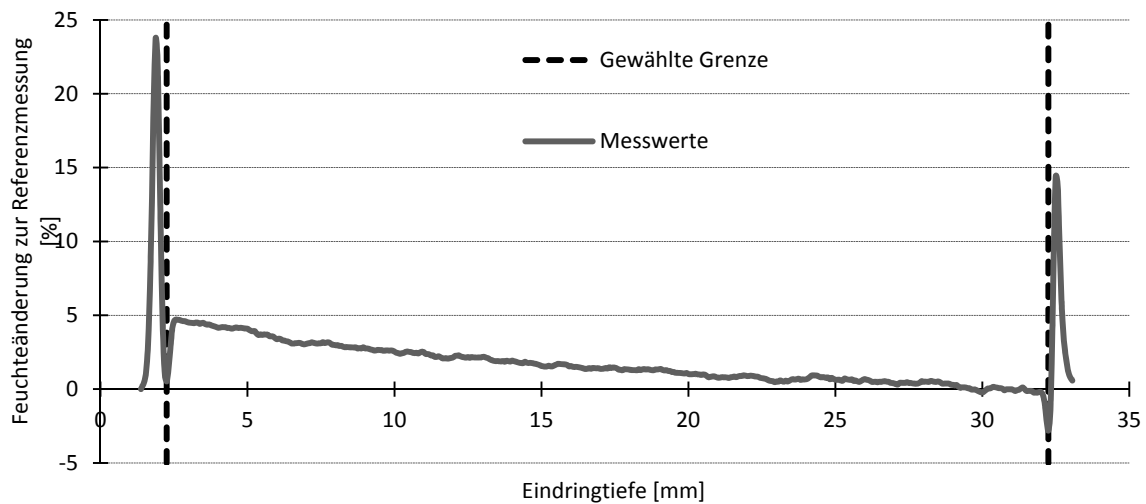


Abbildung 5.34: Beispiel für Grenzen beim Auswerten der Neutronentomografie

5.4.2 Eindringen von Wasser an Beschädigungen

Die Neutronenradiografie-Messungen an Proben, die einer Wassersäule ausgesetzt wurden, ergeben die folgenden Feuchteprofile. Abbildung 5.35 zeigt die Holzfeuchte in Abhängigkeit der Eindringtiefe eine Stunde und 16 Stunden nach Versuchsstart. Die dem Wasser ausgesetzte Oberfläche entspricht der linken Seite des Diagramms.

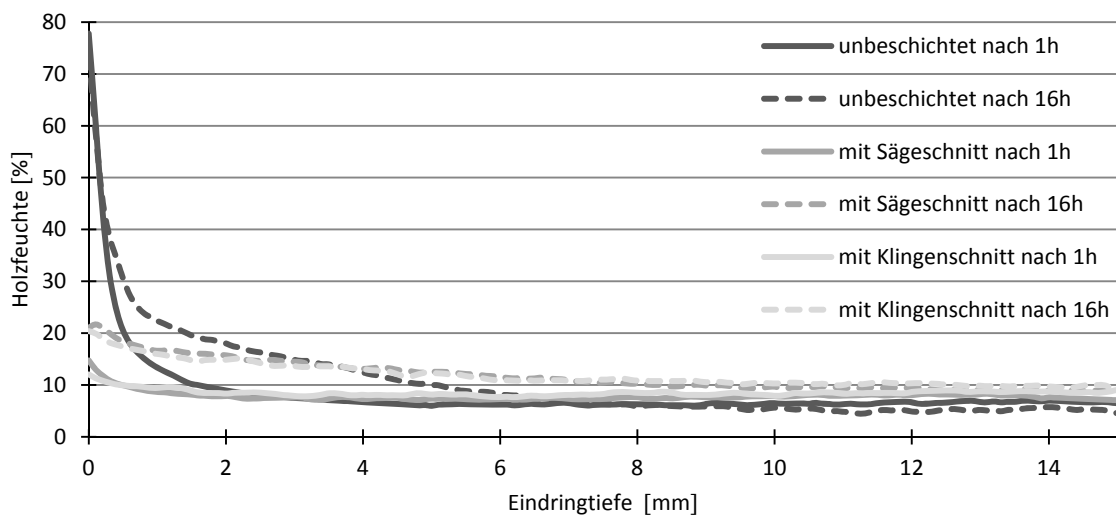


Abbildung 5.35: Feuchteprofile der Neutronenradiografie (Wassersäule)

An der dem Wasser ausgesetzten Fläche, nimmt die unbeschichtete Probe in der ersten Stunde ca. 69% Feuchte auf. In den folgenden 15h steigt die Feuchte an dieser Stelle nicht weiter. Das zeigt, dass Holz zunächst schnell viel Wasser aufnimmt, der Prozess sich dann aber verlangsamt. Die beiden beschichteten und beschädigten Proben nehmen im oberen Bereich deutlich weniger Feuchte auf als die Referenzprobe. Obwohl die Beschichtungen beschädigt sind, schützt die Beschichtung das Holz und weniger Feuchte wird aufgenommen. Obwohl die mit einem Sägeschnitt beschädigte Probe eine deutlich grössere Fehlstelle aufweist, nimmt sie nur unwesentlich mehr Wasser als die mit Klingenschnitt beschädigte auf. Zu erkennen ist die Differenzierung im Randbereich, da das Wasser über die Diffusion sehr langsam ins Innere transportiert wird. Der Effekt ist für Fichte hinreichend

bekannt. Die mit einem Sägeschnitt beschädigte Probe zeigt nach 16 h eine leicht erhöhte Feuchte direkt unter der Oberfläche. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Kapillare durch die Sägezahngeometrie an der Kreissäge verletzt wurden. Somit dringt nicht nur Wasser über die freigeschnittene Fläche in TR-Richtung ein, sondern durch die verletzten Kapillare auch in L-Richtung.

Abbildung 5.36 gibt die durchschnittliche Holzfeuchte der Proben, zu den Zeitpunkten eine Stunde und 16 Stunden nachdem die Probenoberflächen einer Wassersäule ausgesetzt wurden, wieder. Die hellgrauen Säulen stehen für die Messungen eine Stunde nach Versuchsstart, die dunkelgrauen für die Messungen 16 Stunden nach Versuchsstart. Die Zunahme der Feuchte beträgt durchschnittlich betrachtet bei der Referenzprobe 2%, bei den beschichteten Proben 3%.

