

# **Forschungsvorhaben**



## **Einheimisches dimensionsstabilisiertes Holz für den Fenster- und Fassadenbau**

Abschlussbericht

Mai 2006

---

## Abschlussbericht

---

<b>Thema:</b>	di-sta - Einheimisches dimensionsstabilisiertes Holz für den Fenster- und Fassadenbau
<b>Auftraggeber:</b>	Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e. V. Bayerstraße 57 – 59 80335 München  <u>GZ:</u> E-2001/03
<b>Gefördert durch:</b>	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie - Innovationsberatungsstelle Südbayern - Prinzregentenstraße 28 80538 München  <u>GZ:</u> 07 03/685 60/942/01 1890/02/ 1891/03
<b>Forschungsstellen:</b>	isp Rosenheim - Ingenieurbüro Prof. Schmid Hechtseestraße 16 83022 Rosenheim  <u>Projektleitung:</u> Prof. Josef Schmid - isp Rosenheim  <u>In Zusammenarbeit mit:</u> Prof. Dr. Holger Militz - Universität Göttingen Prof. Dr. H. Martin Illner - FH Rosenheim Prof. Dr. Bernhard Schwarz - FH Rosenheim Prof. Dr. Karl Stetter - FH Rosenheim
<b>Koordination Wirtschaftspartner:</b>	GIP - Gesellschaft für innovative Produktkonzepte e. V. Herr Albert Holz Katzenbachstraße 46 73447 Oberkochen

---

## Autorenverzeichnis

<b>Kapitel</b>	<b>0</b>	Prof. Josef Schmid	- isp Rosenheim
<b>Kapitel</b>	<b>1</b>	Prof. Josef Schmid	- isp Rosenheim
<b>Kapitel</b>	<b>2</b>	Andreas Krause Prof. Dr. Holger Militz	- Uni Göttingen - Uni Göttingen
<b>Kapitel</b>	<b>3</b>	Prof. Dr. H. Martin Illner Andreas Krause Prof. Dr. Holger Militz Prof. Dr. Bernhard Schwarz	- FH Rosenheim - Uni Göttingen - Uni Göttingen - Rosenheimer Haus
<b>Kapitel</b>	<b>4</b>	Martin Götz Prof. Dr. H. Martin Illner Andreas Krause Prof. Josef Schmid Prof. Dr. Karl Stetter	- isp Rosenheim - FH Rosenheim - Uni Göttingen - isp Rosenheim - FH Rosenheim
<b>Kapitel</b>	<b>5</b>	Andreas Krause Prof. Josef Schmid Prof. Dr. Bernhard Schwarz Prof. Dr. Karl Stetter	- Uni Göttingen - isp Rosenheim - Rosenheimer Haus - FH Rosenheim
<b>Kapitel</b>	<b>6</b>	Prof. Josef Schmid	- isp Rosenheim

## Inhaltsverzeichnis

<b>0</b>	<b>Vorwort.....</b>	<b>7</b>
0.1	Projektpartner .....	9
0.2	Kennung der Verfahren im Projekt .....	10
0.3	Glossar zu Fachbegriffen .....	11
0.4	Verzeichnis wichtiger Abkürzungen.....	14
<b>1</b>	<b>Einführung.....</b>	<b>15</b>
1.1	Allgemeines .....	15
1.2	Schwachstellenanalyse.....	17
1.3	Folgerungen für die Weiterentwicklung .....	37
1.4	Anforderungen an den Werkstoff.....	37
<b>2</b>	<b>Verfahren zur Dimensionsstabilisierung von Holz .....</b>	<b>41</b>
2.1	Wirkprinzipien .....	41
2.1.1	Füllung von Zelllumen.....	42
2.1.2	Füllung der Zellwände .....	43
2.1.3	Reaktion mit einzelnen Hydroxylgruppen .....	44
2.1.4	Vernetzen von Hydroxylgruppen .....	45
2.1.5	Verändern von Zellwandstrukturen.....	47
2.2	Vergütungsverfahren.....	47
2.2.1	Acetylierung .....	48
2.2.2	Hitzebehandlung.....	50
2.2.3	Harzbehandlung .....	51
2.2.4	Holzvernetzung.....	51
2.2.5	Vergütung mit Melaminharz.....	52
2.2.6	Furfurylierung.....	53
2.2.7	Siliziumorganische Verbindungen .....	53
2.2.8	Ölbehandlungen / Wachsbehandlungen .....	54
2.3	Vergütungsverfahren im Projekt.....	55

---

<b>3</b>	<b>Werkstoff.....</b>	<b>58</b>
3.1	Einführung .....	58
3.2	Feuchtigkeitstechnische Eigenschaften.....	60
3.2.1	Feuchtigkeitsaufnahme und Feuchtigkeitsabgabe .....	61
3.2.2	Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstands .....	65
3.2.3	Einwirken von Wasserdampf und Wasser.....	68
3.3	Dauerhaftigkeit.....	78
3.3.1	Einführung .....	78
3.3.2	Quell- und Schwindverhalten.....	89
3.3.3	Verhalten gegenüber Feuchtigkeit und Wasser .....	105
3.4	Mechanische Eigenschaften .....	111
3.4.1	Allgemeines .....	111
3.4.2	Ziel .....	112
3.4.3	Aufbau und Durchführung der Versuche .....	112
3.4.4	Ergebnisse aus den Versuchen.....	113
3.4.5	Bewertung / Ausblick .....	124
3.4.6	Zusammenfassung .....	125
<b>4</b>	<b>System .....</b>	<b>128</b>
4.1	Allgemeines .....	128
4.2	Schraub- und Nagelfestigkeit .....	129
4.2.1	Ziele .....	129
4.2.2	Aufbau und Durchführung der Versuche .....	130
4.2.3	Ergebnisse aus den Versuchen.....	131
4.2.4	Bewertung / Ausblick .....	133
4.3	Verklebung.....	134
4.3.1	Ziele .....	134
4.3.2	Aufbau und Durchführung der Versuche .....	134
4.3.3	Ergebnisse aus den Versuchen.....	135
4.3.4	Bewertung / Ausblick .....	141
4.4	Oberflächenbehandlung.....	144
4.4.1	Ziele .....	144
4.4.2	Anforderungen an das Beschichtungssystem .....	145
4.4.3	Aufbau und Durchführung der Versuche .....	147
4.4.4	UV- und Bewitterungsstabilität .....	148
4.4.5	Bewitterung und Alterung .....	163
4.4.6	Bewertung.....	171

---

4.5	Bearbeitung.....	172
4.5.1	Ziele .....	172
4.5.2	Erkenntnisse aus der Bearbeitung .....	173
4.5.3	Versuche zur Bearbeitung .....	176
4.5.4	Bewertung und Ausblick .....	186
4.6	Verträglichkeit mit anderen Werkstoffen.....	187
4.7	Gesundheits-/Umweltverhalten .....	188
<b>5</b>	<b>Bauteil .....</b>	<b>190</b>
5.1	Allgemeines .....	190
5.2	Werkstoffgerechtes Konstruieren und Verhalten im Differenzklima ....	192
5.3	Quellen und Schwinden .....	196
5.4	Feuchteaufnahme und Feuchteabgabe.....	200
5.4.1	Wasserdampf-Sorption.....	201
5.4.2	Wasserdampf-Diffusion .....	201
5.4.3	Kapillare Wasseraufnahme .....	203
5.4.4	Wasserabgabe durch Trocknung .....	203
5.5	Kapillare Wasseraufnahme .....	204
5.5.1	Allgemeines .....	204
5.5.2	Kapillare Wasseraufnahme von unvergütetem Holz .....	204
5.5.3	Kapillare Wasseraufnahme von vergütetem Holz .....	209
5.5.4	Zusammenfassung .....	218
5.6	Oberflächenbehandlung.....	220
<b>6</b>	<b>Weiterentwicklung der Konzepte für Holzfenster .....</b>	<b>222</b>
6.1	Allgemeines .....	222
6.2	Nutzung .....	223
6.3	Anforderungen an Qualität und Qualitätsüberwachung .....	225
6.4	Konzepte für innovative Fenster.....	226
6.5	Anregung zur Fortführung der Arbeiten.....	234
<b>7</b>	<b>Anlagen.....</b>	<b>236</b>
7.1	Anlage 1 - Fragebogen Verarbeitung .....	236
7.2	Anlage 2 - Information für Planer und Bauherrn .....	237
7.3	Anlage 3 - Information für Konstrukteure und Verarbeiter.....	240

## 0 Vorwort

In vielen Stilepochen der Architektur ist das Fenster ein wichtiges Gestaltungselement, um den jeweiligen Zeitgeist zu beschreiben und die technischen Möglichkeiten der Werkstoffe und Konstruktionen zu zeigen. Holz war dabei über lange Zeit der einzige Werkstoff, der es ermöglichte, Glas in der gewünschten Form zu umrahmen und neben feststehenden Fenstern auch bewegliche Flügel herzustellen.

Durch handwerkliche Regeln wurde das hierfür notwendige Wissen im Umgang mit Glas, Holz und Metall überliefert. Dies war möglich, weil die Zeitfenster in den früheren technologischen Entwicklungsstufen groß genug waren, um sich durch praktische Erfahrungen den Grenzen, die durch die Architektur, die Bautechnik und die Nutzerwünsche beschrieben wurden, zu nähern.

Aus historischen Bauten kennen wir zum Teil noch Fenster der verschiedenen Entwicklungsstufen<sup>[1]</sup>, die uns durch ihre klaren und einfachen Konstruktionen überraschen. So entwickelten sich aus handwerklicher Erfahrung in Verbindung mit der Kenntnis der wichtigsten Eigenschaften des Holzes Fenster, deren wesentliche Konstruktionselemente noch in unserer, durch moderne Fertigungstechnik geprägten Zeit Bestand haben<sup>[2]</sup>. Dennoch müssen wir uns fragen, warum Holzfenster heute im Wettbewerb mit anderen Rahmenwerkstoffen Marktanteile verlieren.

Die Antworten sind weitgehend bekannt, auch wenn Konsequenzen daraus bisher kaum erkennbar sind, denn

- ⇒ der Wunsch des Bauherrn nach einem möglichst pflegeleichten Bauteil über eine angemessene Nutzungsdauer wird wenig beachtet.
- ⇒ die veränderten Umgebungsbedingungen am eingebauten Fenster werden bei der Auswahl der Werkstoffe und der Festlegung der Konstruktion nicht berücksichtigt.

Im Forschungsvorhaben „di-sta“ waren in Verbindung mit dem Einsatz von dimensionsstabilisiertem einheimischem Holz diese Fragen zu beantworten und Orientierungswissen für die Konstruktion und Herstellung von Fenstern und Fassaden zu erarbeiten.

Als Fassaden in Verbindung mit dem Projekt „di-sta“ sind die das Tragwerk eines Gebäudes umhüllenden Bereiche der Außenhaut, bestehend aus Rahmen und Ausfachungen, definiert.

Das Forscherteam bedankt sich bei der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung e. V. für das mit dem Auftrag verbundene Vertrauen und beim Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie für die Förderung des Vorhabens.

Dank gilt auch der begleitenden Arbeitsgruppe, die durch ihre Sachkompetenz interessante Anregungen gegeben hat.

Für das besondere Engagement bedanken wir uns bei Herrn Albert Holz, GIP. Er hat die Kontakte zu den Projektpartnern hergestellt sowie die Zuführung der Wirtschaftsmittel abgewickelt. Darüber hinaus hat er für die Möglichkeit gesorgt, das Projekt im Fensterbau Frontale 2004 in Nürnberg der Öffentlichkeit und interessierten Fachkreisen vorzustellen.

Ein besonderer Dank gilt außerdem den Projektpartnern, die in einer wirtschaftlich schwierigen Zeit durch ihre Unterstützung die Durchführung des Forschungsvorhabens ermöglicht und durch das Einbringen von speziellem Wissen gefördert haben.

Sowohl das Forscherteam als auch die Projektpartner haben sich bei Beginn des Vorhabens an dem Zitat orientiert:

*„Es ist nicht gesagt, dass es besser wird, wenn es anders wird.  
Wenn es aber besser werden soll, muss es anders werden.“*

**Georg Christoph Lichtenberg, deutscher Physiker und Schriftsteller (1742 – 1799)**

Mit dem Forschungsprojekt konnten in Übereinstimmung mit der Zielsetzung neue Konzepte für Fenster und Fassaden entwickelt und notwendige Zusammenhänge zwischen Werkstoff, System und Bauteil hergestellt werden. Dennoch verbleiben Aufgaben für weitere Projekte, um mit dimensionsstabilisierten Hölzern zukunftsorientierte Fenster- und Fassadenkonstruktionen weiterzuentwickeln.

Eine der wichtigen Aufgaben ist dabei die Beschreibung der Qualitätsanforderungen an das Holz als Eingangsmaterial vor der Vergütung und an den Vergütungsprozess selbst. Für beide Qualitätsanforderungen sollten einfache Verfahren entwickelt werden, die es dem Anwender ermöglichen, sich durch eigene Überprüfung einen Überblick darüber zu verschaffen, ob die zu erwartende Verbesserung der Holzeigenschaften sichergestellt ist.

Das Layout des Berichts, die Gestaltung sowie die Korrekturen erfolgten durch unsere Teamassistentin Frau Stefanie Garhammer. Für die gute Zusammenarbeit möchten wir uns auch bei ihr bedanken.

## **0.1 Projektpartner**

Das Forschungsvorhaben wird unterstützt durch die Projektpartner:

Adolf Münchinger GmbH & Co. KG	D - 75443 Öttisheim
Akzo Nobel Deco GmbH	D - 31515 Wunstorf
Finnforest Deutschland GmbH	D - 28237 Bremen
FLG-Fenster-Leistungsgemeinschaft GmbH	D - 84359 Simbach
Gaulhofer - S+S Qualitätsfenster GmbH & Co. KG	D - 85646 Anzing
Glasurit GmbH	D - 48165 Münster
HAMA - Alu + Holzbauwerk GmbH	D - 84056 Rottenburg
Hermann Gutmann Werke AG	D - 91781 Weißenburg
Hermann Otto GmbH	D - 83411 Fridolfing
HOMAG AG	D - 72296 Schopfloch
Hueber GmbH	D - 88662 Überlingen
Industrieverband Klebstoffe e.V.	D - 40237 Düsseldorf
Leitz GmbH & Co. KG	D - 73447 Oberkochen
Leuco Ledermann GmbH & Co. KG	D - 72160 Horb
Finnforest Merk GmbH	D - 86551 Aichach
Remmers Baustofftechnik GmbH	D - 49624 Lönigen
SFS Stadler AG	CH - 9435 Heerbrugg
Siegenia-Aubi KG	D - 57234 Wilnsdorf
Surface Specialties Germany GmbH & Co. KG	D – 65203 Wiesbaden
Süd-Fensterwerk GmbH & Co. KG	D - 91625 Schnelldorf
tilo GmbH	A - 4923 Lohnsburg
Michael Weinig AG	D - 97941 Tauberbischofsheim

## 0.2 Kennung der Verfahren im Projekt

Nr.	Kennung	Holzart	Verfahren / Bezeichnung	Hersteller
1	 HT (N)-PS	<i>Pinus sylvestris</i>	Hitzebehandlung ⇒ Hitzebehandlung Kiefer	New Option Wood
2	 HT (N)-PM	<i>Pinus pinaster</i>	Hitzebehandlung ⇒ Hitzebehandlung Seekiefer	New Option Wood
3	 HT (F)-PS	<i>Pinus sylvestris</i>	Hitzebehandlung ⇒ Thermowood Kiefer	Finnforest
4	 DRT-PS	<i>Pinus sylvestris</i>	Holzvernetzung mit DMDHEU ⇒ Holzvernetzung Kiefer mit DMDHEU	Uni Göttingen
5	 MRT-PS	<i>Pinus sylvestris</i>	Melamin-Behandlung ⇒ Melamin Kiefer	Surface Specialties
6	 HRT-PS	<i>Pinus sylvestris</i>	Wachs-Harz-Imprägnierung ⇒ Natwood Kiefer	tilo
7	 A-FS	<i>Fagus sylvatica</i>	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid ⇒ Acetylierung Buche	SHR (Merk)
8	 A-PS	<i>Pinus sylvestris</i>	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid ⇒ Acetylierung Kiefer	SHR (Merk)
9	 UT-FS	<i>Fagus sylvatica</i>	Unbehandelt (untreated) ⇒ Unbehandelte Buche	
10	 UT-PA	<i>Picea abies</i>	Unbehandelt (untreated) ⇒ Unbehandelte Fichte	
11	 UT-PS	<i>Pinus sylvestris</i>	Unbehandelt (untreated) ⇒ Unbehandelte Kiefer	

### 0.3 Glossar zu Fachbegriffen

<b>Adsorption</b>	Einlagerung von gasförmigem Wasser in die Zellwände von Holzkörpern
<b>Anti-Shrink-Efficiency [ASE]</b>	ASE ist ein Maß für die Dimensionsstabilität, die Veränderung des Quell- und Schwindverhaltens von behandeltem Holz im Vergleich zu unbehandeltem Holz. 100 % ASE bedeuten, dass das Holz nicht mehr quillt und schwindet. 0 % bedeutet, das Quellen und Schwinden des behandelten Holzes bleibt unverändert.
$ASE = \left( \frac{S_u - S_t}{S_u} \right) \cdot 100$	
<p><math>S_u</math> = Quellung des unbehandelten Holzes  <math>S_t</math> = Quellung des behandelten Holzes</p>	
<b>Anti-Shrink-Efficiency, volumetrisch [ASE<sub>v</sub>]</b>	ASE <sub>v</sub> ist die ASE, bei der sich die Quellung ( $S_v$ ) auf das Volumen des Holzkörpers bezieht.
<b>Bulking-Effekt</b>	Verbleiben der Probe im gequollenen Zustand, z. B. durch Einlagerung großer Moleküle in die Zellwand.
<b>Cross-linking-Effekt</b>	Der Cross-linking-Effekt entsteht durch Chemikalien, die in der Zellwand mit mehr als einem Reaktionspartner reagieren und so zu einer Vernetzung der Zellwand führen. Er führt dazu, dass das Holz bei Befeuchtung nicht mehr bis zum ursprünglichen Maximum quillt.
<b>Desorption</b>	Umkehrung der Adsorption. Loslösung von gasförmigem Wasser aus den Zellwänden von Holzkörpern
<b>DMDHEU</b>	Dimethylol-dihydroxy-ethylen-urea (spezielles Harnstoffharz)
<b>Equilibrium moisture content [emc]</b>	Die Gleichgewichtsholzfeuchtigkeit wird englisch emc abgekürzt. Es die Holzfeuchtigkeit, die sich nach der Lagerung von Holz bis zur Gewichtskonstanz bei einem bestimmten Klima ergibt.
$emc = \frac{m_H - m_0}{m_0}$	
<p><math>m_H</math> = Masse des Holzes bei bestimmter Luftfeuchtigkeit  <math>m_0</math> = Darrmasse des Holzes</p>	

**Masseverlust**  
[mass loss]

Ist der Gewichtsverlust des Holzes, der durch den pilzlichen Abbau hervorgerufen wird.

$$\text{mass loss} = \frac{m1 - m2}{m1}$$

m1 = Darrgewicht vor der Inkubation

m2 = Darrgewicht nach der Inkubation

**Moisture Excluding Efficiency [MEE]**

MEE ist ein Maß für die Veränderung der Ausgleichsfeuchtigkeit von behandeltem Holz im Vergleich zu unbehandeltem Holz. 100 % MEE bedeuten, dass das Holz keine Feuchtigkeit enthält. 0 % bedeutet, die Feuchtigkeitsaufnahme ist unverändert.

$$\text{MEE} = \frac{\text{emc}_u - \text{emc}_t}{\text{emc}_u}$$

emc<sub>u</sub> = Gleichgewichtsfeuchtigkeit des unbehandelten Holzes

emc<sub>t</sub> = Gleichgewichtsfeuchtigkeit des behandelten Holzes

**Quellungskoeffizient**  
[h]

Der Quellungskoeffizient h gibt an, um wie viel Prozent das Holz quillt oder schwindet, wenn sich die relative Luftfeuchtigkeit innerhalb des angegebenen Bereiches um 1 % ändert.

$$h = \frac{l_F - l_T}{l_0(\varphi_F - \varphi_T)} \%$$

h = Quellungskoeffizient bezogen auf die volumetrische Quellung der Proben

l<sub>F</sub> = Länge der Probe bei 90 % relativer Luftfeuchtigkeit

l<sub>T</sub> = Länge der Probe bei 33 % relativer Luftfeuchtigkeit

l<sub>0</sub> = Länge der Probe bei 0 % Holzfeuchtigkeit

ϕ<sub>F</sub> = relative Luftfeuchtigkeit des feuchten Klimapunktes

ϕ<sub>T</sub> = relative Luftfeuchtigkeit des trockenen Klimapunktes

**relative swelling  
(Quellung)**  
[S]

Die relative Quellung gibt an, um wie viel Prozent die Holzprobe im Vergleich zur darr getrockneten Holzprobe gequollen ist. Die Quellung kann in radialer ( $S_R$ ), tangentialer ( $S_T$ ) oder in auf das Volumen bezogener ( $S_V$ ) Quellung berechnet werden.

$$S = \frac{l_2 - l_1}{l_1}$$

$$S_V = (1 + S_T) * (1 + S_R) - 1$$

- $l_1$  = Länge bei 0 % Holzfeuchtigkeit
- $l_2$  = Länge im gequollenen Zustand
- $S_V$  = volumetrische Quellung
- $S_T$  = tangentiale Quellung
- $S_R$  = radiale Quellung

**Wasseraufnahme-  
koeffizient**

Der Wasseraufnahmekoeffizient gibt an, welche Wassermenge je Flächeneinheit und Wurzel der Zeit bei Wasserkontakt aufgenommen wird.

Einheit:  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$  oder  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0,5})$

**Weight Percent Gain**  
[WPG]

Ein Maß für die Gewichtszunahme des behandelten Holzes durch die Behandlung im Vergleich zur reinen Holzmasse.

$$\text{WPG} = \frac{m_t - m_u}{m_u}$$

- $m_t$  = Darrmasse behandeltes Holz
- $m_u$  = Darrmasse unbehandeltes Holz

**weight loss**

Gewichtsverlust

## 0.4 Verzeichnis wichtiger Abkürzungen

### Abkürzungen für die Verfahren des Projekts:

A	acetylated (Acetylierung – Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid)
DRT	Interlace treatment with DMDHEU (Holzvernetzung mit DMDHEU)
HRT	Wax and resin impregnation (Wachs- und Harzimprägnierung)
HT (F)	heat treated - Finnforest (Hitzebehandlung durch Finnforest)
HT (N)	heat treated - New Option Wood (Hitzebehandlung durch New Option Wood)
MRT	melamin formaldehyde resin treated (Melamin Harzbehandlung)
UT	untreated (unbehandelt)

### Holzarten:

FS	<i>Fagus sylvatica</i>	(Buche, beech)
PA	<i>Picea abies</i>	(Fichte, spruce)
PM	<i>Pinus pinaster</i>	(Seekiefer, maritime pine)
PS	<i>Pinus sylvestris</i>	(Gemeine Kiefer, Scots pine)

- 1 **Gerner, M.; Gärtner, D.; 1991:** Historische Fenster – Entwicklung, Technik, Denkmalpflege
- 2 **Krauth, Theodor; Meyer, Franz Sales; 1899:** Das Schreinerbuch – Die Bauschreinerei; Verlag von E. A. Seemann; Leipzig

## **1 Einführung**

### **1.1 Allgemeines**

Gebäude aus dem 19. Jahrhundert mit Holzfenstern der Erstausrüstung zeigen, dass Holzfenster auch nach einer Nutzungsdauer von mehr als 100 Jahren noch funktionsfähig sein können. Wir finden solche Fenster im städtischen Bereich in Wohnhäusern und in öffentlichen Gebäuden mit zum Teil gut erhaltener Holzsubstanz, an denen die Grundfunktionen trotz der langen Nutzungsdauer noch sichergestellt sind.

Aus Beobachtungen der vergangenen Jahre ist aber auch bekannt, dass Holzfenster wegen der Beeinträchtigung der Substanz bereits nach einer kurzen Nutzungszeit erneuert werden mussten. Sie haben damit nur einen Bruchteil der planmäßigen Nutzungsdauer, die allgemein mit etwa 40 Jahren angenommen wird<sup>[3]</sup>, erreicht.

Damit ist die Frage berechtigt, ob das Holz der Fenster früherer Jahre bessere Eigenschaften hatte als das Holz, welches heute für Fenster verarbeitet wird.

Bekannt ist, dass noch bis Mitte des 20. Jahrhunderts für Fenster vorwiegend die jeweils in der Region vorkommenden Holzarten üblich waren. Dies waren in Deutschland die Holzarten Kiefer, Fichte und Tanne, im süddeutschen Raum noch die Lärche und im mittel- und norddeutschen Raum die Eiche<sup>[4]</sup>. Die Verwendung anderer Hölzer - insbesondere tropischer Hölzer - war die Ausnahme.

Durch die Globalisierung der Wirtschaft ist auch der Holzhandel weltumfassend geworden, so dass heute Hölzer aus unterschiedlichen Wuchsgebieten für Fenster eingesetzt werden.

Damit ist aber die Frage nach dem Zusammenhang zwischen der Holzart und der Nutzungserwartung von Fenstern nicht beantwortet. Sie kann abschließend auch nicht beantwortet werden, da sich die Anforderungen an das Fenster und die Einwirkungen aus dem Umfeld verändert haben und noch verändern werden und die damit verbundenen Auswirkungen nicht bekannt sind.

Der Prozess der Veränderungen im Baubereich ist noch nicht abgeschlossen, so dass ein Reagieren auf die Entwicklung der Architektur, der Bautechnik, der Gebäudetechnik und auf die Erwartungshaltung der Nutzer nicht hilfreich ist.

Notwendig ist ein Agieren mit einer vorausschauenden Betrachtung für die nächsten 10 bzw. 20 Jahre, um Grundsätze für das Holzfenster der Zukunft zu erarbeiten.

Einzubeziehen sind dabei, soweit es Fenster und Fassaden allgemein betrifft:

- ⇒ die Erwartungshaltung der Nutzer,
- ⇒ die Fortschreibung der technischen Anforderungen,
- ⇒ die Entwicklung der Bautechnik und der Gebäudetechnik.

Für das Fenster und die Fassaden aus Holz ist im Besonderen notwendig:

- ⇒ die Bereitstellung geeigneter Werkstoffe,
- ⇒ die Vorschläge für werkstoffgerechte Konstruktionen,
- ⇒ die Bereitstellung von Konzepten für eine wirtschaftliche Fertigungstechnik,
- ⇒ das Aufzeigen von Möglichkeiten eines ökologisch verträglichen Umgangs mit den Fenstern am Ende der Nutzungsdauer.

Die Überlegungen für die Entwicklung neuer Fenster und Fassaden müssen von den Erwartungen und den Bedürfnissen des Nutzers und des Bauherrn ausgehen. Die Bauplaner und die Bauausführenden haben sich - unter Beachtung der technischen Regelwerke - den Wünschen des Nutzers und des Bauherrn unterzuordnen. Dabei ist es notwendig, durch regelmäßige Evaluation die Ansätze mit dem Ergebnis und mit den praktischen Erfahrungen zu vergleichen.

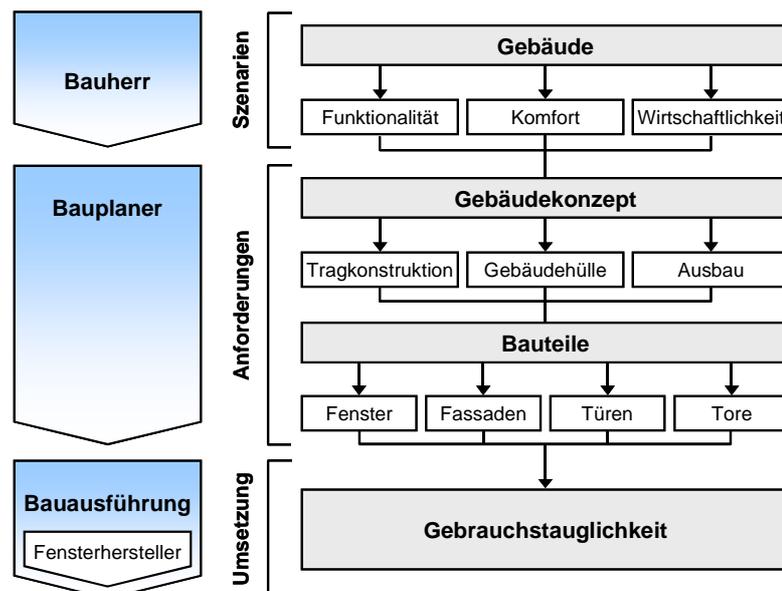


Abbildung 1: Struktureller Ablauf zur Umsetzung von Nutzerbedürfnissen in ein gebrauchstaugliches Produkt

Das Forschungsvorhaben hat deshalb über die Anwendung dimensionsstabilisierter heimischer Nadelhölzer hinaus Bedeutung für die Fenstertechnik und den Fassadenbau im Allgemeinen.

Für die nächsten Jahrzehnte wird dem Werkstoff Holz im Vergleich zu den übrigen Rahmenwerkstoffen für Fenster und Fassaden eine positive Prognose gestellt<sup>[5]</sup>. Die zukünftigen Potentiale liegen einerseits darin, dass der Materialbedarf und ein Teil der für die Fertigung benötigten Energie auch in Zukunft mit Holz gedeckt werden kann. Andererseits besitzt der Werkstoff Holz sehr gute statische und technologische Eigenschaften, um Grundanforderungen für Fenster und Fassaden zu erfüllen. Auch das Recycling wird für den Werkstoff Holz in Zukunft keine besondere Rolle spielen<sup>[6]</sup>. Aus den Prognosen kann abgeleitet werden, dass eine grundsätzliche Auseinandersetzung mit Fenstern und Fassaden aus Holz und Holzwerkstoffen gerechtfertigt ist.

## 1.2 Schwachstellenanalyse

Das heute übliche Holzfenster wird aus verschiedenen Gründen als anfällig und pflegebedürftig eingeschätzt und hat deshalb Probleme, seine Bedeutung - und damit seinen Marktanteil - im Hochbau zu erhalten.

Die Erhaltung der Bedeutung wird nur dann möglich sein, wenn unter wirtschaftlichen Bedingungen Holzfenster angeboten werden können, die bezüglich der Neigung zu Frühschäden und des Aufwands an Instandhaltung den Vorstellungen der Bauherren entgegenkommen. Diese Vorstellungen gehen davon aus, dass der Aufwand am Fenster zur Sicherung der Gebrauchstauglichkeit minimiert sein muss und auch nach einer groben Vernachlässigung die Funktionsfähigkeit und ein ansprechendes Aussehen mit vertretbarem Aufwand wiederhergestellt werden kann<sup>[7]</sup>.



Bei der Verwendung von Holz als einem nachwachsenden und biologisch abbaubaren Werkstoff wird diese Forderung nicht ohne besondere Maßnahmen erfüllt werden können. Dies gilt insbesondere dann, wenn die ökologische Bewegung die Verwendung nachwachsender Werkstoffe und damit auch die Verwendung von heimischem Holz erwartet.

Diese Erwartung kann nur mit grundsätzlichen Überlegungen in Verbindung mit entsprechendem Forschungsbedarf erfüllt werden. Weiter sind Überlegungen unter anderem zur Verbesserung des Wärmeschutzes notwendig, da durch die zu erwartende Fortschreibung der Verordnungen zur Energieeinsparung<sup>[8]</sup> bei den heute üblichen Konstruktionen von Fenstern und Fassaden aus Holz die derzeitigen Möglichkeiten nicht ausreichend sind.

Aus einer Umfrage<sup>[9]</sup> ergeben sich Interessenschwerpunkte bei Architekten und Bauherren, die für die Weiterentwicklung zu beachten sind. Diese Ergebnisse werden durch die Erkenntnisse aus einem Forschungsvorhaben über das Holzfenster der Zukunft<sup>[10]</sup> bestätigt.

Dabei handelt es sich um:

- ⇒ die Möglichkeit der Anpassung von Fenstern und Fassaden an die Wünsche der Architektur,
- ⇒ das Aussehen und die Nutzerfreundlichkeit aus der Sicht des Bauherrn und Nutzers,
- ⇒ das Preis-/Leistungsverhältnis,
- ⇒ den zumutbaren Aufwand für Instandhaltung und Instandsetzung verbunden mit einfach durchzuführenden Maßnahmen,
- ⇒ die Ökologie unter Berücksichtigung der Wiederverwertung und Entsorgung am Ende der Nutzungsdauer.

Neben diesen grundsätzlichen Anforderungen sind es die Anforderungen an:

- 1) den Wärmeschutz im Interesse der Energieeinsparung.
- 2) den Schallschutz zur Sicherung eines angenehmen Umfelds im Gebäude.
- 3) den Einbruchschutz, um das Gefühl der Sicherheit und Geborgenheit in den „eigenen vier Wänden“ zu gewährleisten.

Andere funktionelle Eigenschaften werden als selbstverständlich vorausgesetzt. Sie sind auch unausgesprochen unabdingbarer Bestandteil der Gebrauchstauglichkeit über einen angemessenen Nutzungszeitraum<sup>[3]</sup>.

Alle beschriebenen technischen Belange sind Gegenstand der europäischen Produktnorm und werden in DIN EN 14351 „Fenster und Außentüren“ geregelt. Auch wenn diese Norm zur Zeit noch nicht bindend ist, ist es notwendig, bei der Entwicklung neuer Produkte die dort beschriebenen Klassifizierungen zu beachten.

Im Gegensatz zur bisherigen Praxis in deutschen Normen beschreibt die Produktnorm DIN EN 14351 nur die Bauteileigenschaften ohne Hinweis auf die Eignung bzw. den Einsatz im konkreten Anwendungsfall. Diese Entscheidung wird dem Bauplaner als Aufgabe zugeordnet.

Die Vorgaben für den konkreten Anwendungsfall sind national zu regeln, so z. B. in der Energieeinsparverordnung oder durch die Bauaufsicht im sicherheitsrelevanten Bereich, um die Gebrauchstauglichkeit einer Konstruktion sicherzustellen.

Die Gebrauchstauglichkeit definiert sich nach ISO 9241-11/96 wie folgt:

*„... das Ausmaß, in dem ein Produkt durch bestimmte Nutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und mit Zufriedenheit zu erreichen.“*

Dabei wird unterstellt, dass Wartungsmaßnahmen<sup>[11][12]</sup> in wirtschaftlich vertretbarem Umfang durchgeführt werden.

Wartungsmaßnahmen sind nicht nur bei Holzfenstern und Holzfassaden erforderlich. Sie müssen zur Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit bei Fenstern und Fassaden aus allen Rahmenwerkstoffen<sup>[13][14]</sup> durchgeführt werden, wenngleich sich die Maßnahmen als solche teilweise unterscheiden.

Ansätze zur Entwicklung neuer Fenster müssen sich auch an den Erfahrungen der vergangenen Jahre orientieren, um die Wiederholung von Fehlern zu vermeiden. Eine Analyse von Schadensfällen an Holzfenstern<sup>[15][16][17][18]</sup> war deshalb notwendig und wurde in die weiteren Betrachtungen mit einbezogen.

Die Diskussion der Eignung bestimmter Holzarten und Holzqualitäten geht ebenfalls weit zurück und wurde mit jeder sich andeutenden Schadenswelle des Holzfensters neu belebt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse<sup>[19]</sup> konnten bisher nur teilweise umgesetzt werden, da die Auswahl geeigneter Holzarten<sup>[20][21]</sup> und Holzqualitäten begrenzt war.

Eine pauschale Einstufung der Summe der Eigenschaften des vergüteten Holzes im direkten Vergleich zu übrigen Holzarten zeigt als erste Näherung Abbildung 2.

Die Abbildung vermittelt, dass sich die Summe der notwendigen Eigenschaften eines gebrauchstauglichen Fensters aus den natürlichen Holzeigenschaften und den zusätzlichen technischen Maßnahmen bildet. Dabei ist mit Anstieg der natürlichen Holzeigenschaften ein geringerer zusätzlicher technischer Aufwand notwendig. Bei einem Abfall der natürlichen Holzeigenschaften steigt der notwendige zusätzliche technische Aufwand, um die Gebrauchstauglichkeit über einen angemessenen Nutzungszeitraum sicherzustellen. Der in die Abbildung eingetragene Grenzfall des Kiefersplintholzes lässt die Zusammenhänge aus der praktischen Erfahrung verständlich werden.

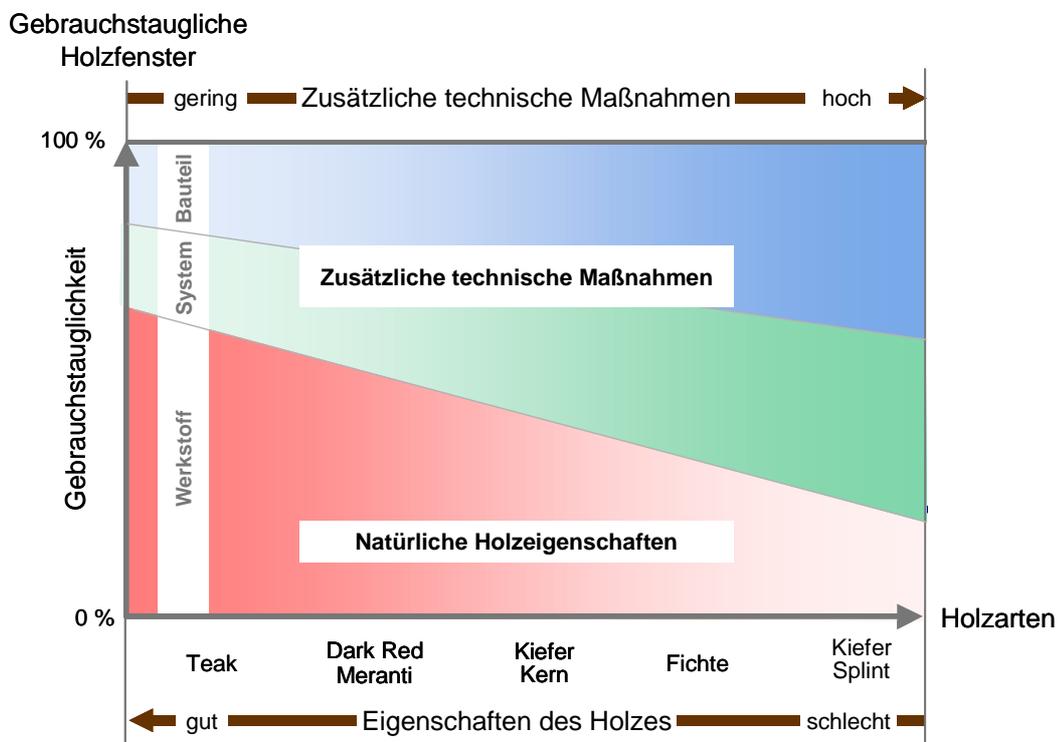


Abbildung 2: Wechselwirkung der natürlichen Holzeigenschaften und der zusätzlichen technischen Maßnahmen in Abhängigkeit der Holzart

Bei dimensionsstabilisiertem Holz ist das Ziel anzustreben, die notwendigen natürlichen Holzeigenschaften zu verbessern, damit der Einfluss zusätzlicher technischer Maßnahmen auf die Gebrauchstauglichkeit geringer ist.

Die weitere Betrachtung zeigt, dass in Abhängigkeit des Konstruktionskonzeptes die Zusammenhänge zwischen den natürlichen Holzeigenschaften und den zusätzlichen technischen Maßnahmen weiter zu spezifizieren sind. Erst danach ist die Entscheidung zu treffen, ob nur bestimmte Eigenschaften zu optimieren sind, um das angestrebte Ziel der Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit der Bauteile Fenster und Fassade bei vertretbarem Aufwand an Wartung zu erreichen.

In Verbindung mit der Anwendung von vergütetem Holz stellt sich zwangsläufig die Frage, ob der monolithische Aufbau der Profile der Holzfenster zukünftig nicht durch einen Schichtenaufbau<sup>[22]</sup> ersetzt werden sollte. Bei einem Schichtenaufbau können die Eigenschaften der einzelnen Schichten optimiert werden und z. B. für die äußere Schicht, gegebenenfalls durch Verzicht auf andere Eigenschaften, die Witterungsbeständigkeit erhöht werden. Die Anzahl und die Verbindung der Schichten kann dabei zunächst offen bleiben, wie dies in Tabelle 1 beispielhaft gezeigt ist.

Die Betrachtungen der Bauteileigenschaften zeigen, dass nur durch ein abgestimmtes Zusammenwirken von Werkstoff, System und Bauteil das Ziel der Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit über einen angemessenen Nutzungszeitraum erreicht werden kann. Dies bedeutet, dass selbst gute Werkstoffeigenschaften, die im System unberücksichtigt sind, die Bauteileigenschaften nicht verbessern. Die Erfahrung zeigt, dass die Eigenschaft eines Bauteils sich nicht aus der Summe der Eigenschaften der Einzelteile ergibt. Um dies zu verdeutlichen, ist mit Abbildung 3 die gegenseitige Abhängigkeit in einem Ringdiagramm dargestellt.

Die Eigenschaften des Bauteils werden durch im System berücksichtigte Eigenschaften des Werkstoffes bestimmt. Verdeutlicht wird dies z. B. durch die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes. Über die Systemeigenschaften wird z. B. durch die Abweisung von Wasser Pilzbefall vermieden. Damit werden die Eigenschaften des Werkstoffes über den Nutzungszeitraum sichergestellt und die Erstellung einer Konstruktion ermöglicht.

Profil	Aufbau	Verbund
<b>Vollholz</b> monolithisch		voll
<b>Verbundholz</b> alle Lagen aus gleichem Holz		verklebt
<b>Verbundholz</b> aus unterschiedlichem Holz		verklebt
<b>Verbund</b> Decklagen aus Holz, auch aus unterschiedli- chen Holzarten  Mittellage aus verschie- denen Werkstoffen		verklebt
<b>Schichten</b> Decklagen aus Holz, auch aus unterschiedli- chen Holzarten  Mittellage aus verschie- denen Werkstoffen		mechanisch verbunden

Tabelle 1: Prinzipien des Profilaufbaus als Basis für die weitere Entwicklung

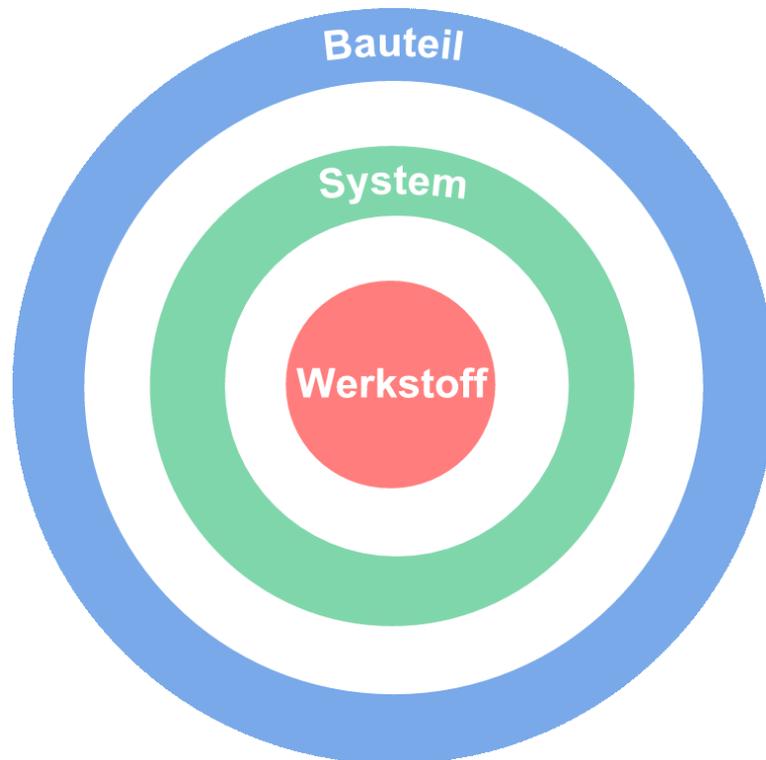


Abbildung 3: Ringdiagramm zur Darstellung der Zusammenhänge von Werkstoff, System und Bauteil bei der Bewertung der Gebrauchstauglichkeit eines Fensters

Die gewählte Struktur Werkstoff – System – Bauteil erleichtert auch die Arbeit an der Gesamtaufgabe „Fenster und Fassaden aus dimensionsstabilisiertem Holz“, da mit der Struktur die Zusammenhänge verdeutlicht werden und eine Abgrenzung der Aufgaben der einzelnen Komponenten erleichtert wird.

Der Bereich Werkstoffe beschreibt die technischen Eigenschaften des vergüteten Holzes, wobei sichergestellt werden muss, dass die Eigenschaften in der praktischen Anwendung auch vorhanden sind und vom Konstrukteur und vom Verarbeiter genutzt werden können.

Im Bereich System ist das Zusammenwirken der für den erfolgreichen Einsatz der Werkstoffe notwendigen Verfahren und Systeme abzuklären, damit die Eigenschaften des vergüteten Holzes optimal genutzt werden können.

Im Bereich Bauteil muss unter Berücksichtigung der Werkstoffeigenschaften, der Konstruktion und der Herstellung deren Zusammenwirken abgestimmt werden, um bei der planmäßigen Umgebungseinwirkungen sowie bei einer zumutbaren Instandhaltung die Gebrauchstauglichkeit sicherzustellen.

Wesentlich ist es, die Schnittstellen zwischen Werkstoff, System und Bauteil zu definieren, ihre Leistungsgrenzen festzulegen und das Risiko abzuschätzen, welches mit dem Versagen von Schnittstellen verbunden sein kann.

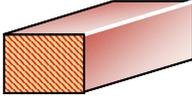
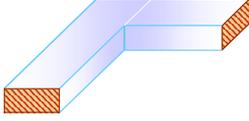
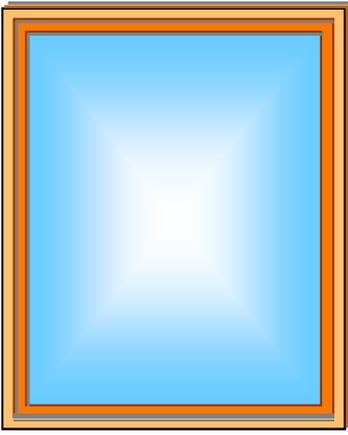
Nr.	Komponente	Beschreibung	Ziel
1	Werkstoff	 <p>Prüfung an ausgewählten Probekörpern, deren Abmessungen häufig normativ festgelegt sind.</p>	Ermittlung der Werkstoffeigenschaften auf der Grundlage bestehender Regelwerke zum Vergleich der Eigenschaften der Werkstoffe untereinander
2	System	 <p>Prüfung an Probekörpern mit definierten und beherrschbaren Randbedingungen Die Form der Probekörper orientiert sich an der Konstruktion des Bauteils.</p>	Ermittlung des Verhaltens des Werkstoffes in Verbindung mit anderen Werkstoffen oder Systemkomponenten unter Berücksichtigung der geplanten Anwendung
3	Bauteil	 <p>Prüfung der Eigenschaften und Funktionen an Bauteilen Bei positiver Kurzprüfung im Labor kann sich ein Feldversuch anschließen.</p>	Abschätzung der Gebrauchstauglichkeit des Bauteils unter Berücksichtigung der Konstruktion, der notwendigen Schutzmaßnahmen bei den zu erwartenden Einwirkungen aus Nutzung und Umgebungseinflüssen

Tabelle 2: Darstellung der Zusammenhänge von Werkstoff, System und Bauteil mit einer Kurzbeschreibung der angestrebten Ziele

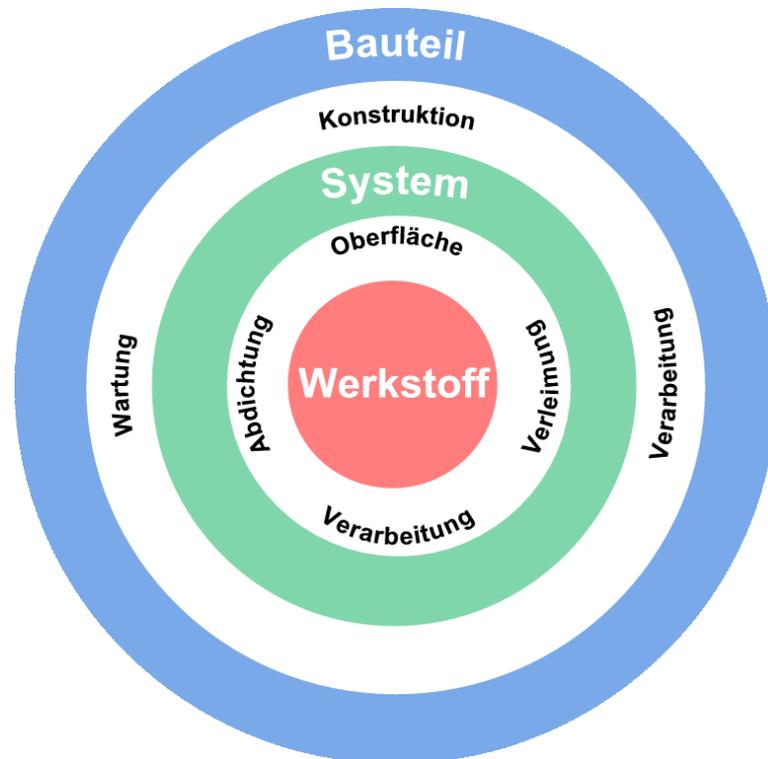


Abbildung 4: Ringdiagramm zur Darstellung der Zusammenhänge von Werkstoff, System und Bauteil mit Angabe von Schnittstellen bei der Bewertung der Gebrauchstauglichkeit eines Fensters

Bei allen Vergütungsverfahren wird eine Verbesserung des Verhaltens der dimensionsstabilisierten Hölzer bei Feuchtigkeitseinwirkung in Verbindung mit den Quell- und Schwindvorgängen im Vergleich zu unbehandelten Hölzern angestrebt.

Damit verbunden ist für die praktische Anwendung auch die Frage, inwieweit diese Verbesserung ausreicht, um den im Bauwesen wichtigen Grundsatz, der mit dem Slogan

**„Das Bauen ist ein Kampf gegen das Wasser!“**

beschrieben werden kann, unbeachtet zu lassen oder großzügiger auszulegen.

Dabei sind die Einwirkungen

- ⇒ der Luftfeuchtigkeit des Raumklimas und des Außenklimas,
- ⇒ die Tauwasserbildung an der Oberfläche im Inneren der Konstruktion und in den Falzen,
- ⇒ die Einwirkungen von Niederschlagswasser

in die Betrachtung mit einzubeziehen.

Für das Eingehen auf diese Frage ist wieder das Zusammenwirken von Werkstoff, System und Bauteil von Bedeutung.

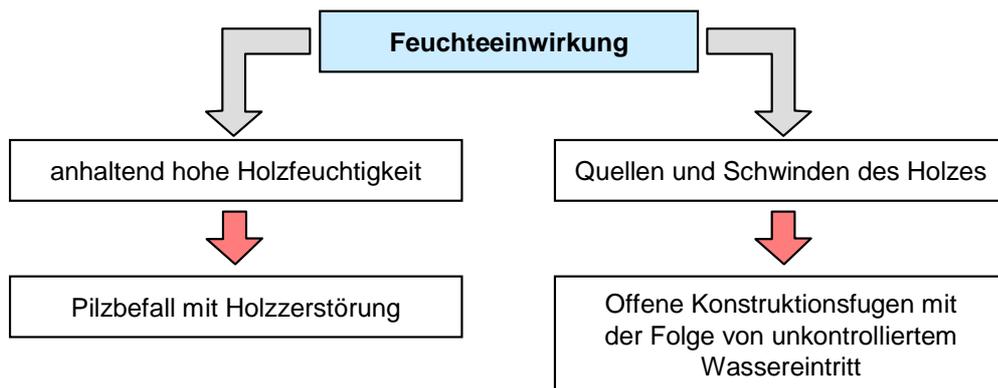


Abbildung 5: Folgen bei Feuchtigkeitseinwirkung

Eine Analyse von häufigen und wiederkehrenden Schäden erleichtert die Erarbeitung von Lösungsansätzen für neue Konstruktionen unter Verwendung von dimensionsstabilisiertem Holz. Häufige und wiederkehrende Schäden sind vorwiegend auf die Einwirkung von Feuchtigkeit zurückzuführen.

Für die Abschätzung des Risikos ist zunächst eine Schwachstellenanalyse bisheriger Holzfensterkonstruktionen notwendig. Die Analyse erfolgt an Fenstern aus nicht vergütetem Holz und an bekannten und erfassten Schadensfällen<sup>[12] [19]</sup>.

Entsprechende Schäden aus Feuchtigkeitseinwirkungen sind in Abbildung 6 skizziert und in Tabelle 3 mit Stichworten erläutert.