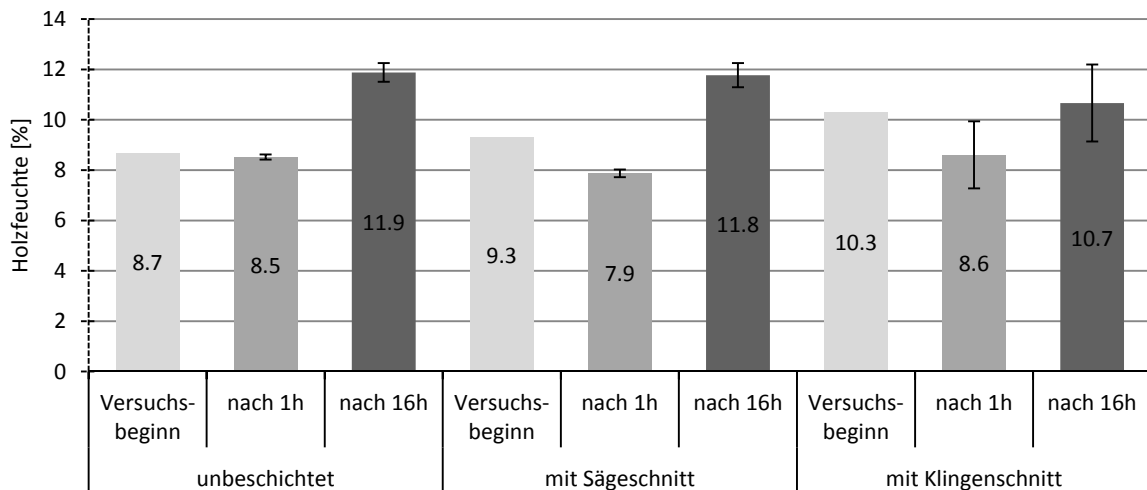


Abbildung 5.36: Holzfeuchte mit 95% Konfidenzintervall (Wassersäule)

Die globale Holzfeuchte nimmt, bei allen Proben, in der ersten Stunde nach Versuchsstart ab. Ob dies vom Klima am Messplatz (ca. 25°C und 50% relative Luftfeuchte, PSI interne Daten) herrührt oder andre Einflüsse der Grund dafür sind sollte in weiteren Versuchen erörtert werden. Nach einer Stunde nimmt die Feuchte bei allen Proben zu. Die Endfeuchten der Proben liegen zwischen 10.7% und 11.9%. Die Beschädigungen haben hier ähnliche Holzfeuchten zur Folge, wie Proben ohne Beschichtung. Sobald in der Beschichtung Beschädigungen vorhanden sind, reduziert sich der Schutz gegenüber Wasser sehr stark.

Abbildung 5.37 zeigt die Holzfeuchte nach einer Stunde und nach 16 Stunden bei 1, 7.5 und 13 mm Eindringtiefe. In den Bereiche die näher am Wasser liegen, findet eine deutlich stärkere Wasseraufnahme statt. Der Weitertransport ins Innere geht bei allen Proben gleich langsam von statten.

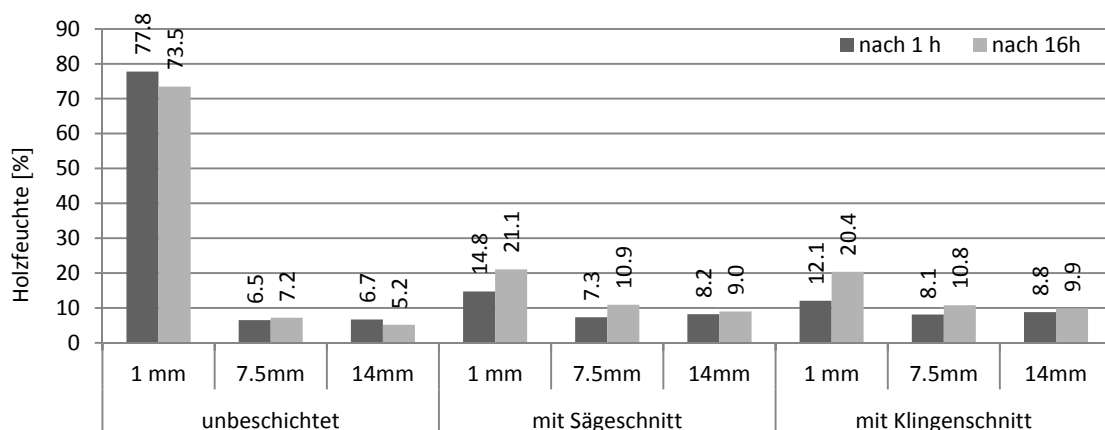
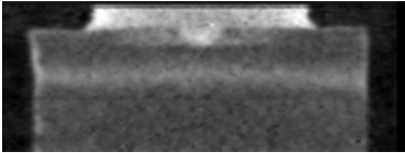
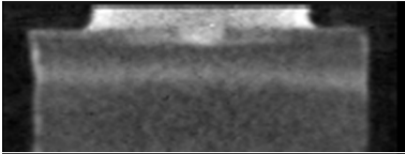
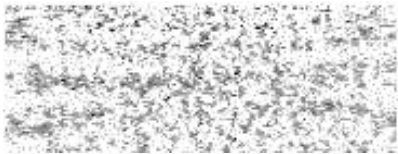
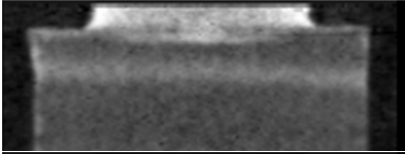
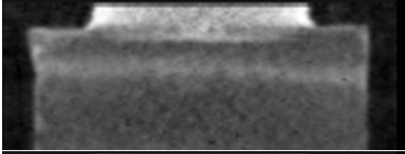
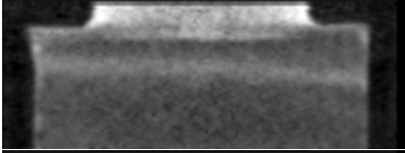
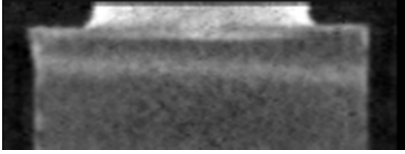
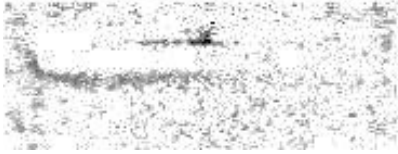


Abbildung 5.37: Zeitabhängige Holzfeuchte bei 1mm, 7.5mm und 14mm Eindringtiefe (Wassersäule)

5.5 Neutronentomografie bei Wassereinwirkung an Beschädigung

Die in T-Richtung geschnittenen Datensätze sind in Tabelle 5.9 abgebildet. Neben den unreferenzierten Schnitten, welche die TL-Ebene zeigen, sind die Feuchteänderungen zur ersten Messung mittels Grauwerten dargestellt.