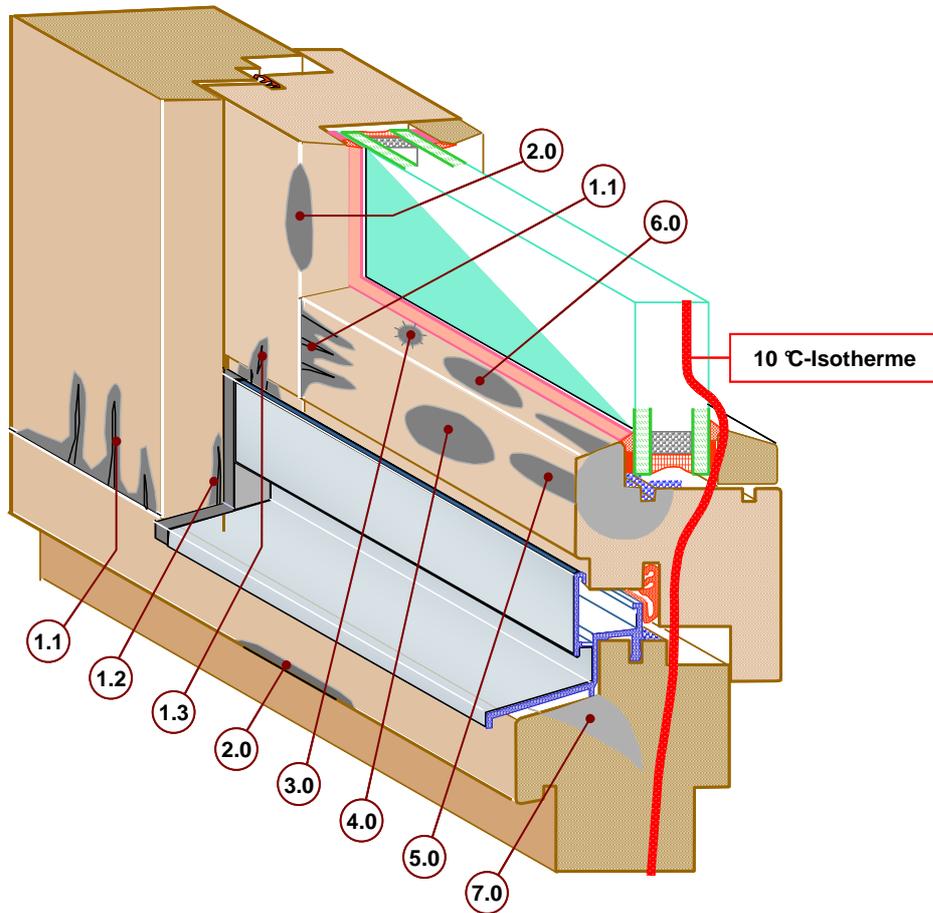


Abbildung 6: Darstellung von Schäden an Holzfenstern, die sich in der Regel durch die Veränderung der Oberfläche zeigen

Nr.	Schadensbeschreibung
1.1	Wassereintritt in die Konstruktion
1.2	Wasseransammlung in Feuchtenestern
1.3	Wasseraufnahme über Hirnholz
2.0	Kantenschaden
3.0	Stoßbelastung (z. B. Hagelschlag)
4.0	Abwitterung
5.0	Tauwasserbildung im Glasfalz durch konvektiven Feuchtetransport
6.0	UV-Schaden
7.0	Inhomogenitäten im Holz

Nr.	Schadensbeschreibung	
	Schadensbild	Ursachen
1.1	<b>Wassereintritt in die Konstruktion</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Von der Fuge ausgehende Ablösung des Anstrichfilms</li> <li>• Rissbildung im Holz</li> <li>• Vergrauung der Holzoberfläche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kapillarer Wassereintritt über offene Konstruktionsfugen</li> <li>• Eintritt von Feuchtigkeit in die Grenzschicht zwischen Holz und Anstrichfilm</li> <li>• Tritt sehr häufig an unzureichend verleimten Rahmenverbindungen auf.</li> </ul>
1.2	<b>Wasseransammlung in Feuchtenestern</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Von einem „Feuchtigkeitsnest“ ausgehende Anstrichablösung</li> <li>• Rissbildung im Holz</li> <li>• Vergrauung der Holzoberfläche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Störung des Feuchtgleichgewichts ausgehend von Fugen im Eckbereich</li> <li>• Das angesammelte Wasser kann in Trockenzeiten nicht wieder abgegeben werden.</li> </ul>
1.3	<b>Wasseraufnahme über Hirnholz</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vom Hirnholz ausgehende Ablösung des Anstrichfilms</li> <li>• Rissbildung im Holz</li> <li>• Vergrauung der Holzoberfläche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nicht ausreichend beschichtetes Hirnholz, so dass Wasser über offene Kapillaren ins Holz einringen kann.</li> </ul>
2.0	<b>Kantenschaden</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Von der Profilkante ausgehende Ablösung des Anstrichfilms</li> <li>• Vergrauung der Holzoberfläche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unzureichende Dicke des Anstrichfilms an der Profilkante, im Regelfall verursacht durch eine unzureichende Rundung der Kanten</li> </ul>
3.0	<b>Stoßbelastung (z. B. Hagelschlag)</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rissbildung im Anstrichfilm</li> <li>• Feuchtigkeitshinterwanderung des Anstrichfilms</li> <li>• Anstrichablösung</li> <li>• Vergrauung der Holzoberfläche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durch mechanische Einwirkungen verursachte Risse im Anstrichfilm</li> </ul>
4.0	<b>Abwitterung</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zu dünner Anstrichfilm</li> <li>• Feuchtigkeitshinterwanderung des Anstrichfilms</li> <li>• Anstrichablösung</li> <li>• Rissbildung im Holz</li> <li>• Vergrauung der Holzoberfläche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unzureichende Schichtdicke des Anstrichfilms als Folge unzureichender Beschichtung oder zu langer Instandhaltungsintervalle</li> </ul>

Nr.	Schadensbeschreibung	
	Schadensbild	Ursachen
5.0	<b>Tauwasserbildung im Falz durch konvektiven Feuchtetransport</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vergrauung des Anstrichfilms</li> <li>• Flächige Ablösung des Anstrichfilms</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Konvektiver Feuchtetransport im Glasfalz und im Flügelfalz</li> <li>• Beeinträchtigung der Anstrichhaftung durch rückwärtige Feuchtebelastung (Flüssigwassertransport im Holz)</li> </ul>
6.0	<b>UV-Schaden</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vergrauung des Holzes unter dem Anstrichfilm</li> <li>• Flächige Ablösung des Anstrichfilms</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unzureichende oder fehlende UV-Schutzwirkung des Anstrichfilms</li> </ul>
7.0	<b>Inhomogenitäten im Holz</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anstrichablösung durch Hinterwanderung ausgehend von erhöhter Holzfeuchtigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Veränderungen im Holz durch Bakterien- oder Pilzbefall erhöhen das kapillare Saugvermögen und führen damit zu hohen Holzfeuchtigkeiten.</li> </ul>

Tabelle 3: Beschreibung der Schäden am Holzfenster und Zuordnung der Schwachstellen

Die in der Zeile 1 beschriebenen Schäden stehen in direktem Zusammenhang mit dem kapillaren Wassertransport im Holz.

Der Wassereintritt über offene Fugen (1.1) ist bei den heutigen Holzfenstern sowohl auf Mängel in der Verarbeitung als auch auf Schwachpunkte in der Konstruktion zurückzuführen. Die Schlitz-Zapfenverbindungen, wie sie im heutigen Fensterbau als Rahmenverbindungen zur Anwendung kommen, sind ausführungsempfindlich und verleiten aufgrund der fertigen Oberflächenbearbeitung der Profile vor dem Zusammenbau der Rahmen dazu, Brüstungen und Zapfenflächen nicht vollflächig zu verleimen, damit die bearbeitete Rahmenoberfläche nicht durch ausgetretenen Klebstoff verunreinigt wird. Die Verunreinigung der Oberfläche durch Klebstoff führt zu einer veränderten Aufnahme des Anstrichmittels, die sich bei Lasuranstrichen durch partielle Farbveränderungen zeigt.

Die Umsetzung des Grundsatzes, dass bei der Verleimung aus der Fuge Leim austreten soll, wird damit nicht beachtet, mit der Folge, dass sich die Fugen der unzureichend verklebten Verbindung öffnen und Wasser eindringen kann.

Die Anstrichschäden im Bereich offener Fugen sind in der Regel die Folge des Wassereintritts. Durch die Unterwanderung des Anstrichfilms mit Wasser wird die Anstrichhaftung am Holz gemindert, so dass Ablösungen vom Holz auftreten. Damit handelt es sich nicht um Schäden, die vom Anstrich ausgehen, sondern um Schäden, die ihre Ursachen in der Konstruktion und in der Herstellung haben.

Wasseransammlungen in Feuchtenestern (1.2) werden durch konstruktive Schwachpunkte verursacht, bei denen der Grundsatz, dass anfallendes Wasser unmittelbar und kontrolliert abgeführt werden muss, nicht beachtet wurde. Die Feuchtigkeitseinwirkung auf den Anstrichfilm ist damit anhaltend, so dass Feuchtigkeit über den Anstrich in das Holz eindringt. Die damit verbundene Feuchtebelastung führt durch Überbeanspruchung auch zum Versagen von Klebstoff- und Dichtstofffugen und ermöglicht zusätzlich den unkontrollierten Eintritt von Wasser in das Holz.

Der Wasseraufnahme über freiliegendes Hirnholz (1.3) kann durch eine ausreichende Beschichtung des Holzes entgegengewirkt werden. Zum Teil ist dies nur durch Nacharbeit am fertigen Rahmen erreichbar, da durch die Beschichtungsverfahren das Hirnholz in der Regel nicht ausreichend geschützt wird. Freiliegendes Hirnholz wird auch durch eine schlechte Bearbeitung mit Holzaustrissen begünstigt.

Die Anstrichschäden im Kantenbereich (2.0) sind durch Profilierung des Holzes bzw. durch gleichmäßigen Auftrag des Anstrichfilms weitgehend zu vermeiden. Werden die Kanten gerundet, so hat sich ein Radius von 2 mm als ausreichend erwiesen, um eine zur Fläche vergleichbare Schichtdicke zu erhalten und einen vorzeitigen Abbau des Anstrichfilms an der Kante zu vermeiden. Den Kantenschäden zugeordnet sind aber auch Schäden, die durch die Quetschung von Holzfasern bei der Bearbeitung aufgrund ungeeigneter Werkzeuge entstehen.

Anstrichschäden durch Stoßbelastung (3.0) an horizontalen Profilflächen entstehen in vielen Fällen durch Hagelschlag (Abbildung 7). Die Schadensentwicklung ist sowohl von der Belastbarkeit des Holzes als auch von der Rissanfälligkeit des Anstrichfilms abhängig. Die Auswirkungen können durch eine regelmäßige Nachbehandlung beanspruchter Flächen gemindert werden. Dabei ist zur Kenntnis zu nehmen, dass Hagelschlag zwar durch bauliche Maßnahmen gemindert, durch die Konstruktion des Fensters aber nicht verhindert werden kann.



Abbildung 7: Anstrichschäden durch Hagelschlag

Anstrichschäden, die durch die Abwitterung des Anstrichfilms (4.0) entstehen, sind mit Ausnahme bei Dünnschichtlasuren nach vorliegenden Erkenntnissen nicht häufig anzutreffen. Schäden, die der Abwitterung zugeordnet werden, sind vielfach Schäden, bei denen sich der Anstrichfilm vom Holz ablöst. In diesen Fällen wandert Feuchtigkeit in den Grenzbereich zwischen Anstrichfilm und Holz und schwächt die Anstrichhaftung auf dem Holz, so dass es zu Ablösungen kommt. Die Erfahrung zeigt, dass die bisherige Auffassung, dass der notwendige Oberflächenschutz von Fenstern und Fassaden nur über eine große Schichtdicke des Anstrichfilms und damit bei Lasuranstrich nur über Dickschichtlasuren erreicht wird, nicht haltbar ist.

Es ist zwar zutreffend, dass sich mit der Schichtdicke die Schutzwirkung erhöht und der Zeitraum bis zur notwendigen Nachbehandlung verlängert. Die notwendigen Voraussetzungen, um diese im System nachgewiesenen Eigenschaften der Beschichtung zu nutzen, können aber am Bauteil derzeit nicht sichergestellt werden. Wie auch die Schadensanalyse zeigte, sind die häufigsten Schadensursachen in Verbindung mit der Unterwanderung des Anstrichfilms zu sehen.

Die Aufgaben, die der Schichtdicke zugeordnet werden, sind in der Regel

- ⇒ Verlängerung der Wartungsintervalle,
- ⇒ Vermeidung der Vergrauung der Holzoberfläche,
- ⇒ Schutz des Holzes vor zu großer Wasseraufnahme,
- ⇒ Vermeidung einer zu schneller Austrocknung bzw. Auffeuchtung des Holzes,
- ⇒ Vermeidung der Entstehung von Oberflächenrissen.

Der konvektive Feuchtigkeitstransport (5.0), wie er in den Hohlräumen und Falzen der Fenster auftritt, führt zu einer hohen und häufig unterschätzten Feuchtigkeitsbelastung des Holzes. Die treibende Kraft für den konvektiven Feuchte-transport in Fugen und in den Falzen der Fenster sind Druckunterschiede zwischen den Innenräumen eines Gebäudes und der Außenatmosphäre. Mit zunehmender Dichtheit der übrigen Gebäudehülle und der fehlenden kontrollierten Führung der Abluft verstärkt sich der konvektive Feuchtigkeitseintrag über feuchte und warme Raumluft in Fugen und Spalten.

Soweit keine definierten Abluftöffnungen vorhanden sind, verbleiben nur die an den Fenstern, z. B. in den Falzen zwischen Flügel und Blendrahmen, vorhandenen Undichtheiten der Falzdichtung als Abströmöffnungen.

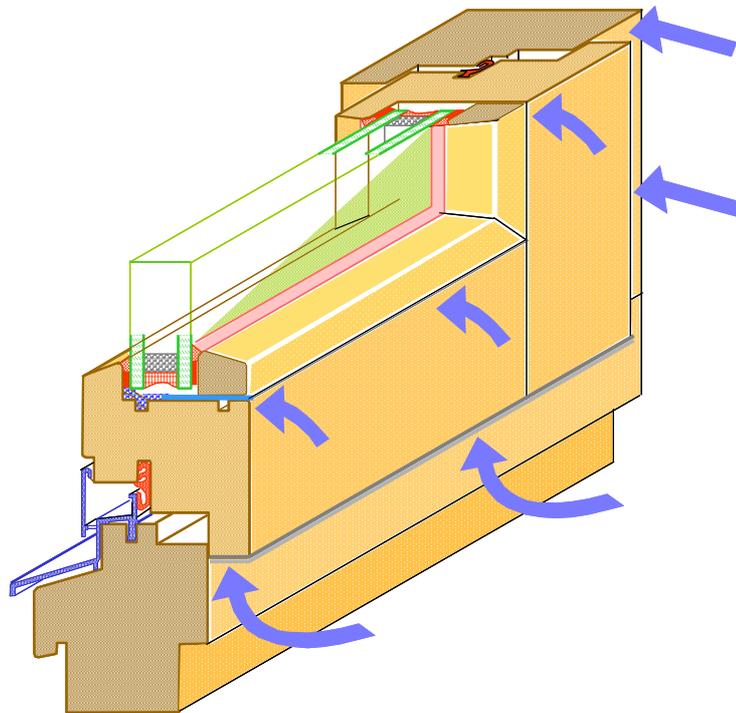


Abbildung 8: Andeutung der Luftströmung in die Falze der Fenster von der Raumseite durch Luftdruckunterschiede zwischen der Raumseite und der Außenseite

Wegen der Wirkung der Falzdichtung ist eine direkte und unmittelbare Durchströmung nicht möglich. Deshalb kommt es nach dem derzeitigen Kenntnisstand zur Umströmung des Fensterrahmens längs des Falzraumes. Damit verbleibt ausreichend Zeit zur Abkühlung der warmen Raumluft an den kalten Falzflächen, die teilweise unter der Taupunkttemperatur liegen, um Tauwasser zu bilden. In den Eckbereichen verstärkt sich nach den bisherigen Beobachtungen der Tauwasseranfall durch die Wirbelbildung abgerissener Stromlinien.

Den Temperaturverlauf und die Feuchtigkeitsverteilung in einem Holzfenster der Profilausbildung IV 68 in Anlehnung an DIN 68121 zeigen Abbildung 9 und Abbildung 10. Die rote Linie beschreibt die 10 °C-Isotherme, die etwa der Taupunkttemperatur des Raumklimas 20 °C/50 % entspricht. Die blaue Linie beschreibt die 0 °C-Isotherme.

In der Darstellung der Feuchtigkeitsverteilung beschreiben die blauen Flächen den Umfang der Feuchtebelastung.

Sowohl Abbildung 9 als auch Abbildung 10 zeigen, dass die Falzbereiche bezüglich der Feuchtebelastung kritisch sind. Dies gilt sowohl für den zur Raumseite hin undichten Glasfalz als auch für den Falz zwischen Flügel und Blendrahmen.

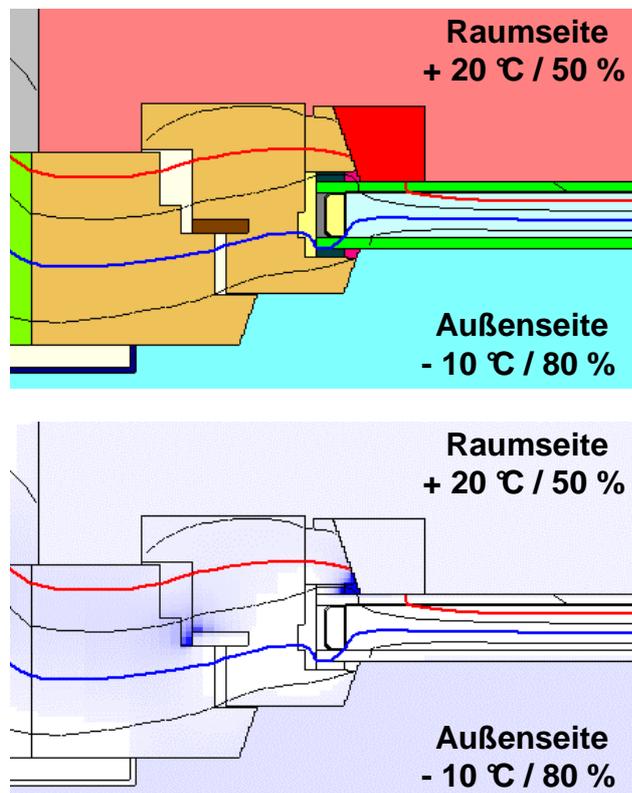
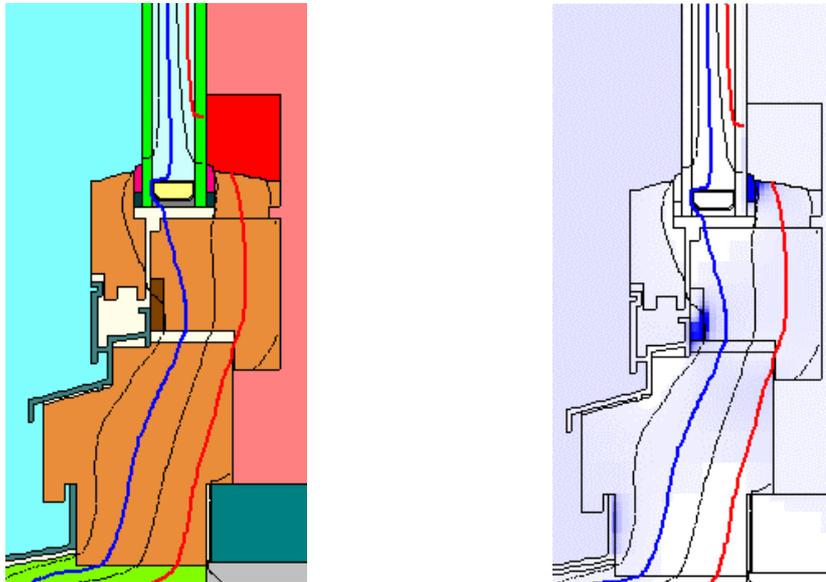
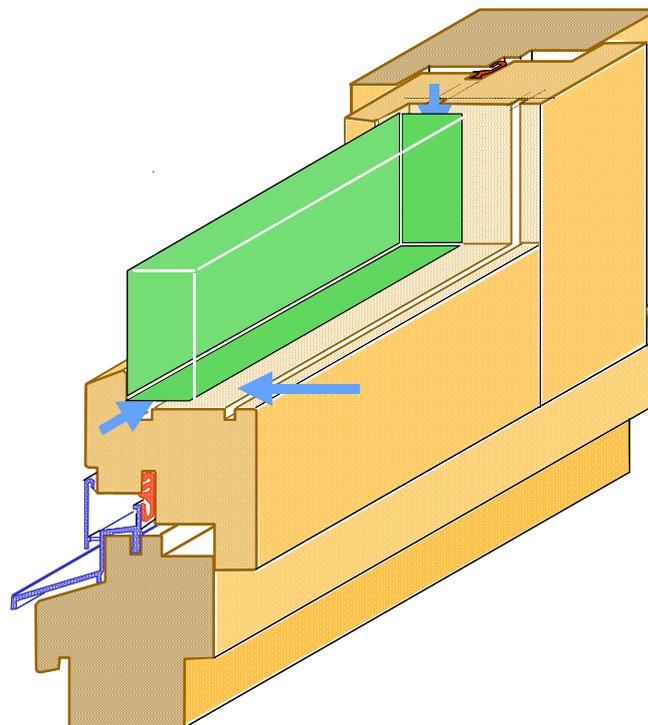


Abbildung 9: Holzfenster IV 68 mit den Temperaturfeldern und der zu erwartenden Verteilung der Feuchtigkeit (unten im Bild) im seitlichen Querschnitt



**Abbildung 10:** Holzfenster IV 68 mit den Temperaturfeldern und der zu erwartenden Verteilung der Feuchtigkeit (rechts) im unteren Querschnitt mit Wetterschutzschiene



**Abbildung 11:** Darstellung des konvektiven Feuchtigkeitstransports im Glasfalz, wobei aufgrund der langen Strömungswege die Luft abgekühlt und Feuchtigkeit ausgeschieden wird.

In Abbildung 8 und Abbildung 11 ist der Strömungsweg der Luft in den Glasfalzen beispielhaft dargestellt. Mit dem Luftstrom wird Feuchtigkeit mitgeführt, welche auf dem Strömungsweg an den kalten Flächen und in den „Wirbelzonen“ der Falze als Tauwasser ausfällt. Die Erfahrung zeigt, dass

- ⇒ im Glasfalz nur mit zusätzlichen Abdichtmaßnahmen die Zuströmung von Raumluft verhindert werden kann.
- ⇒ im Falz zwischen Flügel und Blendrahmen auch durch zusätzliche Dichtungen am Flügelüberschlag die Zuströmung von Raumluft nicht vermieden werden kann.

Da auch eine Stoßlüftung der Räume nicht die notwendige Entlastung der Fenster bringt, muss vom Bauplaner die in Regelwerken beschriebene Grundlüftung umgesetzt werden.

Die Vergrauung des Holzes (6.0) unter dem Anstrichfilm ist auf eine unzureichende UV-Schutzwirkung des Anstrichfilms zurückzuführen. Durch die UV-Lichteinwirkung auf das Holz wird Lignin abgebaut und der Verbund der Holzfasern untereinander zerstört. Damit wird auch die Verbindung des Anstrichfilms zum Holz beeinträchtigt. Dies führt zu einem Ablösen des Anstrichfilms, wobei als typisches Merkmal für den Holzabbau ein Faserbelag auf der Rückseite des Anstrichfilms erkennbar ist.

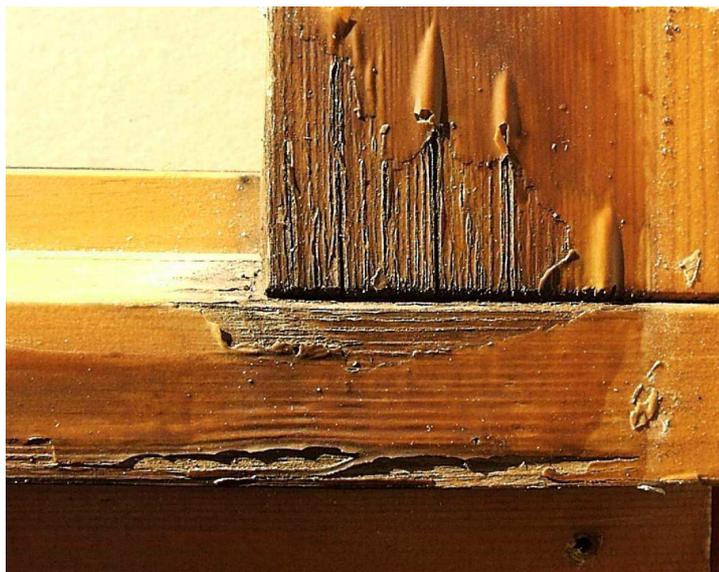
Inhomogenitäten im Holz (7.0) durch den Befall von Mikroorganismen oder durch Pilze führen in den befallenen Bereichen zu einer erhöhten und lang anhaltenden Feuchtigkeitsaufnahme<sup>[23]</sup>. Die Inhomogenität ist für das Auge zunächst nicht erkennbar. Erst bei einem direkten Kontakt mit Wasser zeigt sie sich durch eine erhöhte Wasseraufnahme. Die Folgen sind starke Durchfeuchtungen, da die befallenen Bereiche, die partiell auftreten, bereits bei kurzzeitigem Wasserangebot ausreichend Wasser aufnehmen, und somit die Voraussetzungen für das Wachstum von holzerstörenden Pilzen geschaffen werden. Nach den zwischenzeitlich gewonnenen Erkenntnissen sind die beschriebenen Inhomogenitäten eine häufige Ursache für Schäden an Fenstern. Durch sie wirken sich bereits geringe Feuchtebelastungen nachhaltig auf die Nutzungsdauer aus.

Während man Flächen und Kanten von Fensterhölzern mit Anstrichen vor dem Wassereintritt wirksam schützen kann, erweisen sich die Konstruktionsfugen des Fensters als besonders kritisch. Die Flanken dieser Fugen sind in der Regel im äußeren Bereich nicht verleimt und daher für einen Wassereintritt offen. Das Regenwasser dringt über die offene Fugenflanke in das Innere der Konstruktion ein und wird sowohl in Faserrichtung des Holzes als auch quer zur Faser kapillar weitertransportiert.

Durch die damit verbundenen Quellvorgänge kommt es in der Konstruktionsfuge zu einer nicht mehr reversiblen Stauchung der Holzfasern, so dass nach der Austrocknung eine offene Fuge bleibt, welche beim nächsten Regen den Wassereintritt in das Innere des Profilquerschnitts weiter begünstigt. Die Folgen dieser Wasserbelastung sind aus Abbildung 12 und Abbildung 13 deutlich erkennbar.



**Abbildung 12:** Beginnende Feuchtigkeitsschäden etwa ein Jahr nach dem Einbau durch Eindringen von Feuchtigkeit über eine ungeschützte Konstruktionsfuge. Wegen der geringen Schichtdicke des Anstrichs sind keine Anstrichschäden, sondern nur Wasserbeeinträchtigungen am Holz erkennbar.



**Abbildung 13:** Fortgeschrittene Feuchtigkeitsschäden als Folge des Wassereintritts über offene Konstruktionsfugen an der unteren Ecke eines Blendrahmens

### **1.3 Folgerungen für die Weiterentwicklung**

Aus der Schwachstellenanalyse folgt, dass sich die Schäden an Holzfenstern überwiegend als Schäden der Oberflächenbehandlung zeigen. Erst bei einer näheren Betrachtung wird deutlich, dass die Anstrichschäden Sekundärschäden sind. Die primären Schadensursachen sind auf Schwachpunkte und Mängel bei den eingesetzten Werkstoffen, bei der gewählten Konstruktion und bei der nicht fachgerechten Herstellung zurückzuführen. Das unkontrollierte Eindringen von Feuchte in das Holz wird dadurch ermöglicht.

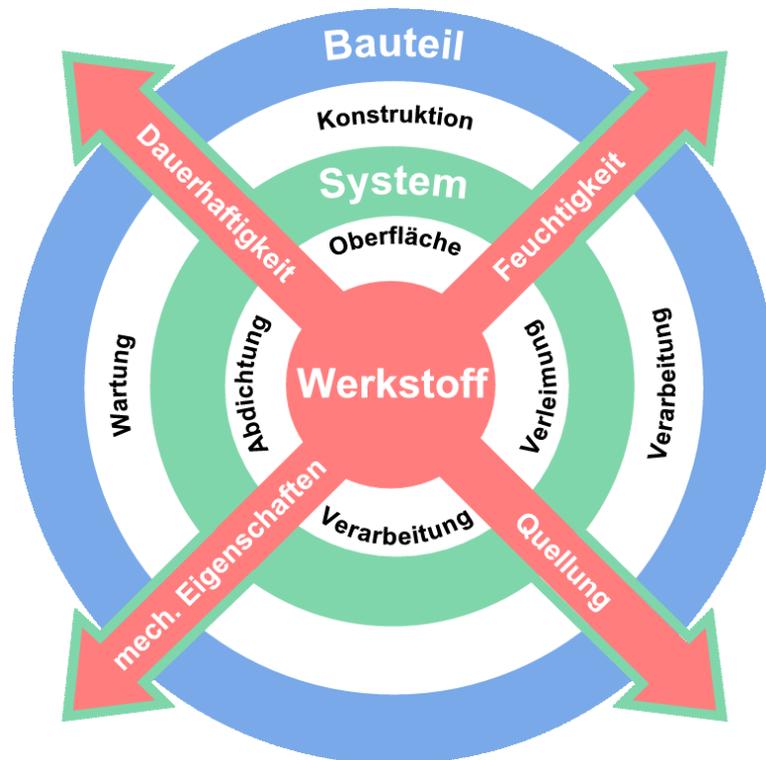
Dabei handelt es sich um:

- ⇒ unzureichend verleimte Rahmenverbindungen,
- ⇒ offene Fugen in Anschlüssen,
- ⇒ schmale offene Konstruktionsfugen,
- ⇒ Risse im Holz,
- ⇒ unzureichend geschütztes Hirnholz,
- ⇒ Fehlstellen im Anstrich.

Für die Weiterentwicklung der Fenster und Fassaden ist dies unter anderem zu berücksichtigen und durch die Vergütung der Werkstoffe in Verbindung mit geeigneten Konstruktionen und einer kontrollierten Herstellung die Mängel und damit auch die Schäden zu vermeiden.

### **1.4 Anforderungen an den Werkstoff**

In Abbildung 14 ist das Runddiagramm (Abbildung 3) durch die Benennung von Schnittstellen ergänzt, um das komplexe Zusammenwirken der Einzelkomponenten zu verdeutlichen. Die Betrachtung beginnt beim Werkstoff, da die Eigenschaften des Werkstoffes die Grundlagen für die Systemeigenschaften und die Bauteileigenschaften bilden.



**Abbildung 14:** Ringdiagramm zur Darstellung der Zusammenhänge von Werkstoff, System und Bauteil bei der Bewertung der Gebrauchstauglichkeit eines Fensters mit Angabe der Schnittstellen und der notwendigen wesentlichen Eigenschaften des Werkstoffes

Die Auswertung der Schadensanalyse und die Einbeziehung weiterer Erkenntnisse aus Schadensfällen an Fenstern und Fassaden zeigt, dass für die gesteckten Ziele,

- ⇒ die natürliche Farbe und Struktur des Holzes zu erhalten,
- ⇒ den Aufwand an Wartung bei einem wirtschaftlichen Aufwand in einer zumutbaren Höhe zu begrenzen,
- ⇒ die Gebrauchstauglichkeit über einen angemessenen Nutzungszeitraum sicherzustellen,
- ⇒ ein im Vergleich zu anderen Rahmenwerkstoffen günstiges Preis-Leistungsverhältnis sicherzustellen,

nachfolgende Eigenschaften des Holzes verändert werden müssen.

- ⇒ Das Quellen und Schwinden des Holzes muss gemindert und in dem angegebenen Bereich sichergestellt werden, damit die Konstruktion leichter zu beherrschen und die Einflüsse aus der Verarbeitung begrenzt werden. Je geringer Veränderungen aus Klimaeinwirkungen sind, um so unempfindlicher ist die Konstruktion im Langzeitverhalten.
- ⇒ Die kapillare Wasseraufnahme sowohl längs der Holzfaser und damit über Hirnholz als auch quer zur Holzfaser muss weitgehend vermieden werden, zumindest aber kontrollierbar sein, damit die Voraussetzungen für die Entwicklung von holzerstörenden Pilzen und die Auswirkungen auf die Beschichtung und auf angrenzende Werkstoffe vermieden werden.
- ⇒ Die Dauerhaftigkeit des Holzes muss ohne zusätzliche Schutzmaßnahmen so weit verbessert werden, dass bei vorübergehend kritischen Situationen der Einfluss auf die Nutzungsdauer und eine unkontrollierte Holzerstörung vermieden wird.
- ⇒ Der Abbau von Lignin durch Lichteinwirkung und UV-Strahlung muss so weit gemindert werden, dass die Festigkeit des Verbundes der Holzfasern und die natürliche Holzfarbe durch eine lasierende Beschichtung über einen langen Zeitraum erhalten werden können.
- ⇒ Die elastischen und die mechanischen Eigenschaften des Holzes dürfen sich nur kontrolliert verändern, sodass für die notwendige Nachweise gesicherte Bemessungswerte vorliegen.

Im vorliegenden Projekt war für den Werkstoff „dimensionsstabilisiertes Holz“ zu klären, welche Veränderungen der Eigenschaften an heimischem Nadelholz durch die Vergütung möglich sind.

- 
- 3 **Kompetenzzentrum „kostengünstig qualitätsbewusst bauen“, 09/2004:** „Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten“; IEMB Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e. V. an der TU-Berlin; Info-Blatt Nr. 9.9
  - 4 **Gerner, M.; Gärtner, D.; 1991:** „Historische Fenster – Entwicklung, Technik, Denkmalpflege“
  - 5 **Plinke, E.; Wolff, H.; Meckel, H.; Schüssler, R.; 1999:** „PVC und Nachhaltigkeit“; Dt. Instituts-Verlag; Köln
  - 6 **NN.:** Restholzensorgung; WKI; Braunschweig

- 7 **Schröder, M.; 2005:** „Der Wartungsvertrag – Vertragsgestaltung der Inspektion – Wartung – Instandsetzung von baulichen Anlagen und Rechtsfolgen“; Beuth-Verlag; Berlin
- 8 **Hegner, Hans-Dieter; Vogler, Ingrid; 2002:** „Energieeinsparverordnung EnEV – für die Praxis kommentiert“; Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- 9 **Thaler, M.; 1999:** „Rahmenmaterialwahl beim Fensterkauf – eine Marktstudie“; Diplomarbeit; Fachhochschule Rosenheim – Fachbereich Holztechnik
- 10 **Hohenstein, Helmut; Lass, Jörn P.; Grünheid, Ralf; Moarcas, Odette; Voigt, Torsten; 2002:** Forschungsvorhaben „Holzfenster der Zukunft“; Institut für Fenstertechnik e. V.; Rosenheim
- 11 **Schröder, Mario; 2005:** „Der Wartungsvertrag – Vertragsgestaltung der Inspektion – Wartung – Instandsetzung von baulichen Anlagen und Rechtsfolgen“; Hrsg. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.; Beuth Verlag GmbH; Berlin
- 12 **Schmid, Josef; Götz, Martin; Hoeckel, Christopher; Krause, Harald; Laurich, Hermann; Lechner, Siegfried; 1997:** „Innovation Holzfenster – Warten und Pflegen“; Institut für Fenstertechnik e. V.; Rosenheim
- 13 **Froelich, Hans; Hepp, Bernhard; Löffel, Gerhard; Schmid, Josef; 1986:** Forschungsbericht „Konstruktionsmerkmale für Fenster“; Institut für Fenstertechnik e. V.; Rosenheim
- 14 **Schmid, Josef u. a.; 1998:** „Expertengespräch Kunststofffenster“; Institut für Fenstertechnik e. V.; Rosenheim
- 15 **Seminar; 1987:** „Schäden aus Feuchteeinwirkung im Fensterbereich“; 1. i.f.t.-Sachverständigensymposium „Aus der Forschung für die Praxis“; Institut für Fenstertechnik e. V.; Rosenheim
- 16 **Seminar; 1993:** „Schäden an Fenstern aus Konstruktion, Verglasung und Baukörperanschluss“; i.f.t.-Seminar; Institut für Fenstertechnik e. V.; Rosenheim
- 17 **Seifert, E.; Froelich, H.; Schmid, J.; Laun, K.; 1970:** Forschungsbericht „Untersuchung über die Ursachen von Schäden an Holzfenstern durch holzerstörende Pilze“; Institut für Fenstertechnik e. V.; Rosenheim
- 18 **Willeitner, Hubert; Schwab, Eckart; 1981:** „Holz – Außenverwendung im Hochbau“; Verlagsanstalt Alexander Koch GmbH, Stuttgart
- 19 **Schmid, Josef; Laurich, Hermann; 1993:** Forschungsbericht „Alterung und Instandhaltung von Holzfenstern“; Institut für Fenstertechnik e. V.; Rosenheim
- 20 **VFF Merkblatt HO.06; 07/2004:** „Holzarten für den Fensterbau – Anforderungen, Holzartentabelle“; Verband der Fenster- und Fassadenhersteller e. V.; Frankfurt
- 21 **VFF Merkblatt HO.02; 02/2003:** „Auswahl der Holzqualität für Holzfenster und -Haustüren“; Verband der Fenster- und Fassadenhersteller e. V.; Frankfurt
- 22 **Schmid, Josef; Leuschner, Ingo; Hoeckel, Christopher; 1999:** „Mit Holzfenstern in die Zukunft“; Holz-Zentralblatt Nr. 142; Stuttgart
- 23 **Willeitner, Hubert; 1971:** „Anstrichschäden infolge Überaufnahmefähigkeit des Holzes“; Holz-Zentralblatt Nr. 157; Stuttgart

## 2 Verfahren zur Dimensionsstabilisierung von Holz

### 2.1 Wirkprinzipien

Die Wirkungsweisen der unterschiedlichen Holzmodifizierungen sind sehr speziell und stark vom jeweiligen Verfahren abhängig. Es gibt einige Wirkprinzipien, die sich zum Verständnis des angestrebten Zieles zusammenfassen lassen. In vielen Holzmodifizierungsprozessen findet man mehrere dieser Wirkprinzipien gleichzeitig.

Die Verfahren und Wirkprinzipien sind im ersten und zweiten Zwischenbericht zu diesem Forschungsvorhaben<sup>[24][25]</sup> ausführlich beschrieben. Es erscheint deshalb zur besseren Übersicht ausreichend, wenn im vorliegenden Bericht die Wirkprinzipien und Verfahren nur kurz beschrieben und in den wesentlichen Merkmalen erläutert werden.

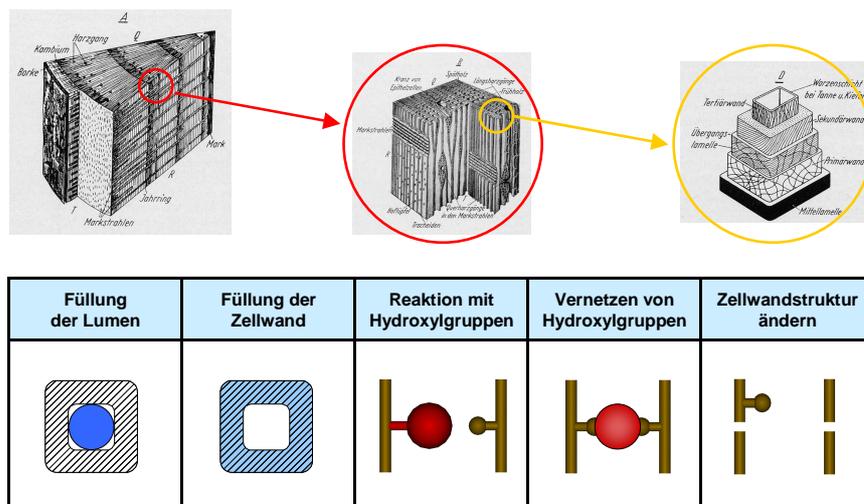


Abbildung 15: Darstellung der Wirkprinzipien zur Vergütung von Holz

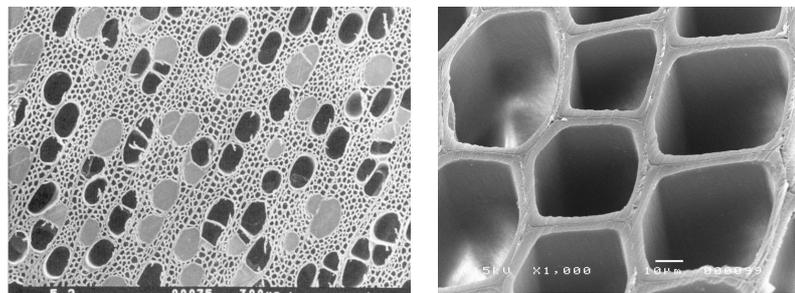


Abbildung 16: Struktur des unbehandelten Holzes im Vergleich zwischen Laubholz (links) und Nadelholz (rechts)

### 2.1.1 Füllung von Zelllumen

Die Füllung der Lumen und/oder der Gefäße im Holz ist die einfachste Art, Holzeigenschaften zu verändern. Das Holz oder die Holzzellwand wird dabei weder chemisch, thermisch noch mechanisch verändert, so dass eine Modifizierung des Holzes nicht erfolgt.

Zur angestrebten Veränderung der Holzeigenschaften werden verschiedene chemische Stoffe - meist mittels Vakuum-Druck-Imprägnierung - in das Holz eingebracht und die Lumen und Gefäße des Holzes gefüllt. Es können mit diesem Verfahren deshalb nur Hölzer behandelt werden, die imprägnierbar sind.

Die für die Füllung verwendeten Partikel sind so groß, dass sie nicht in die Zellwände eindringen können. Eine Fixierung im Holz kann durch chemische Wechselwirkung oder durch thermische Verfahren (Wachse oder Öle) stattfinden.

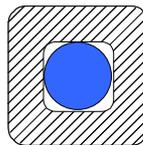


Abbildung 17: Mit Wachs gefüllte Nadelholzzelle

Die Eigenschaften des neuen Materials aus solcher Behandlung sind oft eine Kombination der Eigenschaften des eingebrachten Stoffes und des Holzes. Im Verhalten gegenüber der Einwirkung von Feuchte ergibt sich im Wesentlichen eine große zeitliche Verzögerung der Feuchteaufnahme.

Einige der Verfahren werden, obwohl keine eigentliche Veränderung der Holzzellwand stattfindet, mit zu den innovativen Verfahren der Holzmodifizierung gerechnet.

Beispiele von Verfahren zur Veränderung der Holzeigenschaften durch das Füllen der Zelllumen sind:

- ⇒ Wachs-Harz-Behandlung,
- ⇒ Royalverfahren,
- ⇒ Öl-Hitze-Behandlung,
- ⇒ Imprägnierung mit Chitosan,
- ⇒ Silizium- oder Silikonbehandlungen,
- ⇒ Furfurylierung.

Besonders verbreitet und wirkungsvoll ist dieses Prinzip bei Behandlungen, die das Holz hydrophobieren. Durch die Hydrophobierung wird die Wasseraufnahme gesenkt oder die Wasseraufnahmegeschwindigkeit reduziert. Teilweise werden durch das Einbringen von Harzen oder Wachsen die mechanischen Eigenschaften des Holzes verbessert.

Behandlungen, welche die Zelllumen über den gesamten Profilquerschnitt voll ausfüllen, benötigen hohe Einbringmengen, die eine starke Zunahme des Gewichts verursachen.

Wird keine Vollimprägnierung durchgeführt, bleiben Teile des Holzquerschnitts unbehandelt und können nach einer Be- oder Verarbeitung wieder sichtbar werden und die angestrebten Eigenschaften negativ verändern.

### **2.1.2 Füllung der Zellwände**

Dieses Wirkprinzip ist analog zu dem oben beschriebenen Prinzip der Füllung der Zelllumen zu verstehen. Die Zellwände des Holzes werden weder chemisch, thermisch oder mechanisch verändert.

Ebenfalls per Vakuum-Druck-Imprägnierung werden Stoffe in das Holz eingebracht. Die verwendeten Molekül- oder Partikelgrößen sind so klein, dass diese in die Zellwände eindringen können.

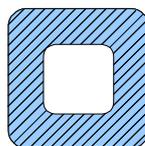


Abbildung 18: Mit Chemikalien gefüllte Zellwand einer Nadelholzzelle

In den Zellwänden kann eine Fixierung durch Kondensation, chemische Wechselwirkung oder thermische Einflüsse stattfinden. Sehr oft treten bei Modifizierungsverfahren die Wirkmechanismen Füllung der Zellwände in Verbindung mit einer Füllung der Zelllumen in Kombination auf. Voraussetzung für die Behandlung ist, dass die Hölzer imprägnierbar sind.

Beispiele für dieses Wirkprinzip sind:

- ⇒ Melaminharzbehandlung,
- ⇒ Holzvernetzung,
- ⇒ Silanimprägnierung,
- ⇒ Furfurylierung.

Durch dieses Wirkprinzip werden häufig die mechanischen Eigenschaften verändert. Je nach Art des eingebrachten Stoffes bewirkt die Behandlung auch die Erhöhung der Dauerhaftigkeit, die Reduzierung des Quellens und Schwindens sowie die Reduzierung der Wasseraufnahmefähigkeit. Die Ausgleichsfeuchtigkeit des Holzes wird gesenkt.

Durch die Behandlung kommt es in der Regel zu einer permanenten Quellung (bulking) und Gewichtszunahme des Holzes. Das Holz kann bis zu 120 % schwerer werden.

### **2.1.3 Reaktion mit einzelnen Hydroxylgruppen**

Dieses Wirkprinzip beruht auf einer chemischen Veränderung der Holzzellwände die ein Kernprinzip der chemischen Holzmodifizierung ist.

Hydroxylgruppen (OH-Gruppen) sind funktionelle Gruppen in den Molekülen von Zellulose, Hemizellulose und Lignin. Diese chemischen Gruppen sind für viele Holzeigenschaften verantwortlich. Hydroxylgruppen sind stark hydrophil und sind für das Sorptionsverhalten des Holzes verantwortlich.

Ziel der chemischen Modifizierung ist es, eine Reaktion von chemischen Stoffen mit den Hydroxylgruppen zu erreichen und so die Holzeigenschaften zu verändern.

Angewendet wird dieses Prinzip hauptsächlich bei imprägnierbaren Hölzern. Nicht imprägnierbare Hölzer können nur oberflächlich behandelt werden.

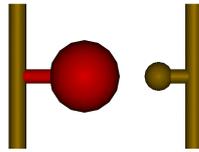


Abbildung 19: Gegenüberliegende Hydroxylgruppen in der Zellwand. Eine der Gruppen wurde durch Essigsäureanhydrid in eine Acetylgruppe umgewandelt.

Eine Hauptanwendung dieses Prinzips ist die Acetylierung. Die Hydroxylgruppen des Holzes werden in Acetylgruppen umgewandelt. Zur Acetylierung von Holz können verschiedene Anhydride verwendet werden. Das bekannteste Beispiel ist die Acetylierung mit Essigsäureanhydrid.

Viele Holzeigenschaften werden durch die Behandlung verändert, unter anderem erfolgt eine:

- ⇒ Erhöhung der Dauerhaftigkeit,
- ⇒ Reduzierung von Quellen und Schwinden,
- ⇒ Reduzierung der Holzfeuchtigkeit.

Mechanische Eigenschaften werden durch dieses Prinzip in der Regel nicht verändert.

Durch die Behandlung kommt es zu einer permanenten Quellung und Gewichtszunahme des Holzes.

#### **2.1.4 Vernetzen von Hydroxylgruppen**

Bei der Vernetzung von Hydroxylgruppen werden zwei dieser Gruppen reaktiv miteinander verbunden. Es kann sich um eine direkte Vernetzung durch thermische Energie ohne zusätzliche Chemikalien handeln. Eine andere Möglichkeit ist, dass mit Hilfe von reaktiven Chemikalien zwei oder mehrere Hydroxylgruppen des Holzes mit reaktiven Gruppen der eingesetzten Moleküle reagieren und feste chemische Bindungen bilden.



Abbildung 20: Vernetzung von Hydroxylgruppen durch Eigenkondensation [A] oder reaktive Imprägniermittel [B]

Durch die Vernetzung der Hydroxylgruppen entstehen andere funktionelle Gruppen, welche die Holzeigenschaften beeinflussen.

Je nach eingesetztem Verfahren werden Holzeigenschaften verändert. Prozesse, die dieses Prinzip nutzen, sind:

- ⇒ Hitzebehandlung [A],
- ⇒ Holzvernetzung [B],
- ⇒ Furfurylierung [B].

Durch diese Behandlung können die gleichen Eigenschaften verändert werden, wie sie im Abschnitt 2.1.3 „Reaktion mit einzelnen Hydroxylgruppen“ beschrieben sind.

Im Fall der Hitzebehandlung wird keine permanente Quellung erreicht, sondern eine permanente Schwindung. Werden bei der Behandlungen Chemikalien eingesetzt, erreicht das Holz eine permanente Quellung.

Charakteristisch für die Vernetzung von Hydroxylgruppen ist, dass das Holz nach der Behandlung (bei Wassersättigung) weniger quillt als vor der Behandlung (Cross-linking-Effekt).

Viele Holzeigenschaften werden verändert. Unter anderem erfolgt eine:

- ⇒ Erhöhung der Dauerhaftigkeit,
- ⇒ Reduzierung von Quellen und Schwinden,
- ⇒ Reduzierung der Holzfeuchtigkeit.

Die mechanischen Eigenschaften können durch dieses Prinzip verändert werden.

### 2.1.5 Verändern von Zellwandstrukturen

Durch viele Holzmodifizierungsprozesse kommt es zu einer dauerhaften Veränderung der Zellwandstrukturen.

Durch Temperatur oder Säuren können die Hemicellulosen degradiert (hydrolysiert) oder die Cellulose depolymerisiert werden. Die Verkittung der Mikrofibrillen durch das Lignin kann verändert werden. Die meisten der Einflüsse beeinträchtigen die mechanischen Eigenschaften des Holzes.

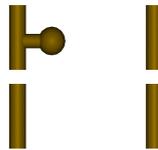


Abbildung 21: Zerstörung von Zellwandbestandteilen (Mikrofibrillen) durch Depolymerisation

Diese Änderungen sind meistens unerwünscht. Ziel ist es, diese negativen Einflüsse der Modifikationen zu unterbinden oder zu reduzieren.

Besonders stark tritt dieser Effekt während der Hitzebehandlung auf, bei der die Bruchschlagarbeit des Holzes stark reduziert werden kann. In einem etwas geringeren Maß können auch die anderen Modifizierungen zu einer Schwächung des Holzes führen.

## 2.2 Vergütungsverfahren

Die Modifizierungsverfahren wurden ausführlich im ersten und zweiten Zwischenbericht des Forschungsverfahrens beschrieben und werden deshalb an dieser Stelle nur kurz zusammengefasst. Aus der Übersicht in Abbildung 22 ist ersichtlich, dass bei den meisten Vergütungsverfahren verschiedene Wirkprinzipien zur Veränderung der Eigenschaften beitragen.

Modifizierungsverfahren	Auf dem Markt	Wirkprinzip						
Hitzebehandlung	×							
Acetylierung	(×)							
Melaminharz	(×)							
Holzvernetzung	(×)							
Furfurylierung	×							
Silizium / Silikon / Silan								
Öle / Wachse	×							
Chitosantreatment								

Abbildung 22: Darstellung der Wirkprinzipien zur Holzvergütung bei den verschiedenen Verfahren

### 2.2.1 Acetylierung

Eines der sehr gut wissenschaftlich erforschten Modifizierungsverfahren ist die Acetylierung des Holzes mit Essigsäureanhydrid.

Durch die Reaktion von Holz mit Essigsäureanhydrid wird ein Teil der Hydroxylgruppen der Zellwand in Acetylgruppen überführt (Abbildung 23). Während der Reaktion entsteht als Nebenprodukt Essigsäure, die wiederum in Essigsäureanhydrid überführt werden kann.

Durch die Acetylierung verbessert sich die Dauerhaftigkeit von Buche, Kiefer und Pappel gegenüber pilzlichem Abbau deutlich. Abhängig vom Acetylierungsgrad ist es möglich, die Dauerhaftigkeit des Holzes so zu steigern, dass die Resistenzklasse 1 erreicht wird.

Die Acetylierung führt allerdings zu keinem Schutz gegen Bläuebefall bei Außenverwendung des Holzes.



**Prozess:**

- Einbringen von Essigsäure-Anhydrid
- Reaktion bei hohen Temperaturen
- Entfernen der Essigsäure

**Eigenschaften:**

- Hohe Dimensionsstabilität
- Hohe Dauerhaftigkeit
- Keine Verfärbung
- Unveränderte mechanische Eigenschaften

$$\text{WOOD-OH} + \begin{array}{c} \text{H}_3\text{C} \\ | \\ \text{O} \\ | \\ \text{H}_3\text{C} \end{array} \longrightarrow \text{WOOD-O} \begin{array}{c} \text{O} \\ || \\ \text{CH}_3 \end{array} + \begin{array}{c} \text{H}_3\text{C} \\ | \\ \text{O} \\ | \\ \text{H}_3\text{C} \end{array}$$

Holz und Essigsäure-Anhydrid → acetyliertes Holz und Essigsäure

Abbildung 23: Beschreibung des Vergütungsverfahrens der Acetylierung

Bedingt durch die reduzierte Feuchteaufnahme wird die Quellung und Schwindung des Holzes bei hohen Acetylierungsgraden um bis zu 80 % vermindert. Ebenfalls kann die Härte des Holzes um 30 % erhöht werden. Ferner wird die UV-Stabilität des Holzes erhöht und die Verwitterung der Oberflächen bei Außenanwendung acetylierter Holzprodukte vermindert. Das konnte durch Versuche mit lackierten, acetylierten Holzoberflächen im Bewitterungstest nachgewiesen werden.

Bei richtiger Prozessführung hat das Verfahren keinen nachteiligen Einfluss auf Festigkeitseigenschaften und auf das Erscheinungsbild des Holzes.

Ein Problem bei der Acetylierung von Vollholz ist, dass die Essigsäure, die während der Behandlung im Holz entsteht, im Prozess entfernt werden muss.

Acetyliertes Holz ist noch nicht auf dem europäischen Markt verfügbar, kann aber in kleineren Mengen in Pilotanlagen in den Niederlanden und Schweden hergestellt werden.

### 2.2.2 Hitzebehandlung

Von allen Modifizierungsverfahren sind in Europa die Hitzebehandlungsverfahren am weitesten entwickelt. Es werden momentan jährlich ca. 35.000 m<sup>3</sup> Holz mit verschiedenen der auf dem Markt befindlichen Verfahren behandelt.



Abbildung 24: Beschreibung des Vergütungsverfahrens der Hitzebehandlung

Alle diese Verfahren, wie technisch unterschiedlich sie auch sind, machen sich das Prinzip zunutze, dass sich die Zellwandbestandteile bei erhöhten Temperaturen (über 150 °C) chemisch verändern und dadurch Eigenschaften wie Dauerhaftigkeit und Dimensionsstabilität verbessert werden.

Durch chemische Umwandlungsprozesse, Ausgasung oder Auswaschung aus dem Holz hat das behandelte Holz eine geringere Dichte als unbehandeltes Holz. Die mechanische Eigenschaften werden negativ beeinflusst. Bei allen Verfahren kommt es zu einer Reduzierung von Biegefestigkeit, Elastizität und vor allem Bruchschlagarbeit.

### **2.2.3 Harzbehandlung**

#### Polymerisierbare Chemikalien

Der Einsatz von Mono- und Polymeren und natürlichen Harzen zur Holzmodifizierung wird schon seit vielen Jahrzehnten praktiziert. Das Augenmerk der meisten Behandlungen richtete sich auf die Verbesserung der Festigkeitseigenschaften wie z. B. der Oberflächenhärte. Zu Beginn der 90er Jahre wurde die Forschung mit diesen Chemikalien wiederbelebt, jedoch nicht ausschließlich zur Verbesserung der physikalischen Eigenschaften, sondern auch zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit und der Dimensionsstabilität. Die Stoffe lassen sich wie folgt unterteilen:

- ⇒ Harze, die mit Zellwandpolymeren chemisch reagieren können.
- ⇒ Harze, die ausschließlich in die Zelllumina eingelagert werden können.

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass Harze, die ausschließlich im Zelllumen eingelagert werden, ohne in die Zellwände einzudringen oder chemisch zu reagieren, zwar die Wasseraufnahme herabsetzen und die Härte und Abriebeigenschaften des Holzes verbessern, jedoch nur geringfügig zu einer verbesserten Dauerhaftigkeit und Dimensionsstabilität des Holzes beitragen.

Stoffe, die in die Zellwand eindringen können, diese vollständig durchdringen und die Möglichkeit besitzen, mit Zellwandbestandteilen zu reagieren oder dort zu polykondensieren, können alle Eigenschaften des Holzes verändern.

Einige der Verfahren befinden sich inzwischen bereits im Industriemaßstab bzw. auf der Schwelle dorthin.

### **2.2.4 Holzvernetzung**

Für die Holzvernetzung werden verschiedene Chemikalien eingesetzt, die ihren Ursprung in der Textilindustrie haben. Ein Beispiel dafür ist DMDHEU (dimethylol-dihydroxy-ethyleneurea). Dieser Stoff kann in die Holzzellwände eindringen, dort polykondensieren und für eine Quervernetzung sorgen. Die Zellwände werden dadurch in einem dauerhaft gequollenen Zustand fixiert. Die Quervernetzung (Abbildung 25) führt gleichzeitig dazu, dass das Holz nicht mehr in der ursprünglichen Größe quellen kann.



Abbildung 25: Beschreibung des Vergütungsverfahrens mit polymerisierbaren Chemikalien

Verbessert wird durch diese Behandlung die Dimensionsstabilität mit Reduzierungen des Quellens und Schwindens bis zu 70 % und die Dauerhaftigkeit bis zu Dauerhaftigkeitsklasse 1. Ebenfalls wird durch diese Behandlung die Oberflächenhärte des Holzes erhöht. Auch eine Verbesserung des UV-Schutzes des Holzes kann durch die Behandlung erreicht werden.

Dieses Behandlungsverfahren ist noch nicht auf dem Markt verfügbar. Ein Zusammenschluss von Forschungseinrichtungen und der Industrie beabsichtigt, diesen Prozess in den nächsten Jahren auf den Markt zu bringen.

### 2.2.5 Vergütung mit Melaminharz

Die Verbesserung der Eigenschaften ist ganz wesentlich von dem verwendeten Harz und von der Beladung abhängig.

Eine Verbesserung der Dauerhaftigkeit bis zu Dauerhaftigkeitsklasse 2 und eine Erhöhung der Dimensionsstabilität mit Quell-/Schwind-Verbesserungen bis zu 30 % kann durch die Behandlung mit Melaminharzen erreicht werden. Ebenso konnte eine leichte Erhöhung des E-Moduls erreicht werden.

Die Modifizierung von Holz mit Melaminharzen wird zur Zeit auch an Holzwerkstoffen untersucht.

### **2.2.6 Furfurylierung**

Die ersten Prozesse der Furfurylierung von Holz wurden schon vor einigen Jahrzehnten entwickelt. Furfurylalkohol ist eine erneuerbare Chemikalie, die aus hydrolysierter Biomasse produziert wird.

Die Eigenschaften von furfuryliertem Holz sind von der Beladung mit veredeltem bzw. polykondensiertem Furfurylalkohol (PFA) abhängig. Bei hohen Beladungsgraden wird ein weiterer Bereich an Holzeigenschaften wie z. B. Härte, Dauerhaftigkeit gegen Pilze und Insekten, Beständigkeit gegen Chemikalien, mechanische Eigenschaften und Dimensionsstabilität verbessert.

Zwei Hauptprozesse, die nachfolgend beschrieben sind, wurden in Norwegen entwickelt. Dabei handelt es sich um:

- ⇒ Die Behandlung des Holzes mit einer hohen Beladung führt zu einer schwarzen Färbung des Holzes und einer starken Verbesserung der Eigenschaften.
- ⇒ Eine geringere Beladung des Holzes verursacht eine Braunfärbung und eine geringere Verbesserung der Eigenschaften.

Furfuryliertes Holz ist seit 2004 auf dem europäischen Markt erhältlich. Es gibt derzeit in Norwegen ein Werk mit der Kapazität von ca. 5.000 m<sup>3</sup>.

### **2.2.7 Siliziumorganische Verbindungen**

Siliziumorganische Verbindungen scheinen für die Modifizierung von Holz geeignet, da das vierwertige Siliziumatom Bindungen mit freien Hydroxylgruppen der Cellulose bilden kann und dadurch funktionelle Gruppen im Holz binden oder vernetzend wirken kann. Ausgangsstoffe für die Modifizierung können z. B. Wasserglas, Alkoxysilane und Silicone, aber auch organische Verbindungen, die Silizium als Bestandteil einer funktionellen Gruppe enthalten, sein.

Durch Einbringen von siliziumhaltigen Verbindungen ins Holz können die Dimensionsstabilität, die Dauerhaftigkeit, das Brandverhalten und die Härte des Holzes verbessert werden.

Es scheint sinnvoll, die je nach Modifizierungsverfahren möglichen Eigenschafts-  
veränderungen anwendungsbezogen zu optimieren

Ein anderer für die Praxis wichtiger Aspekt ist, dass verkieseltes Holz ein verbes-  
sertes Brandverhalten aufweist. Für einige Anwendungsbereiche wünschenswert,  
für die Holzbearbeitung jedoch möglicherweise problematisch, ist die größere  
Härte des Materials (Abstumpfung von Geräten). Bei tiefergehenden Tränkbe-  
handlungen ist auch eine Versprödung (geringere Bruchschlagfestigkeit) des  
Materials nicht auszuschließen. Für Siliziumbehandlungen im Oberflächenbe-  
reich gelten diese Nachteile in geringerem Maße. Versuche haben gezeigt, dass  
das Holz nicht nur eine bessere Oberflächenhärte, sondern auch eine erhöhte  
Lichtstabilität besitzt.

Auf den Einsatz von Siliziumverbindungen in der Oberflächenbehandlung von  
Holz wurde bereits hingewiesen. Auch für die Tränkung von Holz sind neuerlich  
in Deutschland betriebliche Aktivitäten entstanden<sup>[26]</sup>. Erste Labor- und Praxis-  
versuche zeigten, dass mit einem Gemisch von Kieselsäure und anderen organi-  
schen und anorganischen Stoffen behandeltes Holz ein verbessertes Brandver-  
halten, eine erhöhte Dauerhaftigkeit gegen Pilze (getestet nach DIN EN 113) und  
Insekten (DIN EN 46) sowie ein günstigeres Feuchteaufnahmeverhalten besitzt.  
Zur Zeit laufen in Deutschland weitere Praxisversuche zur Erprobung solcher  
Holzmodifizierungen.

### **2.2.8 Ölbehandlungen / Wachsbehandlungen**

Bereits in den 60er Jahren wurde in Skandinavien das Royalverfahren entwickelt.  
Hierbei handelt es sich um einen Zweistufenprozess, bei dem in der ersten Stufe  
eine Holzimprägnierung mit wässrigen Holzschutzmitteln erfolgt, wonach das  
imprägnierte Holz unter Vakuum mit heißem Öl geflutet wird.

Dieses Verfahren wurde in den letzten Jahren weiterentwickelt und wird inzwi-  
schen zur Behandlung von wetterbeanspruchten Bauteilen in Norwegen, Schwe-  
den und Deutschland (Werth-Holz) angewandt. Auch andere Verfahren machen  
sich die wasserabstoßende Wirkung von Ölen und Wachsen zunutze (z. B. Wa-  
xed Wood in den Niederlanden).

Die kombinierte Behandlung von Holzschutzmitteln mit bekannter Wirksamkeit und mit Ölen (Leinöl oder andere Pflanzenöle) hat den Vorteil, dass das Material sehr dauerhaft ist und außerdem verbesserte wasserabweisende Eigenschaften (geringere Rissbildung, etc.) besitzt. Da bei den genannten Prozessen herkömmliche Holzschutzmittel angewandt werden, sind diese Verfahren nicht im engeren Sinne als „Holzmodifizierung“ zu sehen.

Andere Versuche, um die Dauerhaftigkeit ausschließlich mit Ölen (unter Vermeidung von Holzschutzmitteln) zu erzielen, laufen momentan, sind jedoch nicht reif für die Praxis<sup>[27][28]</sup>.

	<p><b>Hydrophobierungsmittel:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Parafine, Fettsäurederivate, etc.</li><li>- Wässrige Emulsionen</li><li>- Siliziumorganische Verbindungen</li></ul> <p><b>Prozess:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Einbringen per Vakuum-Druck</li><li>- Mit und ohne Temperatur</li><li>- Einfache Prozessführung</li></ul> <p>Reduzierung der Wasseraufnahmemenge und -geschwindigkeit</p>
--	--

Abbildung 26: Beschreibung des Vergütungsverfahrens der Hydrophobierung

### **2.3 Vergütungsverfahren im Projekt**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden fünf Verfahren ausgewählt, bei denen die Entwicklung so weit fortgeschritten war, dass mit der Bereitstellung von geeignetem Material während der Laufzeit des Forschungsvorhabens zu rechnen war. Darüber hinaus wurde vereinbart, dass die übrigen bekannten Verfahren, die sich noch im Laborstadium befanden, in ihrer Entwicklung verfolgt werden.

Die Wirkprinzipien zur Verbesserung der Holzeigenschaften sind im Kapitel 2.1 Wirkprinzipien beschrieben und schematisch dargestellt. Die angestrebten Verbesserungen der Holzeigenschaften ergeben sich aus Tabelle 4.

Für den Fensterbau von besonderer Bedeutung sind Verbesserungen

- ⇒ des Quellens und Schwindens,
- ⇒ der Dauerhaftigkeit,
- ⇒ der Wasseraufnahme.

Nr.	Verfahren	Verfahrenstechnische Grundlagen	Verbesserungen
1	Hitzebehandlung	z. B. Kondensation von Carbonylgruppen mit Hydroxylgruppen durch Erhitzung des Holzes Energieübertragendes Medium: Luft, Öl, Wasserdampf, Stickstoff	Quellen und Schwinden; Dauerhaftigkeit
2	Acetylierung	Anlagerung von Acetylgruppen an Hydroxylgruppen unter Wasserabspaltung	Quellen und Schwinden; Dauerhaftigkeit
3	Holzvernetzung mit DMDHEU	Einlagerung und Reaktion von DMDHEU-Harz in der Zellwand durch Imprägnierung und Erhitzung.	Quellen und Schwinden; Dauerhaftigkeit
4	Harzbehandlung mit Melaminharz	Einlagerung und Reaktion von Melaminharz in den Lumina, durch Imprägnierung und Erhitzung.	Quellen und Schwinden; Dauerhaftigkeit
5	Wachs-Harz-Imprägnierung	Einlagerung von Wachs und Harz in die Lumina; dadurch Verschluss der oberflächennahen Lumina	Wasseraufnahme

Tabelle 4: Grundsätze der Vergütungsverfahren und die wesentlichen veränderten Eigenschaften

Die im Projekt ausgewählten Verfahren sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Die Tabelle ist zum besseren Verständnis in die Zusammenfassung der Ergebnisse der einzelnen Kapitel übernommen.

1.0	Vergütung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Holzvernetzung mit DMDHEU	Melamin-Behandlung	Wachs-/Harz-Imprägnierung	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	unbehandelt	unbehandelt	unbehandelt
1.1	Hersteller	New Option Wood	New Option Wood	Finn-forest	Uni Göttingen	Solutia	Tilo	SHR - Merk	SHR - Merk			
1.2	Allgemeine Bezeichnung	NOW	NOW	Thermo-holz			Natwood	Acetylierung	Acetylierung			
<b>2.0 Wirkprinzipien und Farbkennzeichnung der Vergütungsverfahren im Projekt</b>												
2.1	Lumenfüllung											
2.2	Zellwandfüllung											
2.3	Hydroxylgruppen-Reaktion											
2.4	Hydroxylgruppen-Vernetzung											
2.5	Zellwandstrukturänderung											
2.6	unbehandelt											
<b>3.0 Holzarten im Forschungsprojekt</b>												
3.1	Lateinische Bezeichnung	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus pinaster</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Pinus sylvestris</i>
3.2	Allgemeine Bezeichnung	Kiefer	See-Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Buche	Kiefer	Buche	Fichte	Kiefer
3.3	Kurzzeichen	HT(N)-PS	HT(N)-PM	HT(F)-PS	DRT-PS	MRT-PS	HRT-PS	A-FS	A-PS	UT-FS	UT-PA	UT-PS

Tabelle 5: Zusammenstellung der Verfahren, die innerhalb des Projektes untersucht wurden

- 24 Schmid, J.; Götz, M.; Illner, H. M.; Krause, A.; Militz, H.; Schwarz, B.; Stetter, K.; 2001: „di-sta – Einheimisches dimensionsstabilisiertes Holz für den Fenster- und Fassadenbau“, 1. Zwischenbericht
- 25 Schmid, J.; Götz, M.; Illner, H. M.; Krause, A.; Militz, H.; Schwarz, B.; Stetter, K.; 2003: „di-sta – Einheimisches dimensionsstabilisiertes Holz für den Fenster- und Fassadenbau“, 2. Zwischenbericht
- 26 Informationen unter [www.masid.de](http://www.masid.de); MASID Umwelterhaltende Produkte Vertriebs-GmbH, Ulrichstein
- 27 Treu, A.; Militz, H.; et al.; 2003: „Kombinationsverfahren von bioziden Holzschutzmitteln und Hydrophobierungsmitteln“; 23. Holzschutztagung der DGFH, Augsburg
- 28 Sailer, M.; 2001: „Anwendung von Pflanzenölimprägnierung zum Schutz von Holz im Außenbereich“; Dissertation; Ordinariat für Holzbiologie, Hamburg; Universität Hamburg

### 3 Werkstoff

#### 3.1 Einführung

Fenster und Fassaden sind komplexe Einheiten, deren Gebrauchstauglichkeit und Nutzungsdauer durch das optimierte Zusammenwirken der Werkstoffeigenschaften über das Systemverhalten zum Bauteil bestimmt werden, wie dies das Ringdiagramm in Abbildung 27 verdeutlicht.

Danach ergibt sich, dass die Werkstoffeigenschaften die notwendigen Voraussetzungen für die Gebrauchstauglichkeit eines Bauteils mitbestimmen und die Basis für eine fachgerechte Konstruktion und Herstellung schaffen. Dies gilt in Verbindung mit dem Werkstoff Holz insbesondere für das Verhalten gegenüber Feuchtigkeit und Wasser.

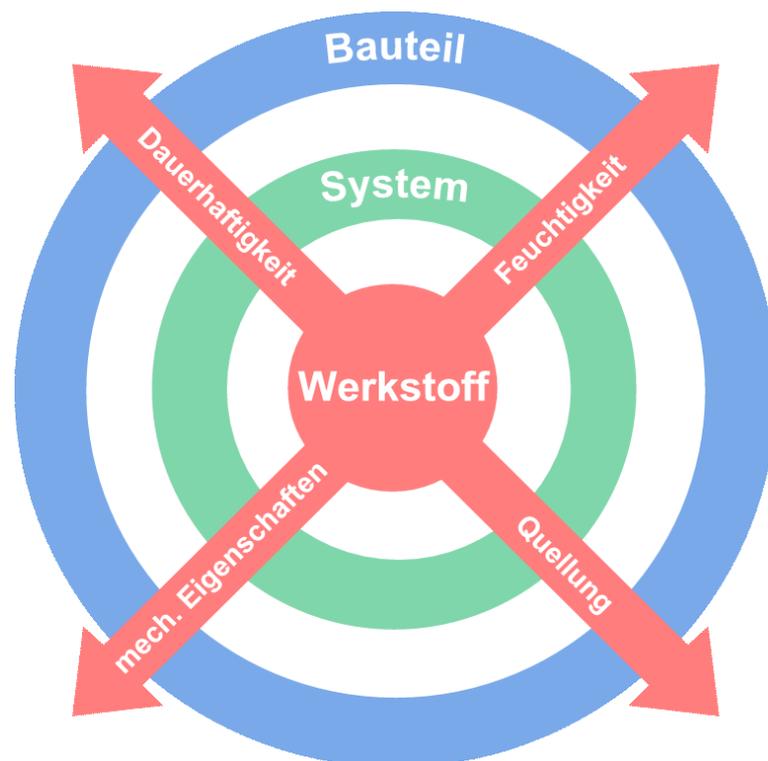


Abbildung 27: Ringdiagramm zur Darstellung der Zusammenhänge von Werkstoff, System und Bauteil bei der Bewertung der Gebrauchstauglichkeit eines Fensters mit Angabe der Schnittstellen und der notwendigen wesentlichen Eigenschaften des Werkstoffes

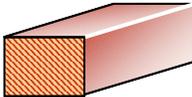
Durch die Dimensionsstabilisierung wird insbesondere eine Verbesserung des Holzes im Verhalten gegenüber Feuchtigkeit und Wasser angestrebt. Um diese Verbesserung auch nutzen zu können, ist es wichtig, dass die wesentlichen Eigenschaften des dimensionsstabilisierten Holzes im Verhalten gegenüber Feuchtigkeit und Wasser bekannt und gesichert sind. Nur dann ist eine optimale Nutzung der verbesserten Eigenschaften des vergüteten Holzes möglich.

Diese wesentlichen Eigenschaften sind:

- ⇒ Quellen und Schwinden,
- ⇒ Aufnahme und Abgabe von Feuchtigkeit,
- ⇒ Dauerhaftigkeit,
- ⇒ mechanisches Verhalten.

Für die Konstruktion und Herstellung von Fenstern und Fassaden ist zunächst das Quellen und das Schwinden unter dem Einfluss des Umgebungsklimas und der Witterungseinwirkungen wichtig. Aus dem Quellen und Schwinden ergeben sich die wichtigsten Konstruktionsregeln für das Zusammenwirken der Einzelteile.

Für die Untersuchung der Werkstoffeigenschaften wurden im Rahmen des Projektes keine ausgesuchten Abmessungen für Laborprüfungen gewählt, sondern Abmessungen mit Querschnitten, wie sie im Fensterbau bei der Herstellung von 3-fach verleimten Kanteln zur Anwendung kommen.

Nr.	Komponente	Beschreibung	Ziel
1	Werkstoff	 <p>Prüfung an ausgewählten Probestkörpern, deren Abmessungen häufig normativ festgelegt sind.</p>	Ermittlung der Werkstoffeigenschaften auf der Grundlage bestehender Regelwerke zum Vergleich der Eigenschaften der Werkstoffe untereinander

**Tabelle 6:** Ausschnitt aus Tabelle 2; Erläuterung zum Ziel und zum Umfang der Werkstoffprüfung, die im vorliegenden Fall auch dann gilt, wenn abweichend von normativ festgelegten Abmessungen die Proben den im Fensterbau üblichen Maßen der Lamellen angepasst wurden.

Mit der Festlegung der Querschnitte der Lamellen von 24 mm x 80 mm für die 3-fach verleimte Kantel bei einer Länge von 1.000 bis 1.200 mm wurde hingenommen, dass die Werkstoffeigenschaften streuen. Es konnte damit auch nicht sichergestellt werden, dass die unbehandelten Proben für die Vergleichsversuche und das Ausgangsmaterial für die behandelten Proben gleiche Eigenschaften haben. Die damit verbundene Streuung der Werkstoffeigenschaften bei den durchgeführten Untersuchung kommt den zu erwartenden Streuungen in der praktischen Anwendung gleich.

Die damit beschriebenen Eingangsbedingungen sind bei der Versuchsauswertung zu beachten und auch beim Vergleich mit Werten aus der Literatur zu berücksichtigen.

### **3.2 Feuchtigkeitstechnische Eigenschaften**

Die häufigsten Schäden bei Fenstern und Fassaden gehen auf eine Störung des Gleichgewichts im Holz zwischen der Feuchteaufnahme und der Feuchteabgabe zurück.

Durch experimentelle Untersuchungen soll geklärt werden, inwieweit Vergütungsverfahren den Feuchtigkeitshaushalt des Holzes in der Außenanwendung in positiver Weise beeinflussen können. Dabei ist vorab festzustellen, dass für den Vergleich der verschiedenen Vergütungsverfahren untereinander und im Vergleich zu unbehandeltem Holz nicht eine definierte Holzfeuchtigkeit, sondern ein definiertes Umgebungsklima zu Grunde zu legen ist.

Die bei unbehandeltem Holz übliche Angabe der Holzfeuchte  $u$  in % ist für die Zustandsbeschreibung deshalb nicht geeignet, weil sich die Zusammenhänge zwischen Klima und Holzfeuchte zwischen den Vergütungsverfahren und im Vergleich zum unbehandelten Holz deutlich unterscheiden. Dies ist auch im Hinblick auf die Querschnittsänderung bei den Festlegungen zur Konstruktion zu beachten. Die entscheidende Größe in Verbindung mit der Veränderung der Feuchte ist damit nicht wie bisher bei unbehandeltem Holz die Holzfeuchte, sondern das Umgebungsklima.

### 3.2.1 Feuchtigkeitsaufnahme und Feuchtigkeitsabgabe

#### 3.2.1.1 Ziele

Viele Modifizierungsverfahren haben zum Ziel, die Ausgleichsfeuchtigkeit (emc) des Holzes zu reduzieren. Diese Reduktion verursacht auch eine Änderung anderer Holzeigenschaften, wie z. B. die Reduzierung von Quellen und Schwinden und einen besseren Schutz vor Abbau durch Pilze und Insekten.

In diesen Untersuchungen wurde deshalb die Ausgleichsfeuchtigkeit (emc) der modifizierten Hölzer untersucht. Dazu wurde an verschiedenen Punkten der Adsorptions- und Desorptionskurve die Ausgleichsfeuchtigkeit (emc) gemessen.

Bei den Hölzern, bei denen eine Reduktion der Ausgleichsfeuchte erreicht wurde, kann unterstellt werden, dass auch die anderen der genannten Holzeigenschaften, die mit der Holzfeuchtigkeit korreliert sind, positiv beeinflusst werden.

#### 3.2.1.2 Aufbau und Durchführung der Versuche

Aus jeweils zwei unterschiedlichen Lamellen jeder Modifizierungsart wurden 20 Probekörper mit den Abmessungen 25 mm radial, 25 mm tangential und 20 mm longitudinal hergestellt. Diese wurden auf 0 % Holzfeuchtigkeit (atro) getrocknet und danach bei 20 °C verschiedenen Luftfeuchtigkeiten ausgesetzt.

Nach Erreichen der Ausgleichsfeuchtigkeit wurden die Proben gewogen. Folgende Klimabedingungen wurden für die Adsorptionskurve benutzt:

1	33 % relative Luftfeuchtigkeit; 20 °C
2	65 % relative Luftfeuchtigkeit; 20 °C
3	77 % relative Luftfeuchtigkeit; 20 °C
4	90 % relative Luftfeuchtigkeit; 20 °C
5	ca. 98 % relative Luftfeuchtigkeit; 20 °C

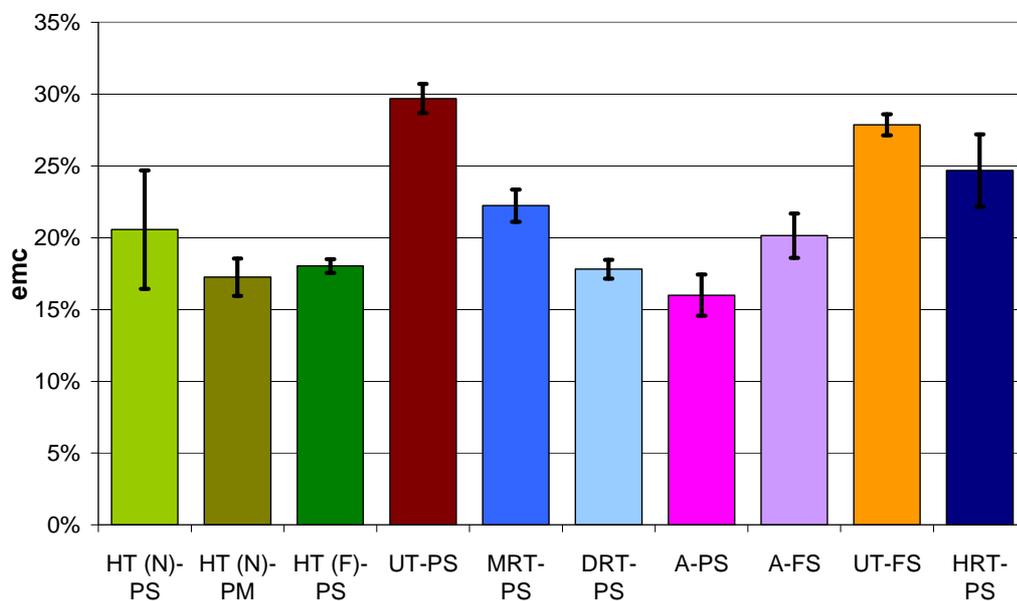
Für die Desorptionskurve wurden die gleichen Feuchtigkeiten, aber in umgekehrter Reihenfolge, verwendet.

Die Ausgleichsfeuchtigkeiten (emc) sind die Anteile des Wassers am Gewicht der Probe im Vergleich zum darrgetrockneten Holzgewicht.

### 3.2.1.3 Ergebnisse aus den Versuchen

Die Ergebnisse zeigen, dass bei allen Modifizierungsarten eine Reduktion der Ausgleichsfeuchtigkeit (emc) erreicht wurde.

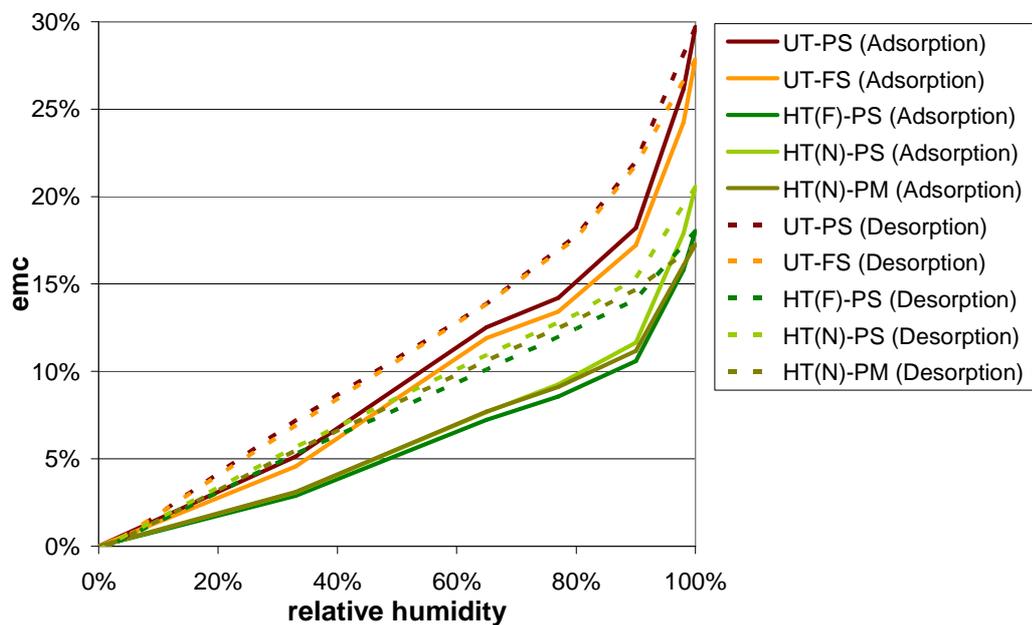
In Abbildung 28 ist die Ausgleichsfeuchtigkeit bei Fasersättigung zu sehen. Sie wurde aus dem Verlauf der Messpunkte 1 bis 5 theoretisch ermittelt. Die acetylierte Kiefer (A-PS) weist die geringste Ausgleichsfeuchtigkeit bei Fasersättigung auf. Auch alle anderen vergüteten Hölzer zeigen reduzierte Ausgleichsfeuchtigkeit (emc).



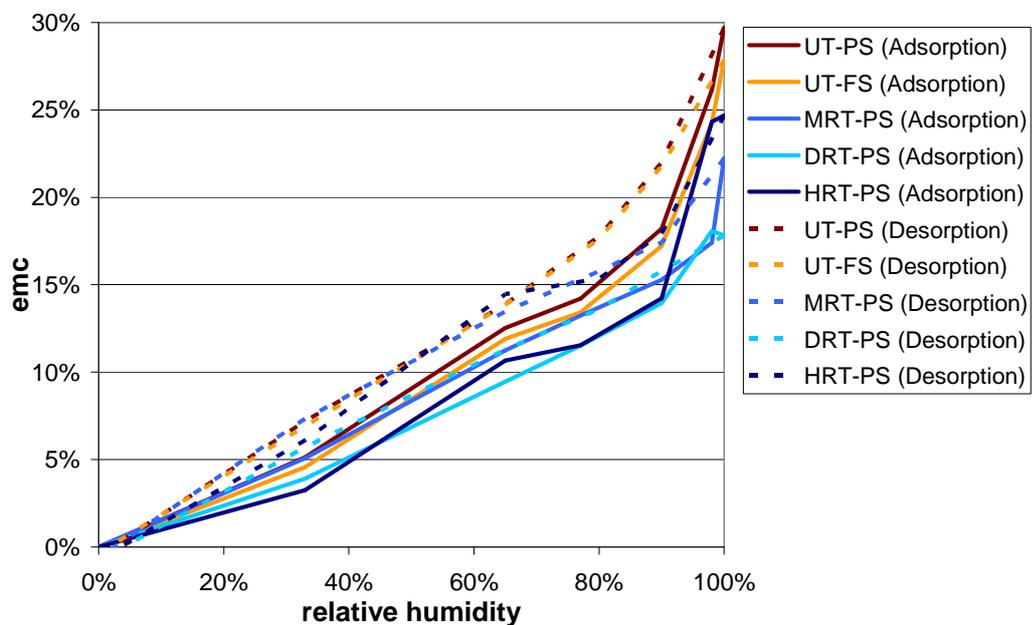
**Abbildung 28:** Grafische Darstellung der Ausgleichsfeuchtigkeit (emc) bei Fasersättigung für das vergütete Holz mit Angabe der Streuung. Das zum Vergleich geprüfte unbehandelte Holz ist mit „UT“ gekennzeichnet.

In Abbildung 29 bis Abbildung 31 wird der Verlauf der Adsorptions- und Desorptionskurve über den gesamten sorptiven Bereich gezeigt.

Die Grafiken wurden wegen der besseren Übersichtlichkeit getrennt nach Behandlungsarten (Vergütungsverfahren) dargestellt. Besonders auffällig ist die Veränderung im feuchten Bereich (> 90 % relative Feuchtigkeit), in dem auch die messtechnische Erfassung Grenzen hat.



**Abbildung 29:** Sorptions-Isothermen der hitzebehandelten Hölzer (HT)  
Die Ausgleichsfeuchtigkeit (emc) ist bei allen drei Verfahren der Hitzebehandlung stark reduziert. Der Verlauf ist dem Verlauf des unbehandelten Holzes (UT) relativ ähnlich.



**Abbildung 30:** Sorptions-Isothermen der mit Harz behandelten Hölzer (MRT), (DRT), (HRT)  
In den Bereichen niedriger Luftfeuchtigkeit zeigt die Wachs-Harz-Behandlung (HRT) keine große Abweichung der Holzfeuchtigkeit von den unbehandelten Proben (UT). Bei hoher Luftfeuchtigkeit wirkt sich die Holzvernetzung (DRT) auf die Ausgleichsfeuchtigkeit (emc) stark reduzierend aus.

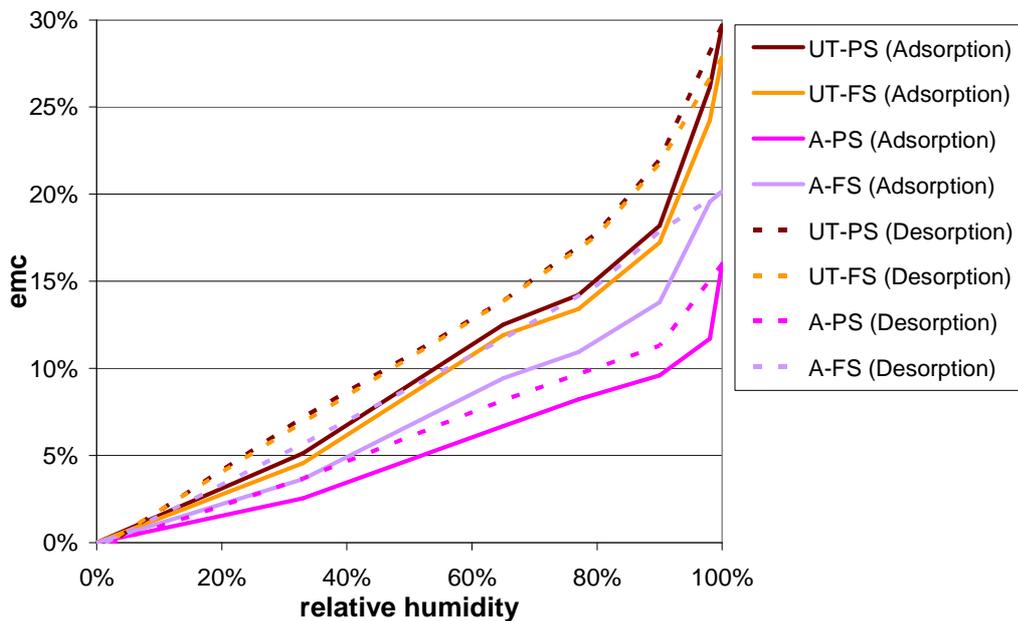


Abbildung 31: Die acetylierten Holzproben (A) zeigen über den gesamten Verlauf der Kurven eine gleichmäßige Reduzierung der Holzfeuchtigkeit gegenüber unbehandeltem Holz (UT). Bei der acetylierten Kiefer beträgt die Reduzierung ca. 50 %.

Es ist zu sehen, dass die acetylierte Kiefer (A-PS) und alle hitzebehandelten Hölzer (HT) im Vergleich zu den anderen modifizierten Hölzern keinen starken Anstieg der Holzfeuchtigkeit bei steigender Luftfeuchtigkeit zeigen. Alle anderen untersuchten Modifizierungen reduzieren die Ausgleichsfeuchtigkeit (emc) weniger stark. Bei einer nur leichten Reduzierung kann nicht mit einem starken Effekt auf die anderen Holzeigenschaften wie Quellen und Schwinden oder die Dauerhaftigkeit gerechnet werden.

Die mit Melamin behandelten Proben (MRT) und die Holzvernetzung (DRT) zeigen kaum eine Veränderung im trockenen und mittleren Bereich der Luftfeuchtigkeit im Vergleich zu den unbehandelten Hölzern (UT). Erst im Bereich hoher Luftfeuchtigkeit (> 90 %) macht sich eine Reduktion deutlich bemerkbar.

#### 3.2.1.4 Bewertung / Ausblick

Die hier gezeigten höheren Reduktionen der Ausgleichsfeuchtigkeiten (emc) führen, wie oben beschrieben wurde, zu einer Veränderung von wichtigen Holzeigenschaften.

Daraus lässt sich ableiten, dass die acetylierte Kiefer (A-PS) gefolgt von den hitzebehandelten Hölzern (HT) eine Verbesserung beim Quellen und Schwinden zeigen und eine Erhöhung der Dauerhaftigkeit erwarten lassen. Auch die leicht reduzierte Holzfeuchtigkeit von acetylierter Buche (A-FS) und Holzvernetzung (DRT) sind noch beachtenswert, so dass eine wesentliche Verbesserung anderer Holzeigenschaften erwartet werden kann.

### 3.2.2 Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstands

#### 3.2.2.1 Einleitung

Die Messung von Wasserdampfdiffusion wurde in Anlehnung an EN ISO 12572 „Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit“ durchgeführt.

Die Prüfanordnung besteht aus einem Prüfgefäß (Abbildung 32), das entweder ein Trockenmittel oder eine wässrige gesättigte Lösung enthält und von der Probe abgeschlossen wird. Von großer Bedeutung ist die seitliche Abdichtung der Probe und des Übergangs zwischen Probe und Prüfgefäß. Diese Anordnung wird in einem temperatur- und feuchtegeregelten Prüfraum einem definierten Klima ausgesetzt.

Durch die Holzprobe hindurch entsteht ein konstantes Wasserdampfdruckgefälle. Deshalb stellt sich nach einer für die Konditionierung der Probe notwendigen Zeit ein gleichbleibender Wasserdampfdiffusionsstrom und eine gleichbleibende Masseänderung der gesamten Prüfapparatur über der Zeit ein. Durch periodische Wägungen wird die Wasserdampfdiffusionsstromdichte im stationären Zustand ermittelt.

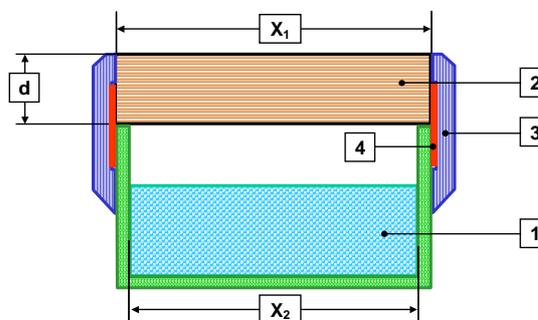


Abbildung 32: Behälter mit eingesetzter Probe nach EN ISO 12572

1: Trockenmittel; 2: Probekörper; 3: Abdichtungsmasse; 4: Dichtband  
 $X_1$ : obere Prüffläche;  $X_2$ : untere Prüffläche;  $d$ : Dicke des Probekörpers

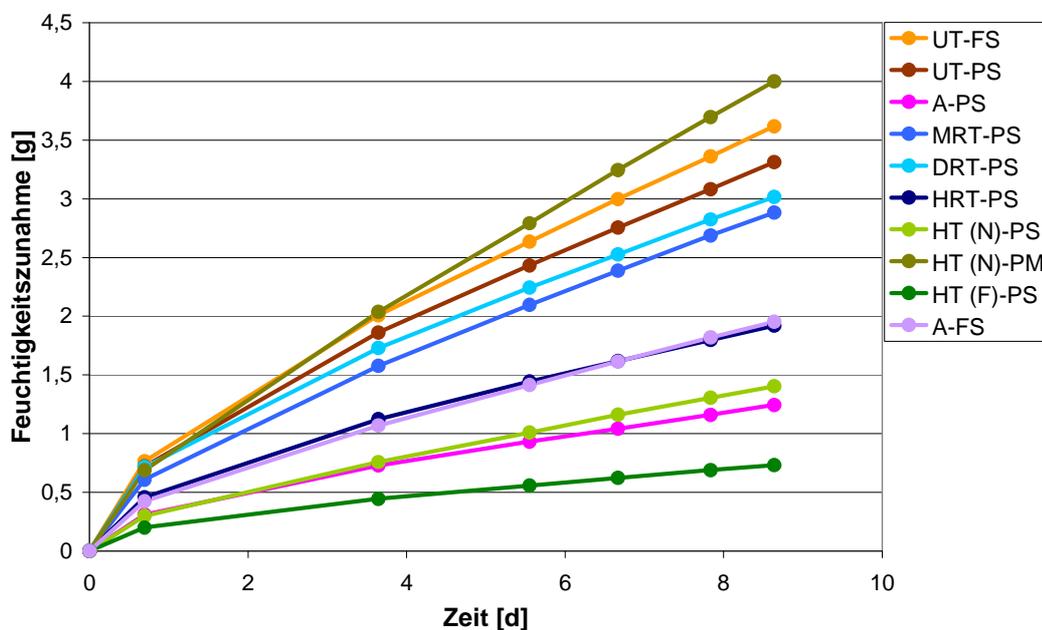
### 3.2.2.2 Material und Methoden

Das Material wurde so ausgewählt, dass beide Oberflächen möglichst als Tangentialflächen ausgeführt werden konnten. Jeweils zwei Lamellen wurden beidseitig auf insgesamt 15 mm Dicke gehobelt. Anschließend wurden kreisrunde Proben mit dem Außendurchmesser der Prüfgefäße von 78 mm ausgeschnitten. Die so vorbereiteten Proben wurden bei 23 °C und 85 % relativer Luftfeuchtigkeit klimatisiert.

Als Prüfgefäße kamen Laborgläser zum Einsatz, die mit Silicagel gefüllt wurden. Als Dichtmittel wurde ein wasserdampfdurchlässiges Wachs verwendet.

Das äußere Klima von 23 °C und 85 % relativer Luftfeuchte wurde – abweichend vom Normklima (23 °C/50 %) nach EN ISO 12572 – durch Lagerung der Proben in einem Klimaschrank sichergestellt. Als Innenklima in den Gefäßen stellte sich eine relative Luftfeuchtigkeit von ca. 0 % ein. Es wurde so die Wasserdampfdiffusion von 85 % zu 0 % relativer Luftfeuchtigkeit gemessen.

Es erfolgte eine periodische Wägung der Proben über einen Messzeitraum von ca. 9 Tagen (Abbildung 33).

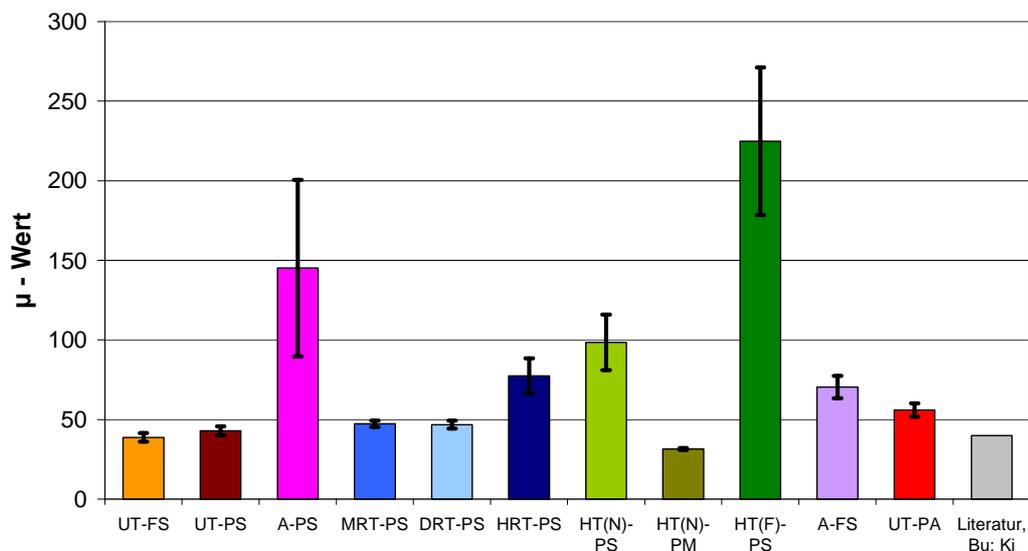


**Abbildung 33:** Mittelwerte der gemessenen Feuchtigkeitszunahme während des Versuchs. Am Beginn sind Unregelmäßigkeiten, die durch den Versuchsstart bedingt sind, zu sehen. Die letzten fünf Messwerte wurden für die Berechnung verwendet.

### 3.2.2.3 Ergebnisse

Die Gewichtszunahme der Prüfgefäße (Feuchtigkeitszunahme) war sehr gleichmäßig. Der Anstieg der Kurven wurde durch lineare Regression aus den letzten 5 gemessenen Werten ermittelt. Die Bestimmtheitsmaße lagen bei Einbeziehung der letzten 5 aufeinander folgenden Messungen (Abbildung 33) für alle Proben nicht unter 0,997. Aus der Steigung der Regressionsgeraden zwischen Feuchtigkeitszunahme und Zeit wurden die Wasserdampfdiffusionsstromdichte ( $g$ ), der Wasserdampfdiffusionsdurchlasskoeffizient ( $W$ ), der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient ( $\delta$ ) und die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl ( $\mu$ ) berechnet.

Als Ergebnis hier dargestellt sind die Dampfdiffusionswiderstandszahlen ( $\mu$ ). Diese geben an, um wie viel Mal der Diffusionswiderstand eines Materials größer ist als der einer gleich dicken ruhenden Luftschicht (Abbildung 34).



**Abbildung 34:** Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen für Hölzer der untersuchten Vergütungsverfahren in  $\mu$  als Vielfaches des Widerstands einer gleichdicken Luftschicht. Der graue Balken gibt die in der Literatur veröffentlichten Werte für Buche und Kiefer an.

Da keine einheitlichen Ausgangsmaterialien für die Erzeugung der verschiedenen Modifizierungen eingesetzt wurden und über das Ausgangsmaterial keine vergleichbaren Daten vorliegen, können trotz geringer Standardabweichungen aus den Versuchsdaten keine endgültigen Erkenntnisse über die modifizierungsbedingten Veränderungen gewonnen werden.

Die Messungen zeigen, dass die Werte der Wasserdampfdiffusion der Proben aus Holzvernetzung (DRT-PS) mit  $46,8 \pm 2,6 \mu$ , Melaminbehandlung (MRT-PS) mit  $47,4 \pm 2,0 \mu$  und hitzebehandelter Seekiefer (HT(N)-PM) mit  $31,5 \pm 0,7 \mu$  nicht innerhalb des Streubereiches der Wasserdampfdiffusion der unbehandelten Kiefer mit  $43,0 \pm 2,9 \mu$  liegen. Die gemessenen Werte sind in einer ähnlichen Größenordnung wie die für Holz allgemein und pauschal angegebenen  $40 \mu$ .

Der Wasserdampf-Diffusionswiderstand bei der Wachs-Harz-Behandlung (HRT-PS) ist mit  $77,5 \pm 11,1 \mu$  gegenüber dem unbehandelten Holz ungefähr verdoppelt worden. Eine Erhöhung wurde hier auch erwartet, weil durch das Einbringen der Stoffe die Lumen des Holzes ausgefüllt werden und nicht mehr für die Diffusion zu Verfügung stehen.

Die hitzebehandelte Kiefer (HT(N)-PS und HT(F)-PS) zeigt mit  $98,5 \pm 17,5 \mu$  und  $224,8 \pm 46,3 \mu$  einen sehr stark erhöhten Dampfdiffusionswiderstand. Die behandelte Kiefer (HT(F)-PS) hat den höchsten Widerstand im Testfeld und liegt damit mehr als 5-mal über der unbehandelten Kiefer. Die Ursache für diesen hohen Widerstand kann in der hydrophobierenden Wirkung der Behandlung liegen.

Ebenfalls einen erhöhten Widerstand zeigen mit  $145,1 \pm 55,5 \mu$  (A-PS) und  $70,4 \pm 7,1 \mu$  (A-FS) die acetylierten Hölzer.

Zusammenfassend gilt erwartungsgemäß, dass alle untersuchten Materialien Wasserdampfdiffusion zulassen. Einige der Vergütungsverfahren scheinen die Wasserdampfdiffusion gegenüber dem unbehandelten Holz erheblich zu reduzieren.

### **3.2.3 Einwirken von Wasserdampf und Wasser**

#### **3.2.3.1 Material und Methoden**

Für die Versuche wurden aus allen in das Vorhaben einbezogenen modifizierten Hölzern jeweils 10 unbehandelte Proben pro Holzart für die Kontrollen und je 10 Proben pro modifiziertem Holz mit den Maßen 25 mm radial \* 25 mm tangential \* 20 mm longitudinal verwendet. Gemessen wurde die Wasseraufnahme quer zur Faser in radialer und tangentialer Richtung.

Der Versuchsaufbau und -ablauf wurde in Anlehnung an DIN 52617 „Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen“ durchgeführt. Diese Norm ist hauptsächlich für die Beurteilung von mineralischen Baustoffen entwickelt worden. Deshalb ist sie für Holz nur eingeschränkt anwendbar. Im Rahmen des Projekts sind aber für die Beurteilung der Verfahren brauchbare Ergebnisse zu erwarten.

Die bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit klimatisierten Proben wurden mit wasserfestem Klebeband so umwickelt, dass nur noch die zu beurteilende Fläche und die gegenüberliegende Seite für den kapillaren Wassertransport zur Verfügung standen (Abbildung 35). Die Proben wurden auf Schwämme, die in einem Wasserbad lagen, so platziert, dass eine optimale Benetzung der Oberflächen gewährleistet war. In zeitlicher Abfolge wurde das Gewicht der Proben bestimmt.

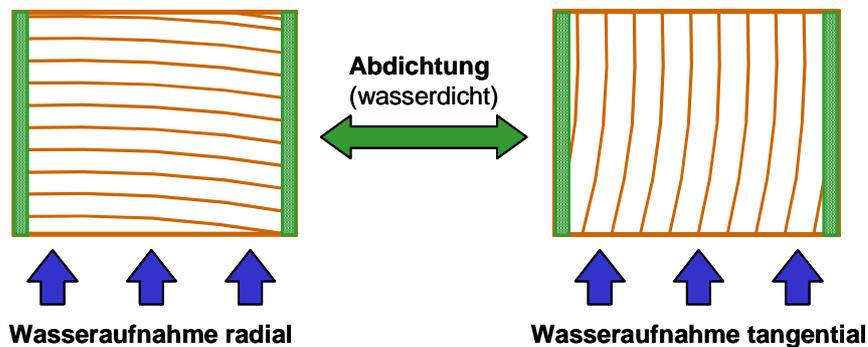


Abbildung 35: Querschnitt durch die Proben für die Messung in radialer und tangentialer Richtung

Die Proben wurden zur Bestimmung der Wasseraufnahme nach dem Zeitplan der folgender Tabelle gewogen:

Messung	Zeit
1	0 min.
2	10 min.
3	30 min.
4	1 h 00 min.
5	1 h 30 min.
6	2 h 00 min.
7	3 h 00 min.
8	4 h 00 min.
9	5 h 00 min.
10	6 h 00 min.
11	12 h 00 min.
12	24 h 00 min.

Nach diesen Messungen wurden die Proben unter Vakuum für 30 Minuten bei 50 mbar mit Wasser imprägniert und anschließend für 24 Stunden bei Raumtemperatur untergetaucht, um die maximal mögliche Wasseraufnahme zu bestimmen. Diese Wasseraufnahme wird normalerweise nicht unter praktischen Bedingungen erreicht, ist aber eine wichtige Kenngröße, um das Aufnahmepotential der Materialien abzuschätzen.

### 3.2.3.2 Ergebnisse aus den Versuchen

Die Proben wurden analog zu DIN 52617 ausgewertet. Um die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme zu berechnen, wurde die Gewichtszunahme der Proben über der Wurzel aus der Zeit aufgetragen (Abbildung 36 und Abbildung 37). In den linearen Bereichen wurde die Steigung der Geraden durch Regression ermittelt.

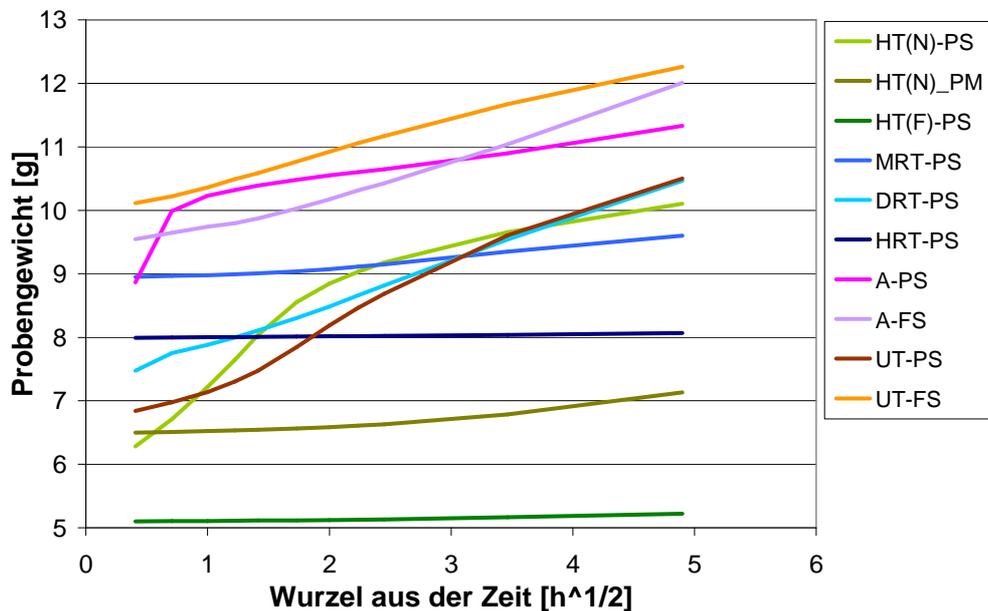
Bei Messung der Wasseraufnahme der Proben in radialer Richtung (Abbildung 36) zeigen die meisten Proben einen relativ linearen Verlauf. Aufgrund der sorptiven Eigenschaften von Holz (Quellen und Schwinden) verändert sich durch Quellung während der kapillaren Wasseraufnahme die Größe der Kapillaren. Deshalb ist ein vollständig linearer Kurvenverlauf nicht zu erwarten.

Die Hölzer der acetylierten Kiefer (A-PS) und die hitzebehandelte Kiefer (HT(N)-PS) zeigen in der Kurve zwei unterschiedliche Aufnahmeverhalten. Bei beiden ist die anfängliche Wasseraufnahmegeschwindigkeit höher und fällt dann während der Untersuchung wieder ab.

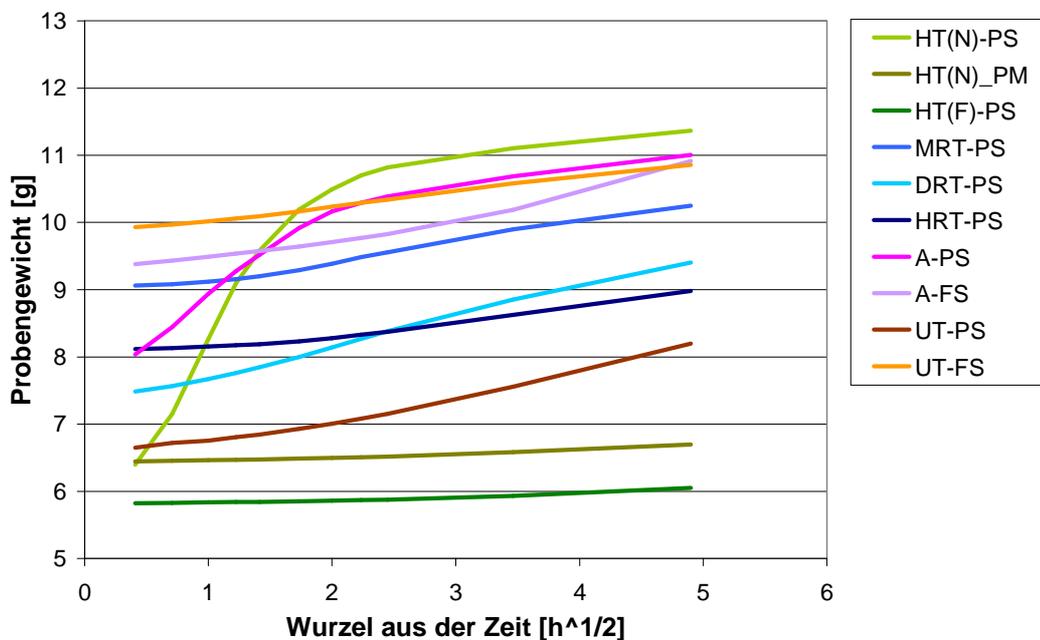
Zur Berechnung der Geschwindigkeit wurden nur die Bereiche verwendet, die darauf schließen lassen, dass es sich nicht um einen Anfangseffekt handelt oder die Proben schon mit Wasser gesättigt sind. Sehr niedrige Wasseraufnahmemengen zeigen die hitzebehandelte Kiefer (HT(F)-PS) und die Wachs-Harz-Behandlung (HRT-PS).

Auch bei der tangentialen Wasseraufnahme (Abbildung 37) findet man relativ lineare Beziehungen für die meisten modifizierten Hölzer.

Eine Ausnahme zeigen die hitzebehandelte Kiefer (HT(N)-PS) und die acetylierte Kiefer (A-PS). Das nichtlineare Verhalten und eine erhöhte Wasseraufnahme deuteten auf das Vorhandensein von Veränderungen im Holz hin.



**Abbildung 36:** Messung der Wasseraufnahme in radialer Richtung  
Der zeitliche Verlauf der Untersuchung wurde als Wurzel aus der Zeit dargestellt, um einen linearen Verlauf der Gewichtszunahme zu erreichen.



**Abbildung 37:** Messung der Wasseraufnahme in tangentialer Richtung  
Der zeitliche Verlauf der Untersuchung wurde als Wurzel aus der Zeit dargestellt, um einen linearen Verlauf der Gewichtszunahme zu erreichen.

Solche Veränderungen im Holz können sein:

- ⇒ Mikrorisse im Holz,
- ⇒ chemische Veränderungen, so dass sich hydrophile Bestandteile am Anfang schneller mit Wasser sättigen,
- ⇒ Abbau von Tüpfelmembranen durch Bakterien<sup>[29]</sup>,
- ⇒ Öffnung der Eindringwege durch Bläuepilze<sup>[29]</sup>.

An der hitzebehandelten gemeinen Kiefer von NOW (HT(N)-PS) wurde Schnittholzbläue festgestellt. Dies kann ebenfalls eine Ursache für dieses Verhalten sein. Die geringsten Wasseraufnahmemengen zeigen hitzebehandelte gemeine Kiefer (HT(F)-PS) und hitzebehandelte Seekiefer (HT(N)-PM).

In Abbildung 38 ist der Wasseraufnahmekoeffizient  $w_t$ , der die Wasseraufnahmegeschwindigkeit angibt, dargestellt. Zu sehen ist, dass es erhebliche Unterschiede zwischen den behandelten Hölzern gibt. Die Wasseraufnahmegeschwindigkeit der hitzebehandelten Kiefer (HT(N)-PS) ist 62mal höher als die Wasseraufnahme der behandelten Kiefer (HT(F)-PS).

Die tangentialen Wasseraufnahmekoeffizienten von Holzvernetzung (DRT-PS), Melaminharzbehandlung (MRT-PS), Wachs-Harz-Behandlung (HRT-PS) und acetylierter Buche (A-FS) sind relativ unverändert im Vergleich zu unbehandelter Kiefer (UT-PS) oder Buche (UT-FS). Stark reduziert wird der tangentiale und der radiale Koeffizient für die hitzebehandelten Proben (HT(N)-PM) und (HT(F)-PS).

Deutlich höhere tangentiale Koeffizienten zeigen die acetylierte Kiefer (A-PS) und die hitzebehandelte Kiefer (HT(N)-PS). Die radiale Wasseraufnahmegeschwindigkeit wird in den Versuchen für alle Behandlungen außer bei der Hitzebehandlung (HT(N)-PS) reduziert. Die hohe Wasseraufnahme bei den Proben (HT(N)-PS) ist zunächst nur durch eine Schädigung des Holzes vor der Hitzebehandlung zu erklären.

Für den Fenster- und Fassadenbau ist eine geringe oder erschwerte und damit zeitlich verzögerte Wasseraufnahme anzustreben. Die hitzebehandelte Kiefer (HT(F)-PS und HT(N)-PM), die Wachs-Harz-Behandlung (HRT-PS) oder die Melaminbehandlung (MRT-PS) werden von den untersuchten Verfahren diesem Wunsch am besten gerecht.

Um das angestrebte Ziel bei der Wasseraufnahme zu erreichen, darf kein verblautes oder anderweitig vorgeschädigtes Holz für die Vergütung verwendet werden.