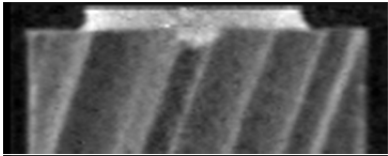
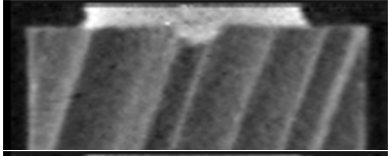
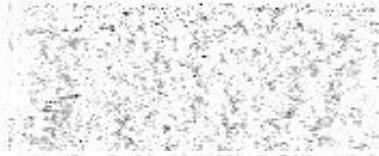
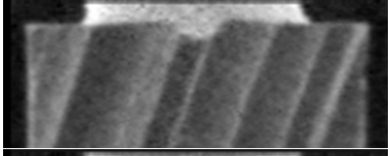
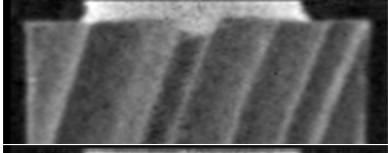
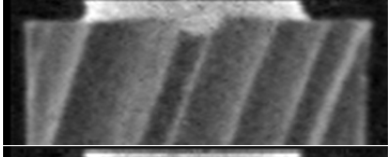
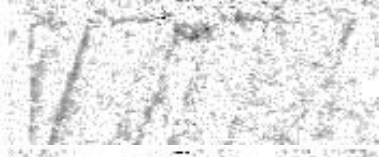
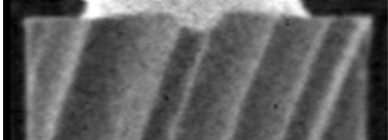
Tabelle 5.9: TL-Ebene von 0h bis 24h

Zeit [h]	unreferenzierten Messung	TL-Ebene Feuchteänderung zur Messung 0-1h
0-1		
1-2		
6-7		
12-13		
18-19		
23-24		

Die unreferenzierten Bilder zeigen, dass sich die dem Wasser ausgesetzte Fläche stark quillt, was zu einem Aufwölben der Fläche führt. Zunächst nimmt der gesamte Querschnitt Feuchtigkeit auf. Daraufhin lassen die Grauwerte im Zeitverlauf eine Feuchteansammlung unterhalb der Bohrung erkennen, die sich longitudinal immer weiter ausbreitet. Hier wurden Fasern durch die Bohrung verletzt. Über diese wird das Wasser, analog wie beim Klebstoffauftrag, sehr schnell und tief ins Holzinne transportiert. Eine Jahrringgrenze die auf den unreferenzierten Bildern als heller Streifen zu sehen ist, zeigt eine verstärkte, volumetrische Feuchteaufnahme.

Tabelle 5.10 zeigt die in T-Richtung geschnittenen Datensätze. Neben den unreferenzierten Schnitten, der TR-Ebene, sind die Feuchteänderungen zur ersten Messung als Grauwerte abgebildet.

Tabelle 5.10:TR-Ebene von 0h bis 24h

Zeit [h]	Unreferenzierte Messung	TR-Ebene Feuchteänderung zur Messung 0-1h
0-1		
1-2		
6-7		
12-13		
18-19		
23-24		

Die Bilder auf der linken Seite zeigen wie die Probe, vor allem im oberen Bereich, quillt. Deutlich sind ausserdem die Jahrringgrenzen und die daraus folgenden Dichteunterschiede zu erkennen. Rechts wird deutlich wie die Probe zunächst im gesamten Querschnitt Feuchte aufnimmt. Dann sind Feuchteansammlungen unterhalb der Bohrung, seitlich der Bohrung und entlang der Jahrringgrenzen zu sehen. Die Feuchteausbreitung seitlich der Bohrung findet hauptsächlich unter der Beschichtung statt. Direkt unter dem Bohrgrund ist die grösste Feuchteansammlung zu erkennen, die stetig zunimmt. Die Aufnahmen machen deutlich, dass die Neutronentomografie zur Differenzierung der richtungsabhängigen Wasseraufnahme geeignet ist. Die Feuchtekonzentration um die Bohrung, vor allem die Ausbreitung des Wassers in den Kapillaren, zeigt den Einfluss einer Beschädigung auf den Wassertransport.

Anhand von vier Querschnitten ist die Feuchteänderung im Folgenden dargestellt, deren Positionen in Abbildung 5.38 schematisch zu sehen sind.

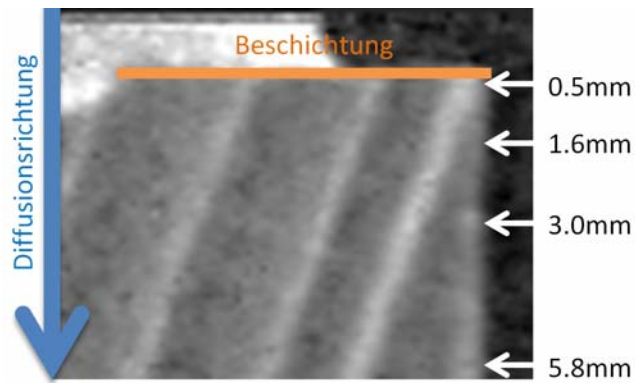


Abbildung 5.38: Position der Querschnitte

In Abbildung 5.39 werden die Feuchteänderungen der Querschnitte über den Zeitraum von 24h dargestellt. Die Querschnitte zeigen einen synchronen Verlauf der Feuchteaufnahme, die mit zunehmender Eindringtiefe sinkt. Da das Bohrloch 2mm in das Material hineinreicht, liegt es innerhalb der Querschnitte bei 0.5 und 1.6 mm. Dadurch erklärt sich die hohe Feuchteaufnahme dieser zwei Ebenen. Obwohl die Ebene bei 3 mm nur 1 mm unter dem Ende des Bohrlochs liegt, findet hier schon eine deutlich geringere Feuchteaufnahme statt. Diese unterscheidet sich kaum von der Ebene bei 5.8mm, die sogar 3.8mm unter dem Ende des Loches liegen. Das bedeutet, dass eine Beschädigung die Wasseraufnahme vor allem dort beeinflusst, wo die Holzstruktur verletzt ist.