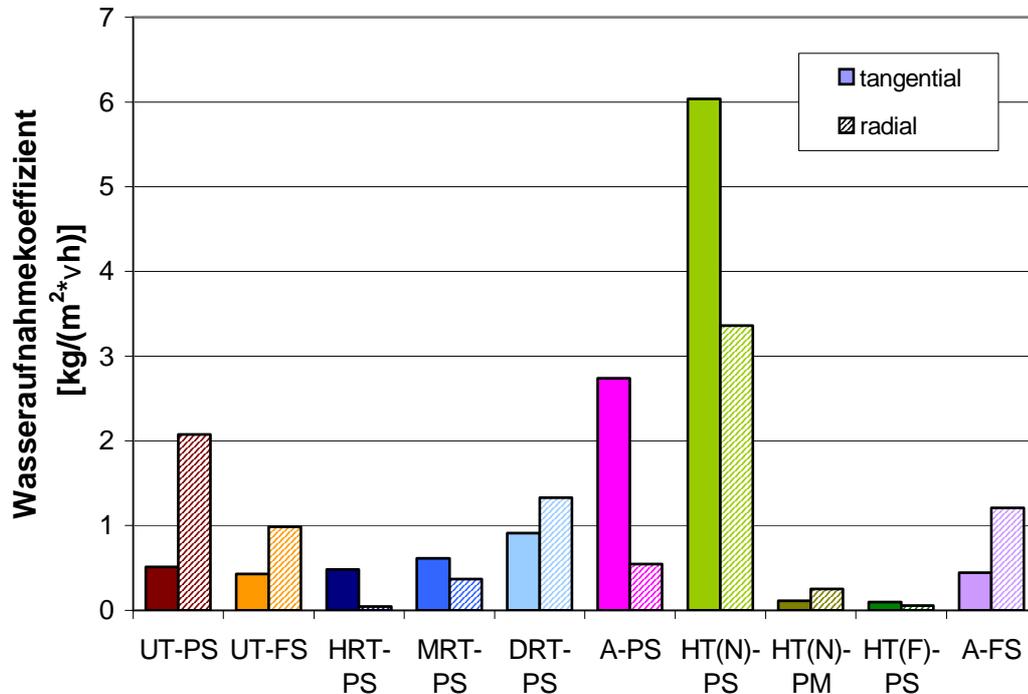


Abbildung 38: Die Wasseraufnahmegeschwindigkeit wird durch den Wasseraufnahmekoeffizienten  $w_i$  dargestellt. Gegenüber dem unbehandelten Holz wird die Geschwindigkeit zum Teil extrem stark reduziert oder erhöht.

Die Holzfeuchtigkeit nach der Vakuumimprägnierung (Abbildung 39) zeigt zusätzlich zur Geschwindigkeit der Wasseraufnahme (Wasseraufnahmekoeffizient  $w_i$ ) auch die maximal mögliche Wasseraufnahme. Ein deutlicher Unterschied im Vergleich zur Geschwindigkeit der Wasseraufnahme ist, dass die Aufnahmemenge bei keiner der behandelten Proben höher ist als bei den unbehandelten Hölzern (UT-PS, UT-FS).

Die hohe Standardabweichung der hitzebehandelten Kiefer (HT(N)-PS) hat ihre Ursache darin, dass unter den Proben sowohl verblaute als auch nicht verblaute bzw. in der Holzsubstanz vorgeschädigte Proben waren.

Starke Reduktionen der Aufnahme zeigen hitzebehandeltes Holz (HT(N)-PS), Wachs-Harz-behandeltes Holz (HRT-PS) und mit Melaminharz behandeltes Holz (MRT-PS).

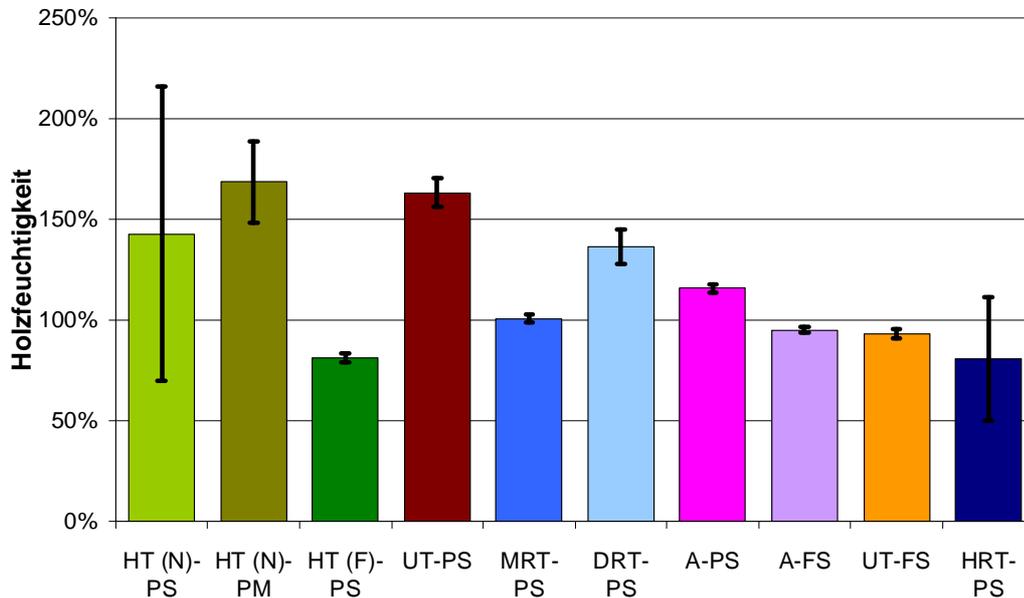


Abbildung 39: Maximal erreichbare Holzfeuchtigkeit in Gewichtsprozent der Proben nach Vakuumimprägnierung

Die Höhe der Holzfeuchtigkeit ist, weil sie auf dem Gewicht der Probe basiert, in starkem Maß von der Dichte der Proben abhängig. Deshalb zeigt Abbildung 39 ein leicht verzerrtes Bild über die tatsächlich aufgenommene Wassermenge. Die hitzebehandelten Proben verlieren während der Hitzebehandlung an Gewicht. Deshalb verringert sich die Dichte des Materials während der Behandlung. Damit steigt bei gleicher Wassermenge die Holzfeuchte in %, die sich auf das Darrgewicht bezieht.

Bei den anderen Behandlungen werden Stoffe in das Holz eingebracht und dadurch die Dichte des neuen Materials erhöht. Für die gleiche Menge an aufgenommenem Wasser bedeutet es, dass die Holzfeuchtigkeit der hitzebehandelten Proben höher ist als bei unbehandeltem Holz. Für alle anderen modifizierten Hölzer mit einer Gewichtszunahme ist die Holzfeuchtigkeit niedriger.

In Abbildung 40 ist die Dichte der modifizierten Hölzer nach der Vakuumimprägnierung dargestellt. Die Höhe der Säulen gibt die Dichte im wassergesättigten Zustand an. Der untere Teil der Säulen markiert den Anteil, den das Holz an der Dichte hat bzw. die Dichte des trockenen Holzes im gequollenen Zustand.

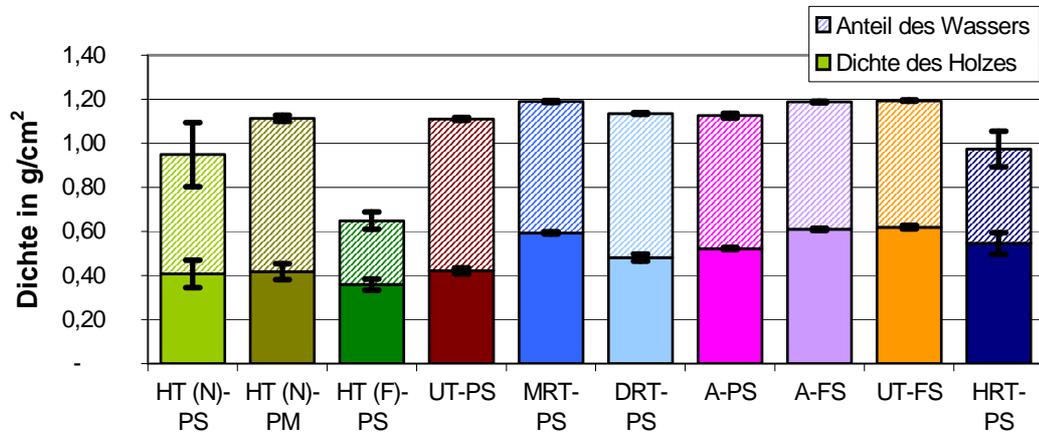


Abbildung 40: Dichte und Anteile des Holzes und des Wassers an der Dichte nach Vakuumimprägnierung

Die Dichte des hitzebehandelten Holzes scheint keine signifikant geringere Dichte als das unbehandelte Holz zu haben. Da die hitzebehandelten Hölzer nicht aus dem gleichen Ausgangsmaterial sind wie das unbehandelte Holz, könnte die natürliche Variabilität der Dichte den Einfluss der Hitzbehandlung überdecken.

Bei allen anderen behandelten Kiefernholzern wird die Dichte erwartungsgemäß erhöht. Die acetylierte Buche zeigt keine Erhöhung der Dichte gegenüber der unbehandelten Buche. Bei der Buche wurde ebenfalls nicht das gleiche Ausgangsmaterial verwendet.

Die Gesamtdichte ist bei vielen Modifizierungen sehr ähnlich wie bei unbehandeltem Holz. Die hitzebehandelte Kiefer (HT(N)-PS und HT(F)-PS) und die Wachs-Harz-Behandlung (HRT-PS) zeigen deutlich geringere Dichten. Diese liegen zum Teil sogar so niedrig (HT(F)-PS), dass die Proben auch nach der Vakuumimprägnierung so leicht waren, dass sie auf dem Wasser geschwommen sind.

Der Anteil des Wassers in den Holzproben ist nach der Vakuumimprägnierung bei den unbehandelten Holzproben (UT) am höchsten. Alle Behandlungen führen so zu einer Reduzierung der potentiell möglichen Wasseraufnahme und damit zu einer besseren Eignung in diesem Punkt in Bezug auf den Fensterbau.

### 3.2.3.3 Weitere Versuche an unbehandelten Proben

Aufgrund der großen Streuung der Wasseraufnahme an unbehandelten und behandelten Proben im Rahmen der planmäßigen Versuche wurden an weiteren unbehandelten Proben aus Kiefer-Splintholz Versuche der Wasseraufnahme nach Abschnitt 3.2.3.1 durchgeführt und der Wasseraufnahmekoeffizient  $w$  gemäß DIN 52617 bestimmt. Er sagt aus, welche Wassermasse pro  $m^2$  Fläche in der Zeiteinheit aufgenommen wird.

Hölzer haben je nach Holzart und Zustand sehr unterschiedliche Werte. Während bei Lärche von einem Wasseraufnahmekoeffizient  $w = 0,1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ h}^{0,5})$  ausgegangen werden kann, ist bei Fichte und Kiefer mit wesentlich höheren Werten zu rechnen. Bei Kiefern-Splintholz liegt der Mittelwert bei  $w = 2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ h}^{0,5})$ . Dies wurde auch durch Versuche bestätigt.

Ist das Holz durch Bakterien oder Pilze vorgeschädigt, kann der Wasseraufnahmekoeffizient bis auf  $w = 20 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ h}^{0,5})$  steigen.

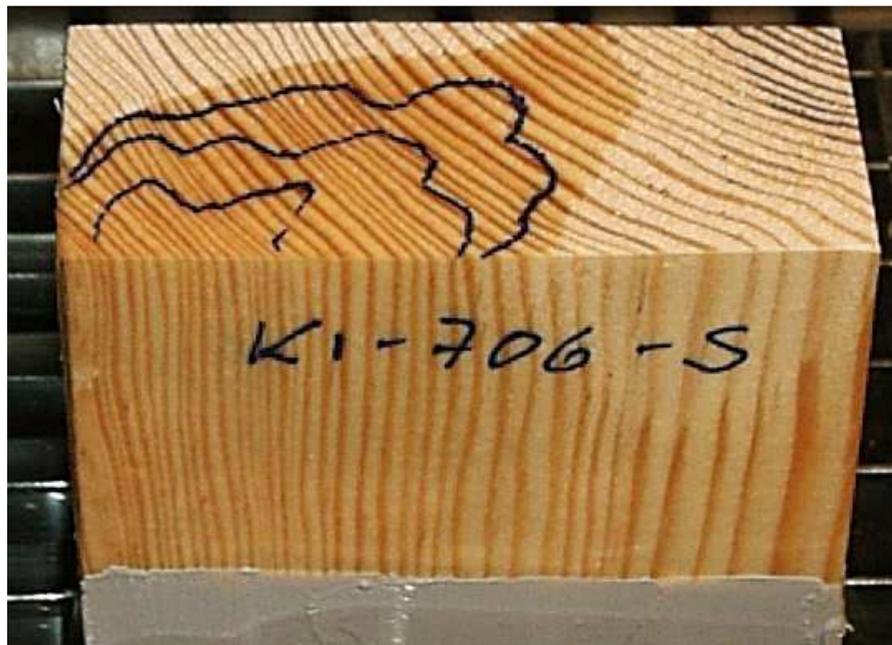


Abbildung 41: Erhöhter Wassertransport längs zur Holzfaser bei einer Probenhöhe von 70 mm mit Kennzeichnung der Wasserverteilung nach 10, 30, 60 und 120 min. Die Abgrenzung der „nassen Bereiche“ lässt auf eine Vorschädigung des Holzes schließen.

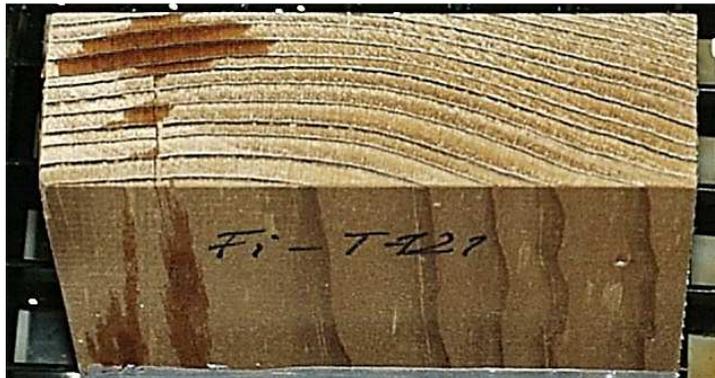


Abbildung 42: Erhöhter Wassertransport als Folge eines Längsrisses in hitzebehandeltem Holz bei einer Probenhöhe von 70 mm nach einer Saugzeit von 20 min.

Welche Feuchteprofile sich bei einem 24-stündigen Saugversuch im Holz ausbilden, wird aus Abbildung 43 ersichtlich. Bemerkenswert ist die relativ geringe Wasseraufnahme von Kiefern-Kernholz.

Der Verlauf der Messkurven macht deutlich, wie durch die Vorschädigung des Holzes die Feuchtigkeit im Vergleich zu ungeschädigtem Holz im Querschnitt ansteigt. Nach den Erfahrungen aus den Versuchen im Rahmen des Projektes wird die hohe Feuchteaufnahme vorgeschädigten Holzes auch durch die Holzvergütung nicht gemindert.

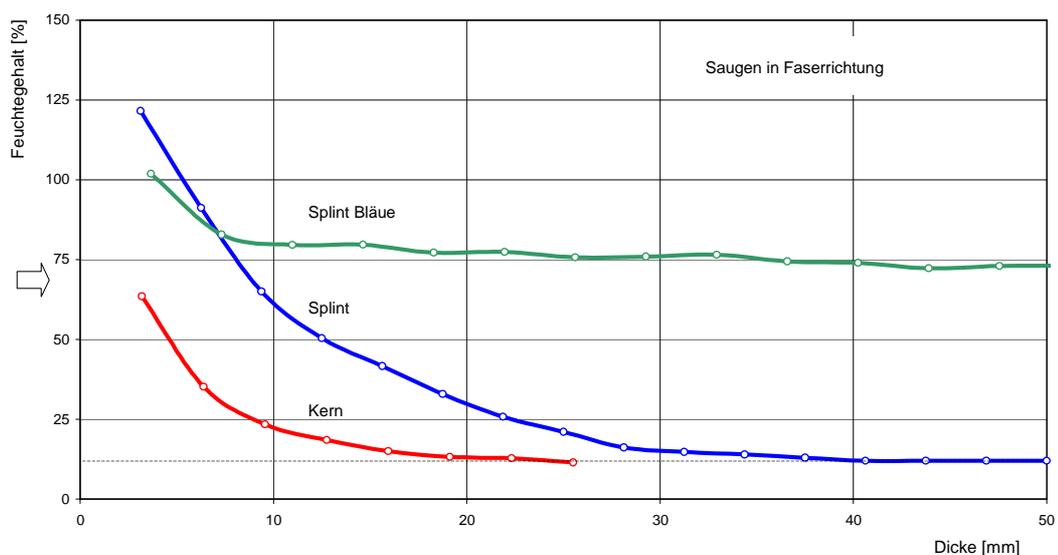


Abbildung 43: Feuchteprofile in Kiefernholz nach 24-stündigem Saugversuch in Faserrichtung. Der Pfeil kennzeichnet die Saugrichtung.

### 3.3 Dauerhaftigkeit

#### 3.3.1 Einführung

Die Dauerhaftigkeit ist für Fenster und Fassaden eine wichtige Materialeigenschaft. Sie ist in der augenblicklichen Situation deshalb von Bedeutung, weil die Schäden an Fenstern und Fassaden eine hohen Stand erreicht haben und die Ursachen häufig nicht geklärt werden können. Damit ist es auch schwierig, im einzelnen Schadensfall die primären Ursachen zu ermitteln.

Dies gilt auch für die unkontrollierte Einwirkung von Wasser und die Entscheidung, ob für die Belastung die Witterungseinwirkung oder das Raumklima ursächlich ist. Deshalb sollte die Dauerhaftigkeit des verwendeten Materials hoch genug sein, um Sekundärschäden, zumindest bei einer vorübergehenden kritischen Belastung, zu verhindern.

Die Möglichkeit eines Pilzbefalls von unbehandeltem Holz ist abhängig von der Holzfeuchte. Erst bei Feuchtigkeiten oberhalb des Fasersättigungspunktes kann ein Abbau des Holzes durch holzerstörende Pilze (Basidiomyceten) stattfinden.

Fachgerecht konstruierte und hergestellte Konstruktionen von Fenstern und Fassaden können bei Verwendung eines geeigneten Werkstoffes in der Regel kritische Werte der Holzfeuchtigkeiten nicht erreichen.

Kritische Werte können aber auftreten bei:

- ⇒ einer Überbeanspruchung der Konstruktion,
- ⇒ fehlender oder unzureichender Wartung,
- ⇒ mechanischen Beschädigungen an der Rahmenkonstruktion.

Für Konstruktionen, an denen ein Primärschaden als Folge äußerer Einwirkungen entstanden ist, wird die Materialeigenschaft „Dauerhaftigkeit“ sehr wichtig. Denn je höher die Dauerhaftigkeit ist, desto mehr Zeit steht zur Verfügung, bis Pilzbefall eintritt und der Schaden ohne Auswirkung auf die Nutzungsdauer behoben sein muss. Im günstigsten Fall ist die Dauerhaftigkeit so hoch, dass auch unter anhaltenden kritischen Bedingungen kein Pilzbefall eintreten kann.

Diese Überlegung kann aber nicht so weit geführt werden, dass eine hohe Holzfeuchte keine weitere Auswirkung hat. Um die Auswirkungen abzuschätzen, müssen die Eigenschaften im System, wie beispielsweise das Verhalten der Anstriche und die Auswirkungen auf das Bauteil, z. B. in Verbindung mit dem Verhalten der Verglasung und der Beschläge, überprüft werden. Es ist also für die zulässige Beanspruchung eine Gesamtbetrachtung für das Bauteil notwendig.

Zur Bewertung der Dauerhaftigkeit wurde das modifizierte Holz auf das Verhalten gegen zwei wichtige holzabbauende Pilze (*Coniophora puteana* und *Coriolus versicolor* für Buche oder *Poria placenta* für Kiefer) untersucht.

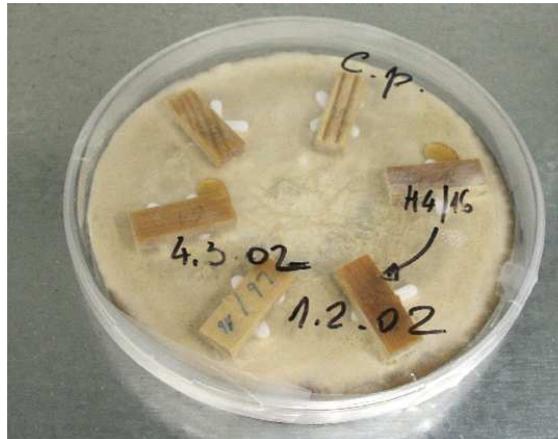
#### 3.3.1.1 Material und Methoden

Der Pilzversuch wurde in Anlehnung an DIN EN 113 – „Laborversuch für Pilzabbau unter sterilen Bedingungen“ durchgeführt. Im Versuch nach DIN EN 113 wird jeweils eine unbehandelte und eine behandelte Probe unter sterilen Bedingungen dem Abbau durch einen Pilz für 16 Wochen ausgesetzt. Nach dieser Zeit wird der Masseverlust zwischen dem Trockengewicht der Probe vor dem Pilzabbau und dem Trockengewicht der Probe nach dem Abbau durch den Pilz berechnet. Für unbehandelte Kontrollproben muss der Abbau mindestens 20 % betragen, um den Versuch für die behandelte Probe gültig werden zu lassen.

Aufgrund des aufwendigen Versuchsaufbaus und der langen Versuchsdauer wurde die im Projekt verwendete Methode gegenüber der Norm modifiziert.

Es wurde eine kleinere Probenabmessung verwendet, die es möglich macht, anstatt 2 Proben gleichzeitig 6 Proben (Abbildung 44) zu untersuchen. Außerdem konnte bei den verwendeten Abmessungen von 5 x 10 x 30 mm die Inkubationszeit von 16 Wochen (DIN EN 113) auf 6 Wochen verkürzt werden.

Zu beachten ist, dass der Versuch nach DIN EN 113 für biozide Holzschutzmittel entwickelt wurde und nicht für modifiziertes Holz. Da sich die Wirkmechanismen zwischen den untersuchten Behandlungen und bioziden Holzschutzmitteln unterscheiden, muss dies in der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden. Vorteil der modifizierten Methode ist es, dass in kürzerer Zeit eine größere Anzahl an Varianten untersucht werden kann.



**Abbildung 44:** Pilzversuch in Anlehnung an DIN EN 113. Jeweils 3 behandelte und 3 unbehandelte Proben werden für 6 Wochen dem Abbau durch einen Pilz (hier: *Coniophora puteana*) unter sterilen Bedingungen ausgesetzt.

In der nachfolgenden Tabelle ist angegeben, welche Behandlungsart mit welchen Prüfpilzen untersucht wurde. Verwendet wurden für jeden Pilz und jede Behandlung 4 Petrischalen mit jeweils 3 behandelten Proben. 12 Proben aus unterschiedlichen Lamellen wurden pro Pilz und Behandlung untersucht. Einige Proben wurden zusätzlich unter sterilen Bedingungen in Petrischalen mit Malzagarmedium, aber ohne Pilz eingebaut, um zu beobachten, ob durch die Versuchsanordnung selbst ein Masseverlust stattfindet.

Modifizierung	<i>Coniophora puteana</i>	<i>Coriolus versicolor</i>	<i>Poria placenta</i>	Ohne Pilz
UT-PS	■		■	■
UT-FS	■	■		■
HT(N)-PS	■		■	■
HT(N)-PM	■		■	■
HT(F)-PS	■		■	■
MRT-PS	■		■	■
DRT-PS	■		■	■
HRT-PS	■		■	■
A-PS	■		■	■
A-FS	■	■		■

Nach dem Herstellen der Proben wurden diese auf 0 % Holzfeuchtigkeit getrocknet und gewogen. Anschließend wurden die Proben luftdicht in Plastikfolie eingeschweißt und mit 20 kGy Gammastrahlung sterilisiert.

In große Petrischalen wurde ein Malzagarmedium als Nährmedium eingesetzt und mittig mit dem entsprechenden Prüfpilz beimpft. Nachdem der Prüfpilz die Petrischale komplett bewachsen hatte, wurden die Holzproben eingebaut. In jede Petrischale wurden 3 behandelte und 3 unbehandelte Proben abwechselnd und sternförmig eingebaut.

Der Einbauzeitpunkt war der Startzeitpunkt der 6-wöchigen Inkubationszeit der Proben. Nach der Abbauphase wurden die Proben ausgebaut, vom außen anhaftenden Pilzmycel befreit und gewogen. Anschließend wurden die Proben bei 103 °C darrgetrocknet.

### 3.3.1.2 Ergebnisse

Für die nachstehende Auswertung wurden alle Proben herangezogen, die folgende Bedingungen erfüllt haben:

- ⇒ Sterilität über den gesamten Versuchszeitraum,
- ⇒ Abbau der Kontrollproben mit mindestens 20 % Gewichtsverlust,
- ⇒ Feuchtigkeit der behandelten Proben nach dem Versuch nicht extrem hoch oder niedrig.

Der Gewichtsverlust (mass loss) der Proben durch Pilzabbau wurde aus der Differenz zwischen dem Darrgewicht vor dem Einbau und dem Darrgewicht nach dem Pilzversuch errechnet. Dieser Wert wurde mit dem Masseverlust der Proben, die ohne Pilz eingebaut waren, korrigiert.

$$\text{mass loss} = \frac{m1 - m2}{m1}$$

mass loss	=	Masseverlust bezogen auf das Volumen der Proben
m1	=	Darrgewicht vor dem Einbau
m2	=	Darrgewicht am Versuchsende

$$\text{mass loss}(p) = \text{mass loss}(a) - \text{mass loss}(k)$$

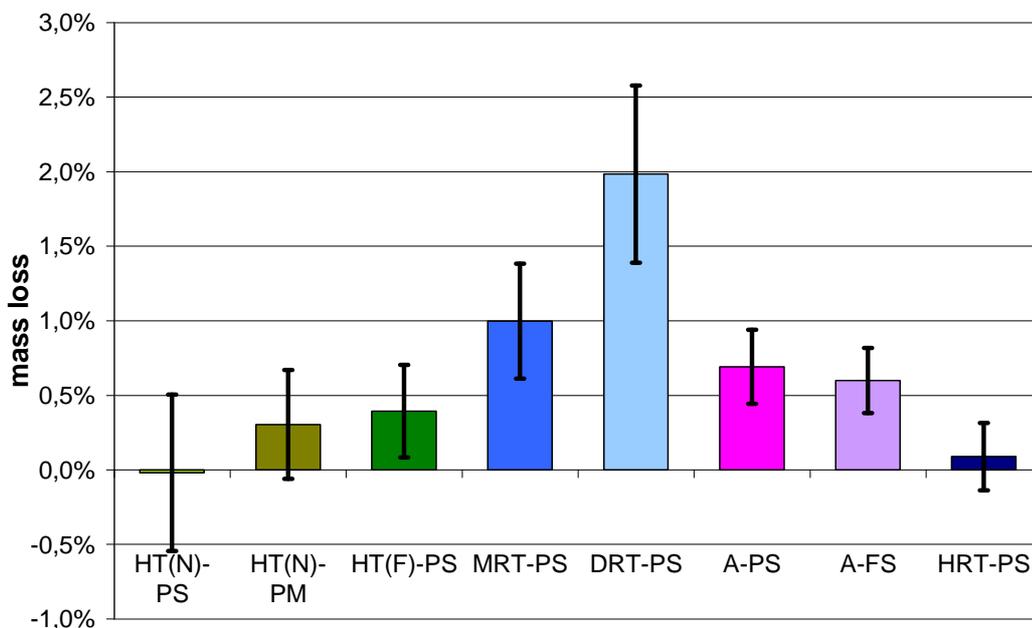
mass loss(p) = Masseverlust durch Pilzabbau

mass loss(a) = Masseverlust der Proben aus Petrischalen mit Pilz

mass loss(k) = Masseverlust der Proben aus Petrischalen ohne Pilz

In Abbildung 45 ist der Masseverlust der Proben aufgeführt, die ohne Pilz unter sterilen Bedingungen eingebaut waren. Während die hitzebehandelten und die Wachs-Harz-behandelten Proben keinen signifikanten Masseverlust zeigen, war bei den acetylierten Proben, den mit Melaminharz behandelten Proben und der Holzvernetzung ein Masseverlust feststellbar.

Bei den letztgenannten Behandlungen werden Stoffe in das Holz eingebracht, die nicht vollständig mit dem Holz reagieren oder nicht vollständig im Holz fixiert werden können, so dass unter bestimmten Bedingungen wieder Stoffe aus dem Holz ausgetragen werden. Besonders hoch ist der Masseverlust durch Auswaschung bei der Holzvernetzung.



**Abbildung 45:** Masseverlust (mass loss(k)) der behandelten Proben, der nicht durch Pilzabbau, sondern durch das Versuchsdesign verursacht wurde. Diese Proben wurden ohne Pilz in den Petrischalen gelagert.

In Abbildung 46 ist der Masseverlust (mass loss(p)) dargestellt, der auf den Abbau des Holzes durch *Coniophora puteana* zurückgeführt werden kann. Das unbehandelte Holz der Buche (UT-FS) und der Kiefer (UT-PS) zeigt durch den hohen Masseverlust von 30,1 % bei Buche und 28,0 % bei Kiefersplint, dass der Prüfpilz im Versuch ausreichend virulent war und somit einen starken Angriff auf das Holz ausgeübt hat.

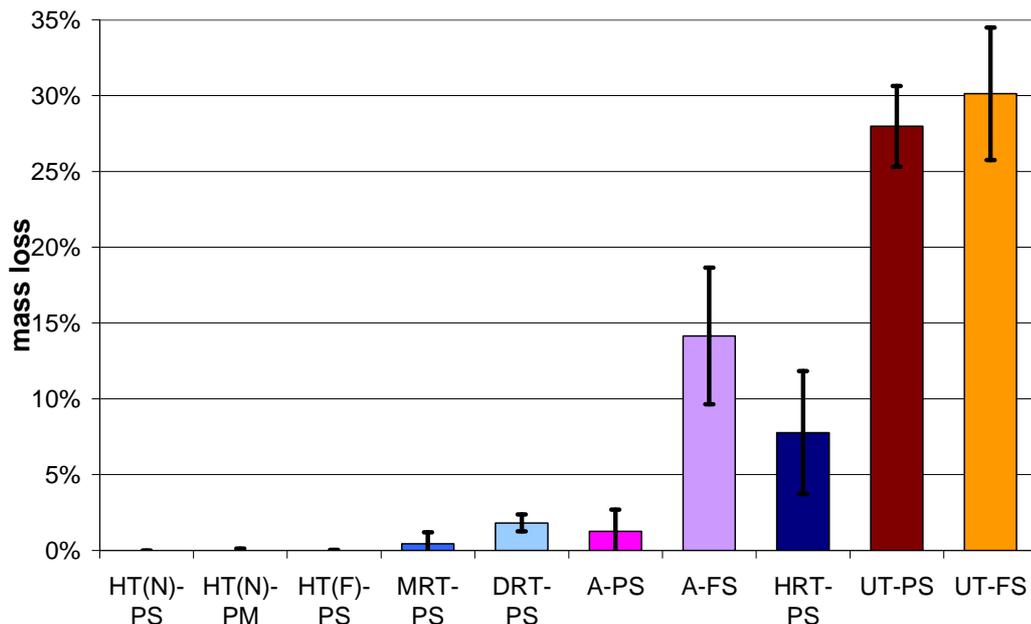


Abbildung 46: Masseverlust (mass loss(p)) der behandelten und unbehandelten Holzproben nach 6 Wochen Abbau durch *Coniophora puteana*

Die hitzebehandelten Proben zeigen keinen signifikanten Holzabbau. Hier könnte sich versuchsbedingt die hydrophobierende Wirkung der Hitzebehandlung bemerkbar machen, die dazu führt, dass der Pilz längere Zeit braucht, um das Holz zu bewachsen und ausreichend gute Bedingungen für den Abbau vorzufinden. Wie stark dieser Effekt der Hydrophobierung den Pilzversuch beeinflusst, könnte nur durch eine deutlich verlängerte Inkubationszeit festgestellt werden.

Einen sehr geringen Abbau durch den Pilz *Coniophora puteana* zeigen die mit Melaminharz behandelten Proben, die Holzvernetzung und die acetylierte Kiefer. Die mit Wachs-Harz behandelten Proben zeigen ebenfalls eine deutliche Reduktion des Masseverlustes gegenüber den unbehandelten Proben. Der Masseverlust von 7,8 % ist an den Proben schon deutlich als Holzabbau sichtbar. Bei diesen Proben könnte die hydrophobierend wirkende Behandlung den Beginn des Pilzabbaus nur zeitlich verzögert haben. Das würde nicht zu einer dauerhaften Reduktion bei längerer Versuchsdauer führen.

Die acetylierte Buche zeigt mit 14,1 % noch deutlich reduzierten Masseverlust durch Pilzabbau. Der Pilzabbau wurde auf ca. 50 % der unbehandelten Buche reduziert. Eine Zerstörung des Materials durch den Pilz ist gut erkennbar.

In Abbildung 47 ist der Masseverlust von zwei unterschiedlichen Pilzen dargestellt. Für alle behandelten Proben, bei denen Kiefernholz das Ausgangsmaterial war (HT(N)-PS, HT(N)-PM, HT(F)-PS, MRT-PS, DRT-PS, A-PS und HRT-PS) und für unbehandeltes Kiefernspilnholz (UT-PS) wurde der Braunfäulepilz *Poria placenta* als zweiter Versuchspilz verwendet. Für unbehandelte Buche (UT-FS) und acetylierte Buche (A-FS) wurde der Weißfäuleerreger *Coriolus versicolor* verwendet. Der Abbau durch diese Versuchspilze zeigt bei den meisten Behandlungen ein anderes Verhalten als beim Abbau durch *Coniophora puteana*.

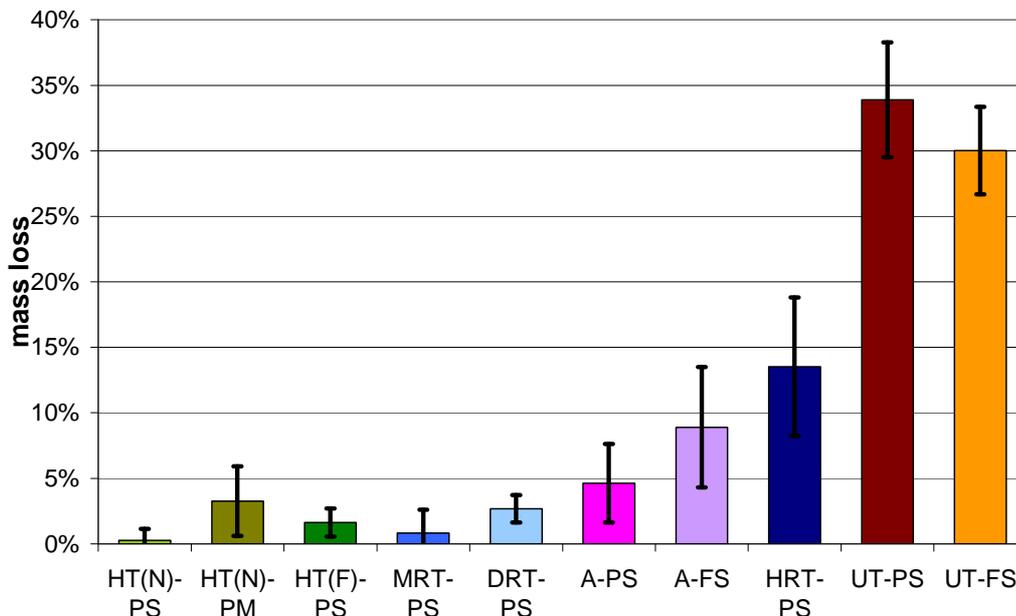


Abbildung 47: Masseverlust (mass loss(p)) der behandelten und unbehandelten Holzproben nach 6 Wochen Abbau durch *Coriolus versicolor* (UT-FS und A-FS) oder *Poria placenta* (übrige Proben)

Die hitzebehandelten Proben zeigen einen höheren Abbau gegenüber diesem Pilz als gegenüber *Coniophora puteana*. Die von NOW hitzebehandelte Kiefer zeigt keinen signifikanten Masseverlust. Der Abbau an der Seekiefer (HT(N)-PM) mit 3,3 % und dem von Finnforest behandeltem Holz (HT(F)-PS) mit 1,6 % ist bereits etwas höher als bei dem ersten Prüfpilz, aber immer noch sehr gering im Vergleich zu den anderen Modifizierungen.

Die mit Melaminharz behandelten Proben (MRT-PS) zeigen mit einem Masseverlust von 0,8 % beim zweiten Prüfpilz eine sehr starke Resistenz gegenüber dem Holzabbau durch diesen Braunfäuleerreger. Die Holzvernetzung (DRT-PS) führte zu einer starken Reduktion des Holzabbaus durch den Prüfpilz. Der Masseverlust betrug nach 6 Wochen nur 2,7 %. Bei den acetylierten Kiefernholzproben (A-PS) ist der Masseverlust beim Abbau durch *Poria placenta* mit 4,6 % höher als der Masseverlust beim Abbau durch *Coniophora puteana*.

Eine Reduzierung des Masseverlustes konnte auch durch die Wachs-Harz-Behandlung (HRT-PS) erreicht werden. Der Abbau bei diesem Material ist deutlich höher als bei allen anderen untersuchten modifizierten Materialien, aber immer noch niedriger als beim unbehandelten Holz. Nicht geklärt werden konnte, ob der verringerte Masseverlust nur wegen der zeitlichen Verzögerung des Abbaubeginns durch die Hydrophobierung zu erklären ist oder die Proben eine dauerhafte Resistenz gegenüber dem Prüfpilz haben.

Die acetylierte Buche (A-FS) wurde durch den Weißfäuleerreger *Coriolus versicolor* als zweiten Prüfpilz abgebaut. Der Masseverlust ist mit 8,9 % zwar niedriger als beim ersten Prüfpilz und um 70 % geringer als beim Abbau von unbehandeltem Buchenholz, aber noch deutlich sichtbar.

### 3.3.1.3 Berechnung der Dauerhaftigkeitsklassen

Nach DIN EN 350-2 können Holzarten in natürliche Dauerhaftigkeitsklassen eingeteilt werden. Die Klassifizierung erfolgt aufgrund langjähriger Untersuchungen und Erfahrungen. Folgende Tabelle zeigt die fünf Dauerhaftigkeitsklassen und deren Bedeutung.

Dauerhaftigkeitsklasse	Bedeutung	Max. Abbau im Vergleich zum Referenzholz	X-Wert
1	sehr dauerhaft	< 15 %	0,00 – 0,15
2	dauhaft	< 30 %	0,15 – 0,30
3	mäßig dauerhaft	< 60 %	0,30 – 0,60
4	wenig dauerhaft	< 90 %	0,60 – 0,90
5	nicht dauerhaft	> 90 %	über 0,90

Die Dauerhaftigkeit von unbehandeltem Holz wird immer relativ zu einer Referenzholzart berechnet. Für alle Nadelhölzer ist die Referenzholzart Kiefersplint und für die Laubholzarten Buche. Über den X-Wert kann berechnet werden, in welche Dauerhaftigkeitsklasse das Holz einzusortieren ist. Dazu wird der Quotient aus dem Abbau bei der zu beurteilenden Holzart und dem Abbau bei der Referenzholzart gebildet. Dieser Wert wird mittels des X-Wertes dann in die Dauerhaftigkeitsklassen sortiert.

Ein Anhaltspunkt für solch eine Einteilung kann auch ein Pilzversuch nach DIN EN 113 sein bzw. die in diesem Projekt durchgeführte Untersuchung. Zu beachten ist bei dieser Klassifizierung die enorme Streubreite der biologischen Untersuchungen. Eine seriöse Einteilung kann nur nach ausreichend langen und ausreichend vielen Versuchen im Labor und im Freiland vorgenommen werden.

Das modifizierte Holz ist in vielen Punkten eher mit einer neuen Baumart vergleichbar als mit Holz, das mit bioziden Holzschutzmitteln behandelt wurde. Deshalb könnte man für das modifizierte Holz eine Dauerhaftigkeitsklassifizierung angeben, wie sie für natürliches Holz verwendet wird. In Abbildung 48 und Abbildung 49 ist dargestellt, wie solch eine Einteilung in Dauerhaftigkeitsklassen aussehen könnte.

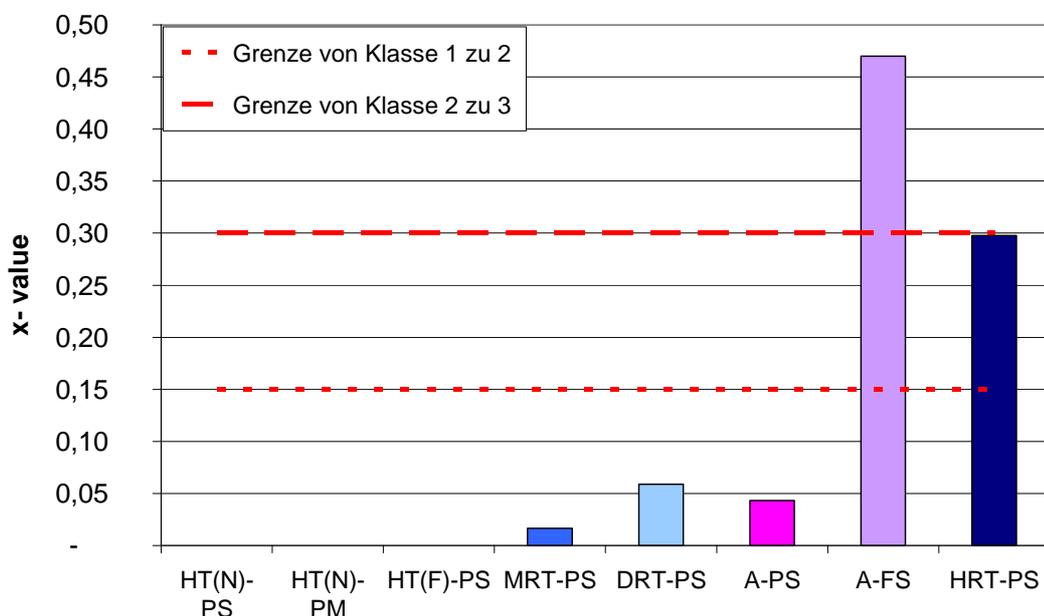


Abbildung 48: X-Wert zur Einteilung in Dauerhaftigkeitsklassen nach dem Abbau durch *Conio-phora puteana* in Anlehnung an DIN EN 350-2

Aus den hier durchgeführten Untersuchungen kann man jedoch keine seriöse Einteilung herleiten, sondern nur eine Orientierung und Anregung für weitere Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit geben. Nach diesem Schema ergibt sich folgende Einteilung:

Dauerhaftigkeitsklasse	Behandlung	Bezeichnung der Proben
1 (sehr dauerhaft)	Hitzebehandlung Holzvernetzung Melaminharzbehandlung acetylierte Kiefer	HT(N)-PS / HT(N)-PM / HT(F)-PS DRT-PS MRT-PS A-PS
2 – 3	Wachs-Harz-Behandlung	HRT-PS
3	acetylierte Buche	A-FS

Tabelle 7: Dauerhaftigkeitsklassen bei Prüfung mit *Coniophora puteana*

Etwas schlechtere Resultate zeigt die Einteilung in Dauerhaftigkeitsklassen nach dem Abbau durch *Poria placenta* oder *Coriolum versicolor*. Die hitzebehandelten Proben würden auch hier eine Dauerhaftigkeitsklasse 1 ergeben. Die Holzvernetzung und die mit Melaminharz behandelten Proben liegen ebenfalls noch in der Klasse 1. Acetylierte Kiefer sinkt in die Klasse 1 – 2 ab, das mit Wachs-Harz behandelte Holz sogar in die Klasse 3. Bei *Coriolum versicolor* als Weißfäuleerreger ergibt sich für die acetylierte Buche die Klasse 3.

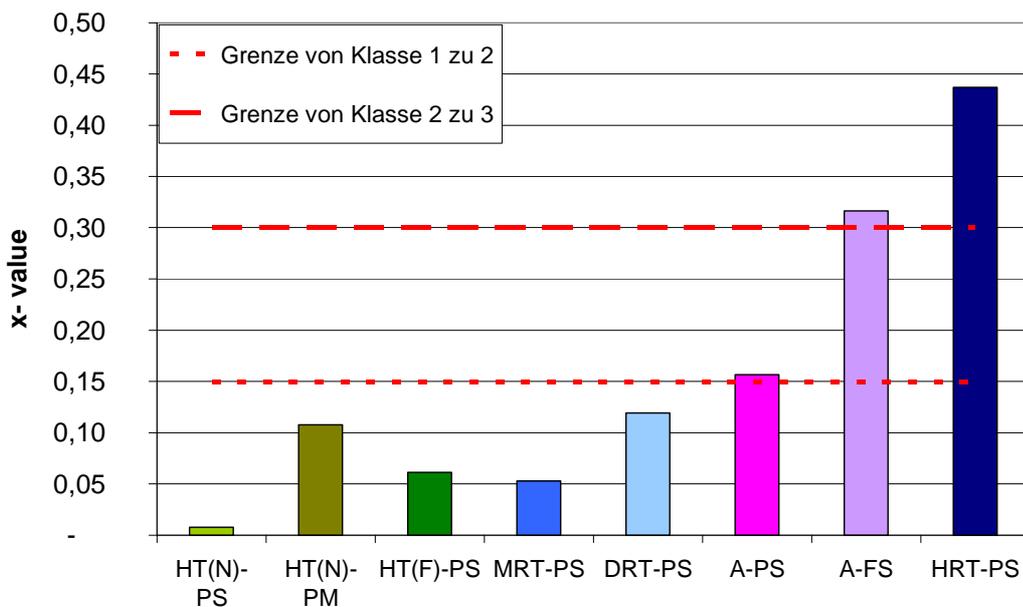


Abbildung 49: X-Wert zur Einteilung in Dauerhaftigkeitsklassen nach dem Abbau durch *Coriolum versicolor* (nur A-FS) oder *Poria placenta* in Anlehnung an DIN EN 350-2

Dauerhaftigkeits- klasse	Behandlung	Bezeichnung der Proben
1 (sehr dauerhaft)	Hitzebehandlung Holzvernetzung Melaminharzbehandlung	HT(N)-PS / HT(N)-PM / HT(F)-PS DRT-PS MRT-PS
2 – 3	acetylierte Kiefer	A-PS
3	Wachs-Harz-Behandlung acetylierte Buche	HRT-PS A-FS

Tabelle 8: Dauerhaftigkeitsklassen bei Prüfung mit *Coriolus versicolor* (nur A-FS) oder *Poria placenta*

Für die Bewertung und Klassifizierung der Holzproben muss immer der Pilz, der den stärksten Abbau verursacht, verwendet werden.

Nach Vorliegen der Ergebnisse an den acetylierten Hölzern wurde durch den Hersteller der Grad der Acetylierung überprüft und mitgeteilt, dass die von ihm zur Verfügung gestellten Proben unzureichend vergütet waren und die Ergebnisse der Untersuchung die Leistungsfähigkeit des Verfahrens nicht wiedergeben.

Die hier durchgeführte Bewertung kann nur ein grober Richtwert sein, um zu zeigen, dass die Dauerhaftigkeit der behandelten Hölzer gegenüber dem unbehandelten Holz erhöht werden kann. Für den Einsatz im Fenster- und Fassadenbau reicht schon eine moderate Erhöhung der Dauerhaftigkeit des Holzes aus, um in Verbindung mit dem verbesserten Verhalten gegen Feuchtigkeit die Funktionsfähigkeit der Bauteile bei vorübergehend kritischen Verhältnissen sicherzustellen.

Für den Fensterbau empfohlen werden kann Material, das mindestens die Dauerhaftigkeitsklasse 3 erreicht. Mit dieser Dauerhaftigkeit sollte sichergestellt werden, dass etwas Zeit zur Wartung von Fenstern und Fassaden im Fall einer Beschädigung oder Veränderung zur Verfügung steht, bevor ein irreparabler Schaden durch holzerstörende Pilze eine Reparatur unmöglich macht.

Für eine seriöse Klassifizierung des behandelten Materials müssen wesentlich mehr Untersuchungen durchgeführt werden, die weitere Prüfpilze umfassen. Von entscheidender Bedeutung werden langjährige Feldversuche unter Freilandbedingungen, wie z. B. nach DIN EN 252, sein.

Da viele Anwendungen des neuen modifizierten Materials, wie z. B. Fenster, nicht im Erdkontakt, sondern nur in der Gefährdungsklasse 3 (bewittert, aber kein Erdkontakt) liegen, müssen aussagefähige Tests für diese Klasse entwickelt und international anerkannt werden.

### 3.3.2 Quell- und Schwindverhalten

#### 3.3.2.1 Ziele

Das Quellen und Schwinden von Holz beeinflusst in einem hohen Maß wichtige Material- und Bauteileigenschaften, die bei der Konstruktion von Fenstern und Fassaden eine große Rolle spielen.

Zu diesen Eigenschaften zählen unter anderem

- ⇒ die Dichtigkeit der Konstruktionsfugen,
- ⇒ die Haltbarkeit von Verleimungen an Rahmenverbindungen,
- ⇒ die Funktionsfähigkeit von abgedichteten Fugen,
- ⇒ die Formstabilität der Rahmen und Einzelteile,
- ⇒ die Haftung von Beschichtungen,

die durch klimabedingte Änderungen der Holzfeuchte und der damit verbundenen Änderungen der Holzquerschnitte belastet werden.

Deshalb ist es ein Hauptziel der Holzmodifizierung, das Quellen und Schwinden des Holzes zu verringern. Für dieses Projekt ist das Quell-/Schwindverhalten ein sehr wichtiges Bewertungskriterium, um die Eignung von modifiziertem Holz für Fenster und Fassaden zu beurteilen.

#### 3.3.2.2 Aufbau und Durchführung der Versuche

Der Versuchsaufbau entspricht im Wesentlichen dem Aufbau der Versuche zur Ausgleichsfeuchtigkeit. Unterschiedlich ist, dass zusätzlich zur Massenermittlung die radialen, tangentialen und longitudinalen Dimensionsänderungen der Holzproben gemessen wurden.

Aus diesen kann dann das Quellen und Schwinden relativ zu den Maßen des absolut trockenen Holzes berechnet werden. Es wurde sowohl die Adsorptionskurve als auch die Desorptionskurve des Holzes zur Berechnung verwendet.

Wie zur Berechnung der Ausgleichsfeuchte werden folgende Klimabedingungen zur Auswertung herangezogen:

1	33 % relative Luftfeuchtigkeit; 20 °C
2	65 % relative Luftfeuchtigkeit; 20 °C
3	77 % relative Luftfeuchtigkeit; 20 °C
4	90 % relative Luftfeuchtigkeit; 20 °C
5	ca. 98 % relative Luftfeuchtigkeit; 20 °C

Die Adsorption wurde in den Schritten von 1 beginnend bis 5 durchgeführt, die Desorption in umgekehrter Reihenfolge.

Zusätzlich zu den Messungen unter verschiedenen Klimabedingungen wurden alle Proben mittels Vakuum von 50 mbar für 1 h mit Wasser getränkt und anschließend für 24 h unter Wasser gelagert, um eine maximale Quellung sicherzustellen. Die Quellung wurde dann vom trockenen Holz bis zum maximal gequollenen Zustand berechnet. Das Schwinden wurde an Proben gemessen, die anschließend wieder bis 0 % Holzfeuchtigkeit getrocknet wurden.

Das Quellen und Schwinden wird vom trockenen Holz bis zum jeweiligen Klima gemessen (z. B. von 0 % – 33 % oder von 0 % – 90 %), während die ASE als Maß der Veränderung des Quellens und Schwindens im Vergleich zwischen behandeltem und unbehandeltem Holz von einem Klimapunkt zum nächstfolgenden Klimapunkt berechnet wird (z. B. 0 % – 33 %; 33 % – 65 %).

Die Ergebnisse wurden auf das Volumen bezogen. Die Volumenänderung wurde aus der radialen und tangentialen Fläche berechnet. Diese Fläche lässt sich auch gleich der Volumenänderung setzen, da die longitudinale Quellung und Schwindung vernachlässigt werden kann. Das Verhältnis zwischen tangentialer zu radialer zu longitudinaler Quellung beträgt durchschnittlich 20 : 10 : 1.

Die volumetrische Quellung wurde folgendermaßen berechnet:

$$S_V = (1 + S_T) * (1 + S_R) - 1$$

- $S_V$  = volumetrische Quellung
- $S_T$  = tangentiale Quellung
- $S_R$  = radiale Quellung

Die als Reduzierung des Quellens und Schwindens ausgedrückte ASE bezieht sich ebenfalls auf die volumetrische Quellung.

### 3.3.2.3 Ergebnisse aus den Versuchen

In Abbildung 50 ist die volumetrische Quellung der modifizierten Hölzer oberhalb der Fasersättigung nach der Wasserimprägnierung angegeben. Festgestellt werden kann, dass nicht bei allen modifizierten Hölzern eine Reduktion der Quellung im Vergleich zu den unbehandelten Hölzern zu finden ist.

Eine starke Reduzierung der Quellung ist bei den Hitzebehandlungen, der acetylierten Kiefer (A-PS) und der Holzvernetzung (DRT-PS) zu sehen. Die niedrigste Quellung weist das hitzebehandelte Holz (HT(F)-PS) auf. Bei der acetylierten Buche (A-FS) wurde die Quellung nur relativ wenig reduziert.

Keine Verbesserung des Quellens und Schwindens zeigten die Melaminharzbehandlung (MRT-PS) und die Wachs-Harz-Behandlung (HRT-PS).

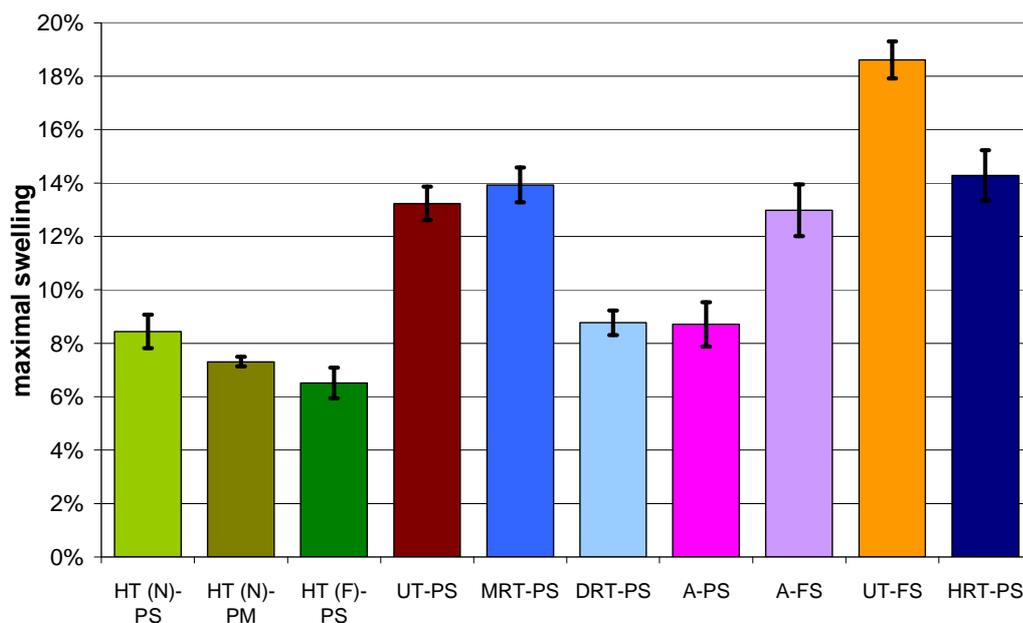


Abbildung 50: Relative volumetrische Quellung der Hölzer nach Wassersättigung. Das ist die maximal mögliche Quellung des Materials.