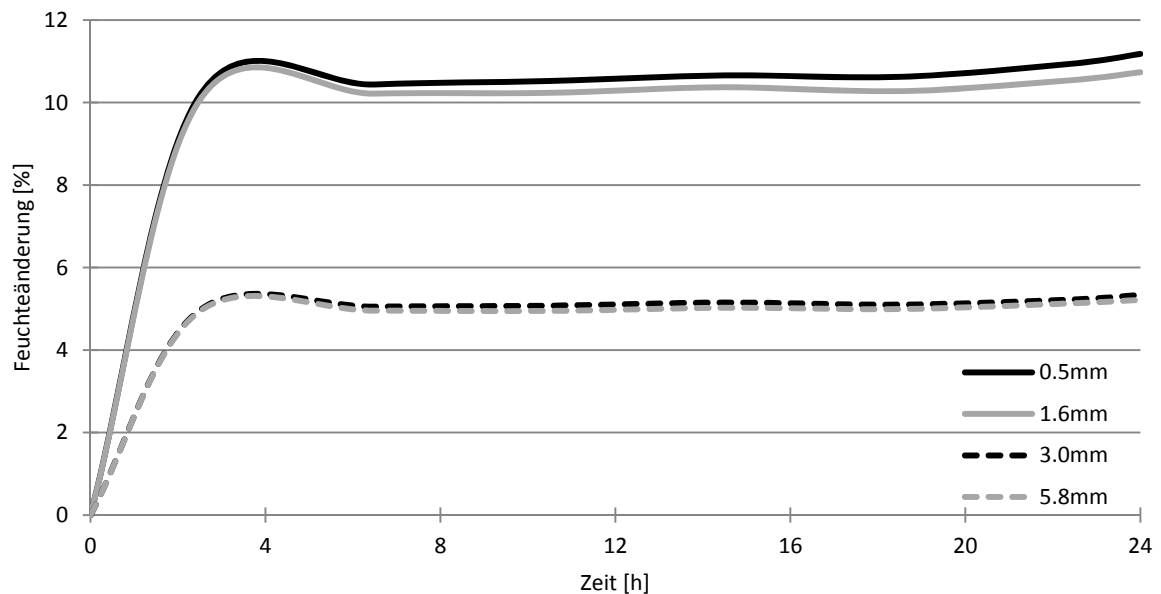


Abbildung 5.39: Feuchteänderung bei Wassereinwirkung an Bohrloch von 0h bis 24h

5.6 Nasshaftfestigkeit und Bruchbilder

Abbildung 5.40 zeigt die maximale Haftfestigkeit in Abhängigkeit des Beschichtungssystems und Konditionierung. Die Werte sind nach Beschichtungen und Konditionierungsart geordnet: im Normalklima konditioniert (Anthrazitfarbene Balken) mit freiem Wasser behandelt (hellgraue Balken) und mit Dampfdruck konditionierte Proben (dunkelgrauer Balken). Bei allen vier Systemen weisen die im Normalklima konditionierten Proben signifikant höhere Haftfestigkeiten als die mit freiem Wasser behandelten bzw. die mit Dampfdruckgefälle konditionierten, auf. Die Haftfestigkeit sinkt also mit zunehmender Feuchte. Beschichtungssystem 3 erreicht bei allen drei Konditionierungsarten die höchste Haftfestigkeit.

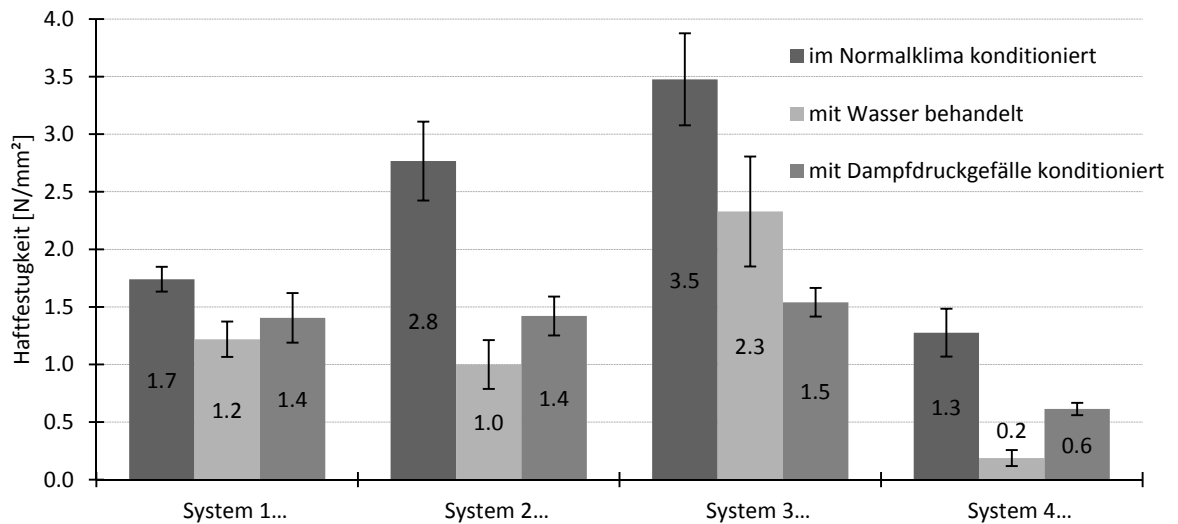


Abbildung 5.40: Nasshaftfestigkeit

Beschichtung 4 erreicht bei allen Konditionierungen die geringste Haftfestigkeit. Generell sind innerhalb der Systeme die Unterschiede zwischen den Festigkeiten eher gering. Das bedeutet, dass die Art der Feuchteeinwirkung (Wasser oder Wasserdampf) keine grosse Rolle spielt.

In Tabelle 5.11 sind die Bruchbilder der Versuche aus Abbildung 5.40 [5]. Bei den im Normalklima konditionierten Proben zeigen die Systeme 1 und 2 mehrheitlich einen Adhäsionsbruch zwischen Grundierung und Decklack. Beschichtung 3 weist abgesehen von einem geringen Anteil an Adhäsionsbruch zwischen Substrat und Grundierung ein ähnliches Bruchverhalten auf. Bei System 4, welches ein mehrschichtiges System ist (zweimal Grundierung und zweimal Decklack), ist der grösste Teil der Bruchfläche innerhalb der beiden Schichten des Decklackes zu finden.

Tabelle 5.11: Visuelle Beurteilung der Bruchflächen

Visuelle Untersuchung der Bruchfläche nach DIN EN ISO 4624 [%]									
Klimatisierung	System	a	b	c	d	e	f	g	h
Normalklima	1	18	-	-	82	-	-	-	14
	2	38	-	-	60	-	-	2	13
	3	27	15	-	58	-	-	-	12
	4	-	0	-	21	79	-	-	12
Wasser	1	-	97	-	3	-	-	-	15 ^a
	2	-	90	-	10	-	-	-	15 ^a
	3	-	94	-	6	-	-	-	15 ^a
	4	-	97	-	3	-	-	-	14 ^a
Dampfdruckgefälle	1	-	100	-	-	-	-	-	25
	2	-	-	94	-	6	-	-	24
	3	-	-	97	-	3	-	-	24
	4	-	-	0	-	7	93	-	22
a	Kohäsionsbruch im Substrat								
b	Adhäsionsbruch zwischen Substrat und erster Beschichtung								
c	Kohäsionsbruch in der ersten Beschichtung								
d	Adhäsionsbruch zwischen erster und zweiter Beschichtung								
e	Kohäsionsbruch in der <i>n</i> -ten Schicht eines Schichtensystems								
f	Adhäsionsbruch zwischen <i>n</i> -ter und <i>m</i> -ter Schicht eines Schichtensystems								
g	Adhäsionsbruch zwischen letzter Beschichtung und Klebstoff								
h	Holzfeuchte [%]								
a	lokale Feuchteansammlung, Einwirkzeit des Wassers 2h								

Die Bruchbilder zeigen, dass die Schwächen der Systeme 1 bis 3 bei den jeweiligen Konditionierungen ähnlich verteilt sind. Bei den mit freiem Wasser behandelten Proben findet der Bruch mehrheitlich zwischen Substrat und erster Beschichtung statt. In Abbildung 5.41 (Mitte) ist erkennbar, wie das Wasser unter die Beschichtung geflossen ist. Diese lokale Feuchteansammlung reduziert die Haftfestigkeit.



Abbildung 5.41: Bruchbilder bei Nasshaftfestigkeitsversuchen

Bei den mit Dampfdruckgefälle konditionierten Proben ist der grösste Teil der Brüche innerhalb der ersten Schicht zu finden. Bei den im Normalklima konditionierten Proben findet das Bruchversagen zwischen erster und zweiter Beschichtung statt. Es ist zu beobachten, dass der Bruch mit zunehmender Feuchte Richtung Substrat wandert und ein Lösen der Beschichtung vom Substrat auf kondensiertes Wasser hindeutet, wohingegen ein Versagen zwischen den Schichten auf den Einfluss von dampfförmigem Wasser hindeutet. Bei Beschichtung 4 findet das Versagen zum grössten Teil

zwischen den Schichten statt. Somit geben die Ergebnisse die Festigkeit der Beschichtung selbst und nicht die Haftfestigkeit auf dem Substrat wieder. Möglicherweise ist -analog zu einigen Klebstoffen- auch die Eigenschaft der Beschichtung feuchteabhängig. Ein geringerer Anteil bricht bei Beschichtung 4 bei im Normalklima konditionierten Proben zwischen der ersten und der zweiten Beschichtung, in diesem Fall zwischen den Grundierungen. Bei den mit Wasser behandelten Proben sind alle Bruchbilder ähnlich. Der Hauptteil ist bei allen Systemen zwischen Substrat und erster Beschichtung, also zwischen Holz und Grundierung, zu finden. Nur sehr wenig Bruchversagen findet als Adhäsionsbruch zwischen Substrat und erster Beschichtung statt. Die mit Wasser behandelten Proben versagen zum grössten Teil zwischen Substrat und erster Beschichtung. Bei den mit einem Dampfdruckgefälle konditionierten Proben versagt das System 1 ausschliesslich zwischen Holz und Grundierung und weist somit ein ähnliches Bruchverhalten wie die mit Wasser behandelten Proben auf. Beschichtungssystem 2 und 3 brechen hauptsächlich innerhalb der Grundierung. System 4 versagt mehrheitlich zwischen der ersten und der zweiten Decklackschicht.

6 Zusammenfassung

Die Analyse der Trockenschichtdicke zeigt, dass die Dicke aufgrund der zerklüfteten Holzoberfläche stark variiert. Die REM Aufnahmen zeigen Risse und Kavitäten, die auf den Querschnitten nur schwer auszumachen sind. Fehlstellen treten bei geringer Auftragsmenge auf und Lufteinschlüsse bei hoher Auftragsmenge. Diese Defekte haben eine Reduzierung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes zur Folge. Es ist anzunehmen, dass sich dieser Effekt mit der Zeit noch stärker auswirkt. Hinzu kommt, dass die Alterung in der Regel die Beschichtungen weniger elastisch werden lässt.

Mit Hilfe der ermittelten Kennwerte für den Feuchtetransport und deren Abhängigkeit von der Holzfeuchte, kann das Auffeuchten von beschichtetem Holz erklärt werden. Der μ -Wert ist stark von der Holzfeuchte abhängig, er sinkt mit zunehmender Holzfeuchte an. Durch den lokalen Feuchteanstieg an beschädigten Stellen sinkt der μ -Wert mit zunehmender Holzfeuchte. Der A_w -Wert steigt, die Wasseraufnahme beschleunigt sich und Wasser dringt schnell und tief ein.

Durch das Austrocknen an der beschädigten Fläche entsteht ein hoher Diffusionswiderstand und die Feuchte im Holz diffundiert langsamer durch die Beschädigung nach aussen. Durch die Beschichtung wird das Abtrocknen reduziert. Die in Fachkreisen verbreitete Annahme, dass durch Defekte in Beschichtungen Feuchtigkeit schnell und tief ins Holz eindringt aber nur langsam wieder her austrocknet und es so zu einem Auffeuchten kommt wird so untermauert. Die mit einem Klingenschnitt beschädigten Proben zeigen, dass auch kleine Beschädigungen einen grossen Einfluss auf den Diffusionswiderstand haben.

Die Neutronentransmissionsmessungen bilden Feuchteprozesse hochaufgelöst ab. Bei der Neutronenradiografie zur Diffusion von Wasserdampf wurde keine erhöhte Feuchte oder ein Aufstauen der Feuchte in beschichtetem Holz festgestellt. Vielmehr baut sich ein Feuchteprofil auf, welches annähernd als Feuchtegradient bezeichnet werden kann. Das Beschichten von Holz reduziert den Feuchtestrom vom Holz deutlich.

Die Neutronenmessungen zum Eindringen von Wasser zeigen, dass auch beschädigte Oberflächen das Holz vor Wassereinfluss schützt. Dabei ist die Art der Beschädigung von Bedeutung. Sind zum Beispiel Fasern angeschnitten, führt dies zu einer verstärkten kapillaren Wasseraufnahme. Die Dynamik des Prozesses wird ebenfalls deutlich. Nachdem am Anfang schnell viel Wasser eindringt, kommt es danach langsam zur Diffusion.

Die Golden Ratio Tomografie hat gegenüber den zweidimensionalen Verfahren den Vorteil, dass die Probe in beliebiger Richtung ausgewertet werden kann. Dadurch kann die Richtungsabhängigkeit anhand einer Probe untersucht werden. Dabei wird deutlich wie sich das Wasser im Bereich der Beschädigung vor allem longitudinal und entlang von Jahrringgrenzen ausbreitet. Lokale Ansammlungen zeichnen sich dabei deutlich ab.

Neutronentransmissionsmessungen geben die Prozesse im Holz gut wieder. So zeigt sich, dass Beschädigungen in der Beschichtung vor allem dort zu einer erhöhten Wasseraufnahme führen, wo die Struktur des Holzes verletzt ist. Besonders an angeschnittenen Fasern kann es in Faserrichtung, durch die deutlich höheren Wasseraufnahmekoeffizienten, zu einer verstärkten Durchfeuchtung kommen.

Die Haftfestigkeit der Beschichtung ist stark von der Feuchte abhängig. Mit zunehmender Feuchte sinkt diese i.d.R. ab. Die Bruchbilder zeigen, dass ein Versagen zwischen Substrat und Beschichtung auf den Wassereinfluss zurückzuführen ist. Ein Versagen innerhalb der Beschichtung deutet auf einen Feuchteinfluss innerhalb des Beschichtungsmaterials hin.