Im Gegensatz zu Abbildung 50 ist in Abbildung 51 bis Abbildung 53 die Quellung über den gesamten Luftfeuchtigkeitsbereich zu sehen. Auffällig ist besonders im hohen Luftfeuchtigkeitsbereich (> 90 %) der extrem starke Anstieg der Quellung bei den unbehandelten Proben. Deshalb kann festgestellt werden, dass die Reduzierung des Quellens besonders große Auswirkungen im feuchten Klimabereich hat.

Über den gesamten Klimabereich hinweg zeigen die hitzebehandelten Hölzer (Abbildung 51) eine sehr geringe Quellung im Vergleich zum unbehandelten Holz. Die Desorption zeigt bei gleicher Luftfeuchtigkeit stets eine höhere Feuchtigkeit und eine höhere Quellung als die Adsorption. In der Praxis werden die beiden Kurven (Adsorption und Desorption) in der Regel nicht erreicht. Es stellen sich Zustände des Holzes ein, die zwischen den beiden Kurven liegen.

Die mit Holzvernetzung (Abbildung 52) behandelte Kiefer zeigt im mittleren Feuchtigkeitsbereich (> 65 %) eine reduzierte Quellung gegenüber dem unbehandelten Holz, die mit zunehmender Feuchtigkeit stark ansteigt. Durch die Behandlung des Holzes mit Melaminharz oder Wachs-Harz konnte keine Verbesserung des Quell-/Schwindverhaltens erreicht werden. Die Kurven der behandelten Proben liegen fast deckungsgleich auf der Kurve der unbehandelten Kiefer.

Die größeren Schwankungen der mit Wachs-Harz behandelten Proben (HRT-PS) finden ihre Ursache in der ungleichen Verteilung der Wirkstoffe im Holz. Während die Randzonen stark getränkt sind, sind die inneren Bereiche der Lamellen fast unbehandelt.

Die acetylierte Buche (Abbildung 53) zeigt über den gesamten Klimabereich eine kaum reduzierte Quellung. Erst bei sehr hohen Luftfeuchtigkeiten (> 90 %) macht sich eine Reduzierung deutlich bemerkbar. Eine geringe Quellung zeigen die acetylierten Kiefernholzproben. Über den gesamten sorptiven Bereich ist das Quellen und Schwinden gegenüber den unbehandelten Proben stark reduziert.

Abbildung 54 zeigt die Höhe der Reduzierung der Quellung im Klimabereich von 0 % Holzfeuchtigkeit bis zur Wassersättigung an. Die ASE gibt an, um wie viel Prozent die Quellung im Vergleich zu unbehandeltem Holz reduziert wurde. Die Standardabweichung des unbehandelten Holzes (UT-PS und UT-FS) zeigt die natürliche Schwankung in der Quellung an. Diese natürlichen Schwankungen können bis zu 10 % betragen.

Die geringste ASE wurde bei mit Melaminharz behandeltem Holz (MRT-PS) mit -5,2 % und Wachs-Harz-Behandlung (HRT-PS) mit -7,8 % gemessen. Die Ursache für die negative Reduzierung kann in der natürlichen Variabilität des Holzes liegen, weil das für die Modifizierungen verwendete Ausgangsmaterial nicht das gleiche Material war, das für die Kontrollproben verwendet wurde. Bei diesen beiden Behandlungen wurde keine Verbesserung des Quell-/Schwindverhaltens erreicht.

Die mit Holzvernetzung behandelte Kiefer (DRT-PS) wurde insgesamt um 33,7 % verbessert. Dieser Wert ist vergleichbar mit den Werten für die acetylierte Kiefer (A-PS) mit 34,1 % und die acetylierte Buche (A-FS) mit 30,2 %. Die höchste ASE wurde bei den hitzebehandelten Hölzern gemessen. Innerhalb der hitzebehandelten Hölzer erreichte die Kiefer (HT(F)-PS) mit 50,7 % den höchsten Wert, gefolgt von behandelter Seekiefer HT(N)-PM mit 44,7 % und der Kiefer (HT(N)-PS) mit 36,2 %.

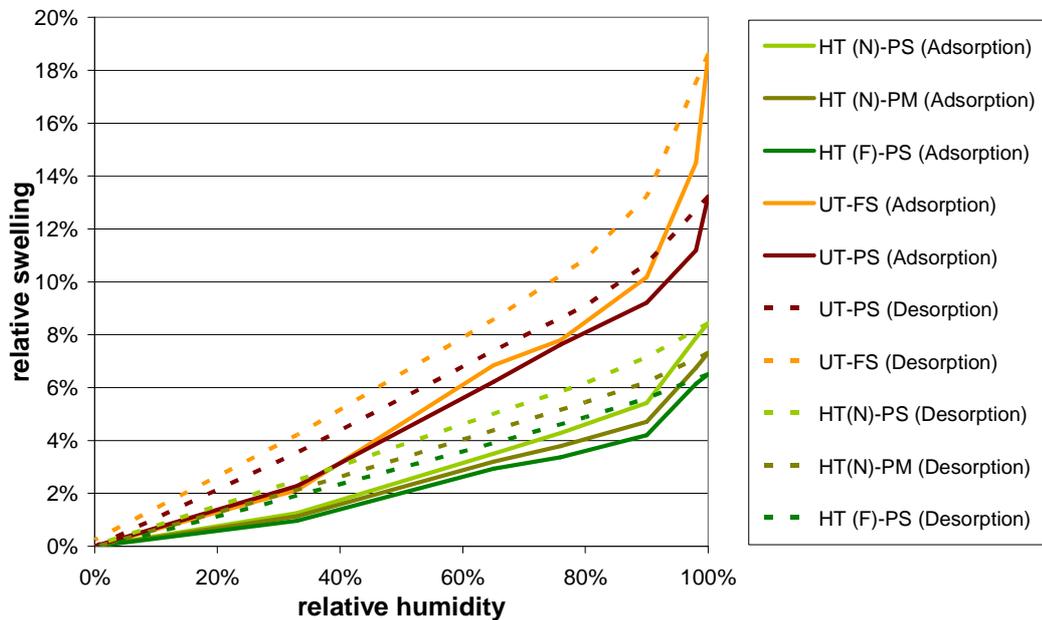


Abbildung 51: Quellen und Schwinden der hitzebehandelten Hölzer (HT) im Vergleich zu unbehandelten Hölzern (UT). Das Quellen und Schwinden der hitzebehandelten Hölzer ist gegenüber dem unbehandelten Holz sehr stark reduziert.

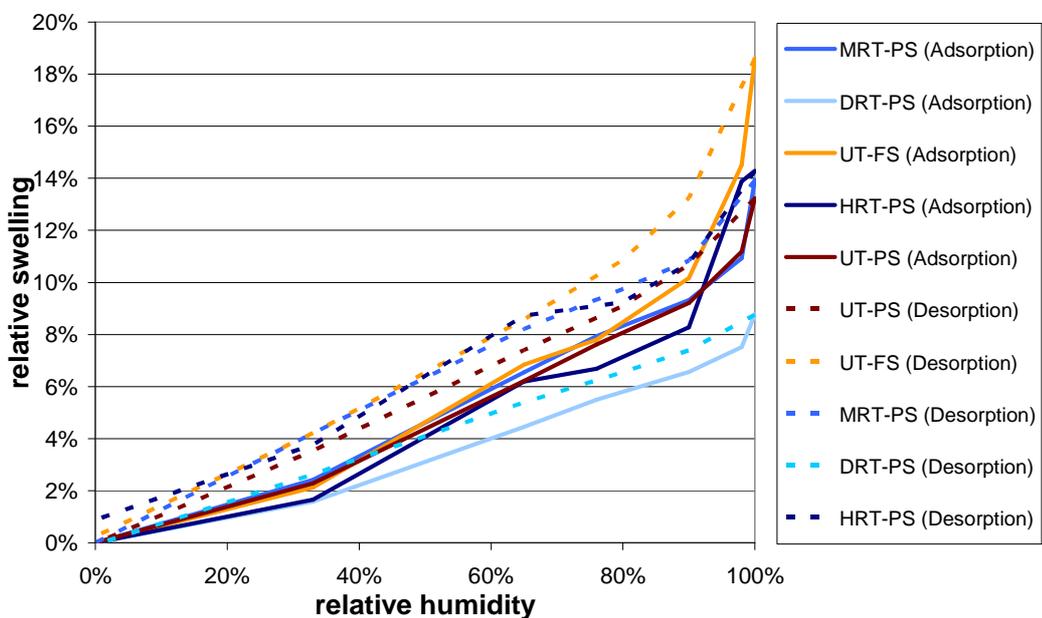


Abbildung 52: Quellen und Schwinden von Holzvernetzung (DRT), Melaminharzbehandlung (MRT) und Wachs-Harz-Behandlung (HRT). Die Quellung der Proben von Melaminbehandlung und Wachs-Harz-Behandlung zeigt keine wesentliche Verbesserung gegenüber unbehandeltem Holz. Holzvernetzung ist im Quellen und Schwinden deutlich verbessert.

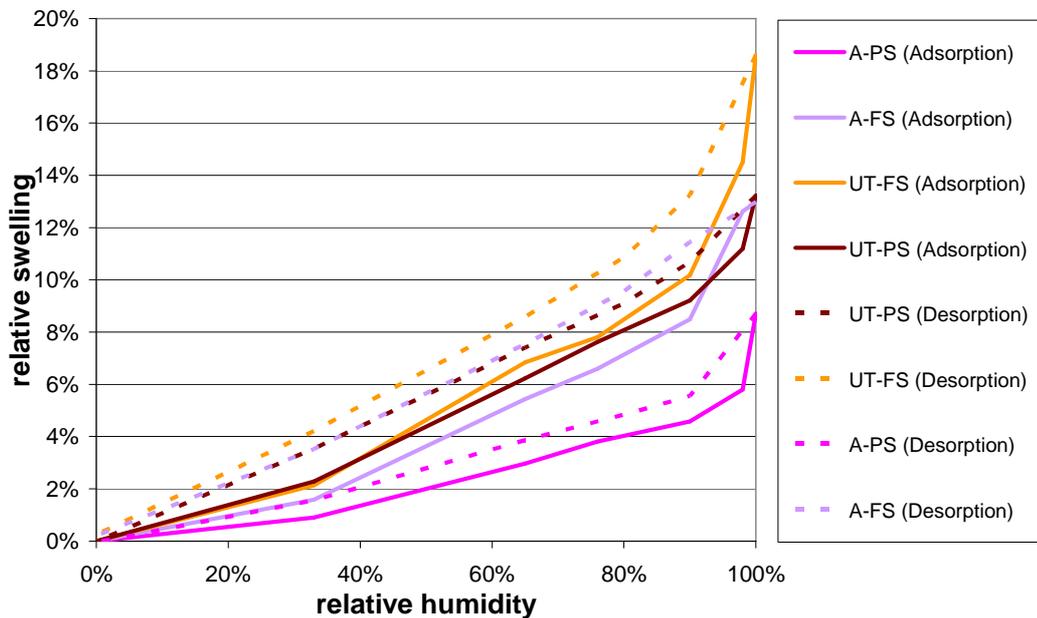


Abbildung 53: Quellen und Schwinden der acetylierten Proben. Für die acetylierte Buche konnte nur eine geringe Verbesserung festgestellt werden. Die Quellung bei acetylierter Kiefer wurde sehr stark reduziert.

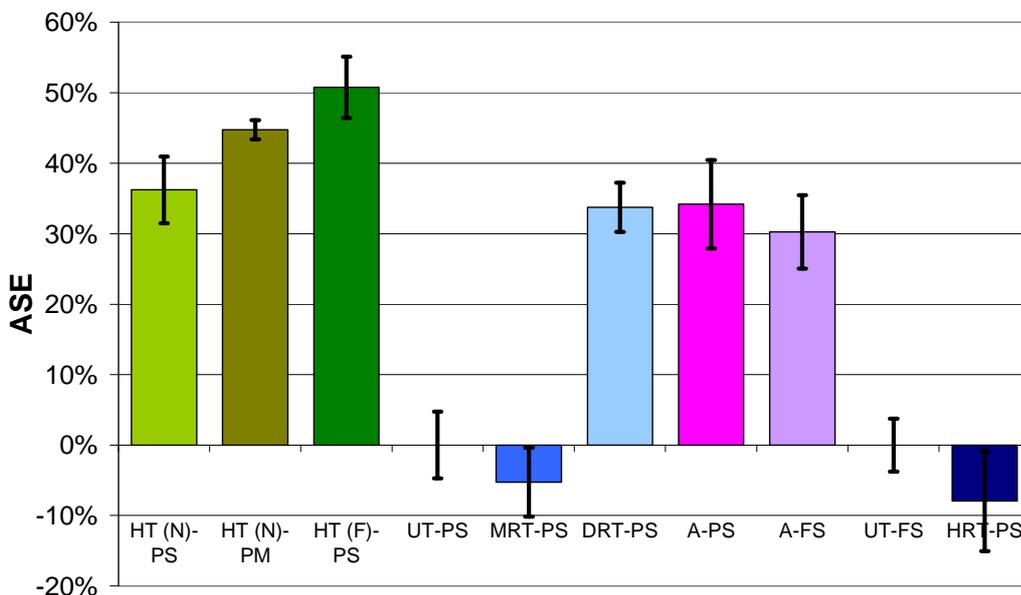


Abbildung 54: Reduzierung des Quellens und Schwindens (ASE) der behandelten Hölzer im Vergleich zu unbehandeltem Holz (UT)

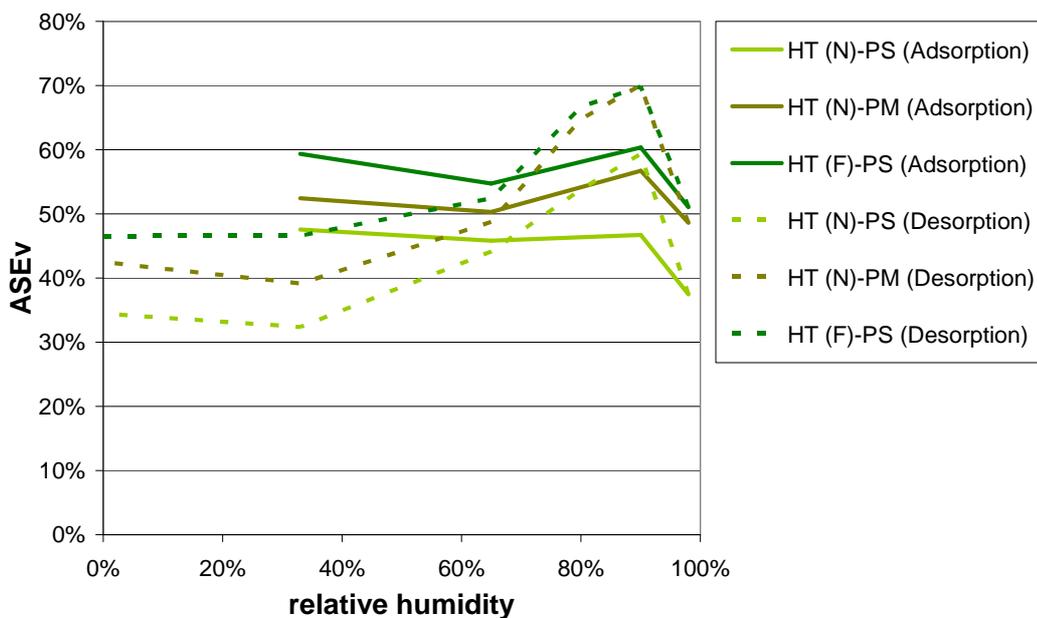
Es zeigen sich drei Gruppen:

- keine Reduzierung (MRT-PS und HRT-PS);
- mittlere Reduzierung (DRT-PS, A-PS und A-FS);
- starke Reduzierung (HT(F)-PS, HT(N)-PM und HT(N)-PS).

In Abbildung 55 bis Abbildung 57 ist die Veränderung der ASE über den gesamten Klimabereich zu sehen. Für die Adsorptionskurven zeigt die ASE an einem einzelnen Messpunkt die ASE, die zwischen diesem Punkt und dem nächst niedrigeren Messpunkt berechnet wurde. Bei der Kurve der Desorption zeigt ein Punkt die Veränderung zwischen dem Punkt und dem nächsthöheren Messpunkt. Beispielsweise die ASE der Adsorptionskurve bei 33 % relativer Luftfeuchtigkeit zeigt die ASE, die zwischen 0 % und 33 % relativer Luftfeuchtigkeit gemessen wurde. Die ASE der Desorptionskurve bei 77 % relativer Luftfeuchtigkeit zeigt die ASE, die zwischen 90 % und 77 % relativer Luftfeuchtigkeit gemessen wurde.

Gezeigt werden kann (Abbildung 57), dass sich die ASE während der Adsorption und der Desorption bei den meisten Modifizierungen ändert. Während sich die ASE der hitzebehandelten Proben (Abbildung 55) relativ wenig ändert, zeigen acetylierte Buche (Abbildung 57), Wachs-Harz-Behandlung und Melaminharzbehandlung (Abbildung 56) sehr große Unterschiede in der ASE während der Adsorption und Desorption.

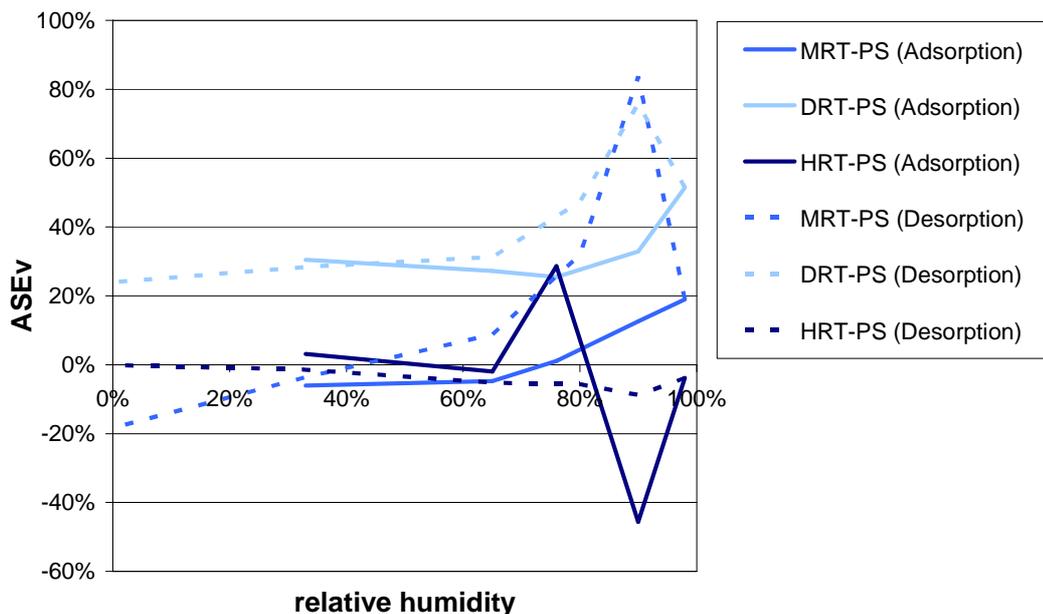
Die hitzebehandelten Proben zeigen ein relativ ähnliches Quell-/Schwindverhalten. Die Hitzebehandlung der Firma Finnforest (HT(F)-PS) zeigt von allen hitzebehandelten Proben im gesamten Verlauf der Adsorption und der Desorption die höchsten Werte für die Quell-/Schwindverbesserung.



**Abbildung 55:** Volumetrische ASE der hitzebehandelten Proben (HT). Die Änderung der ASE während Adsorption und Desorption ist relativ gering.

Die mit Harz (MRT-PS und DRT-PS) und Wachs-Harz (HRT-PS) behandelten Proben zeigen ein sehr differenziertes Quell-/Schwindverhalten. Bei der Wachs-Harz-Behandlung findet lediglich eine Schwankung während der Adsorption um den Nullpunkt statt. Diese Schwankung kann aufgrund der durch die Hydrophobierung verursachten Verzögerung der Wasseraufnahme auftreten. Insgesamt wird das Quellen und Schwinden nicht reduziert. Die mit Melaminharz behandelten Proben zeigen dagegen eine Verbesserung im Bereich hoher Luftfeuchtigkeit (> 80 %). Das ist ein Indiz dafür, dass das Quellen und Schwinden im feuchten Bereich etwas reduziert wurde, aber im trockenen Bereich (< 40 % Luftfeuchtigkeit) im Vergleich zu unbehandeltem Holz verschlechtert wird.

Die Holzvernetzung (DRT-PS) zeigt als einzige der Behandlungen dieser Art eine Verbesserung des Quellens und Schwindens über den gesamten Klimabereich. Die Verbesserung ist in den trockenen und mittleren Bereichen der Luftfeuchtigkeit (< 80 %) mit ca. 30 % ASE relativ moderat, steigt aber in den feuchten Bereichen (> 80 % Luftfeuchtigkeit) stark an.



**Abbildung 56:** Volumetrische ASE der mit Harz (MRT-PS, DRT-PS) und Wachs-Harz (HRT-PS) behandelten Proben. Die Änderung der ASE während Adsorption und Desorption ist zum Teil sehr hoch.

Die acetylierten Hölzer zeigen ein vergleichbares Verhalten während der Adsorption und der Desorption.

Während die acetylierte Kiefer (A-PS) im Mittel ca. 50 % ASE aufweist, erreicht die acetylierte Buche (A-FS) nur ca. 15 %. Dieser Unterschied könnte mit unterschiedlichen Acetylierungsgraden begründet werden. Auffällig ist der Abfall der ASE im feuchten Bereich (> 80 % relative Luftfeuchtigkeit).

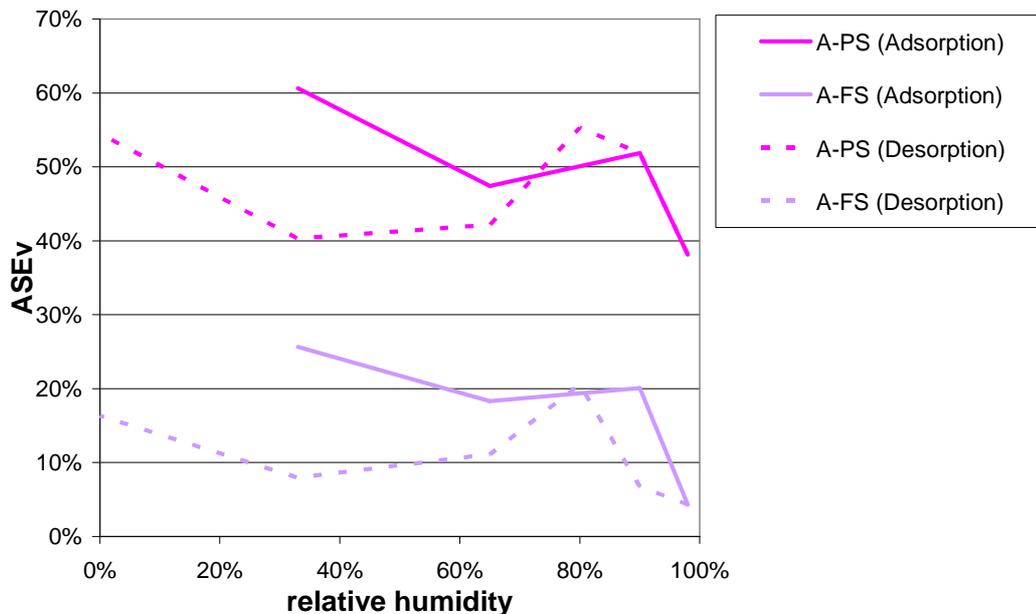


Abbildung 57: Reduzierung des Quellens und Schwindens (ASE) für die acetylierten Hölzer. Die ASE ist in den trockenen und mittleren Bereichen der Luftfeuchtigkeit relativ ähnlich, fällt aber bei hoher Luftfeuchtigkeit (> 80 %) ab.

Abbildung 58 zeigt den Unterschied im Quellungsverhalten zwischen radialer und tangentialer Richtung. Diese Werte beziehen sich auf die ASE von 0 % Holzfeuchtigkeit bis Wassersättigung. Obwohl das Quellungsverhältnis zwischen radialer und tangentialer Richtung bei ca. 1 : 2 liegt, liegen bei den meisten Behandlungen die gemessenen ASE-Werte in einem gleich hohen Bereich.

Größere Unterschiede im Verhalten der radialen und tangentialen ASE findet sich bei hitzebehandelter Kiefer (HT(N)-PS), acetylierter Buche (A-FS) und Wachs-Harz-Behandlung (HRT-PS).

Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass eine Reduzierung der tangentialen Quellung von größerer Bedeutung ist, weil die tangentiale Quellung bei unbehandeltem Holz ca. doppelt so groß ist wie die radiale Quellung.

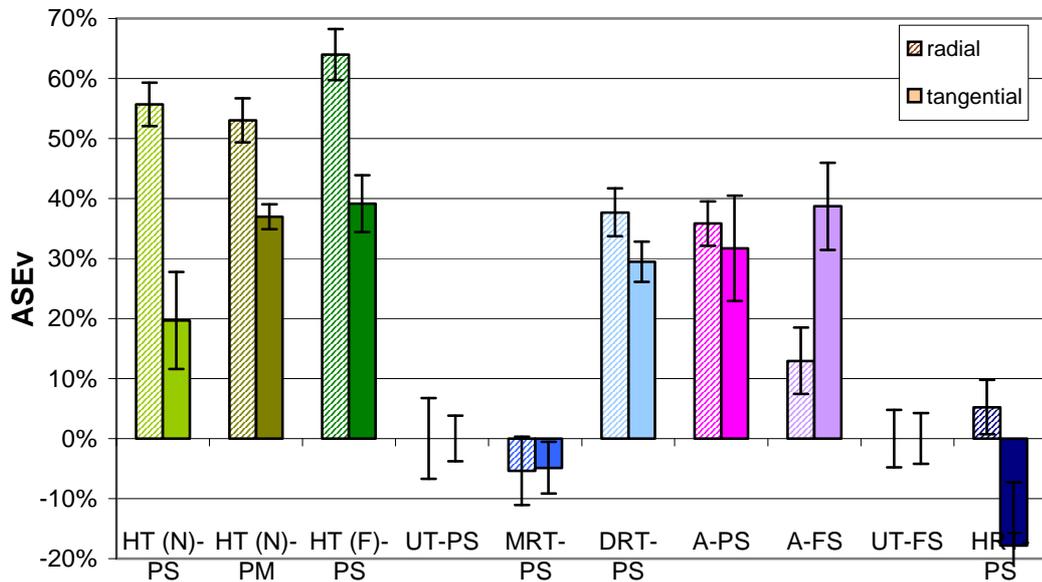


Abbildung 58: Unterschiede des Quellungsverhaltens zwischen tangentialer und radialer Richtung bezogen auf ASE zwischen 0 % Holzfeuchte und Wassersättigung

Abbildung 59 zeigt den Zusammenhang zwischen der Holzfeuchtigkeit und der Quellung unterhalb der Fasersättigung und bis zur Wassersättigung (durch Imprägnierung). Im Bereich unterhalb der Fasersättigung wird im Allgemeinen für unbehandeltes Holz ein linearer Zusammenhang angenommen. Dieser lineare Zusammenhang wurde für unbehandeltes Holz (UT-PS und UT-FS) hier bestätigend gemessen. Er gilt auch im Wesentlichen für die meisten der modifizierten Hölzer.

Die unterschiedliche Höhe der maximalen Quellung zwischen den einzelnen Behandlungen ist hier gut zu erkennen. Ebenfalls unterschiedlich ist die maximal mögliche Wasseraufnahme der einzelnen Behandlungen.

In Abbildung 60 ist als Ausschnitt aus Abbildung 59 nur der Bereich bis 25 % Holzfeuchtigkeit aufgeführt.

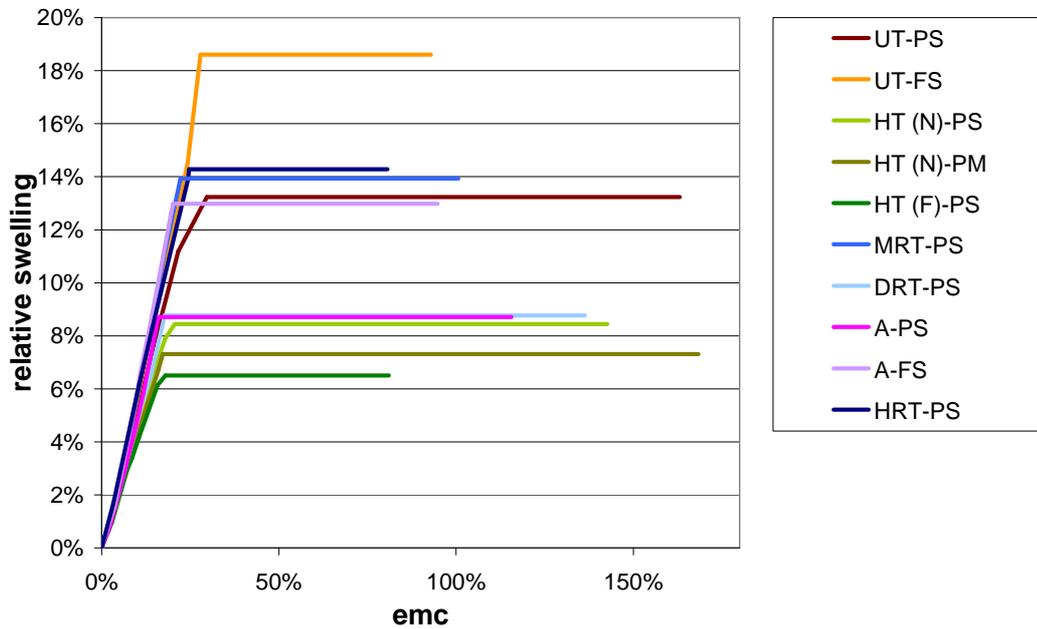


Abbildung 59: Zusammenhang zwischen Holzfeuchtigkeit (emc) und Quellung (relative swelling). Unterhalb der Fasersättigung ist das Verhältnis zwischen Holzfeuchtigkeit und Quellung annähernd linear, während oberhalb der Fasersättigung keine Quellung mehr stattfindet.

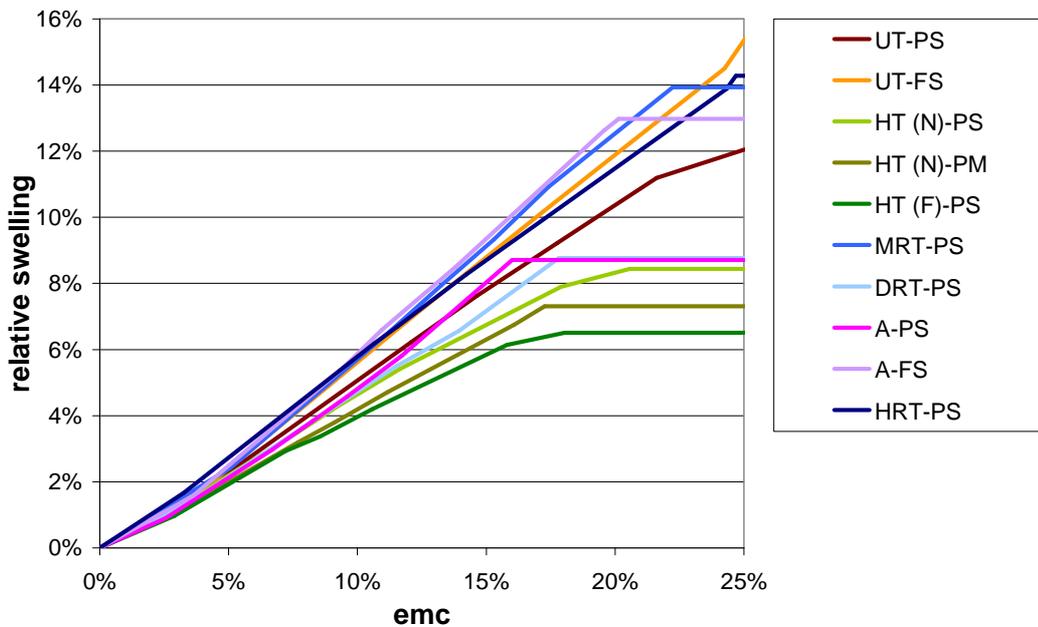


Abbildung 60: Holzfeuchtigkeit (emc) im Vergleich zur Quellung (relative swelling) unterhalb des Fasersättigungspunktes für unbehandeltes Holz. Alle Behandlungen zeigen einen ungefähr linearen Verlauf.

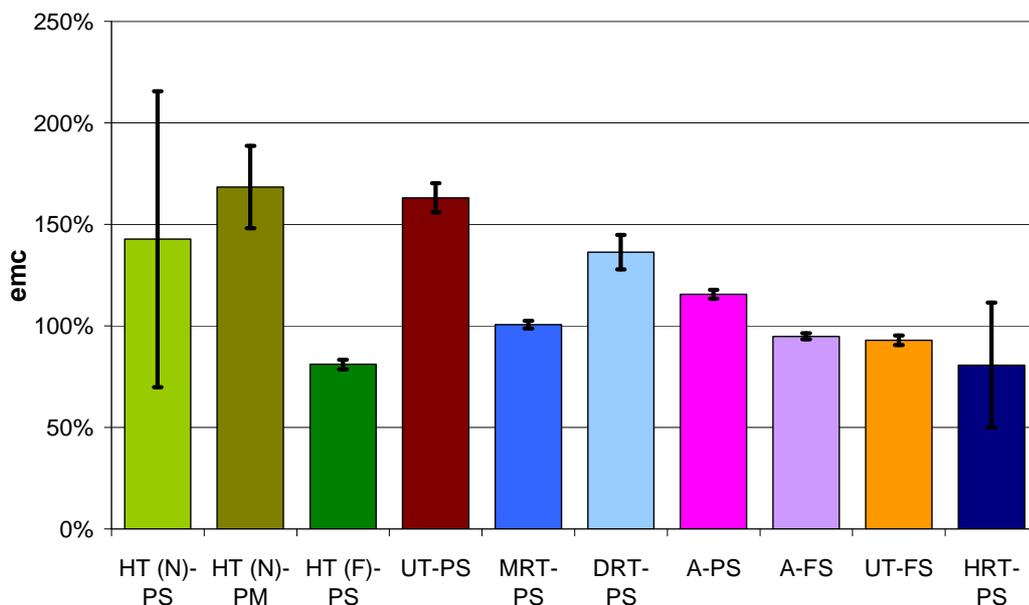
Die acetylierten Hölzer liegen im Kurvenverlauf sehr nahe an den Kurven für unbehandeltes Holz. Das legt die Vermutung nahe, dass bei diesen Behandlungen die Effekte, die zur Verbesserung des Quellens und Schwindens führen, nur durch die Reduktion der Holzfeuchtigkeit verursacht werden.

Die Kurven für die hitzebehandelten Hölzer sind nahezu linear, liegen aber unter der Kurve des unbehandelten Kiefernholzes. Der Effekt, der die Reduzierung der Quellung verursacht, ist größer als der Effekt, der für die Reduzierung der Holzfeuchtigkeit verantwortlich ist.

Mit Melaminharz und mit Wachs-Harz behandeltes Holz zeigt, dass die Reduzierung der Holzfeuchtigkeit effektiver ist als die Reduzierung der Quellung.

Deutlich zu erkennen ist ebenfalls, dass der Fasersättigungspunkt, der bei unbehandeltem Holz ungefähr bei 30 % Holzfeuchte liegt, bei den hitzebehandelten Hölzern, der acetylierten Kiefer und der Holzvernetzung auf 15 % – 20 % Holzfeuchtigkeit reduziert wurde.

In Abbildung 61 sind die maximalen Holzfeuchtigkeiten der Proben nach der Vakuumimprägnierung mit Wasser zu sehen. Diese hohe Holzfeuchtigkeit kann unter natürlichen Bedingungen normalerweise nicht erreicht werden. Es ergeben sich aber zwischen den Behandlungen sehr große Unterschiede.



**Abbildung 61:** Maximale Wasseraufnahme der Proben nach der Vakuumimprägnierung mit Wasser. Die hitzebehandelte Kiefer von Finnforest zeigte die stärkste Reduktion der Wasseraufnahme.

Weil die Dichte von hitzebehandeltem Holz geringer ist als von unbehandeltem Holz, ist für die gleiche Holzfeuchtigkeit eine geringere Menge an Wasser notwendig. Trotzdem erreichen die hitzebehandelten Hölzer bis auf die Seekiefer (HT(N)-PM) nur eine geringere prozentuale Wasseraufnahme.

Im Gegensatz dazu wird bei allen anderen Verfahren die Dichte des Holzes durch das Einbringen von Stoffen erhöht. Poren oder Lumen im Inneren des Holzes werden zusätzlich ausgefüllt, so dass eine Reduktion der Wasseraufnahme zu erwarten ist.

### 3.3.2.4 Quell- und Schwindmaß

In der folgenden Tabelle ist die Auswertung der Kennwerte für das Quellmaß aus den Versuchen zusammengestellt.

Holzart	Tangentiales Quellmaß $\alpha_{\max}$	Radiales Quellmaß $\alpha_{\max}$	Longitudinales Quellmaß $\alpha_{\max}$	Volumetrischer Quellungs- koeffizient h (33% - 90% rh)	Volumetrische differenzielle Quellung q (33% - 90% rh)
UT-PS	7,8 %	5,9 %	0,1 %	0,127 %	0,55 %
UT-FS	13,1 %	6,7 %	0,1 %	0,141 %	0,64 %
HT(N)-PS	6,2 %	2,5 %	0,0 %	0,073 %	0,48 %
HT(N)-PM	4,8 %	2,7 %	0,1 %	0,063 %	0,44 %
HT(F)-PS	4,6 %	2,0 %	0,2 %	0,057 %	0,42 %
MRT-PS	8,2 %	3,6 %	0,2 %	0,121 %	0,68 %
DRT-PS	5,4 %	3,7 %	0,2 %	0,087 %	0,50 %
HRT-PS	9,4 %	5,6 %	0,0 %	0,116 %	0,60 %
A-PS	5,2 %	3,7 %	0,0 %	0,065 %	0,52 %
A-FS	7,6 %	5,8 %	0,1 %	0,121 %	0,68 %

Das maximale Quellmaß ( $\alpha_{\max}$ ) wird zwischen darrgetrockneten und wassergesättigten Proben berechnet. Es gibt an, mit wie viel Prozent Quellung des Holzes in tangentialer, radialer und longitudinaler Richtung gerechnet werden muss.

$$\alpha_{\max} = \frac{l_w - l_0}{l_0} \%$$

$\alpha_{\max}$  = maximales Quellmaß  
(einzeln angegeben für tangential, radial und longitudinal)

$l_w$  = Länge der Probe bei Wassersättigung

$l_0$  = Länge der Probe bei 0 % Holzfeuchtigkeit

Der Quellungskoeffizient  $h$  gibt an, um wie viel Prozent das Holz quillt oder schwindet, wenn sich die relative Luftfeuchtigkeit innerhalb des angegebenen Bereiches (hier 33 % – 90 % relative Luftfeuchtigkeit) um ein Prozent ändert.

$$h = \frac{l_F - l_T}{l_0(\varphi_F - \varphi_T)} \%$$

$h$  = Quellungskoeffizient bezogen auf die volumetrische Quellung der Proben

$l_F$  = Länge der Probe bei 90 % relativer Luftfeuchtigkeit

$l_T$  = Länge der Probe bei 33 % relativer Luftfeuchtigkeit

$l_0$  = Länge der Probe bei 0 % Holzfeuchtigkeit

$\varphi_F$  = relative Luftfeuchtigkeit des feuchten Klimapunktes

$\varphi_T$  = relative Luftfeuchtigkeit des trockenen Klimapunktes

Die differentielle Quellung gibt an, um wie viel Prozent das Holz quillt oder schwindet, wenn sich die Holzfeuchtigkeit innerhalb des angegebenen Bereiches der Gleichgewichtsfeuchtigkeit um ein Prozent ändert.

Als Ausgangswert wurde hier der Bereich einer einheitlichen relativen Luftfeuchtigkeit gewählt (33 % relativer Luftfeuchtigkeit bis 90 % relativer Luftfeuchtigkeit), weil die Holzfeuchten von den Behandlungen abhängig sind und sich stark unterscheiden.

$$q = \frac{l_F - l_T}{l_0(u_F - u_T)}$$

q	=	differentielle Quellung bezogen auf das Volumen der Proben
$l_F$	=	Länge der Probe bei 90 % relativer Luftfeuchtigkeit
$u_F - u_T$	=	Gleichgewichtsfeuchtigkeit des trockenen und feuchten Bereiches
$l_T$	=	Länge der Probe bei 33 % relativer Luftfeuchtigkeit

### 3.3.2.5 Bewertung / Ausblick

Die meisten Modifizierungsarten führen zu einer Verringerung der Quellung zwischen absolut trockenem Holz und der Fasersättigung. Keine Verbesserung des Quell-/Schwindverhaltens konnte mit der Melaminbehandlung und der Wachs-Harz-Behandlung erreicht werden. Die höchste Verbesserung von ca. 50 % erreichte die hitzebehandelte Kiefer der Firma Finnforest.

Die Bewertungen für die einzelnen Modifizierungen folgen nun im Überblick:

#### 1) Hitzebehandeltes Holz

Die hitzebehandelten Hölzer erreichen eine Verbesserung von ca. 35 % – 50 % der Quellung zwischen darrtrockenem und wassergesättigtem Zustand. Innerhalb des sorptiven Bereiches zeigen alle hitzebehandelten Hölzer eine Verbesserung (ASE) von ca. 50 %. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Verfahren sind relativ gering, wobei die hitzebehandelte Kiefer von NewOptionWood die geringsten Verbesserungen zeigte, während die Kiefer von Finnforest die besten Werte erreichte.

Bei allen hitzebehandelten Hölzern ist die tangentielle Quellung weniger verbessert als die radiale Quellung. Da diese Unterschiede bis auf die Kiefer von NOW relativ gering sind, können sie für die Beurteilung der Eignung als Fensterbauholz vernachlässigt werden. Alle hitzebehandelten Hölzer zeigen eine so starke Verbesserung der Quellung, dass eine sehr hohe Eignung als Fensterbauholz in dieser Eigenschaft erwartet werden kann.

## 2) Acetyliertes Holz

Die acetylierte Kiefer zeigt wie die hitzebehandelten Hölzer eine sehr starke Reduzierung der Quellung, so dass von einer starken Verbesserung der für das Fensterbauholz wichtigen Eigenschaften ausgegangen werden kann.

Die acetylierte Buche zeigt dagegen sehr geringe Verbesserungen der Quellung und Schwindung. Die erreichte Verbesserung führt dazu, dass die acetylierte Buche in einem ähnlich großen Maß quillt und schwindet wie unbehandeltes Kiefernholz. Deshalb kann noch nicht von einer Verbesserung für den Einsatz als Fensterbauholz ausgegangen werden.

## 3) Holzvernetzung

Die mit der Holzvernetzung behandelte Kiefer zeigt ein im Durchschnitt um ca. 30 % verringertes Quellen und Schwinden. Diese erreichte Verbesserung kann noch als gute Reduzierung des Quellens betrachtet werden und lässt sich deshalb auch als Eignung für Fensterbauholz in dieser Eigenschaft ansehen. Beachtenswert ist die Reduzierung des Quellens und Schwindens, die bei höheren Luftfeuchtigkeiten (> 90 %) erreicht wird. Viele Schäden entstehen durch die Quellung des Materials in diesem Bereich.

## 4) Melaminbehandeltes Holz

Wie schon oben angeführt ist keine Reduzierung der Quellung an dem hier untersuchten Holz zwischen darrgetrocknetem und wassergesättigtem Holz messbar. Allerdings findet eine Reduzierung der Quellung im Bereich hoher Luftfeuchtigkeit statt.

## 5) Wachs-Harz-Behandlung

Die Untersuchungen der Wachs-Harz-behandelten Proben zeigen keine Reduzierung der Quellung und Schwindung. Es wird aber die Geschwindigkeit der Quellung reduziert, so dass eventuell unter Praxisbedingungen eine Verbesserung gegenüber unbehandeltem Holz zu erwarten ist.

### 3.3.3 Verhalten gegenüber Feuchtigkeit und Wasser

Die Ergebnisse aus den Versuchen sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

1.0	Vergütung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Holzvernetzung mit DMDHEU	Melamin-Behandlung	Wachs-/Harz-Imprägnierung	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	unbehandelt	unbehandelt	unbehandelt
1.1	Hersteller	New Option Wood	New Option Wood	Finn-forest	Uni Göttingen	Solutia	Tilo	SHR - Merk	SHR - Merk			
1.2	Allgemeine Bezeichnung	NOW	NOW	Thermoholz			Natwood	Acetylierung	Acetylierung			
<b>2.0 Wirkprinzipien und Farbkennzeichnung der Vergütungsverfahren im Projekt</b>												
2.1	Lumenfüllung											
2.2	Zellwandfüllung											
2.3	Hydroxylgruppen-Reaktion											
2.4	Hydroxylgruppen-Vernetzung											
2.5	Zellwandstrukturänderung											
2.6	unbehandelt											
<b>3.0 Holzarten im Forschungsprojekt</b>												
3.1	Lateinische Bezeichnung	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus pinaster</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Pinus sylvestris</i>
3.2	Allgemeine Bezeichnung	Kiefer	See-Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Buche	Kiefer	Buche	Fichte	Kiefer
3.3	Kurzzeichen	HT(N)-PS	HT(N)-PM	HT(F)-PS	DRT-PS	MRT-PS	HRT-PS	A-FS	A-PS	UT-FS	UT-PA	UT-PS
<b>4.0 Wasseraufnahmekoeffizient w kg/(m<sup>2</sup>h<sup>0,5</sup>)</b>												
4.1	in Faserrichtung	0,13 - 0,35	6,60 - 7,50	0,30 - 0,70	0,50 - 1,05	0,47 - 2,20	0,18	2,80 - 5,10	3,40 - 3,80	1,20	0,70 - 1,80	1,80 - 6,90
4.2	quer zur Faser	0,08 - 0,13	1,00 - 1,50	0,20 - 0,10	0,11 - 0,30	0,26 - 0,35	0,04 - 0,07	0,25 - 3,80	1,10	0,18	0,16 - 0,21	0,13 - 2,53
<b>5.0 Wasserdampfdiffusionswiderstand μ</b>												
5.1	Mittelwert	100	32	225	47	47	78	70	145	40	55	45
<b>6.0 Dauerhaftigkeitsklassen in Anlehnung an DIN EN 350-2</b>												
6.1	Mittelwert	1	1	1	1	1	2 - 3	3	1 - 2	?	?	?
<b>7.0 Holzgleichsfeuchte (emc) in % bezogen auf das Darrgewicht für die relative Luftfeuchte</b>												
7.1	rel. Luftf. 100%	20,6	17,3	18,0	17,7	22,3	24,5	20,0	16,1	27,5	30,0	29,5
7.2	90%	11,7	11,2	10,6	14,0	15,4	14,2	13,6	9,6	17,5		18,2
7.3	30%	2,9	2,9	2,9	3,4	4,6	2,9	3,4	2,4	4,1		4,8
8.0	Quellung	Die Betrachtungen zur Quellung des Holzes beziehen sich nicht wie üblich auf die Änderung der Holzfeuchte, sondern auf die Änderung der Luftfeuchte, da sich die Holzgleichsfeuchte der untersuchten Hölzer stark unterscheidet und deshalb im konkreten Anwendungsfall die Änderung der Luftfeuchte für die Beurteilung des Verhaltens des Holzes herangezogen werden muss.										

1.0	Vergütung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Holzvernetzung mit DMDHEU	Melamin-Behandlung	Wachs-/Harz-Imprägnierung	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	unbehandelt	unbehandelt	unbehandelt
8.1	<b>Volumenquellung in % für die relative Luftfeuchte</b> (Quellung bezieht sich auf die Luftfeuchte von 0%) swelling-v / Sv											
	rel. Luftf. 100%	8,4	7,3	6,5	8,7	13,9	14,3	13,0	8,7	18,4		13,5
	90%	5,4	4,7	4,2	6,5	9,3	8,3	8,7	4,8	10,2		9,2
	30%	1,0	1,0	0,9	1,4	2,2	1,4	1,5	1,0	2,0		2,1
8.2	<b>Tangentiale Quellung in % für die relative Luftfeuchte</b> swelling-t / St $S_v = (1+St)*(1+Sr)-1$ mit St   Sr   Sl = 20   10   1											
	rel. Luftf. 100%	5,5	4,8	4,3	5,7	9,0	9,2	8,4	5,7	11,8		8,7
	90%	3,6	3,1	2,8	4,3	6,1	5,4	5,7	3,2	6,7		6,0
	30%	0,7	0,6	0,6	0,9	1,5	0,9	1,0	0,7	1,3		1,4
8.3	<b>Radiale Quellung in % für die relative Luftfeuchte</b> swelling-r / Sr $S_v = (1+St)*(1+Sr)-1$ mit St   Sr   Sl = 20   10   1											
	rel. Luftf. 100%	2,7	2,4	2,1	2,8	4,5	4,6	4,2	2,8	5,9		4,4
	90%	1,8	1,6	1,4	2,1	3,0	2,7	2,8	1,6	3,3		3,0
	30%	0,3	0,3	0,3	0,5	0,7	0,5	0,5	0,3	0,7		0,7
8.4	<b>Longitudinale Quellung in % für die relative Luftfeuchte</b> swelling-l / Sl $S_v = (1+St)*(1+Sr)-1$ mit St   Sr   Sl = 20   10   1											
	rel. Luftf. 100%	0,0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1		0,1
8.5	<b>Differentielle Quellung tangential in % bei Änderung der Luftfeuchte um 1 % für Bereiche der Luftfeuchte von</b>											
	90% bis 100%	0,19	0,17	0,15	0,14	0,29	0,38	0,27	0,25	0,51		0,27
	30% bis 90%	0,05	0,04	0,04	0,06	0,08	0,08	0,08	0,04	0,09		0,08
	0% bis 30%	0,02	0,02	0,02	0,03	0,05	0,03	0,03	0,02	0,04		0,05
8.6	<b>Differentielle Quellung radial in % bei Änderung der Luftfeuchte um 1 % für Bereiche der Luftfeuchte von</b>											
	90% bis 100%	0,05	0,04	0,04	0,04	0,07	0,10	0,07	0,06	0,13		0,07
	30% bis 90%	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,02	0,04		0,04
	0% bis 30%	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02		0,02

Tabelle 9: Zusammenstellung des Verhaltens gegenüber Feuchtigkeit und Wasser

a) Zeile 1.0 bis 3.0 - Vergütungsverfahren / Kennzeichnung

Im Kopf der Tabelle 9 werden die im Projekt untersuchten Vergütungsverfahren angeführt und auf die Wirkprinzipien, mit denen die Vergütung erreicht wird, verwiesen. Die Wirkprinzipien selbst sind im Kapitel 2.1 des Berichts beschrieben und den Vergütungsverfahren mit dem Hinweis zugeordnet, dass in den Vergütungsverfahren in der Regel verschiedene Prinzipien wirksam sind. Weiter sind die Kurzzeichen der Proben, die für die Darstellung der Einzelergebnisse verwendet wurden, nochmals angeführt.

#### b) Zeile 4.0 - Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahme des Holzes wird durch den Wasseraufnahmekoeffizienten  $w$  ( $\text{kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$ ) beschrieben. Untersucht wurde die Wasseraufnahme in Faserrichtung und quer zur Faserrichtung, wobei die Wasseraufnahme in Faserrichtung das über das Hirnholz aufgenommene Wasser beschreibt. Die ermittelten Wasseraufnahmekoeffizienten lassen eine Ordnung mit Zuweisung nach Holzart oder Vergütungsverfahren nicht erkennen. Die große Bandbreite der ermittelten Werte weist darauf hin, dass ein Teil des Holzes durch Pilze und Bakterien vorgeschädigt war. Dies wurde durch Nachversuche mit ausgewählten Proben bestätigt und das Verhältnis der Wasseraufnahmekoeffizienten zwischen nicht geschädigtem und vorgeschädigtem Holz mit bis zu 1:10 ermittelt.

Durch die Holzvergütung wird die Wasseraufnahme nur bei den Verfahren, bei denen die Lumen gefüllt werden, verringert. Bei allen übrigen Vergütungsverfahren wurden gesicherte Unterschiede zwischen behandelten und unbehandelten Proben nicht festgestellt.

In Einzelfällen zeigten sich bei der Versuchsdurchführung als Ursache für die erhöhte Wasseraufnahme Mikrorisse im Holz.

Da für die Versuche keine ausgewählten Probekörper in Laborabmessungen verwendet wurden, sondern Querschnitte, wie sie im Fenster- und Fassadenbau zur Anwendung kamen, geben die Ergebnisse die Erwartung bei der praktischen Anwendung des Holzes wieder. Dies gilt sowohl für vergütetes als auch für unbehandeltes Holz.

Die hohe Wasseraufnahme weist auch auf die Gefahr starker partieller Durchfeuchtungen an Fenstern im Außenbereich hin.

#### c) Zeile 5.0 - Wasserdampfdiffusion

Die Wasserdampfdiffusion wird durch den Wasserdampfdiffusionswiderstand  $\mu$  beschrieben.

Die Versuche zeigten, dass alle behandelten Hölzer eine Wasserdampfdiffusion zulassen, wobei durch einige Verfahren die Wasserdampfdiffusion im Vergleich zu unbehandeltem Holz erheblich reduziert wird.

d) Zeile 6.0 - Dauerhaftigkeitsklassen

Die Dauerhaftigkeit des Holzes wird in DIN EN 350-2 nach Dauerhaftigkeitsklassen beurteilt. Die vorliegenden Ergebnisse lassen nur eine vorläufige Abschätzung zu. Für eine fundierte Bewertung der Dauerhaftigkeit und damit für die Aussage, in welchem Umfang vergütetes Holz zeitlich begrenzte kritische Situationen ohne Schaden für das Bauteil überbrücken kann, sind weitere Versuche notwendig.

Ungeachtet der noch offenen Fragen ist aber die Aussage zulässig, dass die Dauerhaftigkeit des Holzes bei allen einbezogenen Vergütungsverfahren verbessert wird.

e) Zeile 7.0 - Holzgleichsfeuchte

Die Holzgleichsfeuchte beschreibt den Feuchtigkeitsgehalt des Holzes, bezogen auf das Darrgewicht, der sich bei einem bestimmten Umgebungsklima einstellt. Vereinfachend wird für die praktischen Anwendung unterstellt, dass der Zusammenhang zwischen Holzfeuchte und Klima für die im Bauwesen eingesetzten Holzarten annähernd gleich ist.

In Verbindung mit vergütetem Holz kann diese Vereinfachung nicht gemacht werden, da sich die Holzgleichsfeuchte sowohl zwischen den Vergütungsverfahren als auch im Vergleich zu unbehandeltem Holz wesentlich unterscheidet (Abbildung 62).

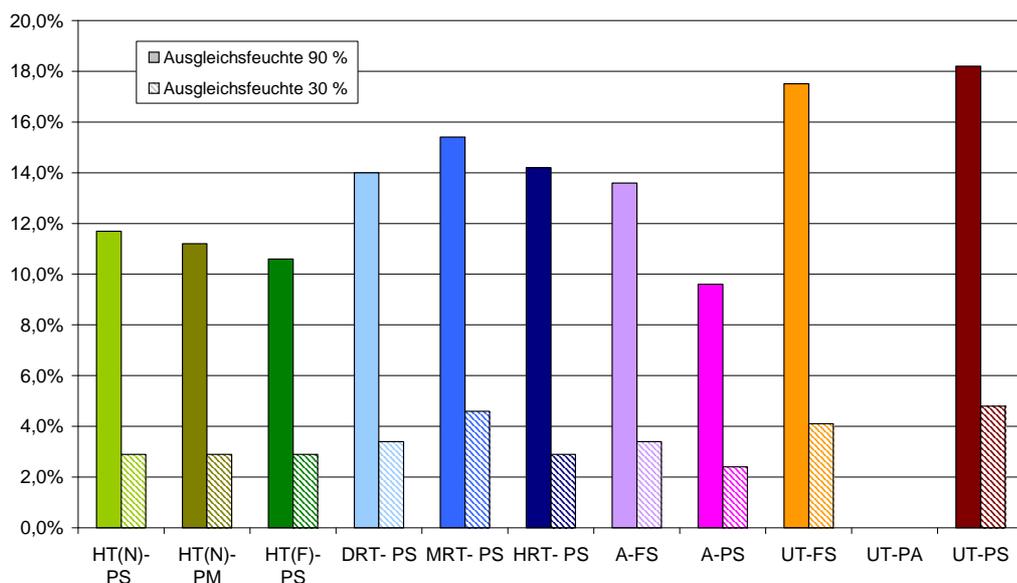


Abbildung 62: Holzgleichsfeuchte der untersuchten Hölzer für die relative Luftfeuchte von 90 % und von 30 % des Umgebungsklimas

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit für jedes Vergütungsverfahren, eine eigene Verknüpfung zwischen der Holzgleichsfeuchte und dem Umgebungsklima zu definieren.