Die Ergebnisse der Arbeit können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die geprüften 4 Beschichtungssysteme zeichneten sich alle durch einen relativ geringen Diffusionswiderstand aus.
- Von der Tendenz her erhöht sich der Diffusionswiderstand mit der Schichtdicke, zwischen den Systemen gibt es dabei aber erhebliche Unterschiede, bei hohen Schichtdicken auftretende Defekte bewirken eine Reduzierung des Diffusionswiderstandes.
- Die Ausrichtung der Beschichtung im Cup-Versuch (Beschichtung zum Normalklima oder zum Trocknungsmittel bzw. Wasser wirkt sich erheblich auf den Diffusionswiderstand aus) bei Orientierung der Beschichtung zum Normalklima hin werden deutlich höhere Werte erreicht als zum Wasser oder Trocknungsmittel.
- Die Haftfestigkeit der Beschichtung wird durch Eindringen von Wasser (flüssig oder dampfförmig) deutlich reduziert. Der Effekt ist auch bei Klebstoffen bekannt. Eindringen von Feuchte unter die Beschichtung kann in Verbindung mit Quellen und Schwinden des Holzes und Unterschieden in der Quellung zwischen Früh- und Spätholz zum Abblättern der Beschichtung führen.
- Die Neutronenradiographie erwies sich als geeignete Methode um die Feuchteverteilung im Querschnitt gut nachzuweisen. Eine Konzentration der Feuchte unter der Beschichtung konnte nicht nachgewiesen werden. Dies ist vermutlich auf den geringen Diffusionswiderstand der Beschichtungssysteme zurückzuführen. Bei geplanten weiterführenden Arbeiten sind daher Beschichtungssysteme mit deutlich erhöhtem Diffusionswiderstand zu verwenden.
- Die Neutronentomographie kann als Methodik zur Erfassung des Eindringens von Defekten in beschichtetes Holz genutzt werden. Sie erlaubt eine hohe Ortsauflösung.

7 Verzeichnisse

7.1 Literaturverzeichnis

- Brombacher, Volker, et al. 2012. Untersuchung zur Wärmeleitfähigkeit und Feuchteverhalten von Holzfaserverleimungen und Materialkompositionen. *Bauphysik*. 34, 2012, Bd. 4.
- Cohen. 1988. Statistical Power Analysis for the Behavioral Science. [Buchverf.] Jacob Cohen. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum Associates, 1988, S. 79-81.
- EPFL, Biomedical Imaging Group. 2013. bigwww.epfl.ch. [Online] 1. 7 2013. [Zitat vom: 6. 7 2013.] <http://bigwww.epfl.ch/thevenaz/turboreg/>.
- Fick, Adolf. 1855. *Ueber Diffusion, Annalen der Physik und der Chemie*. 1855.
- Fiji.sc. 2013. Fiji.sc. [Online] 6. 7 2013. [Zitat vom: 22. 7 2013.] <http://fiji.sc/Fiji>.
- Foell, Helmut. 2009. [tf.uni-kiel.de](http://www.tf.uni-kiel.de/). [Online] 2009. [Zitat vom: 01. 02 2014.] <http://www.tf.uni-kiel.de/>.
- Frandsen, Hendrik Lund, Damkilde, Lars und Svenson, Staffan. 2007. A revised multi-Fickian moisture transport model to describe non-Fickian effects in wood. *Holzforschung Band 61*. 2007.
- Gfeller, Baltz und Zürcher, Ernst. 2005. *Einheimische und fremdländische Nutzhölzer*. Biel : AHB BFH Biel, 2005.
- Hounsfield, G.N. 1973. Computerized transverse axial scanning (tomography): Part I. Description of the system. *British Journal of Radiology* 46. 02 1973, S. 1016-1022.
- Kaestner, Anders et al. 2011. Spatiotemporal computed tomography of dynamic processes. *Optical Engineering*. 2011.
- Keylwerth, Rudolf. 1952. Hochtemperatur-Trockenanlagen. *Holz als Roh- und Werkstoff* 10. 1952.
- Köhler, Thomas. 2004. A projection access scheme for interactive reconstruction based on the golden section. In *proceeding of: Nuclear Science Symposium Conference Record*. 2004, Volume 6.
- Kuchling, Horst. 2011. *Taschenbuch der Physik*. Leipzig : Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2011.
- Lehman, Eberhard, Vontobel, Peter und Niemz, Peter. 2001. Anwendung der Methode der Neutronenradiographie zur Analyse von Holzeigenschaften. *Holz als Roh- und Werkstoff* 59. 2001, S. 463-471.
- Leisse, Bernhard. 2002. *Holzbauteile richtig schützen*. Leinfeld-Echterdingen : DRW-Verlag Weinbrenner GmbH&Co., 2002.
- Mannes, David. 2009. Non-destructive testing of wood by means of Neutron imaging in comparison with similar Methodes. 2009, S. 35.
- Mannes, David, et al. 2009. Neutron attenuation coefficients for non-invasive quantification of wood properties. *Holzforschung Vol. 63*. 07. 05 2009, S. 472-478.
- Mannes, David, et al. 2007. Neutron imaging versus standard X-ray densitometry as method to measure tree-ring wood density. *Trees*. 14. 06 2007, S. 605-612.
- Mannes, David, et al. 2009. Non-destructive determination and quantification of diffusion processes in wood by means of neutron imaging. *Holzforschung Vol. 63*, S. 589-596. 2009.
- Mannes, David, et al. 2012. Untersuchungen zum Einfluss der Klebstoffart auf den Kapillaren Wassertransport in Holz parallel zur Faserrichtung. *Bauphysik* 2/34. 30. 03 2012, S. 61-65.
- Mannes, David, Niemz, Peter und Lehmann, Eberhard. 2006. Study on the penetration behaviour of water in corner joints by means of neutron radiography. *Wood Research* 51 (2). 2006, S. 1-14.
- Neubauer-Letsch, Birgitt et al., 2012. *Holzendverbrauch Schweiz*. Bern : Bundesamt für Umwelt, 2012.
- Niemz Peter. 1993. *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Dresden : DRW- Verlag, 1993.
- Niemz, Peter, et al. 2002. Untersuchungen zur Anwendung der Neutronenradiographie zur Beurteilung des Eindringens von Wasser in Eckverbindungen aus Holz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 60 118-126. 2002, S. 118-126.
- Neubauer-Letsch, Birgitt et al., 2012. *Holzendverbrauch Schweiz*. Bern : Bundesamt für Umwelt, 2012.

- Paul Scherrer Institut. psi.ch. [Online] Paul Scherrer Institut. [Zitat vom: 29. 02 2014.] <http://www.psi.ch/media/eigenschaften-und-moeglichkeiten-von-neutronen>.
- Paul Scherrer Institut, Villingen. psi.ch. [Online] [Zitat vom: 01. 01 2014.] <http://www.psi.ch/media/die-neutronenquelle-sinq>.
- Paul Scherrer Institut, Villingen. 2010. Neutron Imaging. *Informationsbroschüre*. Villingen, Schweiz : Paul Scherrer Institut, Technology Transfer, 03 2010.
- Rothkamm, Martin, Hansemann , Wilfried und Böttcher, Peter. 2003. *Lack Handbuch Holz*. Leinfelden-Echterdingen : DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co., 2003.
- Sanabria, Sergio J., et al. 2014. Adaptive neutron radiography correlation for simultaneous imaging of hygroscopic moisture transport and swelling strains in biological composite materials. *Composite Science and Technology*. 2014.
- Schmidt, Jon-Anton. 2011. *Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses von Klebfugen auf den Diffusionswiderstand von Holzverklebungen*. Biel: s.n., 2011.
- Siau, John F. 1995. *Wood: Influence of Moisture on Physical Properties*. Keene N.Y. : Department of Wood Science and Forrest Products, Verginia Polytechnic Institute and State University, 1995.
- Sonderegger, Walter. 2011. Experimental and theoretical investigations on the heat and water transport in wood and wood-based materials. *Dissertation ETH No. 19503*. Zürich, Schweiz : s.n., 2011.
- Sonderegger, Walter, et al. 2010. Quantitative determination of bound water diffusion in multilayer boards by means of neutron imaging. *European Journal of Wood and Wood Products*. 10. 07 2010, S. 341-350.
- Spohn, Margot, Spohn Roland. 2011. *Kosmos- Baumführer Europa*. Stuttgart : Franckh-Kosmos verlags-GmbH & Co. KG, 2011.
- Sutter, Hans-Peter. 2002. *Holzschädlinge an Kulturgütern erkennen und bekämpfen*. Stuttgart : Haupt, 2002.
- Thévenaz, P., Ruttimann, U.E. und Unser, M. 1998. A Pyramid Approach to Subpixel Registration Based on Intensity. *IEEE Transactions on Image Processing*. Vol. 7, No. 1 Seiten 27-41, 1998.
- Vanek, Manfred. und Teischinger, Alfred. 1989. Diffusionskoeffizienten und Diffusionswiderstandszahlen verschiedener Holzarten. *Holzforschung und Holzverwertung Nr. 1*. 1989.
- Volkmer, Thomas. 2013. REM Aufnahmen Oberfläche Beschichtungssystem, BFH interne Daten. Biel, Bern : s.n., 13. 11 2013.
- . 2007. *Schimmelpilz auf beschichteten Holzfassaden: chemische und physikalische Einflüsse*. Freiburg : s.n., 2007.
- Wadsö, Lars. 1994. Describing Non-Fickian Water Vapor Sorption in Wood. *Journal of Material Science* 29, 2367-2372. 1994.
- . 1993b. Measurements of Water Vapor Sorption in Wood Part 2 Results. *Wood Science and Technology* 28, 59-65. 1993b.
- . 1993. Measurements of Water Vapor Sorption in Wood Part 1 Instrumentation. *Wood Science and Technologie* 28, 369-400. 1993.
- Wagenführ, Andre. 2008. *Taschenbuch der Holztechnik*. München : Carl Hanser Verlag, 2008.
- Wagenführ, Rudi. 2007. *Holzatlas*. München : Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2007.
- Wenzik, Angela. 2010. [weltderphysik.de/](http://www.weltderphysik.de/). [Online] 08. 03 2010. [Zitat vom: 01. 01 2014.] <http://www.weltderphysik.de/gebiete/stoffe/analyse-von-materialien/neutronen-als-sonde/spallation/>.
- www.psi.ch. Neutron Imaging: Wie Neutronen Bilder Machen. [Online] [Zitat vom: 08. 07 2013.] http://www.psi.ch/industry/MediaBoard/neutron_imaging_d_07.pdf.
- Zürcher, Christoph und Frank, Thomas. 2010. *Bauphysik, Bau & Energie*. Zürich : Vdf Hochschulverlag, 2010.

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Alterungsprozess einer Gartenskulptur aus Rosskastanie.....	1
Abbildung 1.2: Schadensfälle an vertikalen Fassadenschalungen	2
Abbildung 2.1: Hierarchische Struktur von Nadelholz	6
Abbildung 2.2: Anatomische Richtungen im Holz	7
Abbildung 2.3: Ausgleichsfeuchte Sitka-Fichte	7
Abbildung 2.4: Bindungsformen von Wasser im Holz	8
Abbildung 2.5: Erstes Fick'sches Gesetz	9
Abbildung 2.6: Zweites Fick'sches Gesetz	9
Abbildung 2.7: Multi-Fickscher Wassertransport nach Frandsen	10
Abbildung 2.8: Gliederung des Holzabbaus	11
Abbildung 2.9: Weissfäule bei Buche makro- und mikroskopische Aufnahmen	12
Abbildung 2.10: Braunfäule bei Fichte makro- und mikroskopische Aufnahmen	12
Abbildung 2.11: Links Bläuepilz in Kiefersplintholz, rechts Moderfäule	12
Abbildung 2.12: V.l.n.r. Wasser auf einer Fassadenschalung, Nadelholzzaun mit starkem Holzabbau	13
Abbildung 2.13: V.l.n.r. kubisches Gebäude mit Holzfassade, Schutz durch Dachüberstand	14
Abbildung 2.14: Gliederung von Holzschutzmassnahmen.....	14
Abbildung 2.15: Links Messingstatue, rechts mit Neutronen erzeugtes Schattenbild	15
Abbildung 2.16: Vereinfachte Darstellung des Neutron Imaging.	15
Abbildung 2.17: Wechselwirkung von Neutronen mit Elementen	16
Abbildung 2.18: Schematische Darstellung der Spallation zur Gewinnung freier Neutronen.....	16
Abbildung 2.19: Links Cockroft-Walton-Beschleuniger, rechts Spallationsquelle SINQ	16
Abbildung 2.20: Winkelpositionen der Golden Ratio Messmethode (Köhler, 2004)	17
Abbildung 3.1: V.l.n.r. Schlittenmikrotom, Detail, Klingenschnitt	21
Abbildung 3.2: Links Refrenzprobe, Mitte Klingenschnitt, rechts Sägeschnitt	22
Abbildung 3.3: V.l.n.r. Prüfstempel mit Wasser in Freischneidenut, Prüfstempel auf Wet-Cup.....	23
Abbildung 4.1: Proben für Mikroskopie	24
Abbildung 4.2: Poliermaschine	24
Abbildung 4.3: Mikroskop	25
Abbildung 4.4: Bestimmung der Trockenschichtdicke	25
Abbildung 4.5: Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes.	26
Abbildung 4.6: Bestimmung der Masseabnahme der Probe bei Dry-Cup	26
Abbildung 4.7: Luftfeuchtemessung in Dry- und Wet-Cup	27
Abbildung 4.8: Schematische Darstellung des Neutronenmessplatzes	32
Abbildung 4.9: Schematischer Versuchsaufbau der Neutronenradiografie zur Feuchtemessung	32
Abbildung 4.10: Behälter mit Abdeckung	33
Abbildung 4.11: Versuchsbehälter mit Schieber zum Verschliessen	33
Abbildung 4.12: Rechts Schablone zum Ausrichten der der Proben, linkes Messplatz beim Versuch .	33
Abbildung 4.13: Unbearbeitetes Schattenbild	34
Abbildung 4.14: Bearbeitetes Schattenbild	34
Abbildung 4.15: Eindringverhalten von Wasser mittels Neutronenradiografie	37
Abbildung 4.16: Unbearbeitetes Schattenbild (Sägeschnitt)	37
Abbildung 4.17: Bearbeitetes Schattenbild (Sägeschnitt).....	37
Abbildung 4.18: Schematischer Versuchsaufbau	38
Abbildung 4.19: Probe im geöffneten Versuchsaufbau	38