#### f) Zeile 8.0 - Quellung

Das im Zusammenhang mit dem Projekt wesentliche Ziel, die Verringerung des Quellens und Schwindens durch die Holzvergütung, wurde bestätigt. Die Verringerung ist im Vergleich der Vergütungsverfahren unterschiedlich. Wobei in der Bewertung der Ergebnisse zu unterscheiden ist in eine

- ⇒ Verringerung der Quellung, z. B. bei Verfahren mit Veränderungen in der Zellwand,
- ⇒ Verzögerung der Quellung, z. B. bei Verfahren mit Lumenfüllung.

Bei Verfahren mit ausschließlicher Verzögerung der Feuchteaufnahme wird zeitlich verzögert eine dem unbehandelten Holz vergleichbare Quellung erreicht. Inwieweit diese Verzögerung in der praktischen Anwendung ausreicht, um die Fenster und Fassaden nachhaltig zu verbessern, ist in Verbindung mit der Konstruktion und den äußeren Einwirkungen zu klären.

Bei der Holzgleichsfeuchte wurde bereits darauf hingewiesen, dass im praktischen Anwendungsfall eine direkte Verknüpfung zwischen der zu erwartenden Veränderung durch Quellen oder Schwinden und dem Umgebungsklima notwendig ist.

Der bisherige Weg über die Holzgleichfeuchte ist bei vergütetem Holz nicht zielführend, da der Zusammenhang zwischen Quellung und Holzgleichfeuchtigkeit zwischen den verschiedenen Vergütungsverfahren sehr unterschiedlich ist. Der planmäßige Bereich der Luftfeuchte des Umgebungsklimas kann dabei in den Grenzen von 30 bis 90 % angenommen werden. Die differentiellen Quellungskoeffizienten sind für die tangentielle und die radiale Quellung in Abbildung 63 dargestellt.

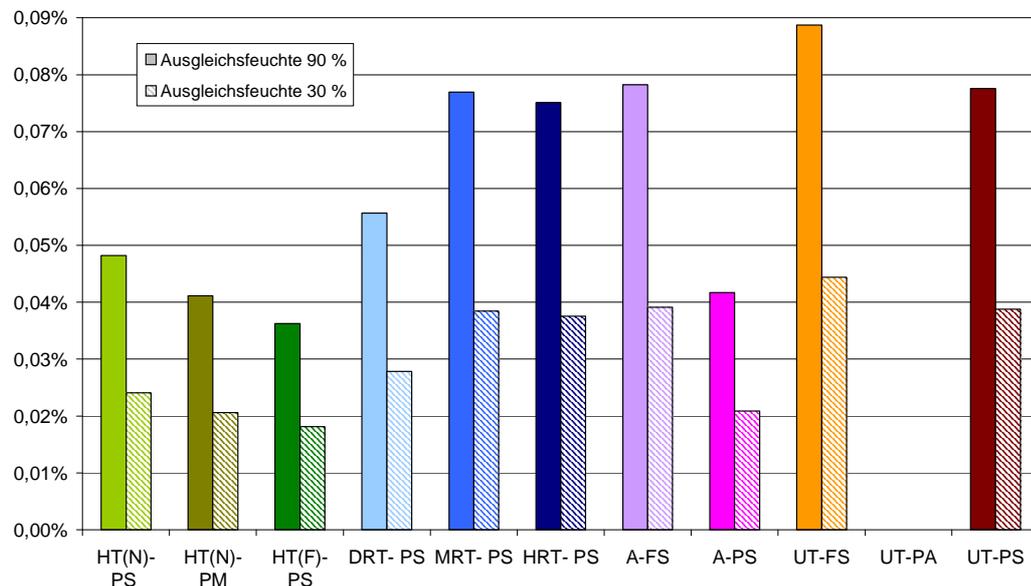


Abbildung 63: Koeffizienten der differentiellen Quellung tangential und radial für den Bereich der Luftfeuchte des Umgebungsclimas von 30 bis 90 %

#### g) Qualität der Vergütung

Durch die Festlegung der Proben in Abmessungen, wie sie auch im Fenster- und Fassadenbau üblich sind, und ohne eine besondere Auswahl, gab die Qualität der Vergütung ein Bild, wie es auch in der praktischen Anwendung zu erwarten ist.

Diese Erkenntnis kann wie folgt zusammengefasst werden:

- ⇒ Die Auswahl des unbehandelten Holzes bestimmt auch die Qualität des vergüteten Holzes.
- ⇒ Ein durch Mikroorganismen vorgeschädigtes Holz wird in seinem Verhalten gegenüber Feuchtigkeit durch die Vergütung nicht verbessert.
- ⇒ Die Vergütungsprozesse werden nicht mit der notwendigen Sicherheit geführt, so dass mit Qualitätsschwankungen in den angestrebten Eigenschaften gerechnet werden muss.

## 3.4 Mechanische Eigenschaften

### 3.4.1 Allgemeines

Aus einer Vielzahl der Anwendungen von Holz liegen die Erfahrungen vor, dass sich die mechanischen Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen verändern, wenn physikalische und/oder chemische Einflüsse einwirken. Solche Einflüsse können z. B. erhöhte Temperatur, Druck, Unterschiede in der Luftfeuchtigkeit oder Einwirkungen von Flüssigkeiten oder der Beschichtungen sein. Derartige Einwirkungen treten z. B. kurzfristig im Zuge der Bearbeitung oder langfristig während der Nutzungsdauer von Bauteilen auf.

Die genannten Einwirkungen werden zum Teil auch bei den im Rahmen des Projektes untersuchten Vergütungsverfahren wirksam, so dass mit einer Veränderung von Eigenschaften gerechnet werden muss.

Die veröffentlichten Informationen über Auswirkungen auf vergütete Hölzer sind nicht immer abgesichert. Damit fehlt die Grundlage für den Konstrukteur und für den Planer bei der Anwendung von vergütetem Holz

Daher ist es von erheblicher Bedeutung, eventuell mögliche Folgeerscheinungen der Parameter, die während der Modifikationsprozesse auf die Hölzer einwirken, zu überprüfen. Denn gerade bei Fenstern und Fassaden werden Holzteile in unterschiedlichster Weise - vor allem auch mechanisch - beansprucht.

Beispielsweise

- ⇒ tragen sie einerseits ihr Eigengewicht und andererseits die Massen von Zwei- oder Dreischeiben-Isolierverglasungen.
- ⇒ halten sie über Schrauben und Nägel die Beschlagteile bzw. Glashalteleisten.
- ⇒ werden Verblendungsteile/-systeme an den Hauptprofilen befestigt.
- ⇒ sind sie durch Verbindungsmittel im Baukörper verankert.
- ⇒ unterliegen sie bei der Nutzung schlagartig auftretenden Beanspruchungen.

Im Hinblick auf derartige Beanspruchungen müssen eventuell auftretende Veränderungen der mechanischen Eigenschaften ermittelt und bei der künftigen Verwendung berücksichtigt werden.

### **3.4.2 Ziel**

Im Rahmen des Projekts ist deshalb durch Versuche zu ermitteln, welche Veränderungen der mechanischen Eigenschaften durch die Vergütung des Holzes zu erwarten sind. Die möglichen Veränderungen sind an ausgewählten Holzarten für die festgelegten Vergütungsverfahren zu untersuchen.

Da die Probekörper aus Holzabmessungen hergestellt werden, wie sie im Fensterbau zur Anwendung kommen, ist auch zu erwarten, dass die Streuungen die spätere Praxis abbilden.

Es ist nicht das Ziel, im Rahmen des Projekts gesicherte und für den Nachweis der Standsicherheit von tragenden Bauteile geeignete Werte der mechanischen Eigenschaften zu ermitteln. Die gewonnenen Erkenntnisse sind als Grundlage für weitere Betrachtungen zu werten.

### **3.4.3 Aufbau und Durchführung der Versuche**

Für die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften bzw. ihrer Veränderungen gegenüber denen von unbehandelten Hölzern werden die einschlägig bekannten DIN-Prüfungen zu Grunde gelegt.

Voraussetzung für die vorgesehenen Untersuchungen bzw. die Anwendung der DIN-Prüfungen ist es zunächst, dass sich die aus unterschiedlichen Herkünften stammenden Probekörper in einem gleichmäßigen Zustand befinden. Deshalb wurden die angelieferten Hölzer zunächst in einem Klimaraum mit dem Normal-klima 20/65 (= 20°C und 65 % relative Luftfeuchtigkeit) eingelagert.

Bei der Klimalagerung stellte sich heraus, dass die modifizierten Hölzer teilweise außerordentlich träge auf das vorgegebene Normalklima reagierten und sich nur sehr langsam anpassten. Bei einem Teil der angelieferten Hölzer war selbst nach dreimonatiger Lagerung im Klimaraum noch immer kein stabiler Zustand erreicht.

Im Rahmen der Untersuchung der mechanischen Eigenschaften wurden die in der nachfolgenden Tabelle genannten Prüfverfahren zu Grunde gelegt.

Nr.	Eigenschaft	Grundlage der Prüfung
1	Biegefestigkeit/E-Modul	DIN 52186
2	Druckfestigkeit (in Faserrichtung)	DIN 52185
3	Bruchschlagarbeit	DIN 52189
4	Oberflächen-/Brinellhärte	EN 1534

Tabelle 10 Verfahren zur Prüfung der mechanischen Eigenschaften



Abbildung 64: Durchführung der Prüfungen an einer Zwick-Universalprüfmaschine Typ 1485

#### 3.4.4 Ergebnisse aus den Versuchen

Für die Prüfungen wurden jeweils zwölf Prüfkörper erstellt. Bei der Auswertung der Versuche wurde jeweils der Wert der „schlechtesten“ und der „besten“ Probe unberücksichtigt gelassen.

#### 3.4.4.1 Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit

Während bei der Prüfung der Biegefestigkeit das Material bis zum Bruch – also bis zur Überbelastung – beansprucht wird, gibt der Elastizitätsmodul an, wie viel Steifigkeit es einer mechanischer Beanspruchung im elastischen Bereich entgegensezt. Die Bestimmung des Elastizitätsmoduls erfolgte im Biegeversuch.

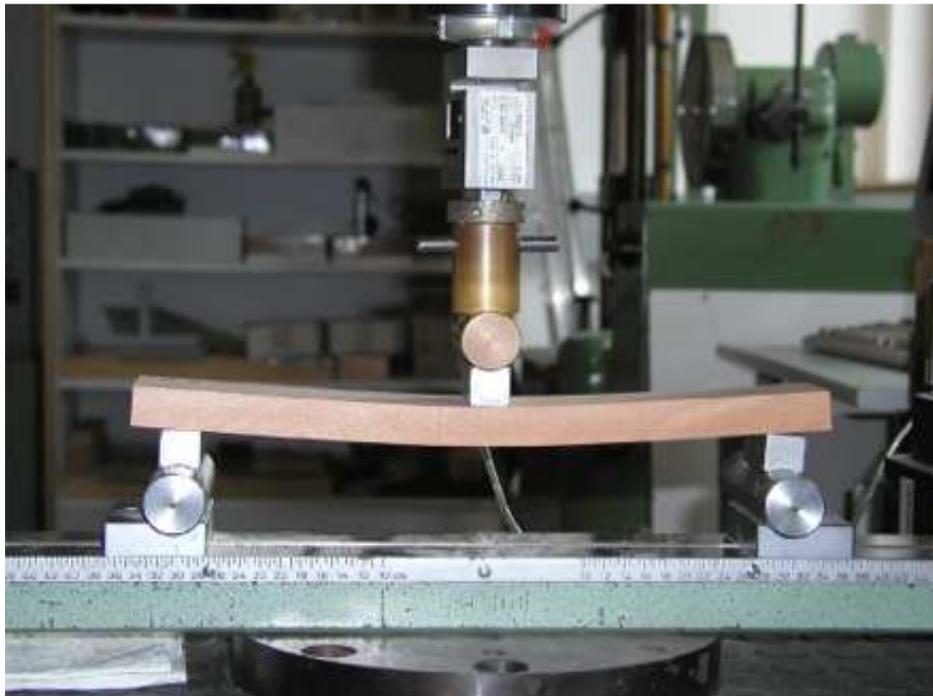


Abbildung 65: Eingespannte Probe zur Ermittlung der Biegefestigkeit / des Elastizitätsmoduls

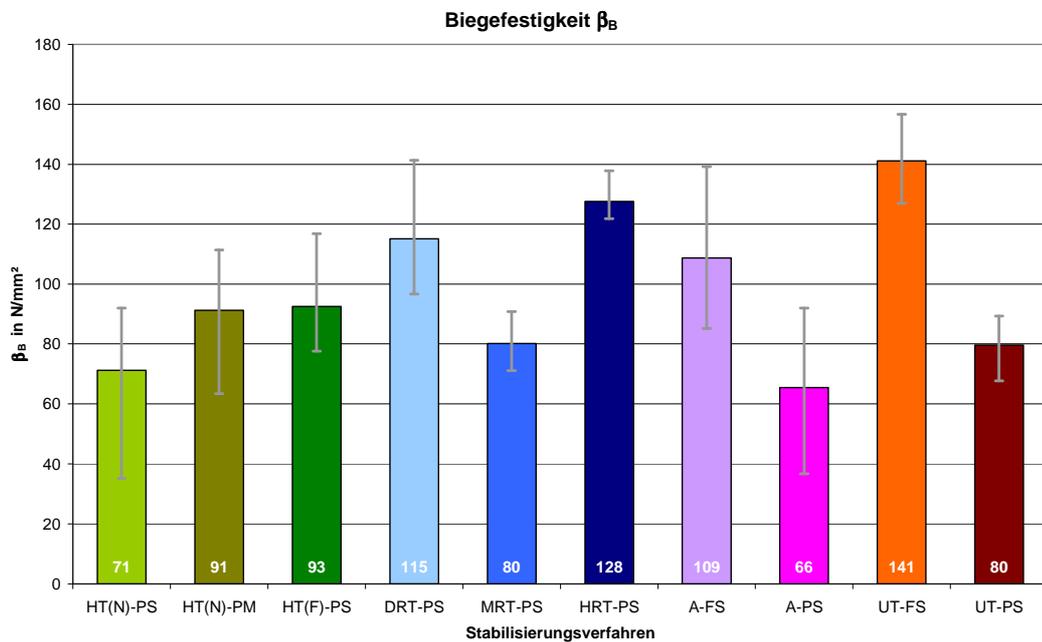
Die hitzebehandelten Hölzer weisen bei der Ermittlung der Biegefestigkeit so charakteristische Bruchbilder wie in Abbildung 66 auf.

Trotz dieses Bruchbildes lassen sich jedoch keine signifikanten Einflüsse der Vergütungsverfahren auf die Biegefestigkeit erkennen. Um eventuell in geringem Umfang vorliegende Unterschiede ermitteln zu können, müsste mit einem Vielfachen des vorhandenen Probenumfangs – mindestens 100 statt der vorhandenen 10 Parallelproben – gearbeitet werden.

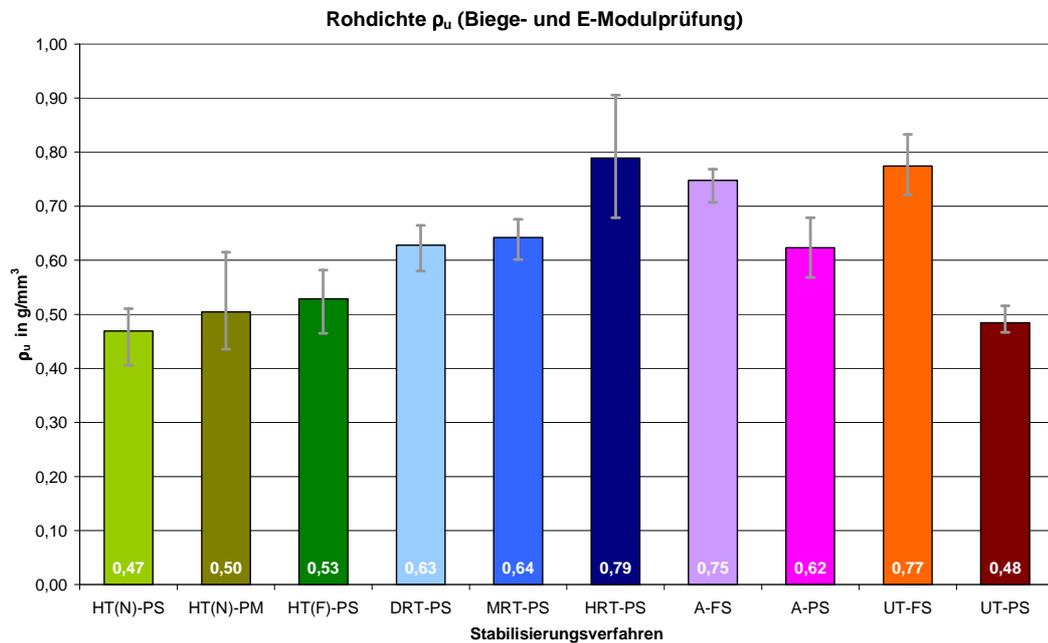
Jedoch ist festzustellen, dass die ermittelten Werte in recht guter Übereinstimmung den gemessenen Rohdichtewerten folgen.



**Abbildung 66:** Typisches Bruchbild bei der Ermittlung der Biegefestigkeit  
Deutlich erkennbar sind der charakteristisch kurzfasrige Bruch und die ausgeprägten Querbrüche des Holzes.



**Abbildung 67:** Grafische Darstellung der Veränderung der Biegefestigkeit von behandeltem Holz im Vergleich zu unbehandeltem Holz



**Abbildung 68:** Grafische Darstellung der Rohdichte der Proben, die für Biegefestigkeits- und Elastizitätsmoduluntersuchung eingesetzt wurden.

Der Elastizitätsmodul ist die signifikante Größe, nach der Bauholz und Lamellen von Brettschichtholz sortiert werden. Die in DIN 4074-1 „Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit“ definierten Sortierklassen beziehen sich auf den Elastizitätsmodul parallel zur Faser. Beispielsweise führt der Elastizitätsmodul von Fichte/Kiefer/Tanne von 10.000 N/mm<sup>2</sup> (DIN 1052-1/A 1) direkt zur Sortierklasse S 10.

Insofern würden bei der Zulassung behandelter Hölzer für tragende und aussteifende Bauteile die in umfangreichen Versuchsreihen zu ermittelnden Elastizitätsmoduln zu Grunde gelegt. Mit dem geringen zur Verfügung stehenden Probenumfang konnten nur Anhaltswerte ermittelt werden.

Die für die Sortierklasse S 10 geforderten Werte wurden bei allen Proben (Mittelwert) erreicht bzw. nahezu erreicht.

Grundsätzlich folgen die ermittelten Werte den jeweils vorliegenden Rohdichten. Dies unterstreicht die Ergebnisse der Biegefestigkeitsprüfung, die einen deutlichen Zusammenhang zwischen den festgestellten Werten und der Rohdichte aufzeigten.

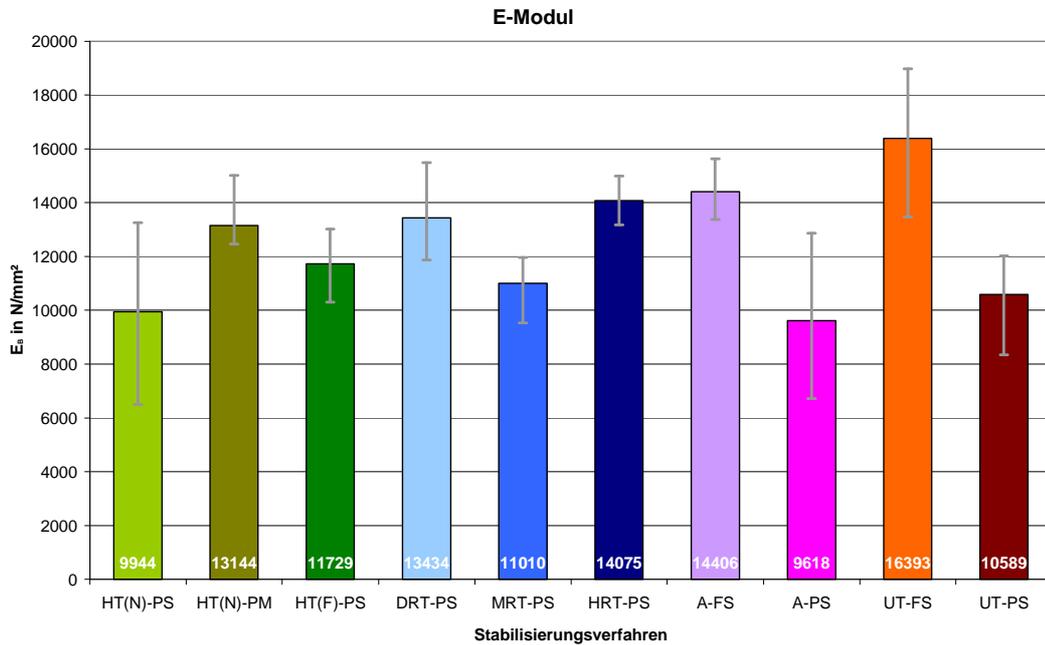


Abbildung 69: Grafische Darstellung der Veränderung des Elastizitätsmoduls von behandeltem Holz im Vergleich zu unbehandeltem Holz

#### 3.4.4.2 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit gibt an, mit welcher maximalen Druckspannung ein Körper belastbar ist.

Probekörper werden in Faserrichtung belastet; meist treten kaum erkennbare Scherbrüche auf. Das in Abbildung 70 dokumentierte seitliche Ausknicken der Faser trat nur bei acetylierter Kiefer auf.

Die festgestellten Bruchbilder (Gleitbruch) bei den anderen modifizierten Hölzern zeigten keine Unterschiede zu unbehandelten Hölzern.

Signifikante Veränderungen der Festigkeitswerte zwischen behandelten und unbehandelten Hölzern konnten nicht festgestellt werden. Die ermittelten Werte für die unterschiedlich behandelten Hölzer zeigen jedoch starke Schwankungen der Druckfestigkeitswerte innerhalb der jeweiligen Probenserie auf.

Ein deutlicher Zusammenhang besteht zwischen den ermittelten Druckfestigkeits- und den gemessenen Rohdichtewerten.

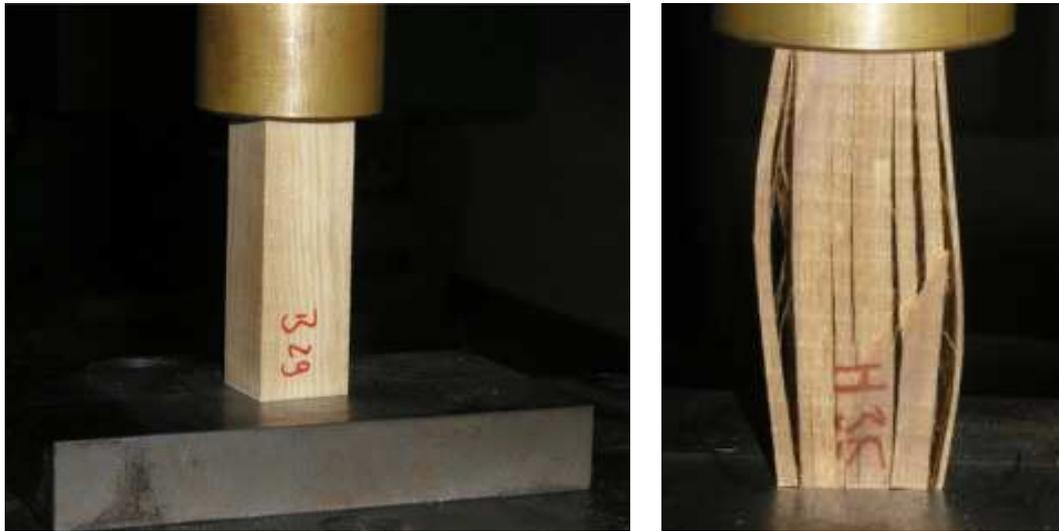


Abbildung 70: Eingespannte Probe zur Ermittlung der Druckfestigkeit (links)  
Spaltbruch bei acetylierter Kiefer; untypisches seitliches Ausknicken der Faser unter Druckbelastung parallel zur Faser (rechts)

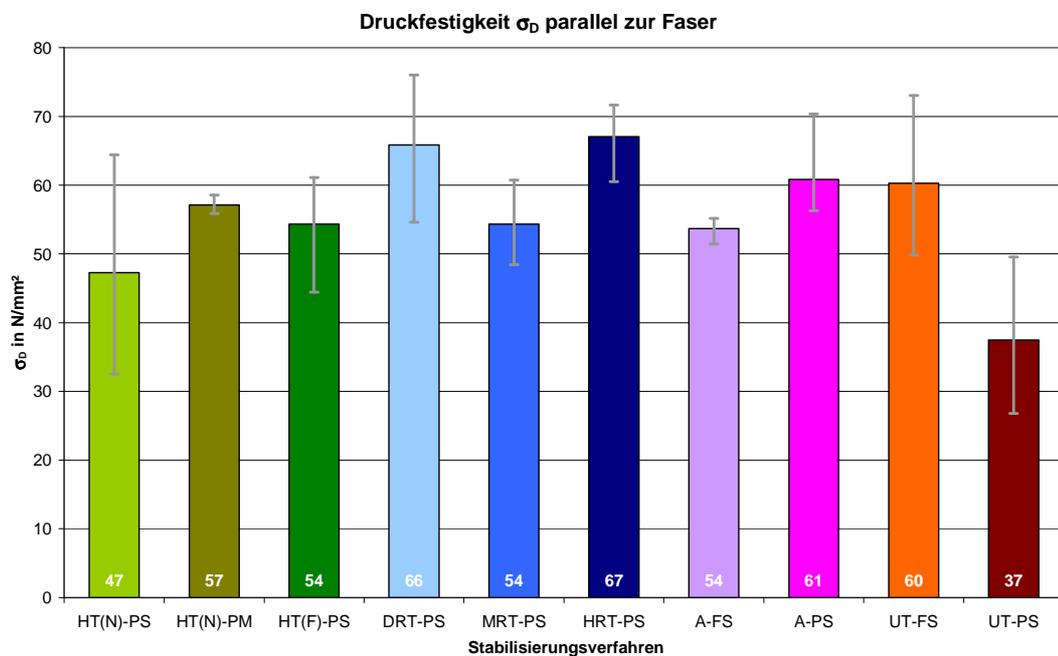
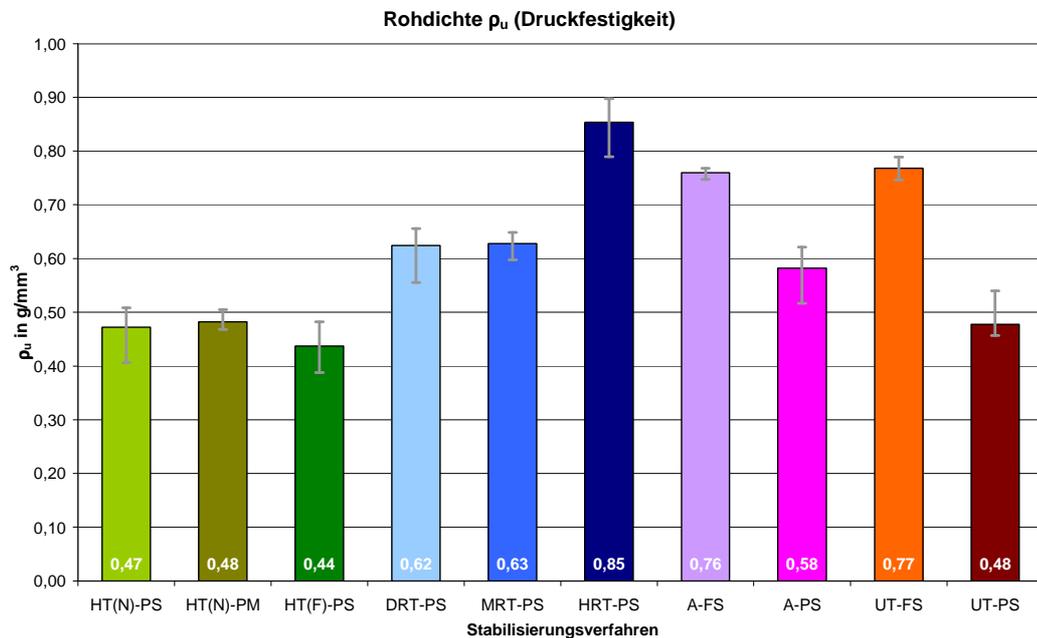


Abbildung 71: Grafische Darstellung der Veränderung der Druckfestigkeit von behandeltem Holz im Vergleich zu unbehandeltem Holz



**Abbildung 72:** Grafische Darstellung der Rohdichte der Proben, die für Druckfestigkeitsuntersuchung eingesetzt wurden.

#### 3.4.4.3 Bruchschlagarbeit

Die Bruchschlagarbeit ist die signifikante Kenngröße für das Verhalten von Materialien bei spontan auftretenden Kräften bzw. bei schlagartiger Beanspruchung. Die Prüfung erfolgt an stabförmigen, also schlanken Probekörpern. Im Hinblick auf die Formgebung von Fensterhölzern/-rahmenprofilen ist dies ebenso von besonderer Bedeutung, wie die spontan auftretenden Kräfte – vergleichbar beim Zuschlagen eines Fensterflügels, z. B. beim Auftreten von Zugluft.

Abbildung 74 zeigt, dass bei der Bruchschlagarbeit ein besonderer Einfluss der Holzbehandlung auf die ermittelten Festigkeiten vorliegt. Die Fasern, insbesondere in der Außenschicht, reißen praktisch im 90°-Winkel zur Längsachse ab.

Die ermittelten Werte sind in Abbildung 75 zusammenfassend dargestellt. Sie zeigen sehr deutlich, dass die Bruchschlagarbeit die elastomechanische Eigenschaft ist, die durch die unterschiedlichen Behandlungsverfahren am stärksten beeinträchtigt wird.



Abbildung 73: Eingelegter Probestab zur Ermittlung der Bruchschlagarbeit

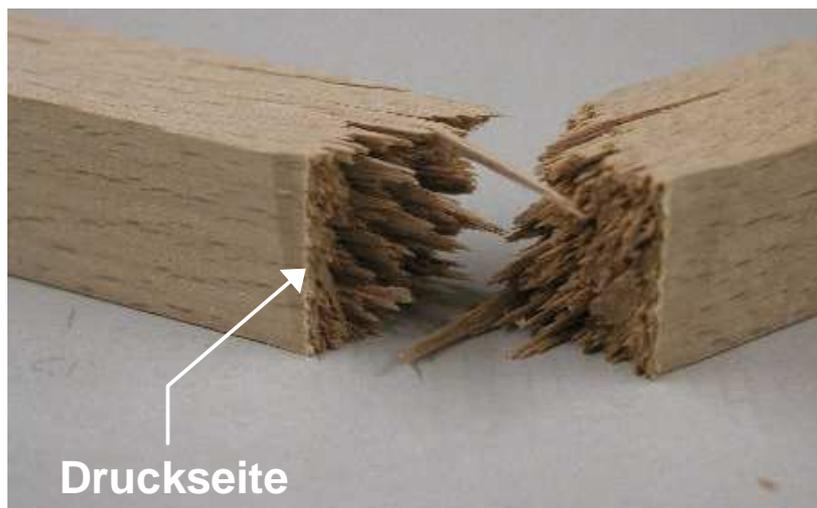
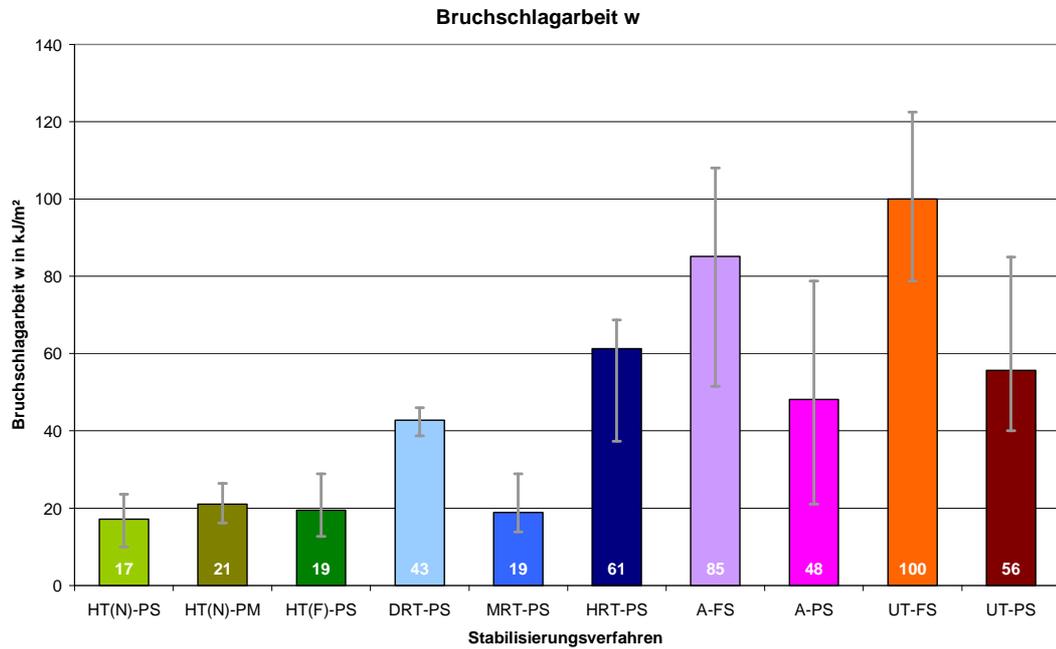
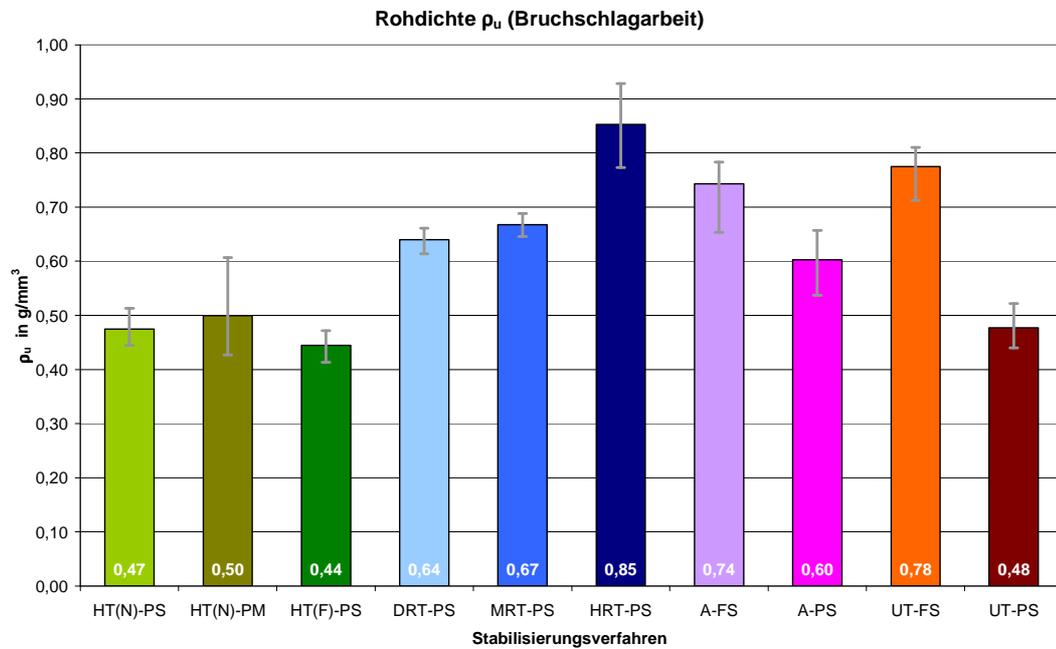


Abbildung 74: Typisches Bruchbild bei der Ermittlung der Bruchschlagarbeit  
Deutlich erkennbar sind der charakteristische, extrem kurzfasrige Bruch und die ausgeprägten Querbrüche des Holzes.



**Abbildung 75:** Grafische Darstellung der Veränderung der Bruchschlagarbeit von behandeltem Holz im Vergleich zu unbehandeltem Holz



**Abbildung 76:** Grafische Darstellung der Rohdichte der Proben, die für Bruchschlagarbeitsuntersuchung eingesetzt wurden.

Gegenüber den unbehandelten Hölzern zeigen die modifizierten Hölzer deutlich reduzierte Werte. Vor allem bei den hitze- und melaminbehandelten Kiefernproben sind signifikante Einbußen von deutlich über 50 % gegenüber unbehandelten Hölzern festzustellen.

Bekanntermaßen steigt der Wert der Bruchschlagarbeit innerhalb einer Holzart mit der Rohdichte an. Wenn jedoch die Höhe der Rohdichte bei modifizierten Hölzern nicht auf die Wuchseigenschaften, sondern auf die Art der Behandlung zurückzuführen ist – z. B. abnehmende Rohdichte bei Hitzebehandlung und zunehmende bei der Beladung mit Wachs oder Harz –, dann gilt die Korrelation Bruchschlagarbeit-Rohdichte jedoch nicht.

#### 3.4.4.4 Oberflächen-/Brinellhärte

Die Härte von Materialien wird mit sehr unterschiedlichen Prüfmethoden ermittelt. Im deutschsprachigen Raum wird die sogenannte „Härte nach Brinell“ bevorzugt. Dabei wird eine Stahlkugel von z. B. 10 mm Durchmesser mit einer vorgegebenen Kraft in das Material/Holz gedrückt. Über den mittleren Durchmesser des Eindruckes im Holz lässt sich die Eindruckfläche errechnen und daraus die Brinellhärte bestimmen.

Die Frage nach prozessbedingten Veränderungen der Oberflächenhärte ist beispielsweise bei Fenster- und Fassadenhölzern von Bedeutung, die in hagelgefährdeten Gebieten eingesetzt werden.

Die statistisch nachgewiesene, zunehmende Häufigkeit von Hagelereignissen mit größeren Hagelkörnern spielt einerseits bei der Holzverwendung generell eine Rolle und andererseits auch bei versicherungstechnischen Fragen.

Gebäude bzw. Bauteile mit hohem Hagelschadenrisiko führen entweder zu höheren Versicherungsprämien oder – im bereits aufgetretenen Extremfall – dazu, dass eine Versicherung den Kunden/das Risiko ablehnt oder bestehende Verträge kündigt.



Abbildung 77: Eingelegter Probekörper zur Ermittlung der Brinellhärte (links); „Markierung“, die die Prüfkugel in der Probe hinterlassen hat (rechts)

In Abbildung 78 sind die Ergebnisse der Untersuchungen der Oberflächen-/ Brinellhärte zusammenfassend dargestellt. Gegenüber den unbehandelten Hölzern zeigen die mit DMDHEU- und die mit Wachs-/Harzimprägnierung behandelten Hölzer deutlich höheren Widerstand gegen die eindrückende Kugel. Bei den hitzebehandelten Proben wurden keine Einbußen der Härte festgestellt. Ihre Werte liegen etwa auf dem gleichen Niveau wie die von unbehandelten Hölzern.

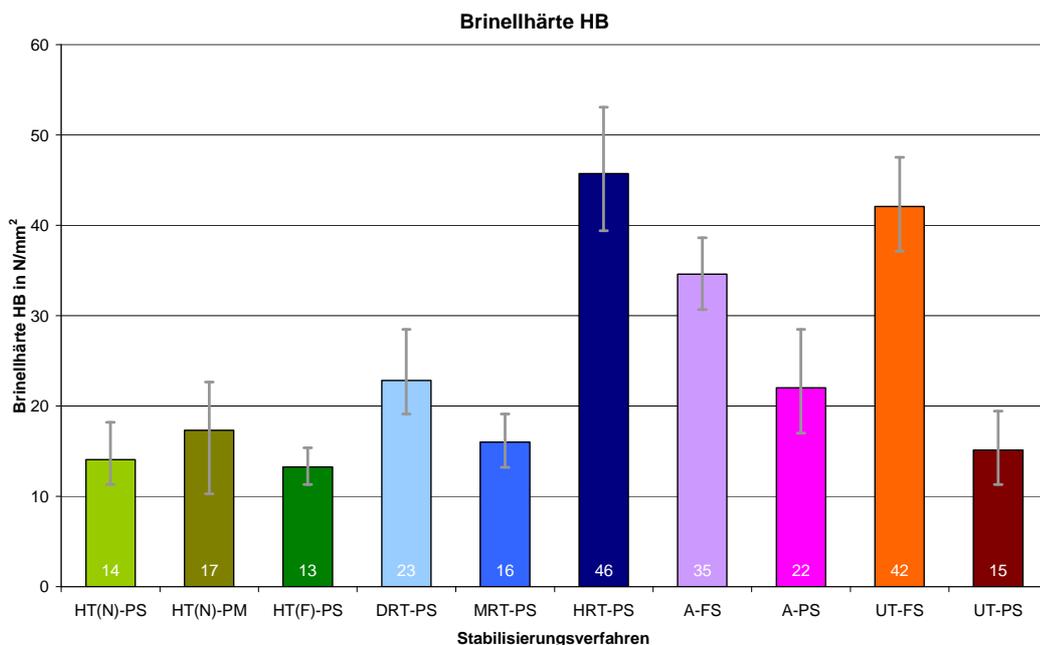


Abbildung 78: Grafische Darstellung der Veränderung der Brinellhärte von behandeltem Holz im Vergleich zu unbehandeltem Holz

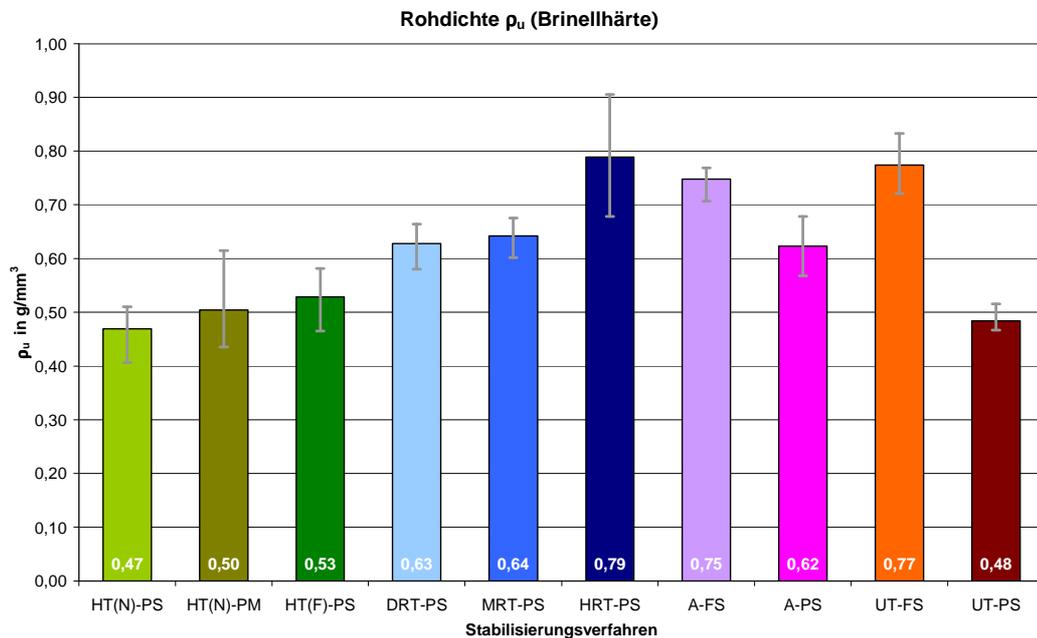


Abbildung 79: Grafische Darstellung der Rohdichte der Proben, die für die Brinellhärteuntersuchung eingesetzt wurden.

### 3.4.5 Bewertung / Ausblick

Bei allen Versuchsergebnissen wurde festgestellt, dass die Streuung der ermittelten Werte innerhalb einer Serie ausgesprochen hoch ist. Dies liegt daran, dass man im gesamten Projekt nicht mit kleinen, fehlerfreien Laborproben, sondern mit Hölzern aus der laufenden Produktion gearbeitet hat.

Dadurch liegen alle holztypischen Eigenschaftsschwankungen, wie z. B. Rohdichte, Faserverlauf, Jahringbreite, Jahringlage in der Probe, Astigkeit, etc. in vollem Umfang vor. Ihre Bandbreite spiegelt sich in den entsprechenden Schwankungsbreiten der Messergebnisse wieder.

Den herausragendsten Parameter stellt jedoch die Rohdichte dar. Bis auf die Ergebnisse der Bruchschlagarbeitsversuche korreliert die Rohdichte mit den jeweiligen Festigkeitswerten. Der Einfluss bzw. die Schwankungsbreite der ermittelten Rohdichtewerte überlagert die Veränderungen der Festigkeitseigenschaften.

Generell gilt die Aussage, dass die Festigkeitswerte – mit Ausnahme der Bruchschlagarbeit – direkt von der Rohdichte bzw. der zur Verfügung gestellten Holzqualität abhängen. In den abgewickelten Versuchen wurden z. B. verwendet:

- ⇒ unbehandelte Kiefer (*Pinus sylvestris*) mit mittleren Jahrringbreiten von 2 – 5 mm und Rohdichten von 0,45 – 0,55 kg/dm<sup>3</sup>
- ⇒ hitzebehandelte Kiefer (*Pinus sylvestris*) mit mittleren Jahrringbreiten von 1 – 5 mm und Rohdichten von 0,55 – 0,53 kg/dm<sup>3</sup>
- ⇒ melamin-/harzbeladene Kiefer (*Pinus sylvestris*) mit mittleren Jahrringbreiten von 2 – 5 mm und Rohdichten von 0,62 – 0,85 kg/dm<sup>3</sup>

Signifikante Veränderungen der Festigkeitseigenschaften wurden ausschließlich bei der Bruchschlagarbeit festgestellt. Dort kam es jedoch zu Festigkeitseinbußen, die bei bis zu 60 % gegenüber unbehandelten Hölzern betragen.

### 3.4.6 Zusammenfassung

Für die Prüfung der mechanischen Eigenschaften der modifizierten Hölzer standen nur geringe Mengen an Prüfkörpern zur Verfügung.

Damit ist auch eine Bestimmung der Werte der Eigenschaften nach DIN EN 384, 2004-05: "Bauholz für tragende Zwecke - Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte", wegen des zu kleinen Stichprobenumfangs (10 – 12 Prüfungen je Eigenschaft) nicht möglich.

Zudem wurden bei der Durchführung der Versuche der jeweils größte und kleinste Prüfwert, unabhängig von einem denkbaren Ausreißertest, unwiederbringlich gelöscht, was die statistische Datenbasis reduziert.

Bei dem Verfahren nach DIN 55303-5 wird ein statistischer Anteilsbereich einer normalverteilten Zufallsgröße mit unbekanntem Erwartungswert  $\mu$  und unbekannter Varianz  $\sigma^2$  berechnet, ausgehend von einer n-elementigen Stichprobe und dem zugehörigen Mittelwert  $\bar{x}$  und der zugehörigen Varianz  $s^2$  der Stichprobe. Es wurde ein Vertrauensniveau von 95 % gewählt. Die daraus resultierende Bestimmung der 5 %-Quantilswerte für die Verteilungen beruht auf einem genormten und für den gegebenen Stichprobenumfang angebrachten Verfahren.

Aus dem Verfahren heraus ergeben sich z. B. bei der Bruchschlagarbeit im Modifikationsverfahren acetylierte Kiefer (A-PS) sehr großen Streuungen. Dieser Wert ist physikalisch nicht sinnvoll. Bei einer größeren Datenbasis würden sich hier physikalisch sinnvolle Werte ergeben. Ähnlich bei einigen anderen Ergebnissen, die sehr klein sind im Verhältnis zum Mittelwert der Stichprobe (z. B. Brinellhärte HT(N)-PM, Druckfestigkeit HT(N)-PS, Biegefestigkeit HT(N)-PS und A-PS).

Keinesfalls dürfen die gewonnenen 5 %-Quantile mit den charakteristischen Festigkeitswerten für das semiprobabilistische Bemessungsverfahren in DIN 1052, "Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau", Anhang F (2004-08) verglichen werden. Die Datenbasis für die Ergebnisse ist dazu viel zu gering.

Die aus dem Projekt gewonnenen Erkenntnisse können nur als Anhalt für den Trend zu erwartender Veränderungen gesehen werden. Aus diesem Grund wurde auf eine weitere Auswertung verzichtet und die Ergebnisse in Tabelle 11 zusammengefasst.

1.0	Vergütung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Holzvernetzung mit DMBHEU	Melamin-Behandlung	Wachs-/Harz-Imprägnierung	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	unbehandelt	unbehandelt	unbehandelt
1.1	Hersteller	New Option Wood	New Option Wood	Finnforest	Uni Göttingen	Solutia	Tilo	SHR - Merk	SHR - Merk			
1.2	Allgemeine Bezeichnung	NOW	NOW	Thermoholz			Natwood	Acetylierung	Acetylierung			
<b>2.0 Wirkprinzipien und Farbkennzeichnung der Vergütungsverfahren im Projekt</b>												
2.1	Lumenfüllung											
2.2	Zellwandfüllung											
2.3	Hydroxylgruppen-Reaktion											
2.4	Hydroxylgruppen-Vernetzung											
2.5	Zellwandstrukturänderung											
2.6	unbehandelt											
<b>3.0 Holzarten im Forschungsprojekt</b>												
3.1	Lateinische Bezeichnung	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus pinaster</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Pinus sylvestris</i>
3.2	Allgemeine Bezeichnung	Kiefer	See-Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Buche	Kiefer	Buche	Fichte	Kiefer
3.3	Kurzzeichen	HT(N)-PS	HT(N)-PM	HT(F)-PS	DRT-PS	MRT-PS	HRT-PS	A-FS	A-PS	UT-FS	UT-PA	UT-PS

1.0	Vergütung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Holzvernetzung mit DMDHEU	Melamin-Behandlung	Wachs-/Harz-Imprägnierung	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	unbehandelt	unbehandelt	unbehandelt
<b>4.0</b>	<b>Mittlere Jahringbreite in mm</b>											
4.1	Mittelwert	3,5	1,1	2,3	2,1	2,0	1,6	2,2	3,0	1,9		2,6
4.2	Standardabweich.	1,1	0,1	0,5	0,8	0,5	0,2	0,5	0,7	0,4		0,5
<b>5.0</b>	<b>Rohdichte <math>\rho</math> in g/mm<sup>3</sup></b>											
5.1	Mittelwert	0,47	0,50	0,53	0,63	0,64	0,79	0,75	0,62	0,77		0,48
5.2	Standardabweich.	0,03	0,08	0,04	0,03	0,02	0,09	0,02	0,04	0,03		0,02
<b>6.0</b>	<b>Biegefestigkeit <math>\beta</math> in N/mm<sup>2</sup></b>											
6.1	Mittelwert	71	91	93	115	80	128	109	66	141		80
6.2	Standardabweich.	22	13	11	17	7	6	15	19	11		6
<b>7.0</b>	<b>Elastizitätsmodul E in N/mm<sup>2</sup></b>											
7.1	Mittelwert	9444	13144	11729	13434	11010	14075	14406	9618	16393		10589
7.2	Standardabweich.	2209	994	921	1364	909	636	847	2182	1957		997
<b>8.0</b>	<b>Druckfestigkeit <math>\sigma</math> in N/mm<sup>2</sup>, parallel zur Faser</b>											
8.1	Mittelwert	47	57	54	66	54	67	54	61	60		37
8.2	Standardabweich.	12	1	5	8	4	3	1	5	9		7
<b>9.0</b>	<b>Bruchschlagarbeit w in N/mm<sup>2</sup></b>											
9.1	Mittelwert	17	21	19	43	19	61	85	48	100		56
<b>10.0</b>	<b>Brinellhärte HB in N/mm<sup>2</sup></b>											
10.1	Mittelwert	14	17	13	23	16	46	35	22	42		15

Tabelle 11: Zusammenstellung der ermittelten mechanischen Eigenschaften aus den Versuchsergebnissen

Die Übersicht in Tabelle 11 lässt keine gesicherte Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften im Vergleich zwischen behandeltem und unbehandeltem Holz erkennen. Diese Feststellung gilt auch im Vergleich der mechanischen Eigenschaften der vergüteten Hölzer untereinander.

Die Ergebnisse lassen auch vermuten, dass innerhalb der Vergütungsverfahren Unterschiede auftreten, die durch die natürliche Streuung der Eigenschaften noch überlagert werden.

29 **Willeitner, Hubert; 1971:** „Anstrichschäden infolge Überaufnahmefähigkeit des Holzes“; Holz-Zentralblatt Nr. 157; Stuttgart

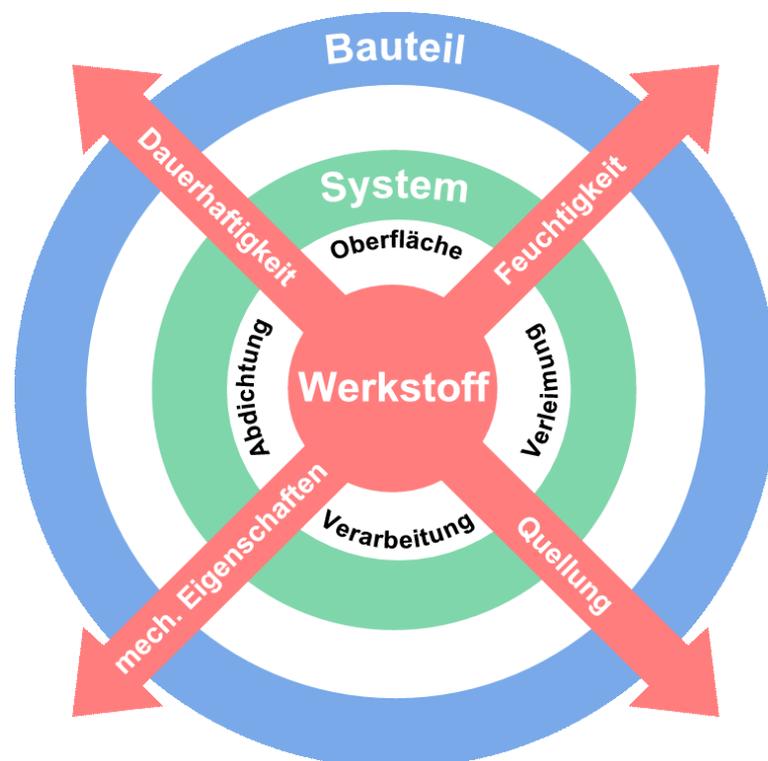
## 4 System

### 4.1 Allgemeines

In Kapitel 3 sind die Werkstoffe und ihre Eigenschaften in Verbindung mit der Vergütung behandelt. Das Ziel, insbesondere das Verhalten gegenüber Feuchtigkeit zu verbessern, ist nach den Ergebnissen möglich.

Zugleich zeigten die Versuche, dass Streuungen auch innerhalb eines Vergütungsverfahrens zu erwarten sind. Dies ist zum Teil auf die Ausgangsqualitäten des Holzes zurückzuführen, zum Teil liegt es aber auch daran, dass die im Forschungsprojekt miteinbezogenen Verfahren noch nicht so weit entwickelt waren, dass eine gleichmäßige Vergütung erreicht wird.

Diese Feststellung ist wichtig im Zusammenwirken mit anderen Werkstoffen oder mit anderen Systemen, die nach dem heutigen Kenntnisstand bei Holzfenstern unabdingbar sind. Die Zusammenhänge sind in Ergänzung des Ringdiagramms aus Kapitel 3 (Abbildung 27) in Abbildung 80 dargestellt.