Abbildung 4.20: Bearbeitetes Schattenbild	38
Abbildung 4.21: Freigeschnittener Prüfstempel	39
Abbildung 4.22: Probe im Zugversuch	39
Abbildung 5.1: Beschichtungssystem 1 (v.l.n.r. 26µm, 52 µm, 55 µm).....	41
Abbildung 5.2: Beschichtungssystem 2 (v.l.n.r. 62µm, 105 µm, 196 µm)	41
Abbildung 5.3: Beschichtungssystem 3 (v.l.n.r. 61 µm, 81 µm, 97µm).....	41
Abbildung 5.4: Beschichtungssystem 4 (v.l.n.r. 198 µm, 207µm, 375 µm)	41
Abbildung 5.5: Beschichtungssystem 1 (26µm)	42
Abbildung 5.6: Beschichtungssystem 2 (62µm)	42
Abbildung 5.7: Beschichtungssystem 2 (62µm)	42
Abbildung 5.8: Beschichtungssystem 2 (196µm)	42
Abbildung 5.9: Beschichtungssystem 2 (105µm)	43
Abbildung 5.10: Beschichtungssystem 1 (52µm)	43
Abbildung 5.11: Beschichtungssystem 2 (105µm)	43
Abbildung 5.12: Beschichtungssystem 3 (61µm)	43
Abbildung 5.13: Beschichtungssystem 4 (198µm)	44
Abbildung 5.14: Schimmelpilz bei Beschichtungssystem 4.....	44
Abbildung 5.15: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (Dry-Cup)	45
Abbildung 5.16: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (Beschichtung zum Cup-Inneren)	46
Abbildung 5.17: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (Klingenschnitt)	46
Abbildung 5.18: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl.....	47
Abbildung 5.19: Vergleich der μ -Werte für unbehandelte Fichte	47
Abbildung 5.20: Relative Luftfeuchten im Cup-Inneren bei Dry- und Wet-Cup.	48
Abbildung 5.21: Zeitabhängige Massenänderung bei Wet-Cup dann bei Dry-Cup.	49
Abbildung 5.22: Wasserdampfaufnahmekoeffizienten (Dry-Cup).....	50
Abbildung 5.23: Wasserdampfaufnahmekoeffizienten (Wet-Cup)	50
Abbildung 5.24: Wasserdampfaufnahmekoeffizienten (Klingenschnitt).....	51
Abbildung 5.25: Diffusionskoeffizient (Dry-Cup).....	52
Abbildung 5.26: Diffusionskoeffizient (Wet-Cup)	52
Abbildung 5.27: Diffusionskoeffizient Wet-Cup (Klingenschnitt)	53
Abbildung 5.28: Feuchteprofile der Neutronenradiografie (Diffusion)	57
Abbildung 5.29: Zeitabhängige Holzfeuchte (Diffusion)	57
Abbildung 5.30: Holzfeuchte bei 29mm Eindringtiefe	58
Abbildung 5.31: Holzfeuchte bei 15mm Eindringtiefe	58
Abbildung 5.32: Holzfeuchte bei 1mm Eindringtiefe	59
Abbildung 5.33: Vergleich Gradient der Referenzprobe bei 41 Tage mit Feuchtegradienten	59
Abbildung 5.34: Beispiel für Grenzen beim Auswerten der Neutronentomografie	60
Abbildung 5.35: Feuchteprofile der Neutronenradiografie (Wassersäule)	60
Abbildung 5.36: Holzfeuchte mit 95% Konfidenzintervall (Wassersäule).....	61
Abbildung 5.37: Zeitabhängige Holzfeuchte bei 1mm, 7.5mm und 14mm Eindringtiefe	61
Abbildung 5.38: Position der Querschnitte.....	64
Abbildung 5.39: Feuchteänderung bei Wassereinwirkung an Bohrloch von 0h bis 24h	64
Abbildung 5.40: Nasshaftfestigkeit	65
Abbildung 5.41: Bruchbilder bei Nasshaftfestigkeitsversuchen	66

7.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Dauerhaftigkeitsklassen einiger Holzarten nach DIN 350-2 [8].....	1
Tabelle 1.2: Versuchsgliederung	5
Tabelle 2.1: Richtungsabhängiger μ -Wert von Fichte	10
Tabelle 2.2: Dauerhaftigkeit verschiedener Holzarten in Jahren.....	12
Tabelle 3.1: Beschichtungssysteme	18
Tabelle 3.2: Ausgewählte Materialkennwerte von Fichte	19
Tabelle 3.3: Roh- und Darrdichte des verwendeten Fichtenholzes	19
Tabelle 3.4: Probenumfang aller Versuche	20
Tabelle 3.5: Probenumfang der Wet- und Dry-Cup Versuche	21
Tabelle 3.6: Probengliederung der Neutronenradiografie zur Feuchtemessung	22
Tabelle 3.7: Holzfeuchte und Darrdichte vor Versuchsstart (Diffusion)	22
Tabelle 3.9: Holzfeuchte und Darrdichte vor Versuchsstart (Wassersäule)	22
Tabelle 3.10: Probengliederung der Nasshaftfestigkeitsversuche.....	23
Tabelle 4.1: Probengliederung zur Bestimmung der Schichtdicke	25
Tabelle 5.1: Gemessene Schichtdicke	40
Tabelle 5.2: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (Dry-Cup)	45
Tabelle 5.3: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (Beschichtung zum Cup-Inneren)	46
Tabelle 5.4: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (Klingenschnitt)	47
Tabelle 5.5: Relative Luftfeuchte	48
Tabelle 5.7: Kennwerte Dry-Cup	54
Tabelle 5.8: Kennwerte Wet-Cup	55
Tabelle 5.9: Kennwerte Referenzen und beschädigte Proben :Wet-Cup	56
Tabelle 5.9: TL-Ebene von 0h bis 24h.....	62
Tabelle 5.10:TR-Ebene von 0h bis 24h	63
Tabelle 5.11: Visuelle Beurteilung der Bruchflächen	66

7.4 Normenverzeichnis

- [1] DIN 52 182 1976
Prüfung von Holz: Bestimmung der Rohdichte
- [2] DIN EN ISO 15 148 2003
Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten:
Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen
- [3] DIN EN ISO 12 572 2001
Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten:
Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit
- [4] DIN 52 183 1993
Prüfung von Holz: Bestimmung des Feuchtegehalts
- [5] DIN EN ISO 4624 2003
Beschichtungsstoffe: Abreissversuche zur Beurteilung der Nasshaftfestigkeit
- [6] DIN EN 350-1 1994
Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten: Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz
- [7] DIN EN 318
Holzwerkstoffe: Bestimmung von Maßänderungen in Verbindung mit Änderungen der relativen
Luftfeuchte
DIN EN 350-2 1994
- [8] Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz - Teil 2:
Leitfaden für die natürliche Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten von
besonderer Bedeutung in Europa