**Abbildung 80:** Darstellung der Verknüpfung zwischen Werkstoff, System und Bauteil als Voraussetzung für ein gebrauchstaugliches Fenster

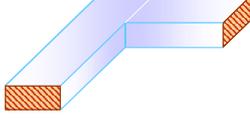
Nr.	Komponente	Beschreibung	Ziel
2	System	 <p>Prüfung an Probekörpern mit definierten und beherrschbaren Randbedingungen</p> <p>Die Form der Probekörper orientiert sich an der Konstruktion des Bauteils.</p>	Ermittlung des Verhaltens des Werkstoffes in Verbindung mit anderen Werkstoffen oder Systemkomponenten unter Berücksichtigung der geplanten Anwendung

Tabelle 12: Ausschnitt aus Tabelle 2; Erläuterung zum Ziel und Umfang der Prüfung im System, die im vorliegenden Fall auf Teile des Fensters abgestimmt ist.

## 4.2 Schraub- und Nagelfestigkeit

### 4.2.1 Ziele

Die Verbindungstechnik durch Schrauben oder Nägel ist im Fenster- und Fassadenbau eine wichtige Konstruktionselement, um Rahmen oder Profile miteinander zu verbinden. Häufig handelt es sich dabei um Verbindungen, die mechanisch beansprucht werden. Damit ist die Kenntnis der Tragfähigkeit von Schraub- und Nagelverbindungen ein wesentlicher Punkt bei der Konstruktion und Ausführung von Fenstern und Fassaden.

Da die Tragfähigkeit durch das Zusammenwirken von Werkstoff und Verbindungsmittel bestimmt wird, war es notwendig, an vergütetem Holz entsprechende Versuche durchzuführen. Im Rahmen des Forschungsprojekts waren nur orientierende Versuche an ausgewählten Schrauben möglich. Die Versuchsergebnisse geben damit nur einen Anhalt, inwieweit Veränderungen der Tragfähigkeit gegenüber unbehandeltem Holz zu erwarten sind. Soweit die Konstruktion und Bemessung statisch tragender Verbindungen erforderlich wird, müssen deshalb, da zur Zeit genormte Werte der Tragfähigkeit nicht vorliegen, objektbezogene Prüfungen durchgeführt werden.

Die Versuche der Schraub- und Nagelfestigkeit wurden in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner SFS Stadler AG, CH-9435 Heerbrugg durchgeführt

#### 4.2.2 Aufbau und Durchführung der Versuche

Mit Schraubenauszug- bzw. Schraubenauszieh Widerstand wird die Kraft bezeichnet, die erforderlich ist, um eine Schraube aus einem Prüfkörper herauszuziehen. Die vielfältigen Einflussgrößen, wie z. B. Einschraubrichtung und -tiefe, Art der Schraube, Mindestdurchmesser und Material des Prüfkörpers, machen es notwendig, dass die Prüfung dem jeweiligen Bedarf anzupassen ist.

Die Versuche im Rahmen des Forschungsprojekts erlauben jedoch relative Vergleiche bei der Verwendung eines Schraubentyps zwischen verschiedenen vergüteten Hölzern. Für die Versuche an den im Forschungsprojekt verwendeten vergüteten Hölzern wurden folgende Schrauben verwendet:

- ⇒ Spano-Spanplattenschraube 4 x 30 mm
- ⇒ Spano-Fer-Holzbohrschraube 4 x 30 mm

Nr.	Eigenschaft	Grundlage der Prüfung
1	Schraub-/Nagelfestigkeit	orientiert an DIN EN 1382

Tabelle 13 Verfahren zur Prüfung der Auszugsfestigkeit von Schrauben

Entsprechend wurden die Untersuchungen mit dem abgebildeten Versuchsaufbau in allen behandelten und unbehandelten Hölzern durchgeführt.



Abbildung 81: Für die Versuche verwendete Schraubentypen (links);  
Vorrichtung zum Eindrehen der Schrauben (rechts)

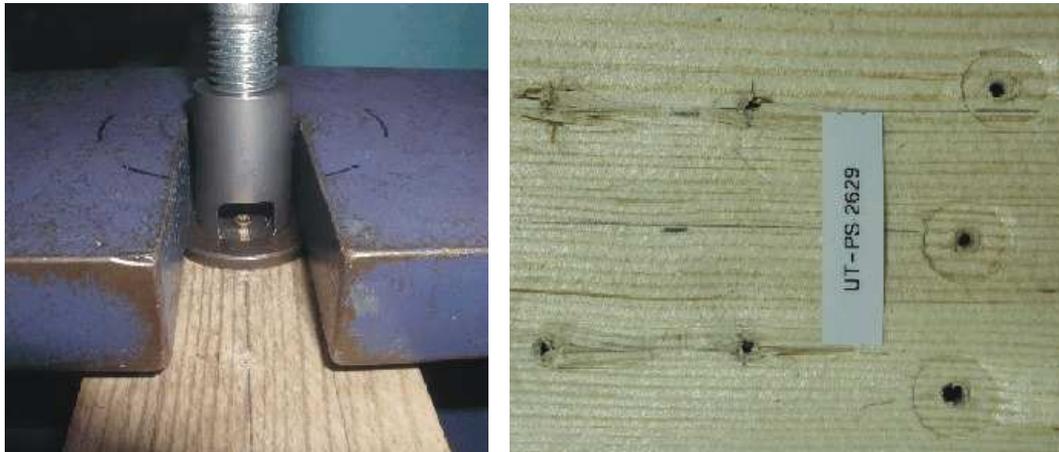


Abbildung 82: Vorrichtung zum Ausziehen der Schrauben (links);  
Holzprobe mit ausgerissenen Schraubenlöchern (rechts)

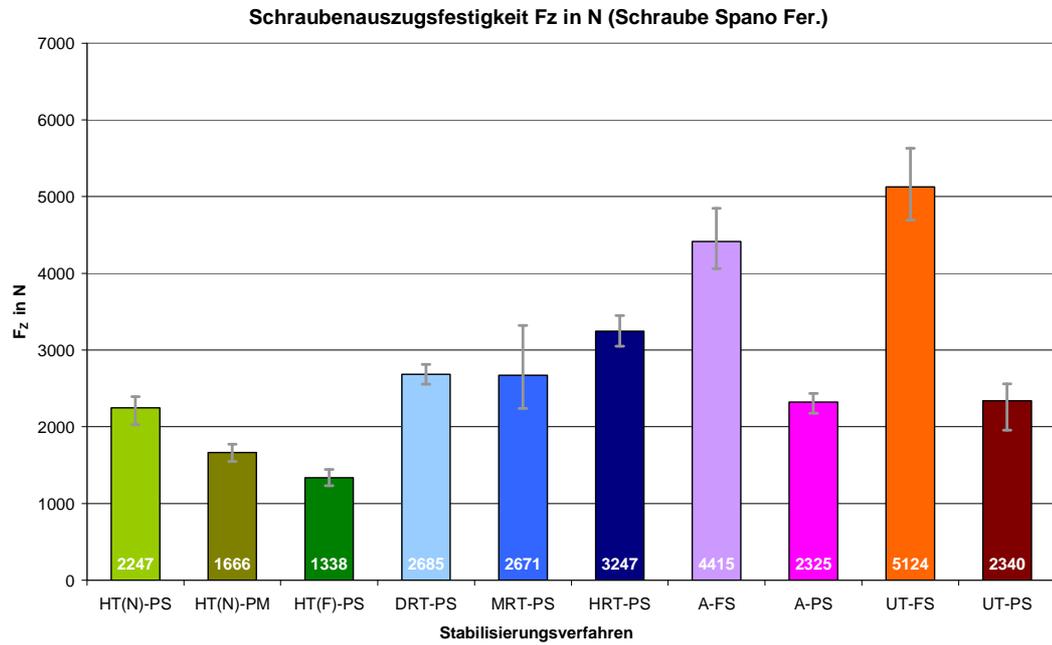
### 4.2.3 Ergebnisse aus den Versuchen

In Abbildung 83 und Abbildung 84 sind die Ergebnisse der Untersuchungen der Schraubenauszugfestigkeit zusammengefasst. Das Verhalten der beiden Schraubentypen unterscheidet sich nur unwesentlich.

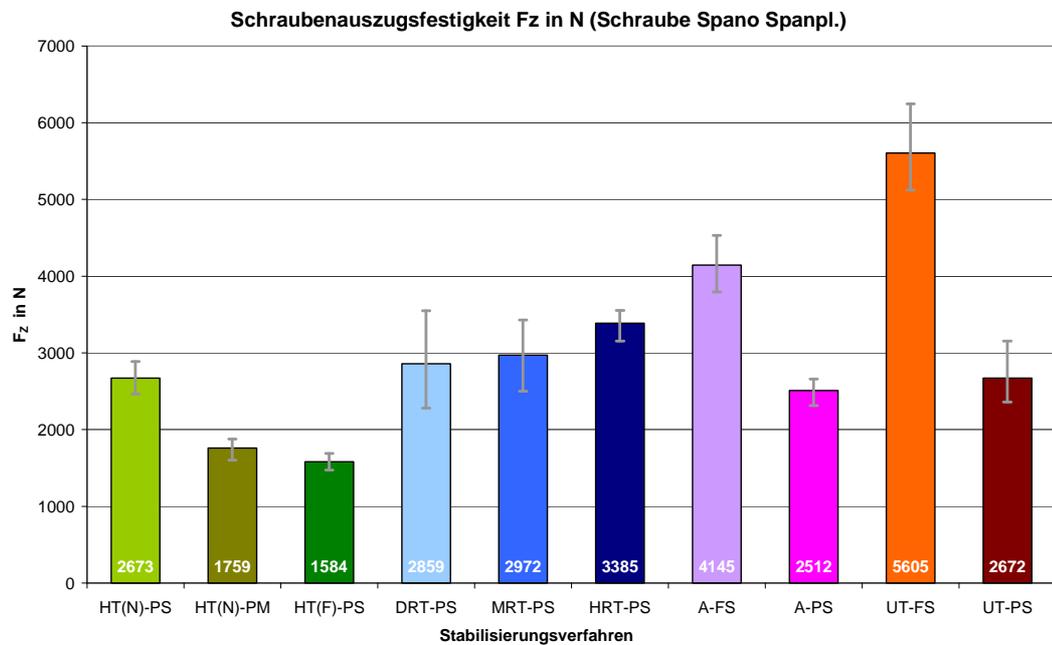
Die Auszugswerte der hitzebehandelten Proben sind entweder niedriger oder auf dem gleichen Niveau wie die bei unbehandelten Hölzern. Dies gibt einen deutlichen Hinweis darauf, dass es jeweils auf den individuellen Hitzebehandlungsprozess ankommt.

Bei den mit Wachs-Harzimprägnierung behandelten Hölzern liegen tendenziell etwas höhere Werte vor als bei unbehandeltem Holz.

Während Kiefer durch die Acetylierung weitgehend unverändert bleibt, nimmt die Auszugsfestigkeit bei Buche spürbar ab.



**Abbildung 83:** Grafische Darstellung der Veränderung der Schraubenauszugsfestigkeit von behandeltem Holz im Vergleich zu unbehandeltem Holz



**Abbildung 84:** Grafische Darstellung der Veränderung der Schraubenauszugsfestigkeit von behandeltem Holz im Vergleich zu unbehandeltem Holz

#### 4.2.4 Bewertung / Ausblick

Bei den Versuchen wurde eine hohe Streuung festgestellt, die im Vergleich zu den übrigen Versuchsergebnissen darauf zurückgeführt werden kann, dass die Versuche nicht an ausgewählten Proben durchgeführt wurden. Die Eigenschaften des eingesetzten Holzes hatten die natürliche Streubreite, die durch den Einfluss der Vergütungsverfahren noch überlagert wurde.

Im übrigen gelten die gleichen Feststellungen, wie sie bei der Auswertung der Untersuchung der mechanischen Eigenschaften bereits beschrieben wurden.

1.0	Vergütung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Holzvernetzung mit DMDHEU	Melamin-Behandlung	Wachs-/Harz-Imprägnierung	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	unbehandelt	unbehandelt	unbehandelt
1.1	Hersteller	New Option Wood	New Option Wood	Finn-forest	Uni Göttingen	Solutia	Tilo	SHR - Merk	SHR - Merk			
1.2	Allgemeine Bezeichnung	NOW	NOW	Thermoholz			Natwood	Acetylierung	Acetylierung			
<b>2.0 Wirkprinzipien und Farbkennzeichnung der Vergütungsverfahren im Projekt</b>												
2.1	Lumenfüllung											
2.2	Zellwandfüllung											
2.3	Hydroxylgruppen-Reaktion											
2.4	Hydroxylgruppen-Vernetzung											
2.5	Zellwandstrukturänderung											
2.6	unbehandelt											
<b>3.0 Holzarten im Forschungsprojekt</b>												
3.1	Lateinische Bezeichnung	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus pinaster</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Pinus sylvestris</i>
3.2	Allgemeine Bezeichnung	Kiefer	See-Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Buche	Kiefer	Buche	Fichte	Kiefer
3.3	Kurzzeichen	HT(N)-PS	HT(N)-PM	HT(F)-PS	DRT-PS	MRT-PS	HRT-PS	A-FS	A-PS	UT-FS	UT-PA	UT-PS
<b>4.0 Schraubenauszugsfestigkeit Fz in N (Schraube Spano Fer.)</b>												
4.1	Mittelwert	2247	1666	1338	2685	2671	3247	4415	2325	5124		2340
<b>5.0 Schraubenauszugsfestigkeit Fz in N (Schraube Spano Spanplatte)</b>												
5.1	Mittelwert	2673	1759	1584	2859	2972	3385	4145	2512	5605		2672

Tabelle 14: Zusammenstellung der ermittelten Schrauben-Auszugsfestigkeit

## 4.3 Verklebung

### 4.3.1 Ziele

Eine wichtige Voraussetzung für die Herstellung von Fenstern ist die Herstellung von Kanteln, aus denen Fensterprofile in weiteren Arbeitsschritten hergestellt werden können.

Eine Grundvoraussetzung dazu ist es, dass das modifizierte Holz zu Kanteln verklebt werden kann. Neben der Verklebung der Kanteln ist die Verklebung von Montageverbindungen wie Rahmenverbindungen sicherzustellen.

Es wurden vier marktübliche Klebstoffsysteme untersucht, um mindestens ein System pro Material zu finden, das eine ausreichende Verklebung des modifizierten Holzes sicherstellt.

### 4.3.2 Aufbau und Durchführung der Versuche

Als Klebstoffe wurden unter Absprache mit dem Klebstoffverband folgende vier Systeme ausgewählt:

- 1) PVAc (D4)
- 2) EPI (D5) (Emulsion-Polymer-Isocyanat)
- 3) Polyurethan (PUR)
- 4) Melamin

Der Versuchsaufbau wurde grundsätzlich in Anlehnung an die in der Praxis angewendete Richtlinie für massive, keilgezinkte und lamellierte Profile für Holzfenster, Rosenheim 2001 durchgeführt. Die Presszeiten, offenen Zeiten, Topfzeiten, etc. wurden in Absprache mit den Herstellern so gewählt, dass eine optimale Verklebung möglich sein sollte. Es wurden jeweils zwei Kanteln aus sechs verschiedenen Lamellen hergestellt und zu jeweils sechs Probekörpern weiterverarbeitet.

Zusätzlich zu den Messungen, welche die Richtlinie empfiehlt (Fugenöffnung, Holzbruchanteil), wurde die Querkzugfestigkeit der verklebten Kanteln vor und nach der Belastung durch den Zyklus aus der Richtlinie gemessen. Der Zyklus enthält folgende Belastung der Holzproben:

Lagerung	Temperatur	Dauer
Wasser	20 °C	3 h
	60 °C	3 h
	20 °C	18 h
Normklima	23 °C, 50 % rel. Luftfeuchte	72 h

Nach der Auswahl des jeweils besten Klebstoffes aus den vier Systemen wurde mit diesem eine weitere Untersuchung nach der Norm DIN EN 301 / 302 durchgeführt. Zusätzlich wurde ein Versuch zur kurzfristigen tangentialen Wasseraufnahme durchgeführt, um etwas über das potentielle Eindringverhalten der Klebstoffsysteme zu erfahren.

### 4.3.3 Ergebnisse aus den Versuchen

Das Hauptergebnis ist in Tabelle 15 dargestellt, die eine Zusammenfassung aller Versuche darstellt. Es lässt sich feststellen, dass für jede modifizierte Holzart ein Klebstoffsystem gefunden wurde, das den Anforderungen der Richtlinie entspricht.

Ein Fazit dieser Untersuchungen ist, dass der PVAc-Klebstoff selbst bei unbehandeltem Kiefernholz eine nicht ausreichende Klebkraft während des Zyklustes zeigte. Überwiegend positive und insgesamt erfolgreiche Verklebungen bei allen Modifizierungsarten zeigte das PUR-System.

Das EPI- und das Melaminsystem lassen je nach Modifizierungsart unterschiedlich erfolgreiche Verklebungen erkennen. Die Mittelwerte aus den Proben, die nach dem Belastungszyklus gemessen wurden, sind in Tabelle 16 aufgeführt.

Holzart	PVAc (D4)	EPI	Melamin	PUR
 HT (N)-PS	-	+	+	++
 HT (N)-PM	+/-	+	+	++
 HT (F)-PS	-	+/-	+	++
 DRT-PS	-	++	+	+
 MRT-PS	-	-	-	+
 HRT-PS	-	+	++	+/-
 A-FS	-	-	-	+/-
 A-PS	+/-	+/-	-	+/-
 UT-PS	-	+	++	+

Tabelle 15 Bewertung der Verklebung von vergütetem Holz mit verschiedenen Klebstoffen

Zeichenerklärung	
(-)	= Mehr als 5 % der Klebefuge waren nach dem Beanspruchungszyklus geöffnet. Diese Verklebung liefert nicht akzeptable Ergebnisse.
(+/-)	= 0 % - 5 % der Klebefuge waren nach dem Beanspruchungszyklus geöffnet. Diese Verklebung liefert gerade noch akzeptable Ergebnisse.
(+)	= Keine Klebefuge war nach dem Beanspruchungszyklus geöffnet. Diese Verklebung liefert sehr gute Ergebnisse.
(++)	= Keine Klebefuge war nach dem Beanspruchungszyklus geöffnet. Diese Verklebung zeigte im Vergleich zu den anderen die höchsten Werte für Querkzugkraft. Ausgezeichnete Verklebung.

Für jede der Modifizierungsarten wurde der Klebstoff ausgewählt, der das beste Ergebnis in den Vorversuchen zeigte. Mit diesen Kombinationen aus Klebstoff und Modifizierungsart wurde eine weitere Untersuchung nach DIN EN 301 und DIN EN 302-3 durchgeführt.

Folgende Kombinationen wurden verwendet:

Hitzebehandlungen:	Polyurethan (PUR)
Acetylierte Buche:	Polyurethan (PUR)
Holzvernetzung:	Polyurethan (PUR)
Melaminbehandlung:	Polyurethan (PUR)
Acetylierte Kiefer:	EPI
Wachs-Harzimprägnierung:	Melamin

Holzart	PVAc			EPI			Melamin			PUR		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
 HT (N)-PS	25	12	0,4	0	48	0,9	0	56	0,9	0	75	1,1
 HT (N)-PM	5	76	0,7	0	46	0,8	0	82	0,7	0	78	0,9
 HT (F)-PS	16	56	0,7	4	45	0,6	0	86	0,8	0	88	0,8
 DRT-PS	12	70	1,1	0	90	1,0	0	72	0,8	0	63	1,2
 MRT-PS	96	2	0,1	40	18	0,4	88	13	0,1	0	84	0,8
 HRT-PS	72	2	0,3	0	11	1,1	0	38	1,1	1	1	0,9
 A-FS	100	0	0	8	1	0,1	37	3	0,4	6	26	0,8
 A-PS	5	80	1,0	0	38	0,5	8	50	0,8	3	83	0,7
 UT-PS	15	51	0,9	0	82	1,0	0	86	0,9	0	60	1,2

Tabelle 16 Beurteilung der Ergebnisse der Prüfung der Verklebung

Zeichenerklärung		
A	=	Fugenöffnung in %
B	=	Holzbruchanteil in %
C	=	Querzugbruchkraft in N/mm <sup>2</sup>

Laut der Norm DIN EN 301 werden die Querkzugfestigkeiten von verleimtem Holz nach der Lagerung im Normklima bei 20 °C und 50 % Luftfeuchtigkeit verglichen mit der Querkzugfestigkeit nach einem Belastungszyklus.

In Abbildung 85 sind die Querkzugfestigkeiten nach Normklima und nach Belastungsklima dargestellt. Die in der Norm geforderten 2 N/mm<sup>2</sup> wurden bei den meisten der Modifizierungsarten erreicht. Acetylierte Buche liegt aufgrund der höheren Holzfestigkeit wesentlich über diesem Wert. Die hitzebehandelten Hölzer liegen unter dem Wert von 2 N/mm<sup>2</sup>. Das ist auf die reduzierte Holzfestigkeit durch die Hitzebehandlung zurückzuführen. Acetylierte Kiefer zeigt sehr schlechte Ergebnisse.

Nach der Norm wird in die Klebefuge ein Pappstreifen als Abstandhalter eingebracht. In diesem Versuch war der EPI-Klebstoff so flüssig, dass er während des Pressens zum Teil aus der Fuge ausgetreten ist. Dieses wird durch den geringen Holzbruchanteil (siehe unten) bestätigt.

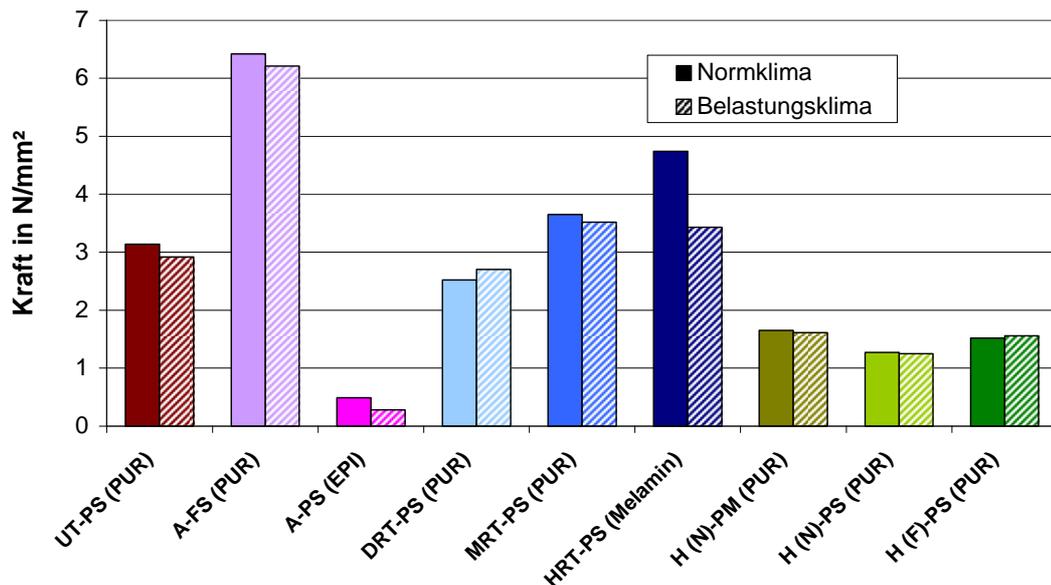


Abbildung 85: Grafische Darstellung der Prüfung der Querkzugfestigkeit nach Lagerung im Normklima und im Belastungsklima

Ein weiteres Kriterium in der Norm DIN EN 301 / 302 ist, dass die Querkzugfestigkeit nach dem Belastungsklima nicht weniger als 80 % des Wertes aus dem Normklima betragen darf.

In Abbildung 86 ist die relative Höhe der Querkraft nach dem Belastungsklima im Vergleich zum Normklima dargestellt. Es ist zu sehen, dass bei allen Modifizierungen, bei denen Polyurethanklebstoff verwendet wurde, die 80 %-Marke erreicht bzw. überschritten wird.

Im Fall der Holzvernetzung und der Hitzbehandlung von Finnforest war die Querkraftfestigkeit nach dem Belastungsklima höher als nach der Lagerung im Normklima. Die Modifizierungsarten (acetylierte Kiefer und Wachs-Harz imprägnierung), bei denen ein anderer Klebstoff verwendet wurde, erreichten diesen Wert nicht.

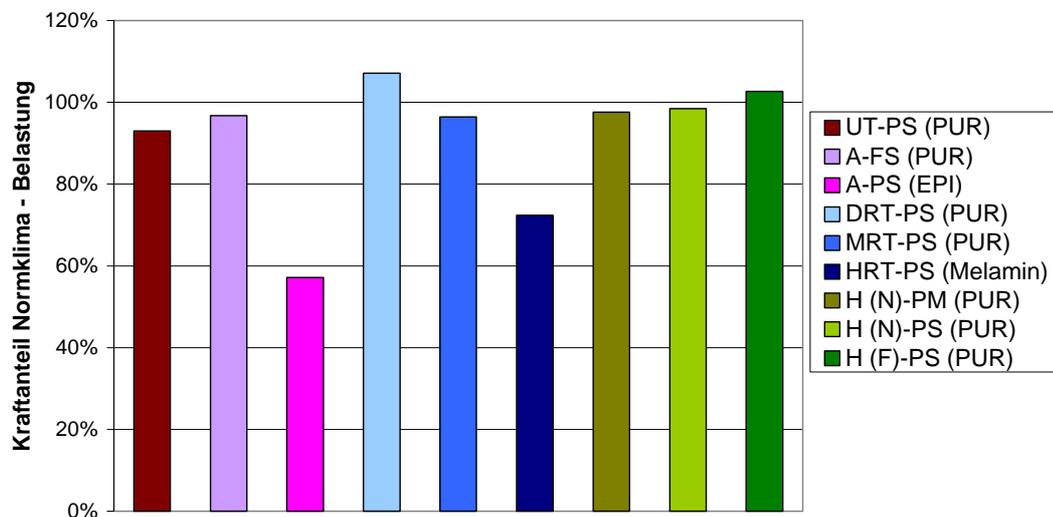


Abbildung 86: Grafische Darstellung der relativen Höhe der Querkraftfestigkeit nach dem Belastungsklima im Vergleich zum Normklima

In Abbildung 87 sind die Holzbruchanteile dargestellt, die nach der Prüfung gemäß DIN EN 301 / 302 gemessen wurden. Sehr hohe Holzbruchanteile wurden mit allen Modifizierungsarten erreicht, bei denen Polyurethanklebstoff verwendet wurde.

Die beiden anderen Klebstoffsysteme zeigten deutlich schlechtere Ergebnisse. Auffällig ist bei diesen beiden Behandlungen, dass der Wert nach dem Belastungsklima deutlich schlechter ist als nach dem Normklima.

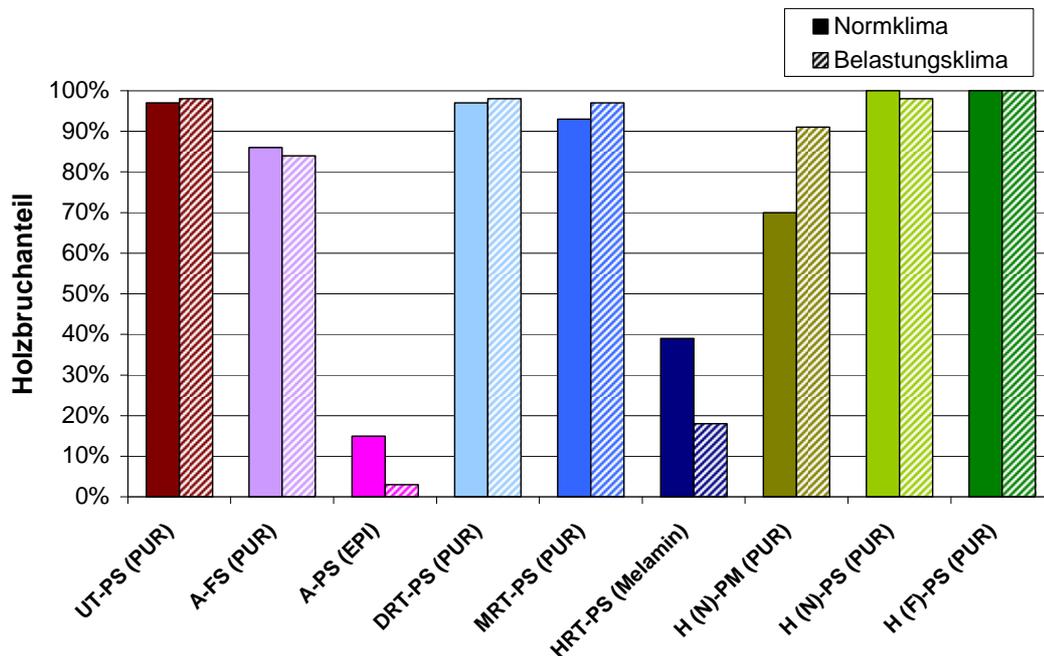


Abbildung 87: Grafische Darstellung der Ergebnisse des ermittelten Holzbruchanteils bei Prüfung der Querkzugfestigkeit der Verklebung

Die meisten der Modifizierungsarten zeigen ein deutlich reduziertes Wasseraufnahmeverhalten, wie in Abbildung 88 zu sehen ist. Nur die acetylierte Kiefer und Buche zeigen eine nahezu unveränderte Wasseraufnahmegeschwindigkeit. Im Fall der Holzvernetzung stieg die Wasseraufnahmegeschwindigkeit und Menge sogar an.

Die stärkste Reduzierung findet man bei den Modifizierungsarten (Melaminharzbehandlung und Wachs-Harz imprägnierung), die eine Füllung der Zelllumina verursachen und dadurch die Wasseraufnahmegeschwindigkeit stark reduzieren.

Für die hier untersuchten Klebstoffsysteme ist eine gute Wasseraufnahmefähigkeit bzw. Wasserleitfähigkeit wichtig, um ein Trocknen des Klebefilms in der Fuge zu gewährleisten. PVAc, EPI- und Melaminsysteme sind während des Aushärtens auf ein Abtransportieren der Feuchtigkeit aus dem Klebstofffilm in das Holz angewiesen.

Für das Polyurethansystem ist die Wasseraufnahmefähigkeit und die Wasserleitfähigkeit nicht so entscheidend, weil Feuchtigkeit zum Aushärten benötigt wird. Für die Bewertung der Klebefähigkeit ist deshalb eine hohe Wasseraufnahmegeschwindigkeit eher positiv zu bewerten.

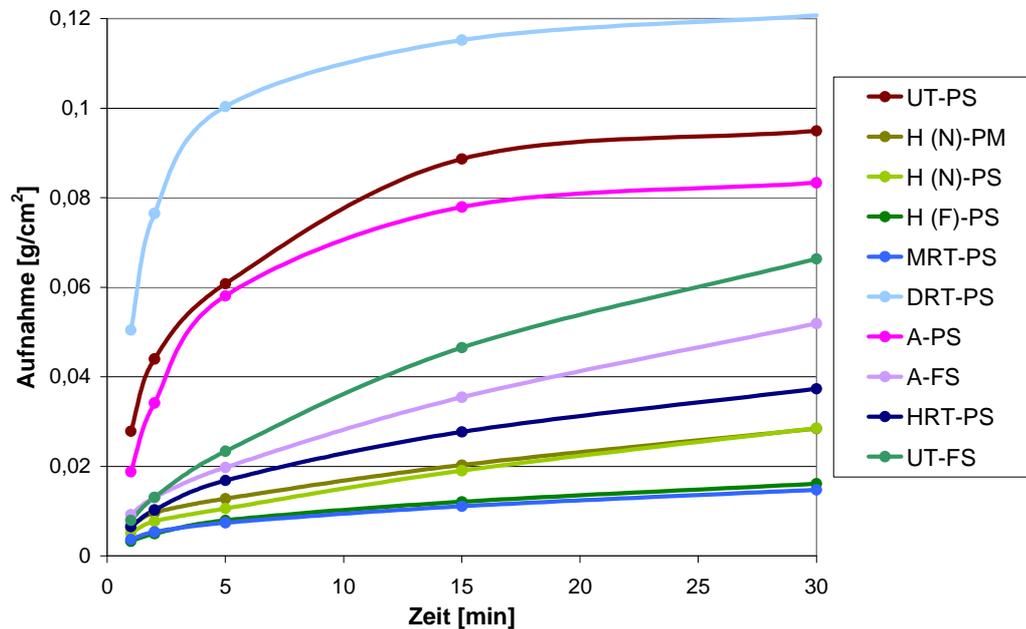


Abbildung 88: Verlauf der Wasseraufnahme der vergüteten Hölzer in Abhängigkeit der Verfahren im Vergleich zu unbehandeltem Holz (UT)

#### 4.3.4 Bewertung / Ausblick

Für die Bewertung der Ergebnisse wird kurz auf die einzelnen Modifizierungsarten eingegangen. Ziel war es, für jede dieser Arten ein geeignetes Klebstoffsystem zu finden.

Der PVAc-Klebstoff stellt bei allen Versuchen eine Besonderheit dar, da auch das unbehandelte Holz nicht zufriedenstellend verklebt werden konnte. Dieser Klebstoff ist sehr verbreitet in der Fensterkanteherstellung und bei der Montageverklebung. Ob ein besseres PVAc-Klebstoffsystem diese Prüfungen bestanden hätte, kann nicht festgestellt werden. Aus diesen Ergebnissen ist es nicht zu empfehlen, modifiziertes Holz mit einem PVAc-Klebstoffsystem zu verkleben.

##### 1) Hitzebehandlung

Die Ergebnisse zeigen, dass es keine herausragenden Unterschiede zwischen den hitzebehandelten Hölzern gibt. Insgesamt ließen sie sich mit allen Klebstoffsystemen außer mit PVAc zufriedenstellend verkleben. Optimale Ergebnisse wurden mit dem PUR-System erreicht. Aber auch die anderen beiden Systeme scheinen sich für die Verklebung zu eignen.

## 2) Acetylierung

Die acetylierten Hölzer (Buche und Kiefer) zeigten insgesamt etwas schlechtere Ergebnisse als die hitzebehandelten Hölzer. Mit dem Polyurethanklebstoff lassen sie sich scheinbar aber zufriedenstellend verkleben. Die schlechten Ergebnisse bei den anderen drei Systemen im Fall der Buche könnten auf die Essigsäure oder auf die Behandlung selbst zurückzuführen zu sein.

Für die Buche kann eine ausreichend gute Verklebung mit Polyurethanklebstoff sichergestellt werden. Für die Kiefer sind die Ergebnisse nicht so aussagekräftig, da die Untersuchung nach DIN EN 301 / 302 zu schlechteren Ergebnissen mit EPI-Klebstoff führte. Die Gründe dafür können aber auch im Versuchsablauf selbst liegen und damit nicht das Potential des Klebstoffes zeigen.

## 3) Melaminbehandlung

Für die Melaminbehandlung gab es in Vorversuchen ein Klebstoffsystem, das die gestellten Ansprüche erfüllen konnte. Ebenfalls die Ergebnisse aus den durchgeführten Untersuchungen gemäß DIN EN 301 / 302 bestätigen, dass Polyurethanklebstoff ein geeignetes Klebstoffsystem für die Melaminbehandlung ist. Die anderen Systeme zeigten schon im Vorversuch, dass eine solche Verklebung nicht zu empfehlen ist.

## 4) Holzvernetzung

Alle Klebstoffe, die getestet wurden, zeigten gleich gute Ergebnisse wie das unbehandelte Holz. Außer mit dem PVAc-Klebstoff scheinen sich alle anderen Klebstoffsysteme für diese Behandlung zu eignen. Der gemäß DIN EN 301 / 302 untersuchte Polyurethanklebstoff lässt erkennen, dass er sehr gut für die Verklebung geeignet ist.

## 5) Wachs-Harzbehandlung

Die Untersuchung zeigt für diese Modifikation, dass sich die Systeme mit Melaminlebstoff oder EPI-Klebstoff für die Verklebung zu eignen scheinen. Polyurethan ergab im Vergleich zu den anderen Hölzern eine etwas schlechtere Verklebung. Wie im Fall der acetylierten Kiefer zeigte die Untersuchung nach DIN EN 301 / 302 schlechtere Ergebnisse als erwartet. Dies könnte ebenfalls durch den Versuchsablauf verursacht worden sein.

1.0	Vergütung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Holzvernetzung mit DMDHEU	Melamin-Behandlung	Wachs-/Harz-Imprägnierung	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	unbehandelt	unbehandelt	unbehandelt
1.1	Hersteller	New Option Wood	New Option Wood	Finn-forest	Uni Göttingen	Solutia	Tilo	SHR - Merk	SHR - Merk			
1.2	Allgemeine Bezeichnung	NOW	NOW	Thermo-holz			Natwood	Acetylie-rung	Acetylie-rung			
<b>2.0 Wirkprinzipien und Farbkennzeichnung der Vergütungsverfahren im Projekt</b>												
2.1	Lumenfüllung											
2.2	Zellwandfüllung											
2.3	Hydroxylgruppen-Reaktion											
2.4	Hydroxylgruppen-Vernetzung											
2.5	Zellwandstrukturänderung											
2.6	unbehandelt											
<b>3.0 Holzarten im Forschungsprojekt</b>												
3.1	Lateinische Bezeichnung	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus pinaster</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Pinus sylvestris</i>
3.2	Allgemeine Bezeichnung	Kiefer	See-Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Buche	Kiefer	Buche	Fichte	Kiefer
3.3	Kurzzeichen	HT(N)-PS	HT(N)-PM	HT(F)-PS	DRT-PS	MRT-PS	HRT-PS	A-FS	A-PS	UT-FS	UT-PA	UT-PS
<b>4.0 Verklebung mit Bewertung der Eignung</b>												
4.1	PVAc (D4)	-	+/-	-	-	-	-	-	+/-			-
4.2	EPI (D5)	+	+	+/-	++	-	+	-	+/-			+
4.3	Melaminharz	+	+	+	+	-	++	-	-			++
4.4	Polyurethan	++	++	++	+	+	+/-	+/-	+/-			+
<b>5.0 Verklebung Querzugfestigkeit in N/mm<sup>2</sup> nach Lagerung im Normklima und im Belastungsklima</b>												
5.1	Klebstoff	PUR	PUR	PUR	PUR	PUR	Melamin	PUR	EPI			PUR
5.2	nach Belastung	1,1	0,9	0,8	1,2	0,8	0,9	0,8	0,7			1,2
<b>6.0 Holzbruchanteil in % bei Prüfung der Querzugfestigkeit der Verklebung</b>												
6.1	nach Belastung	75	78	88	63	84	1	26	83			60

Tabelle 17: Zusammenfassende Darstellung der Untersuchungen zur Verklebung

## 4.4 Oberflächenbehandlung

### 4.4.1 Ziele

Aus der Befragung von Bauherren und Planern<sup>[30]</sup> ergaben sich als primäre Forderungen für die Oberflächenbehandlung von Fenstern und Fassaden:

- ⇒ die Erhaltung des Aussehens und des Holzcharakters.
- ⇒ die Verbesserung der Dauerhaftigkeit und des Verhaltens bei mechanischen Einwirkungen wie z. B. Hagelschlag.
- ⇒ die Verlängerung der Wartungsintervalle für die Instandhaltung und Instandsetzung.
- ⇒ die Verbesserung der Instandhaltungs- und Instandsetzungsfreundlichkeit.

Gleichzeitig soll die Notwendigkeit zur Überarbeitung der Oberfläche auch für einen Nichtfachmann rechtzeitig erkennbar sein, um die primären Forderungen sicherzustellen. Im Rahmen des Projekts war deshalb zu untersuchen, ob bei vergütetem Holz ein Oberflächenschutz notwendig ist. Falls sich die Notwendigkeit bestätigt, war auch zu klären, welche Anforderungen an die Beschichtung zu stellen sind.

In Verbindung mit vergütetem Holz ist dabei auch die Frage zu klären, inwieweit von der bisher üblichen und in technischen Regelwerken für maßhaltige Bauteile vorgegebenen Dickschichtlasur abgewichen werden kann. Mit dünneren Schichten ist nach den vorliegenden Beobachtungen mit einer einfachen Instandhaltung zu rechnen.

Aus den primären Forderungen an den Oberflächenschutz ergeben sich als sekundäre Forderungen an den Beschichtungsstoff:

- ⇒ eine ausreichende UV-Beständigkeit zur Sicherstellung des Aussehens und der Haftung des Anstrichfilms am Holz.
- ⇒ ein optimaler Schutz gegen Bläue und Schimmelpilze zur Erhaltung des Aussehens der Holzoberfläche, auch unter vorübergehenden kritischen Bedingungen.
- ⇒ eine optimale Schichtdicke des Anstrichfilms in Verbindung mit der Optimierung der Diffusionsfähigkeit zur Vermeidung der Rissbildung im Holz und der Ablösung durch Feuchtigkeitsstau sowie zur Vereinfachung der Instandhaltung.

Die Holzarten waren durch die im Projekt zur Verfügung stehenden Hölzer vorgegeben. Parallel zu den vergüteten Hölzern werden jeweils unbehandelte Hölzer der gleichen Holzart als „interne Vergleichsprodukte“ („ICP“) mit untersucht.

#### **4.4.2 Anforderungen an das Beschichtungssystem**

Die Versuche zur Oberflächenbehandlung wurden in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Akzo Nobel Deco GmbH, D-31515 Wunstorf und Glasurit GmbH, D-48165 Münster durchgeführt. Die Auswahl des Anstrichmittels für die Langzeitbewitterung im Freiland erfolgte auf Vorschlag von Akzo Nobel und Glasurit.

Unter Berücksichtigung des derzeitigen Marktangebots wurden die in Tabelle 18 zusammengestellten Beschichtungssysteme ausgewählt.

Wegen der erhöhten Resistenz bei vergüteten Hölzern wurde auf einen Schutz gegen holzerstörende Pilze verzichtet. Ein Schutz gegen Bläue- und Schimmelpilze wurde wegen der partiellen Anfälligkeit des Holzes zur Erhaltung des Aussehens teilweise in die Versuche miteinbezogen.

Für die Oberflächenbehandlung wurden wasserverdünnbare Systeme ausgewählt. Die Oberflächenbeschichtung wurde unter Beachtung der jeweiligen Vorgaben des Beschichtungsstoffherstellers wie folgt ausgeführt:

- ⇒ Bläue- und/oder schimmelschützende Grundbeschichtung,
- ⇒ Zwischenbeschichtungen,
- ⇒ Schlussbeschichtung.

Das Holz wurde vor der Beschichtung in üblicher Weise gehobelt und geschliffen.

Aufgrund der verbesserten Dimensionsstabilität des verwendeten Holzes einerseits sowie im Hinblick auf die erwünschte Instandhaltungs- und Instandsetzungsfreundlichkeit andererseits wurden dünne und mitteldicke Schichten bevorzugt. Ausgewählt wurden die in Tabelle 18 beschriebenen Systeme.

Kenn.	Code	System	Imprägnierung	Eigenschaften
D1	3	Dünnschichtlasur Acrylat-Copolymer- Dispersion	mit Imprägnierung Acrylat-Copolymer- Dispersion	diffusionsoffen ( $s_d < 0,5 \text{ m}$ ) Schichtdicke 30 - 45 $\mu\text{m}$ in mittlerem Farbton
D2	4 10	Dünnschichtlasur Acrylat-Copolymer- Dispersion mit Reinacrylat-Dispersion	ohne Imprägnierung	
D3	7	Dünnschichtlasur Reinacrylat-Dispersion	ohne Imprägnierung	
M1	1 9	Lasur mit mittlerer Schichtdicke Acrylat-Copolymer- Dispersion	mit Imprägnierung Acrylat-Copolymer- Dispersion	diffusionshemmend ( $s_d = 0,5 - 0,8 \text{ m}$ ) Schichtdicke 60 – 80 $\mu\text{m}$ in mittlerem Farbton
M1	2	Lasur mit mittlerer Schichtdicke Acrylat-Copolymer- Dispersion	ohne Imprägnierung	
DD1	5 8	Dickschichtlasur Acrylat-Copolymer- Dispersion mit Reinacrylat-Dispersion auf Basis PowerFeed- Technologie	mit Imprägnierung Acrylat-Copolymer- Dispersion	diffusionshemmend ( $s_d = 0,8 - 1,2 \text{ m}$ ) Schichtdicke 100 – 150 $\mu\text{m}$ in mittlerem Farbton
DD1	6	Dickschichtlasur Acrylat-Copolymer- Dispersion mit Reinacrylat-Dispersion auf Basis PowerFeed- Technologie	ohne Imprägnierung	

Tabelle 18: Beschreibung der Anstrichsysteme für die Prüfung

Die Entscheidung für die spätere Anwendung wurde unter dem Gesichtspunkt einer einfachen Instandhaltung bei Instandhaltungsintervallen von mindestens 2 Jahren bei mittlerer Witterungsbeanspruchung getroffen.

#### 4.4.3 Aufbau und Durchführung der Versuche

Es wurden an den beschichteten vergüteten Hölzern jeweils im Vergleich zu un-  
behandelten Hölzern folgende Untersuchungen der Beschichtung durchgeführt:

⇒ Visuelle Beurteilung der Verarbeitbarkeit der Beschichtungsstoffe

Benetzung der Holzoberfläche

Saugverhalten der Holzoberfläche

Verlaufsverhalten der Beschichtung

⇒ Belastung der beschichteten Hölzer

Die Prüfungen erfolgen an ungeschädigten und planmäßig vorgeschädig-  
ten Proben.

Künstliche Bewitterung im Q-UV-Gerät

Bei der Bewitterung im Q-UV-Gerät werden die Probekörper zyklisch  
mit Feuchtigkeit, Temperatur und UV-Licht belastet.

Freibewitterung (gemäß DIN EN 927)

Die planmäßige Vorschädigung von Proben wurde vorgenommen, um das Ver-  
halten des Anstrichsystems im Bereich von Beschädigungen und Rissen zu er-  
kennen, da in der praktischen Anwendung Beschädigungen und Risse nicht ver-  
meidbar sind.

Die Beurteilung der Proben wird in unterschiedlichen Stadien der Bewitterung  
durchgeführt, um die unterschiedlichen Entwicklungen der einzelnen Beschich-  
tungssysteme festzustellen.

Kriterium nach DIN EN 927	Beurteilung
Beschreibung des Aussehens gemäß DIN EN 927-3	⇒ Glanzänderung ⇒ Abwitterung ⇒ Kreidung
Blasenbildung gemäß DIN EN 927-3	⇒ Blasenfreiheit im Anstrichfilm
Rissbildung gemäß DIN EN 927-3	⇒ im Anstrich ⇒ im Holz

Kriterium nach DIN EN 927	Beurteilung
Abblätterung gemäß DIN EN 927-3	⇒ Ablösung des Anstrichfilms mit und ohne Holzschädigung ⇒ Holzschädigung
Porosität des Holzes gemäß DIN EN 927-3	⇒ Saugfähigkeit des Holzes gegenüber der Beschichtung
Haftfestigkeit gemäß DIN EN 927-3	⇒ Ablösung nach der Kreuzschnittmethode
Bläue gemäß DIN EN 927-2	⇒ visuelle Prüfung
Schimmelbeständigkeit gemäß DIN EN 927-3	⇒ visuelle Prüfung
Nasshaftung	⇒ Abhebeverhalten der Beschichtung von Holz ⇒ Beurteilung des Bruchbildes
Verfärbung	⇒ vom Holz ausgehende Verfärbung (Ausbluten)
Wasserdampfdurchlässigkeit bzw. -aufnahme gemäß DIN EN 927-4	⇒ Wassereinwirkung
Wasserdurchlässigkeit bzw. -aufnahme gemäß DIN EN 927-5	⇒ Wassereinwirkung

Tabelle 19 Zusammenstellung von Beurteilungskriterien für den Oberflächenschutz von Holz

#### 4.4.4 UV- und Bewitterungsstabilität

##### 4.4.4.1 Versuchsaufbau

Der Abbau des Holzes durch Bewitterung findet in mehreren Schritten statt. Zuerst wird durch UV-Strahlung Lignin verändert und degradiert. Anschließend kann das Lignin durch Regen oder andere Wassereinflüsse ausgewaschen werden. Schließlich wird die Cellulose, die normalerweise durch das Lignin verkittet ist, freigelegt und ausgewaschen.

Diese Prozesse sind relativ langsam und können nur ca. 1 cm Holz in 100 Jahren abbauen. Durch den beginnenden Abbau werden jedoch die Beschichtungen zerstört und andere Schäden, z. B. durch Pilze, können sekundär auftreten.

Das modifizierte Holz wurde mittels einer künstlichen Schnellbewitterung untersucht. Festgestellt werden sollte, ob schon durch das Modifizieren des Holzes selbst ein besserer Widerstand gegen die Verwitterung messbar ist. Zusätzlich wurde ein Teil der Proben mit einer dünnen Beschichtung versehen. Es sollte untersucht werden, ob die Schäden, die durch die Bewitterung an unbeschichtetem Holz auftreten, durch die Beschichtung unterbunden bzw. stark reduziert werden können.

Von allen modifizierten Hölzern wurden jeweils aus zwei Lamellen je zwei Proben mit den Maßen 150 x 75 mm (Länge x Breite) hergestellt. Die Dicke der Proben betrug ca. 15 mm. Es wurde darauf geachtet, dass der Jahrringverlauf ungefähr einem Halbriftschnitt entsprach. Die Hirnflächen der Proben wurden mit Silikon versiegelt.

Jeweils eine Probe pro Lamelle wurde mit einer einfachen Beschichtung aus einer blauen handelsüblichen Dünnschichtlasur versehen. Die Beschichtung wurde durch Pinseln aufgebracht.

Als Schnellbewitterungsgerät diente ein Q-UV-Gerät. Drei unterschiedliche Beanspruchungen wurden in einem einwöchigen Zyklus appliziert:

- a) Kondensationszyklus (100 % Luftfeuchte im Q-UV): soll Einflüsse auf das Sorptionsverhalten der Holzproben simulieren.
- b) UV-Zyklus (UVA-Lampen): soll das Sonnenlicht imitieren und Holzverfärbung und Ligninabbau verursachen.
- c) Spray-Zyklus: soll einen Temperaturschock erzeugen (das Wasser ist kalt) und das Auswaschen von abgebauten Holzbestandteilen bewirken.

Der einwöchige Zyklus wurde nach dem folgenden Zeitplan durchgeführt:

Schritt	Funktion	Temperatur	Dauer	Bedingungen
1	Kondensation	(45 ± 3) °C	24 h	
2	Subzyklus aus 3 + 4		48 x	
3	UV	(60 ± 3) °C	2,5 h	0,77 W/(m <sup>2</sup> nm) at 340 nm
4	Spray		0,5 h	6 – 7 l/min.; UV off

Der einwöchige Zyklus wurde insgesamt sieben Mal wiederholt. Ziel der Untersuchung war es, möglichst schnell Aussagen über das Verhalten der behandelten Holzproben bei der Bewitterung treffen zu können. Bei der Bewertung ist zu beachten, dass es keine Korrelation des Zyklus zu einer bestimmten Dauer während der Außenbewitterung gibt.

Nach jeder Woche Beanspruchung folgte mindestens eine Woche Klimatisierung bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit. Die Proben wurden anschließend eingescannt, um die Farbveränderungen zu beurteilen.

#### 4.4.4.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden getrennt für alle untersuchten Hölzer die Veränderungen der Proben während der Untersuchung gezeigt und bewertet.

##### 1) Unbehandelte Kiefer (UT-PS)

Bei der unbehandelten Kiefer (Abbildung 89) können verschiedene Stadien des Abbaus beobachtet werden.

Nach zwei Wochen Bewitterung ist der braun gewordene Bereich der bewitterten Fläche zu sehen. Das Lignin wurde oxidiert, aber noch nicht stark ausgewaschen.

Nach 4 Wochen Bewitterung ist eine Vergrauung deutlich erkennbar. Im unteren Bereich der Probe wird das abgebaute Lignin (erkennbar an der dunklen Verfärbung) abgelagert. Das Frühholz ist wesentlich stärker abgebaut als das Spätholz.

Nach 7 Wochen Bewitterung ist das ausgewaschene Lignin deutlich sichtbar an der unteren Seite der Probe abgelagert. Das Frühholz ist komplett vergraut und das Spätholz ebenfalls stark angegriffen. Ein tiefer Waschbretteffekt ist an der Oberfläche sichtbar.

An der beschichteten Probe ist zu sehen, dass der Ligninabbau (Verdunkelung) unvermindert stattfindet. Die Auswaschung des Lignins wird durch die Beschichtung reduziert, so dass die Vergrauung erst nach 7 Wochen erkennbar wird.



Abbildung 89: Künstliche Bewitterung mittels Q-UV an unbehandelten Kiefernholzproben

## 2) Hitzebehandelte Kiefer (HT(N)-PS)

Bei der künstlichen Bewitterung der hitzebehandelten Kiefer von NOW sind schon nach 2 Wochen deutliche Effekte zu sehen. Es ist bei diesen Proben kein Stadium des Ligninabbaus wie an den unbehandelten Proben erkennbar. Eine deutliche Vergrauung des Frühholzes ist sowohl bei der beschichteten als auch bei der unbeschichteten Probe erkennbar.

Bereits nach 4 Wochen ist auch das Spätholz der unbeschichteten Probe stark angegriffen. An der beschichteten Probe ist ein beginnendes Ablösen der Beschichtung erkennbar. Im unteren Teil der Probe ist keine Ablagerung des abgebauten Lignins sichtbar.

Nach 7 Wochen ist die unbeschichtete Probe vollständig vergraut. Der Waschbretteffekt ist etwas schwächer ausgeprägt als bei der unbehandelten Probe (UT-PS). Bei der beschichteten Probe ist eine deutliche Vergrauung erkennbar. Die Beschichtung hat sich schon großflächig abgelöst. Diese Behandlung zeigt keine Verbesserung gegenüber der unbeschichteten Probe.



Abbildung 90: Künstliche Bewitterung mittels Q-UV an hitzebehandelter Kiefer (HT(N)-PS)

### 3) Hitzebehandelte Seekiefer (HT(N)-PM)

Die hitzebehandelte Seekiefer (Abbildung 91) zeigt gegenüber der hitzebehandelten Kiefer von NOW eine wesentlich bessere Bewitterungsstabilität. Nach 2 Wochen ist bei der unbeschichteten und der beschichteten Probe eine leichte Vergrauung des Frühholzes erkennbar. Das Spätholz ist noch unverändert, so dass die Jahrringstrukturen nun stärker hervortreten.

Nach 4 Wochen ist die Vergrauung nur unwesentlich stärker geworden. Das unbeschichtete Holz zeigt eine leichte Zunahme der Vergrauung, die auch schon das Spätholz angreift. Die beschichtete Probe zeigt dagegen keine sichtbare Verschlechterung gegenüber der Bewitterung nach 2 Wochen.

Nach 7 Wochen Bewitterung ist eine deutliche Zunahme der Vergrauung der unbeschichteten Probe erkennbar. Das Spätholz wurde ebenfalls stark abgebaut. Es ist kein starker Waschbretteffekt wie bei den unbehandelten Proben (UT-PS) spürbar. Die beschichtete Probe zeigt keine Veränderung im Bereich des Frühholzes gegenüber der Bewitterung nach 4 Wochen. Das Spätholz zeigt ein beginnendes Ablösen der Beschichtung.



Abbildung 91: Künstliche Bewitterung mittels Q-UV an hitzebehandeltem Holz der Seekiefer

#### 4) Hitzebehandelte Kiefer (HT(F)-PS)

Die hitzebehandelte Kiefer von Finnforest (Abbildung 92) zeigt ein etwas besseres Verhalten als die Kiefer von NOW.

Nach 2 Wochen ist eine leichte Vergrauung des Frühholzes an der unbeschichteten Probe sichtbar. Das beschichtete Holz zeigt dagegen allgemein nur eine leichte Aufhellung.

Nach der 4. Woche Bewitterung ist an der unbeschichteten Probe das Spätholz immer noch relativ intakt. An der beschichteten Probe zeichnet sich langsam eine beginnende Ablösung der Beschichtung ab. Das Frühholz beginnt zu vergrauen.

Nach der 7. Woche ist die unbeschichtete Probe stark vergraut. Ein deutlicher Waschbretteffekt macht sich bemerkbar. An dem beschichteten Holz zeigt sich ein starkes Ablösen der Beschichtung. Der farbliche Unterschied zwischen Früh- und Spätholz ist sehr schwach ausgeprägt.



Abbildung 92: Künstliche Bewitterung mittels Q-UV an hitzebehandelter Kiefer (HT(F)-PS)

### 5) Holzvernetzung mit Kiefer (DRT-PS)

Für die Behandlung durch Holzvernetzung (Abbildung 93) stand nur verblautes Holz zur Verfügung. Das Holz war vor der Behandlung verblaut. Aufgrund eines kurzfristigen Materialengpasses stand kein anderes Ausgangsmaterial für die Schnellbewitterung zur Verfügung.

Nach 2 Wochen Bewitterung ist an den unbeschichteten und beschichteten Proben eine Verdunkelung durch Ligninoxidation sichtbar. Es ist noch keine Vergrauung des Holzes erkennbar.

Nach 4 Wochen ist das Frühholz der unbeschichteten Probe leicht vergraut. Das ausgewaschene Lignin setzt sich im unteren Bereich der Probe ab. An der beschichteten Probe ist nur sehr schwach eine beginnende Vergrauung des Frühholzes erkennbar.

Nach der 7. Woche ist das Frühholz der unbeschichteten Probe vollständig vergraut und das Spätholz zeigt eine teilweise beginnende Vergrauung. Die beschichtete Probe ist gegenüber dem Zustand nach der 4. Woche relativ unverändert. Es ist fast kein Waschbretteffekt spürbar. Die Holzvernetzung zeigt insgesamt ein besseres Verhalten als die unbehandelten Proben.



Abbildung 93: Künstliche Schnellbewitterung mittels Q-UV an mit Holzvernetzung behandelter Kiefer

### 6) Melaminharz behandelte Kiefer (MRT-PS)

Die mit Melaminharz behandelten Hölzer (Abbildung 94) zeigen ein ähnliches Verhalten wie die Proben, die durch Holzvernetzung behandelt wurden.

Nach 2 Wochen Bewitterung ist an den unbeschichteten und beschichteten Proben eine Verdunkelung durch Ligninoxidation sichtbar. Es ist noch keine Vergrauung des Holzes erkennbar.

Nach 4 Wochen ist das Frühholz der unbeschichteten Probe vergraut. An der beschichteten Probe ist immer noch keine Vergrauung des Frühholzes erkennbar.

Nach der 7. Woche ist das Frühholz der unbeschichteten Probe vollständig vergraut und das Spätholz zeigt eine leichte Vergrauung. Die beschichtete Probe ist gegenüber dem Zustand nach der 2. Woche relativ unverändert. Es ist fast kein Waschbretteffekt spürbar. Die Melaminharzbehandlung zeigt insgesamt ein sehr gutes Verhalten im Vergleich zu den unbehandelten Proben.

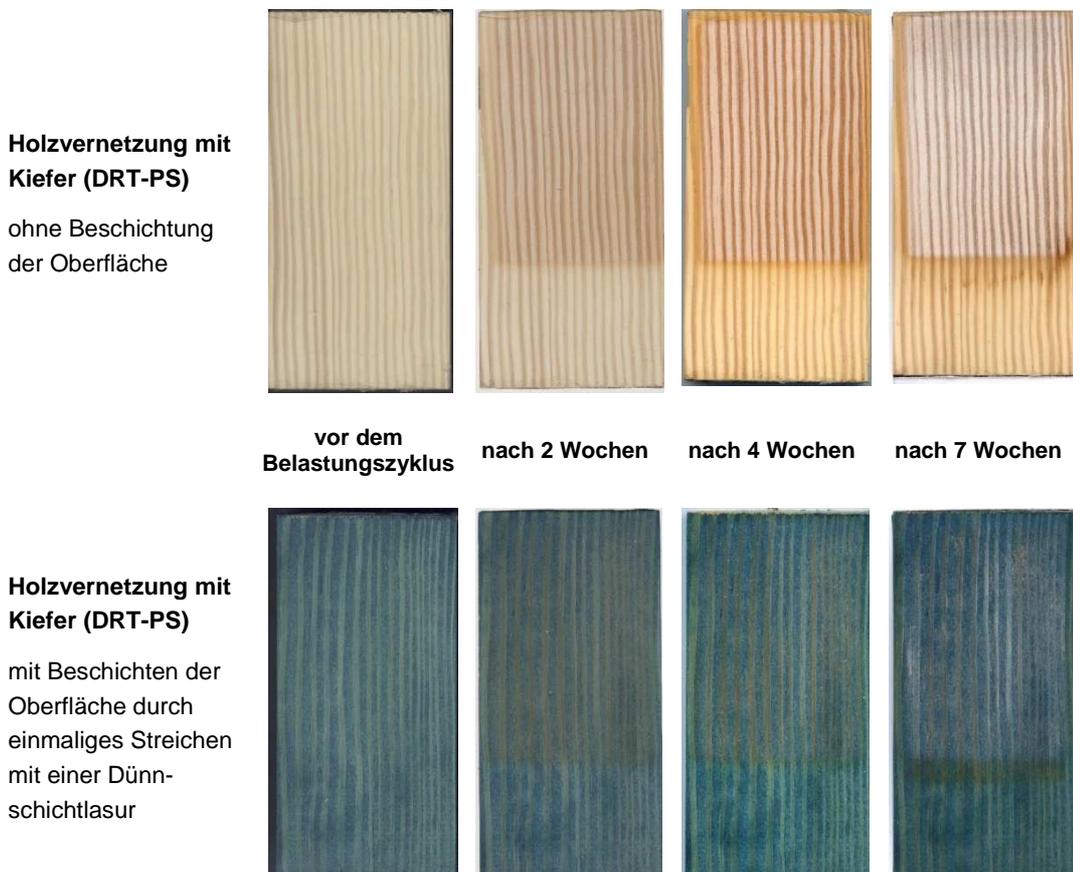


Abbildung 94: Künstliche Schnellbewitterung mittels Q-UV an mit Melaminharz behandelter Kiefer

### 7) Wachs-Harz behandelte Kiefer (HRT-PS)

Die Wachs-Harz behandelten Proben (Abbildung 95) zeigen ein unterschiedliches Verhalten während der Schnellbewitterung. Vor der Bewitterung war bereits zu erkennen, dass die Lasur nur schlecht appliziert werden konnte. Deshalb wurde keine gute Deckung der Beschichtung auf dem Holz erreicht.

Nach 2 Wochen Bewitterung ist an den unbeschichteten Proben fast keine Änderung erkennbar. Eine ganz leicht sichtbare Verdunkelung des Materials ist sowohl bei der unbeschichteten als auch bei der beschichteten Probe eingetreten. Risse, die schon vor Beginn der Bewitterung im Holz waren, treten deutlicher hervor.

Nach der 4. Woche ist bei der unbeschichteten Probe eine leichte Vergrauung erkennbar, die im Gegensatz zu den anderen Behandlungen nur sehr oberflächlich ist. Der Riss wurde weiter verstärkt. Die beschichtete Probe zeigt eine stärkere Ablösung der Beschichtung, ist aber noch nicht vergraut. Das beschichtete Holz zeigt ungefähr den gleichen Zustand wie nach der 2. Woche. Die Risse traten stärker hervor.



Abbildung 95: Künstliche Schnellbewitterung mittels Q-UV an mit Wachs-Harz behandelter Kiefer

Nach der 7. Woche findet sich bei der unbeschichteten Probe eine deutliche Vergrauung, die immer noch nur oberflächlich ist. Ein Waschbretteffekt tritt nicht auf. Diese Proben zeigen von allen untersuchten Proben den stärksten Widerstand gegen die Bewitterung. Die beschichteten Proben zeigen eine fast vollständige Ablösung der Beschichtung. Diese Ablösung der Beschichtung ist an diesen Proben am stärksten im Vergleich zu allen anderen Behandlungen. Es ist noch keine sichtbare Vergrauung zu sehen. Die Risse treten stark hervor.

Für diese Behandlung kann eine deutliche Verbesserung der Bewitterungsstabilität festgestellt werden, die aber durch die mangelnde Haftung der Beschichtung eingeschränkt wird.

#### 8) Acetylierte Kiefer (A-PS)

Die acetylierte Kiefer (Abbildung 96) zeigt ein ähnliches Verhalten wie die hitzebehandelten Proben.

Nach 2 Wochen wird eine beginnende schwache Vergrauung an den unbeschichteten und beschichteten Proben sichtbar. An der beschichteten Probe ist die Vergrauung nur als eine leichte Aufhellung wahrnehmbar.

Nach der 4. Woche ist die Vergrauung an der unbeschichteten Probe schon deutlich fortgeschritten. Besonders stark ist das Frühholz vergraut, während das Spätholz kaum einen Angriff zeigt. An der beschichteten Probe ist zusätzlich zur Vergrauung im Bereich des Frühholzes eine leichte Ablösung der Beschichtung erkennbar.

Nach der 7. Woche ist das Spätholz der unbeschichteten Probe ebenfalls stark vergraut und hebt sich kaum noch vom Frühholz ab. Im unteren Bereich der Probe ist eine leichte Ablagerung des ausgewaschenen Lignins sichtbar. Die beschichtete Probe zeigt noch keinen Abbau im Spätholz. Das Frühholz ist deutlich vergraut und die Beschichtung hat sich stark abgelöst. Das ausgewaschene Lignin setzt sich im unteren Bereich der Probe ab. Es ist kein starker Waschbretteffekt erkennbar.

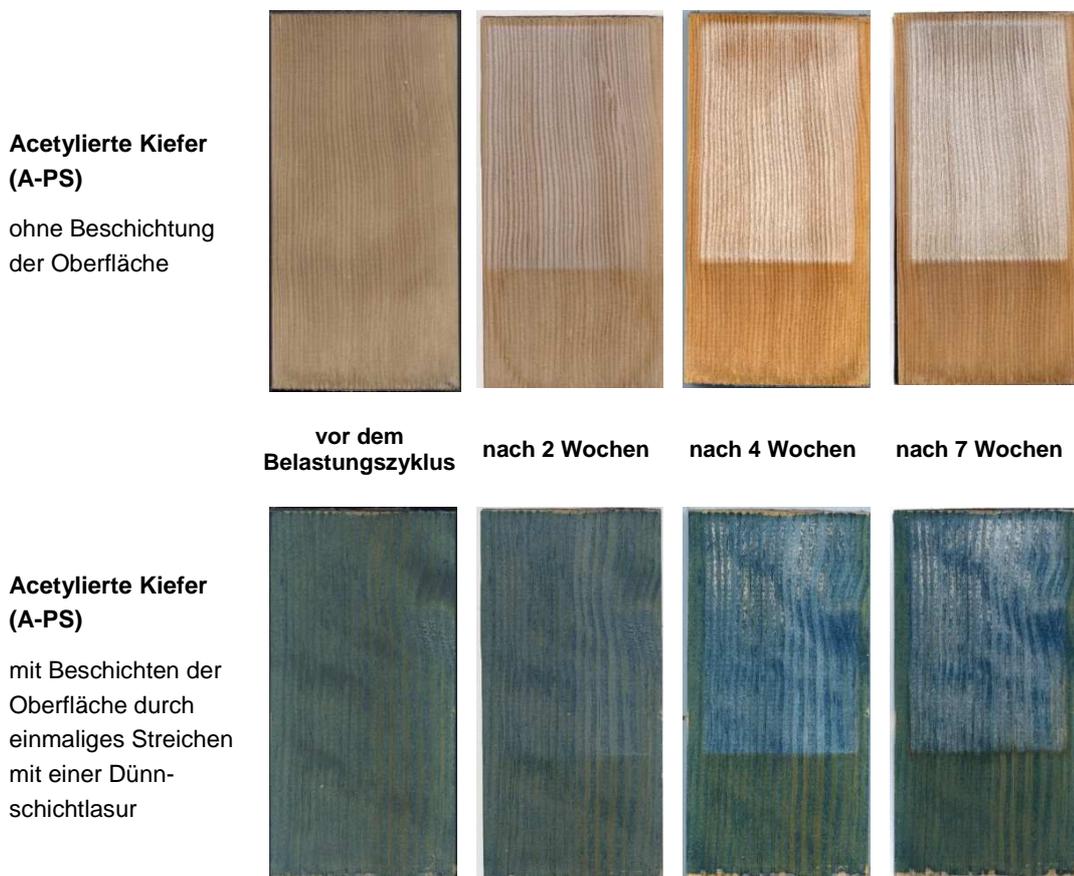


Abbildung 96: Künstliche Schnellbewitterung mittels Q-UV an acetylierter Kiefer

### 9) Unbehandelte Buche (UT-FS)

Buchenholz wird normalerweise nicht für Anwendungen in bewitterten Bereichen (Gefährdungsklasse 3) eingesetzt. Der Grund dafür ist in der schlechten Stabilität des Holzes gegen Bewitterung zu suchen. Um einen besseren Vergleich zur acetylierten Buche zu haben, wurde die Buche trotzdem der Schnellbewitterung ausgesetzt. Die unbehandelte Buche (Abbildung 97) zeigt einen relativ schlechten Widerstand gegen die Bewitterung.

Schon nach 2 Wochen ist das unbeschichtete Holz leicht vergraut. Das beschichtete Holz zeigt nur eine leichte Aufhellung.

Nach der 4. Woche der Bewitterung ist das unbeschichtete Holz schon sehr stark vergraut. Das abgebaute und ausgewaschene Lignin setzt sich seitlich am Rand der Probe ab. Das beschichtete Material zeigt eine leicht fortschreitende Vergrauung und eine beginnende Ablösung der Beschichtung im Bereich des Frühholzes.

Nach 7 Wochen Bewitterungszeit ist die unbeschichtete Probe vollständig vergraut und zeigt einen weit fortgeschrittenen Holzabbau mit einem deutlichen Waschbretteffekt. Ein Teil der Cellulose ist stark erodiert. Die beschichtete Probe zeigt eine geringere Vergrauung. Nur im Bereich des Frühholzes ist eine Ablösung der Beschichtung und eine fortschreitende Vergrauung sichtbar.



Abbildung 97: Künstliche Schnellbewitterung mittels Q-UV an unbehandelter Buche

### 10) Acetylierte Buche (A-FS)

Die acetylierte Buche (Abbildung 98) zeigt kein stark verbessertes Verhalten während der Schnellbewitterung im Vergleich zur unbehandelten Buche.

Nach 2 Wochen Bewitterung war die unbeschichtete acetylierte Probe wie die unbehandelte und unbeschichtete Buche leicht vergraut. Die beschichtete Probe zeigt nur eine leichte Aufhellung.

Nach 4 Wochen Schnellbewitterung ist die unbeschichtete Probe sehr stark vergraut. Das beschichtete Holz zeigt eine Vergrauung im Bereich des Frühholzes in Verbindung mit einer beginnenden Ablösung der Beschichtung.

Nach der 7. Woche ist die unbeschichtete Probe stark vergraut und zeigt eine deutliche Erosion der Cellulose. Die beschichtete Probe zeigt eine stärkere Ablösung der Beschichtung, aber noch keinen deutlichen Waschbretteffekt.



Abbildung 98: Künstliche Schnellbewitterung mittels Q-UV an acetylierter Buche

#### 4.4.4.3 Zusammenfassung

Es kann allgemein festgestellt werden, dass keines der im Projekt einbezogenen Vergütungsverfahren eine so hohe UV-Stabilität oder Bewitterungsstabilität aufweist, dass eine Beschichtung der Oberfläche des Holzes überflüssig wird. Alle unbeschichteten Proben zeigten in der Kurzbewitterung eine Vergrauung, die aus der Degradation des Lignins und dem anschließenden Auswaschen des abgebauten Lignins stammt. Eine Stabilisierung der Oberfläche wird durch das Vergütungsverfahren zwar erreicht, sie ist aber ohne weitere Schutzmaßnahmen kein ausreichender Witterungsschutz.

Auch die aufgebrauchte Beschichtung konnte keines der Hölzer ausreichend vor der Verwitterung schützen.

Eine insgesamt bessere Stabilität zeigen die mit Harz behandelten Proben. Bei dem mit Melaminharz behandelten Holz (MRT-PS), dem Wachs-Harz behandelten Holz (HRT-PS) und der Holzvernetzung (DRT-PS) zeigt sich eine deutlich verbesserte Stabilität der bewitterten Proben gegenüber dem unbehandelten Holz. Dieses Verhalten ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass das abgebaute Lignin aufgrund des Harzes schlechter ausgewaschen werden kann. Dadurch wird die Geschwindigkeit des Ligninabbaus reduziert. Am besten zeigt sich dieser Effekt an den Wachs-Harz behandelten Proben. Leider zeigt sich genau bei diesem Vergütungsverfahren eine schlechte Haftung der Beschichtung, so dass es fast zur vollständigen Ablösung der Beschichtung während der Bewitterung kam.

Die hitzebehandelten Proben sowie die acetylierten Proben haben keinen behandlungsbedingten Schutz vor Ligninabbau oder Auswaschung. Deshalb war das Verhalten während der Schnellbewitterung gegenüber den unbehandelten Proben nicht verbessert.

Über das Verhalten der behandelten Hölzer bei anderen Beschichtungen, vor allem dickschichtigen Lacken und Lasuren, kann durch diesen Versuch keine Aussage getroffen werden. Bei solchen Beschichtungen werden andere Holzeigenschaften für das Verhalten der Proben wichtiger. Die Untersuchung der UV- und Bewitterungsstabilität im Kurzzeitversuch kann nicht in Beziehung zu einer gewissen Zeit der Außenbewitterung gesetzt werden.

#### 4.4.5 Bewitterung und Alterung

Die Proben wurden nach der Bewitterung im Q-UV-Gerät nach einer Belastungsdauer von 1.350 Stunden nach folgenden Kriterien ausgewertet:

- ⇒ Rissbildung an den Proben,
- ⇒ Ablättern der Beschichtung an den nichtbeschädigten Proben,
- ⇒ Ablättern der Beschichtung an den Proben mit planmäßiger Schädigung der Oberfläche,
- ⇒ Holzverfärbung an den Proben,
- ⇒ Nachdunkeln und Verfärbungen des Anstriches.

Die Bewertung erfolgte in Tabelle 20 nach dem Zahlenschlüssel von 1 bis 5, wobei die Bewertung 1 für keine Veränderung steht und die Bewertung 5 für starke Veränderung.

Die Nummerierung der Proben entspricht dem Code in der Beschreibung der Anstrichsysteme in Tabelle 18.



**Abbildung 99:** Im Q-UV-Gerät bewitterte Proben des vergüteten Holzes HT(N)-PS mit den Beschichtungen entsprechend Tabelle 18



Abbildung 100: Im Q-UV-Gerät bewitterte Proben des vergüteten Holzes HT(N)-PM mit den Beschichtungen entsprechend Tabelle 18



Abbildung 101: Im Q-UV-Gerät bewitterte Proben des vergüteten Holzes HT(F)-PS mit den Beschichtungen entsprechend Tabelle 18



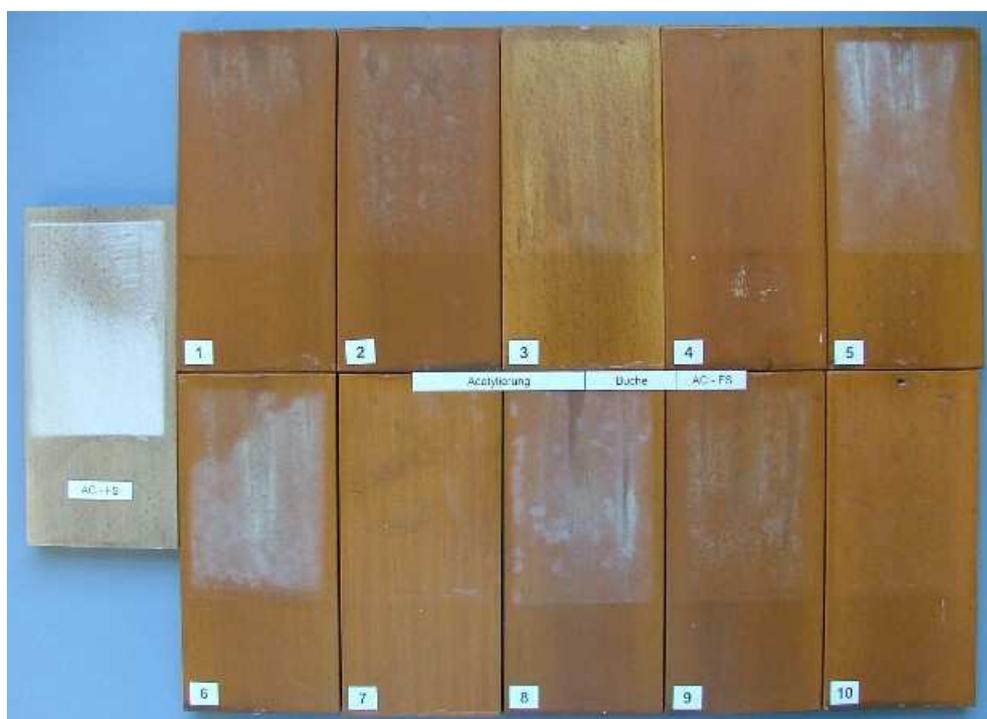
Abbildung 102: Im Q-UV-Gerät bewitterte Proben des vergüteten Holzes DRT-PS mit den Beschichtungen entsprechend Tabelle 18



Abbildung 103: Im Q-UV-Gerät bewitterte Proben des vergüteten Holzes MRT-PS mit den Beschichtungen entsprechend Tabelle 18



**Abbildung 104:** Im Q-UV-Gerät bewitterte Proben des vergüteten Holzes HRT-PS mit den Beschichtungen entsprechend Tabelle 18



**Abbildung 105:** Im Q-UV-Gerät bewitterte Proben des vergüteten Holzes A-FS mit den Beschichtungen entsprechend Tabelle 18



Abbildung 106: Im Q-UV-Gerät bewitterte Proben des vergüteten Holzes A-PS mit den Beschichtungen entsprechend Tabelle 18



Abbildung 107: Im Q-UV-Gerät bewitterte Proben des vergüteten Holzes UT-FS mit den Beschichtungen entsprechend Tabelle 18



Abbildung 108: Im Q-UV-Gerät bewitterte Proben des vergüteten Holzes UT-PR mit den Beschichtungen entsprechend Tabelle 18



Abbildung 109: Im Q-UV-Gerät bewitterte Proben des vergüteten Holzes UT-PS mit den Beschichtungen entsprechend Tabelle 18

Ziel ist es in jedem Fall, die Instandhaltung und damit auch die Reparaturen von beschädigten Beschichtungen zu vereinfachen. Inwieweit dies auch über geringere Schichtdicken erreicht werden kann, soll durch die laufenden und durch weitere Untersuchungen geklärt werden.

Die Ergebnisse der Bewertung sind in Tabelle 20 zusammengefasst.

1.0	Vergütung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Holzvernetzung mit DMDHEU	Melamin-Behandlung	Wachs-/Harz-Imprägnierung	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	unbehandelt	unbehandelt	unbehandelt
1.1	Hersteller	New Option Wood	New Option Wood	Finn-forest	Uni Göttingen	Solutia	Tilo	SHR - Merk	SHR - Merk			
1.2	Allgemeine Bezeichnung	NOW	NOW	Thermoholz			Natwood	Acetylierung	Acetylierung			
<b>2.0 Wirkprinzipien und Farbkennzeichnung der Vergütungsverfahren im Projekt</b>												
2.1	Lumenfüllung											
2.2	Zellwandfüllung											
2.3	Hydroxylgruppen-Reaktion											
2.4	Hydroxylgruppen-Vernetzung											
2.5	Zellwandstrukturänderung											
2.6	unbehandelt											
<b>3.0 Holzarten im Forschungsprojekt</b>												
3.1	Lateinische Bezeichnung	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus pinaster</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Pinus sylvestris</i>
3.2	Allgemeine Bezeichnung	Kiefer	See-Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Buche	Kiefer	Buche	Fichte	Kiefer
3.3	Kurzzeichen	HT(N)-PS	HT(N)-PM	HT(F)-PS	DRT-PS	MRT-PS	HRT-PS	A-FS	A-PS	UT-FS	UT-PA	UT-PS
<b>4.0 Bewertung der Rissbildung nach der Bewitterung</b>												
4.1	Dünnschicht D1 mit Impräg.	3	3	2	2	3	2	1	3	2	4	3
4.2	Dünnschicht D2 mit Impräg.	-	2	2	1	-	-	1	2	1	3	4
4.3	Mittelschicht M1 mit Impräg.	2	3	2	2	1	2	2	3	2	1	2
4.4	Mittelschicht M1 ohne Impräg.	3	3	2	-	3	2	1	2	3	3	3
4.5	Mittelschicht M2 mit Impräg.	4	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1
4.6	Dickschicht DD1 mit Impräg.	3	-	2	2	4	2	3	4	3	3	3
4.7	Dickschicht DD1 ohne Impräg.	3	3	2	-	3	1	2	4	4	4	5

1.0	Vergütung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Holzvernetzung mit DMDHEU	Melamin-Behandlung	Wachs-/Harz-Imprägnierung	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	unbehandelt	unbehandelt	unbehandelt
<b>5.0 Bewertung der Abwitterung und Ablätterung / unbeschädigte Oberfläche (beschädigte Oberfläche)</b>												
5.1	Dünnschicht D1 mit Impräg.	4 (5)	3 (4)	3 (5)	2 (4)	2 (4)	2 (4)	2 (4)	2 (4)	3 (5)	3 (4)	3 (5)
5.2	Dünnschicht D2 mit Impräg.	- (-)	1 (2)	1 (3)	2 (1)	- (-)	- (-)	1 (1)	2 (2)	1 (2)	2 (2)	2 (2)
5.3	Mittelschicht M1 mit Impräg.	1 (3)	1 (3)	1 (2)	2 (1)	1 (2)	1 (2)	2 (2)	2 (2)	1 (1)	1 (1)	2 (2)
5.4	Mittelschicht M1 ohne Impräg.	2 (2)	1 (3)	2 (2)	- (-)	2 (2)	2 (2)	1 (2)	1 (1)	1 (2)	1 (1)	1 (2)
5.5	Mittelschicht M2 mit Impräg.	2 (2)	1 (3)	1 (3)	1 (2)	1 (2)	2 (2)	1 (2)	1 (2)	1 (2)	1 (1)	2 (2)
5.6	Dickschicht DD1 mit Impräg.	2 (4)	- (-)	2 (3)	2 (2)	3 (4)	2 (2)	2 (2)	2 (2)	3 (3)	2 (4)	2 (4)
5.7	Dickschicht DD1 ohne Impräg.	2 (4)	2 (2)	2 (3)	- (-)	4 (4)	2 (2)	2 (2)	2 (3)	3 (3)	3 (3)	4 (4)
<b>6.0 Bewertung der Verfärbung / Nachdunkeln des Holzes (Anstrichverfärbung)</b>												
6.1	Dünnschicht D1 mit Impräg.	2 (3)	2 (4)	2 (3)	5 (4)	5 (4)	4 (4)	3 (2)	2 (3)	1 (4)	4 (3)	5 (2)
6.2	Dünnschicht D2 mit Impräg.	3 (3)	3 (3)	- (-)	3 (2)	- (-)	- (-)	2 (2)	3 (2)	2 (3)	2 (2)	3 (3)
6.3	Mittelschicht M1 mit Impräg.	2 (2)	2 (1)	3 (1)	2 (3)	2 (2)	1 (2)	2 (3)	2 (3)	1 (1)	1 (1)	3 (2)
6.4	Mittelschicht M1 ohne Impräg.	3 (3)	3 (2)	3 (3)	- (-)	2 (3)	1 (2)	2 (3)	2 (2)	1 (1)	1 (2)	2 (2)
6.5	Mittelschicht M2 mit Impräg.	2 (2)	3 (4)	2 (2)	3 (2)	4 (2)	3 (4)	2 (2)	8 (2)	2 (2)	2 (2)	4 (2)
6.6	Dickschicht DD1 mit Impräg.	2 (3)	- (-)	2 (4)	3 (2)	3 (2)	2 (3)	2 (3)	2 (4)	2 (4)	2 (4)	3 (4)
6.7	Dickschicht DD1 ohne Impräg.	2 (5)	3 (3)	3 (4)	- (-)	2 (5)	2 (4)	2 (4)	2 (3)	3 (3)	3 (4)	4 (3)
<b>7.0 Mittelwertbildung aus Rissbildung und Ablättern des Anstriches</b>												
7.1	Dünnschicht D1 mit Impräg.	4,0	3,3	3,3	2,7	3,0	2,7	2,3	3,0	3,3	3,7	3,7
7.2	Dünnschicht D2 mit Impräg.	-	1,7	2,0	1,3	-	-	1,0	2,0	1,3	2,3	2,7
7.3	Mittelschicht M1 mit Impräg.	2,0	2,3	1,7	1,7	1,3	1,7	2,0	2,3	1,3	1,0	2,0
7.4	Mittelschicht M1 ohne Impräg.	2,3	2,3	1,7	-	2,3	2,0	1,3	1,3	2,0	1,7	2,0
7.5	Mittelschicht M2 mit Impräg.	2,7	1,7	1,7	1,3	1,3	2,0	1,3	1,3	1,3	1,3	2,0
7.6	Dickschicht DD1 mit Impräg.	3,0	-	2,3	2,0	3,7	2,0	2,3	2,7	3,0	3,0	3,0
7.7	Dickschicht DD1 ohne Impräg.	3,0	2,3	2,3	-	3,7	1,7	2,0	3,0	3,3	3,3	4,3

Tabelle 20: Zusammenstellung der Bewertung der Anstriche

#### 4.4.6 Bewertung

Im Abschnitt 7 der Tabelle 20 ist aus der Bewertung zur Rissbildung und zur Abblätterung des Anstriches mit und ohne Vorschädigung der Oberfläche der Mittelwert gebildet. Dieser Mittelwert gibt einen Anhalt für die Unterschiede zwischen den eingesetzten Proben aus vergütetem Holz und den verschiedenen Anstrichsystemen. Das Ergebnis der Mittelwertbildung ist in Abbildung 110 nochmals graphisch dargestellt. Für die Darstellung wurde zum besseren Erkennen der positiv bewerteten Proben der Kehrwert des Mittelwertes gewählt.

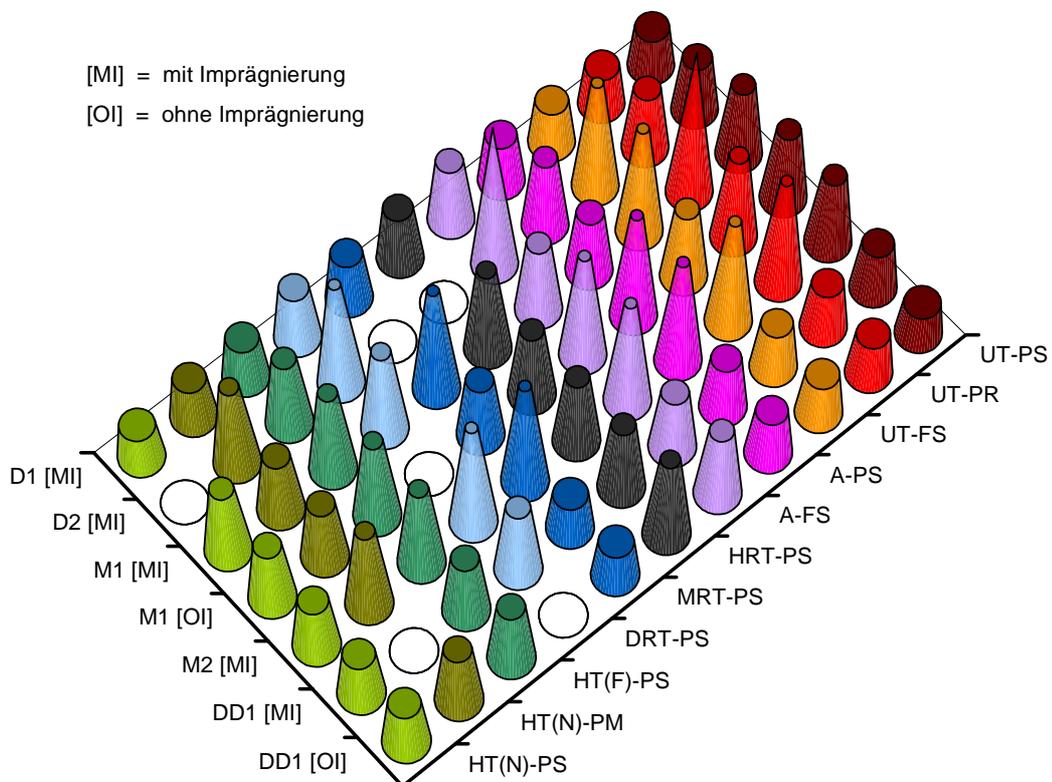


Abbildung 110: Mittelwerte der Bewitterung

Der vollausbildete Kegel weist auf eine gute Bewertung hin. Je niedriger der Kegelstumpf ist, um so ungünstiger ist die Bewertung der Oberfläche.

Aus Abbildung 110 ist zu erkennen, dass die ungünstigsten Ergebnisse der Beschichtung erreicht wurden mit:

- ⇒ Dünnschicht-System D1 mit Imprägnierung,
- ⇒ Dickschicht-System DD1 mit Imprägnierung,
- ⇒ Dickschicht-System DD1 ohne Imprägnierung.

Die besseren Ergebnisse der Beschichtung wurden erreicht mit:

- ⇒ Dünnschicht-System D2 mit Imprägnierung,
- ⇒ Mittelschicht-System M1 mit Imprägnierung,
- ⇒ Mittelschicht-System M1 ohne Imprägnierung,
- ⇒ Mittelschicht-System M2 mit Imprägnierung.

Die Versuchsergebnisse der Belastung im Q-UV-Gerät geben einen Anhalt für die Entwicklungsrichtung, die zeigt, dass mit Dünnschicht- und Mittelschicht-Systemen die besseren Ergebnisse zu erwarten sind.

## **4.5 Bearbeitung**

### **4.5.1 Ziele**

Aus einer Vielzahl von Anwendungen liegen Erfahrungen vor, dass die bearbeitungstechnischen Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen veränderliche Größen sind. Die Holzeigenschaften können sich verändern, wenn von außen physikalische und/oder chemische Einflüsse einwirken, wie z. B.:

- ⇒ Temperatur,
- ⇒ Druck,
- ⇒ Luftfeuchtigkeit,
- ⇒ Flüssigkeiten,
- ⇒ Beschichtungen.

Derartige Einwirkungen treten z. B. kurzfristig im Zuge der Bearbeitung der Hölzer/Holzwerkstoffe oder langfristig während der Gebrauchsdauer auf.

Bei den verschiedenen im Projekt angewendeten Modifikationsverfahren wirken zusätzliche Parameter auf die Hölzer, über die Auswirkungen wenig Informationen vorliegen.

Deshalb war es innerhalb des Projekts notwendig, zur Frage der Bearbeitung Stellung zu nehmen. Die hierfür notwendigen Versuche wurden in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Leitz GmbH & Co. KG, D-73447 Oberkochen durchgeführt.

Auch wenn in den Versuchen nicht alle Fragen hinreichend beantwortet werden konnten, geben die Ergebnisse Anhalt für grundsätzliche Fragen zur Bearbeitung von vergütetem Holz. Diese Ergebnisse wurden durch eine Umfrage bei Firmen mit Erfahrungen aus der Bearbeitung von vergütetem Holz untermauert.

#### **4.5.2 Erkenntnisse aus der Bearbeitung**

Beim Herstellen der Probekörper wurde das Verhalten der im Projekt einbezogenen vergüteten Hölzer hinsichtlich Neigung zur Splitterbildung, Staubentwicklung und Geruchsbildung beobachtet und dokumentiert.

Neben den eigenen Beobachtungen wurden die Erfahrungen anderer Institutionen und Hersteller/Bearbeiter, die bereits Erfahrungen mit der Bearbeitung von modifizierten Hölzern gesammelt haben, mittels einer Umfrage einbezogen.

Um diese Fragestellung auf möglichst breiter Basis beantworten zu können, wurde ein Fragebogen (Anlage 1 - Fragebogen Verarbeitung) erarbeitet. Er wurde allen Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Der Rücklauf der Umfrage zeigt verschiedene verfahrensspezifische Merkmale auf, die im Zusammenhang mit der Bearbeitung der verschiedenen dimensionsstabilisierten Hölzer näher betrachtet werden sollten. Diese sind nachfolgend zusammengefasst:

- ⇒ Geruch / Geruchsbelästigung Spanentwicklung
- ⇒ Spanentwicklung
- ⇒ Staubbelastung
- ⇒ Sprödigkeit
- ⇒ Bearbeitung
  - Standzeit
  - Schnittwiderstand
  - Verschmutzung
  - Verharzung

Die Auswertung der Fragebögen und die eigenen Erfahrungen/Beobachtungen hinsichtlich der Bearbeitung der Hölzer aus den verschiedenen Vergütungsverfahren sind in Tabelle 21 bis Tabelle 23 zusammengefasst.

Nr.	Verfahren	Erfahrungen / Beobachtungen – materialbezogen			
		Geruch	Spanbildung	Staubbildung	Sonstiges
1	Hitzebehandlung	leicht verbrannt rasch verfliegend	kaum Späne sehr fein trocken	überwiegend Staub	übereinstimmend erhöhte Sprödigkeit
2	Holzvernetzung mit DMDHEU	nein	kurze Späne	feiner weißer Staub	leicht erhöhte Sprödigkeit
3	Melaminbehandlung	nein	unverändert	leicht erhöht	-
4	Wachs-/Harz- imprägnierung	nein	unverändert	unverändert	leicht speckige Oberfläche
5	Acetylierung	essigartig  lange anhaltend	unverändert	unverändert	ggf. Schleimhautreizung

Tabelle 21: Materialbezogene Beobachtungen bei der maschinellen Bearbeitung von Holz aus den verschiedenen Vergütungsverfahren

Wenn die Bearbeitungseigenschaften von unbehandelten und vergüteten Hölzern gegenübergestellt werden, dann sind die Veränderungen bei den hitzebehandelten Hölzern am auffälligsten. Die eigenen Erfahrungen und die Angaben in den ausgewerteten Fragebögen veranlassen die übereinstimmenden, deutlichen Forderungen nach

- ⇒ leistungsfähigen Absaugungseinrichtungen,
- ⇒ verminderten Vorschubgeschwindigkeiten,
- ⇒ Anpassung des Anpressdrucks an die eventuell reduzierten Festigkeitseigenschaften.

Es wurde beobachtet, dass die Sprödigkeit in Abhängigkeit von den Prozessparametern bei der Hitzebehandlung - insbesondere mit steigender Behandlungstemperatur - zunimmt.

Des weiteren wurde übereinstimmend die Geruchsbeeinträchtigung bei acetylierten Hölzern angesprochen. Der charakteristische essigartige Geruch ist nicht nur bei der Bearbeitung festzustellen. Er tritt bereits bei der Lagerung dieser Hölzer auf und bleibt über Wochen bis Monate bestehen.

Bei den werkzeugbezogenen Erfahrungen ist die herausragende und übereinstimmend beschriebene Beobachtung die Notwendigkeit scharfer Bearbeitungswerkzeuge bei den hitzebehandelten Hölzern. Des weiteren wird auf die Notwendigkeit verwiesen, die jeweilige Vorschubgeschwindigkeit den individuellen Gegebenheiten anzupassen. Hierdurch wird Einfluss auf die Oberflächengüte bzw. auf die Mobilisierung von Harzen genommen. Letztere kann dazu führen, dass die Oberfläche als unregelmäßig und „leicht speckig“ wahrgenommen wird.

Nr.	Verfahren	Erfahrungen / Beobachtungen – werkzeugbezogen			
		Standzeit	Schnittwiderstand	Verschmutzung	Verharzung
1	Hitzebehandlung	überwiegend geringer	geringer gleich	gleich höher	übereinstimmend geringer
2	Holzvernetzung mit DMDHEU	geringer	höher	gleich	geringer gleich
3	Melamin- behandlung	geringer	höher	gleich	gleich
4	Wachs-/Harz- imprägnierung	gleich höher	geringer	gleich	höher
5	Acetylierung	gleich	gleich	gleich	geringer

Tabelle 22: Werkzeugbezogene Beobachtungen bei der maschinellen Bearbeitung von Holz aus den verschiedenen Vergütungsverfahren

Die Frage der Entsorgung wurde nur bei den thermisch behandelten Hölzern angesprochen, was die nachfolgende Tabelle 23 dokumentiert.

Nr.	Verfahren	Erfahrungen / Beobachtungen – werkzeugbezogen		
		Entsorgung	Probleme	Untersuchungen
1	Hitzebehandlung	thermisch	keine	keine eigenen
2	Holzvernetzung mit DMDHEU	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben
3	Melamin-behandlung	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben
4	Wachs-/Harz-imprägnierung	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben
5	Acetylierung	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben

Tabelle 23: Erfahrungen bei der Entsorgung von Holz aus den verschiedenen Vergütungsverfahren

### 4.5.3 Versuche zur Bearbeitung

Um die Voraussetzungen für eine materialgerechte Verarbeitung von vergütetem Holz sicherzustellen, müssen die Maschinen- und Werkzeugparameter auf das zu bearbeitende Holz abgestimmt werden. Die erforderliche Oberflächengüte ist dabei abhängig von Schneiden-Qualität und Schneiden-Geometrie.

Die Werkzeugabstimmung sowie die Versuche wurden vom Projektpartner Leitz GmbH & Co. KG, D-73447 Oberkochen durchgeführt.

#### 4.5.3.1 Aufbau und Durchführung

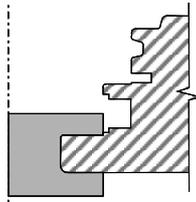
Auf Basis der für die Beurteilung für die Bearbeitung beschriebenen Merkmale und aus den bisherigen Erkenntnissen der Bearbeitung von unbehandeltem Holz im Fenster- und Fassadenbau wurden die nachfolgenden Bearbeitungskriterien an vergütetem Holz untersucht.

- ⇒ Bearbeitungsqualität mit den Merkmalen:
  - Fräsbild
  - Schnittfläche
  - Kanten
  - Rauheit der Hirnholzflächen
- ⇒ Bearbeitbarkeit und Vorspaltung
- ⇒ Schnittwiderstand bzw. Schnittkraft
- ⇒ Werkzeugverschmutzung und –verharzung
- ⇒ Spanentwicklung
- ⇒ Staubbelastung

Die innerhalb des Projekts vorausgegangenen Untersuchungen zeigten, dass bei vergütetem Hölzern eine individuelle Anpassung der Werkzeuge erforderlich ist.

Für die Untersuchungen zur Bearbeitbarkeit von modifizierten Hölzern wurden Bearbeitungsgänge gewählt, bei denen es sich um Teilbereiche aus fensterbautypischen Bearbeitungen handelt. Sie werden bei der Profilierung und Formatierung der Einzelteile von Fenstern eingesetzt. Hierbei wird eine sehr hohe Anforderung an die Oberflächengüte der gefrästen Flächen gestellt, da diese in der Regel vor der Oberflächenbeschichtung der Fenster nicht mehr überarbeitet werden. Besonderes Augenmerk gilt hier den Hirnholzflächen, da in diesen Bereichen die Grundlage für einen geschlossenen Anstrichfilm hergestellt werden muss.

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Versuche zur Bearbeitung sind nachfolgend beschrieben.

Nr.	Bezeichnung	Beschreibung
1	Fräsen längs	
	Arbeitsgang:	Längsfräsung mit geringem Holzübermaß
	Zuordnung Fensterfertigung:	Umfräsen von Flügelrahmen
	Beurteilungskriterien:	Fräsbild, Schnittfläche, Kanten, Übergänge

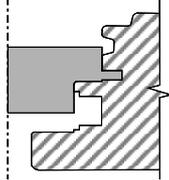
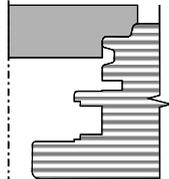
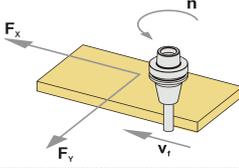
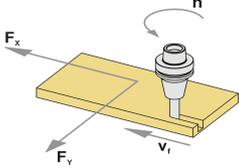
Nr.	Bezeichnung	Beschreibung	
2	<b>Fräsen längs</b>		
		Arbeitsgang:	Fräsen Nut bzw. Falz
		Zuordnung Fensterfertigung:	Profilieren von Blendrahmen und Flügel, Umfälen der Flügel
		Beurteilungskriterien:	Fräsbild, Schnittfläche, Kanten, Übergänge
3	<b>Fräsen quer</b>		
		Arbeitsgang:	Fräsen quer zur Faser
		Zuordnung Fensterfertigung:	Umfälzen der Flügel
		Beurteilungskriterien:	Schnittfläche, Kanten, Faserausbrüche
4	<b>Sägen quer</b>		
		Arbeitsgang:	Sägen quer zur Faser
		Zuordnung Fensterfertigung:	Ablängen der Profile
		Beurteilungskriterien:	Schnittfläche, Kanten
5	<b>Fräsen längs</b>		
		Arbeitsgang:	Fräsen Kante mit geringem Übermaß
		Beurteilungskriterien:	Schnittkraft
6	<b>Fräsen längs</b>		
		Arbeitsgang:	Fräsen Nut
		Beurteilungskriterien:	Schnittkraft

Tabelle 24: Beschreibung der im Rahmen des Projekts durchgeführten Versuche zur Bearbeitung von dimensionsstabilisiertem Holz

Die Versuche zur Bearbeitung der Probekörper wurden an dem Bearbeitungszentrum der Firma Leitz durchgeführt (Abbildung 111). Die Werkstücke wurden dabei über Spannvorrichtungen auf dem Maschinentisch fixiert (Abbildung 112).



Abbildung 111: Bearbeitungszentrum der Fa. Leitz für die Durchführung der Bearbeitungsversuche

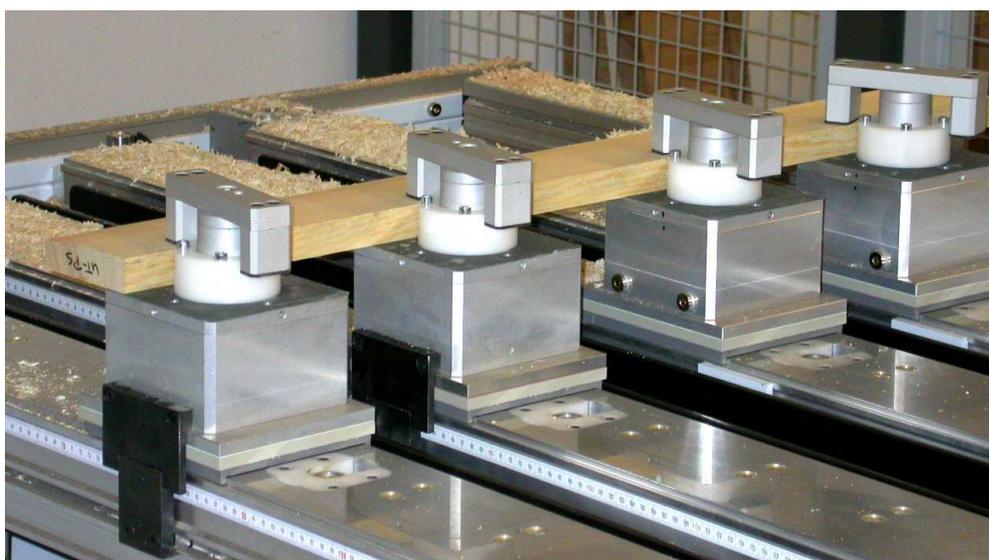


Abbildung 112: Spannvorrichtung für die Probekörper

Für die Bearbeitung der Probekörper wurden nachfolgende Parameter festgelegt:

<b>Drehzahl n</b>	10.000	1/min (Fräsen)
	6.000	1/min (Sägen)
<b>Vorschubgeschwindigkeit <math>v_f</math></b>	5	m/min (quer)
	8	m/min (längs)
<b>Zähnezahl</b>	Z2+2	(Fräsen)
	Z28	(Sägen)
<b>Werkstoff Schneiden</b>	HW	(Hartmetall)
<b>Bearbeitungsrichtung</b>	Gegenlauf	
<b>Bearbeitungszugabe <math>a_e</math> beim Fügen</b>	3	mm
<b>Werkzeugsysteme</b>	Leitz ProFix	(Fräsen)
	Leitz ProfilCut	(Fräsen)
	Leitz OptiCut AS	(Sägen)

#### 4.5.3.2 Ergebnisse aus den Versuchen

Die Ergebnisse der Versuche zur Bearbeitung gliedern sich in 2 Teilbereiche:

- a) Bearbeitungsqualität: - Versuch 1 bis 4
- b) Schnittkräfte beim Fügen und Nuten - Versuch 5 und 6

Die Versuche an den vergüteten Hölzern wurden im Vergleich zu unbehandeltem Holz durchgeführt.

#### a) Bearbeitungsqualität

Die Bearbeitungsqualität wurde visuell überprüft. Die Kriterien für die Beurteilung waren das Fräsbild, die Schnittflächen, die Kanten sowie die Übergänge. Die Feststellungen sind nachfolgend zusammengefasst.

Nr.	Kennung	Feststellungen aus der Bearbeitung
1	 HT (N)-PS	⇒ alle Flächen sehr gut, glatter als bei unbehandeltem Holz ⇒ keine spürbaren Übergänge, glatte Hirnholzflächen
2	 HT (N)-PM	⇒ glatte Kanten ⇒ keine Ausrisse an den Hirnholzkanten ⇒ keine Gratbildung
3	 HT (F)-PS	⇒ teilweise Spanschläge sichtbar ⇒ Farbunterschiede am Hirnholz ⇒ keine bis geringe Ausrisse beim Sägen an der Austrittsseite  <u>Anmerkung:</u> Die Feststellungen zur Bearbeitbarkeit der verschiedenen Hitzebehandlungsverfahren waren vergleichbar und wurden deshalb zusammengefasst.
4	 DRT-PS	⇒ alle Flächen sehr gut, deutlich glatter als bei unbehandeltem Holz ⇒ keine spürbaren Übergänge, sehr glatte Hirnholzflächen ⇒ keine Ausrisse an der Hirnholzkante ⇒ keine Gratbildung ⇒ Ausrisse beim Sägen an der Austrittsseite, vergleichbar mit unbehandeltem Holz
5	 MRT-PS	⇒ alle Flächen sehr gut, deutlich glatter als bei unbehandeltem Holz ⇒ keine spürbaren Übergänge, sehr glatte Hirnholzfläche ⇒ sehr glatte Kanten ⇒ keine Ausrisse an der Hirnholzkante ⇒ keine Gratbildung ⇒ Ausrisse beim Sägen an der Austrittsseite, geringer als bei unbehandeltem Holz

Nr.	Kennung	Feststellungen aus der Bearbeitung
6	 HRT-PS	<p>⇒ alle Flächen sehr gut, deutlich glatter als bei unbehandeltem Holz</p> <p>⇒ keine spürbaren Übergänge, sehr glatte Hirnholzfläche</p> <p>⇒ sehr glatte Kanten, leicht „speckig“</p> <p>⇒ keine Ausrisse an der Hirnholzkante</p> <p>⇒ keine Gratbildung</p> <p>⇒ Ausrisse beim Sägen an der Austrittsseite, geringer als bei unbehandeltem Holz</p> <p><u>Anmerkung:</u> Die Behandlung der Probekörper erfolgte nicht über den gesamten Querschnitt. Die Feststellungen beziehen sich auf die behandelten Bereiche.</p>
7	 A-FS	<p>⇒ alle Flächen sauber</p> <p>⇒ keine spürbaren Übergänge, glatte Hirnholzflächen</p> <p>⇒ keine Ausrisse an der Hirnholzkante</p> <p>⇒ geringe Gratbildung</p> <p>⇒ glatte Kanten</p> <p>⇒ Ausrisse beim Sägen an der Austrittsseite, geringer als bei unbehandeltem Holz</p>
8	 A-PS	<p>⇒ Es wurden keine Versuche durchgeführt.</p>
9	 UT-FS	<p>⇒ alle Flächen sauber</p> <p>⇒ keine spürbaren Übergänge, glatte Hirnholzflächen</p> <p>⇒ keine Ausrisse an der Hirnholzkante</p> <p>⇒ geringe Gratbildung</p> <p>⇒ glatte Kanten</p> <p>⇒ Ausrisse beim Sägen an der Austrittsseite</p>
10	 UT-PA	<p>⇒ Es wurden keine Versuche durchgeführt.</p>

Nr.	Kennung	Feststellungen aus der Bearbeitung
11	 UT-PS	⇒ leicht aufstehende Fasern an der Hirnholzfläche ⇒ Frühholz-Spätholz-Übergänge leicht spürbar ⇒ keine Ausrisse an der Hirnholzkante ⇒ keine spürbaren Übergänge an den Radien ⇒ Kante am Hirnholz mit kleinem Grat ⇒ Ausrisse beim Sägen an der Austrittsseite

Tabelle 25: Zusammenfassung der Feststellungen aus der visuellen Prüfung der bearbeiteten Probekörper

Das Fräsbild und die Bearbeitungsqualität der Schnittflächen, Kanten und Radien bei Längs- und Querbearbeitung der Proben ist gegenüber den unbehandelten Hölzern gleich oder besser.

- ⇒ Es sind keine rauen Flächen vorhanden.
- ⇒ Die Übergänge von Frühholz zu Spätholz sind kaum bis nicht spürbar.
- ⇒ Die Fasertrennung beim Schneiden ist spürbar sauberer.
- ⇒ Je nach Vergütungsverfahren sind die gefrästen Holzoberflächen glatt bzw. leicht „speckig“ (DRT-PS, HRT-PS, MRT-PS).
- ⇒ Die Aussplitterungen an Kanten von modifizierten Hölzern sind mit denen von unbehandeltem Holz vergleichbar mit Ausnahme von hitzebehandeltem Holz. Hier ist die Neigung zum Aussplittern etwas größer

Die erzielte Oberflächenqualität von dimensionsstabilisierten Hölzern ist abhängig von der Schneidengeometrie und -qualität sowie von den gewählten Bearbeitungsparametern. Der größte Anpassungsbedarf ergibt sich für die hitzebehandelten Hölzer, da sie je nach Grad der Behandlung eine höhere Sprödigkeit aufweisen.

Zusammenfassend haben die Versuche ergeben, dass sowohl die Bearbeitung von Längs- als auch von Querholz bei modifizierten Hölzern mit den derzeit im Fensterbau eingesetzten Werkzeugen möglich ist.

Voraussetzung ist, dass die Bearbeitungsparameter in Verbindung mit den individuellen Eigenschaften der modifizierten Hölzer überprüft und angepasst werden. Besonderes Augenmerk ist dabei auf die Bearbeitung der Hirnholzbereiche sowie auf die Formatfräsungen zu legen.

b) Schnittkräfte beim Fügen und Nuten

Die Versuche 5 und 6 dienten zur Ermittlung der Schnittkraft. Im Versuch 5 wurden die Kräfte beim Fügen der Hölzer mit geringem Übermaß, wie es beim Umfälen der Flügel am inneren Überschlag vorkommt, ermittelt. Der Versuch 6 diente der Ermittlung der Schnittkräfte beim Nuten. Beide Versuche wurden auf dem Bearbeitungszentrum der Firma Leitz durchgeführt.

Die einzelnen Bearbeitungsparameter sind nachfolgend zusammengefasst.

<b>Drehzahl n</b>	24.000 1/min
<b>Vorschubgeschwindigkeit <math>v_f</math></b>	5 m/min (längs)
<b>Werkzeug</b>	Schruppfräser
<b>Zähnezahl</b>	Z2 (Fräsen)
<b>Werkzeugdurchmesser D</b>	16 mm
<b>Werkstoff Schneiden</b>	HW (Hartmetall)
<b>Bearbeitungsrichtung</b>	Gegenlauf
<b>Bearbeitungszugabe <math>a_e</math> beim Fügen</b>	3 mm

Die Versuche zeigen, dass die auftretenden Schnittkräfte bei modifizierten Kiefern niedriger sind als bei unbehandelter Kiefer. Auffallend sind die deutlich geringeren Schnittkräfte sowohl für die Längs- als auch für die Querbearbeitung von hitzebehandelten Hölzern und der Holzvernetzung mit DMDHEU. Die Unterschiede für die Melaminbehandlung und die Wachs-Harzbehandlung sind gering.

Bei den hitzebehandelten Hölzern kam es bei den Versuchen mit den gewählten Bearbeitungsparametern teilweise zu Holzabrissen längs der Faser. Dies ist auf die Zunahme der Sprödigkeit durch die Modifizierung zurückzuführen.

Für die acetylierte Buche konnten im Vergleich zur unbehandelten Buche ebenfalls geringere Schnittkräfte bei der Bearbeitung festgestellt werden.

Die Versuchsergebnisse sind in Abbildung 113 und Abbildung 114 dargestellt.

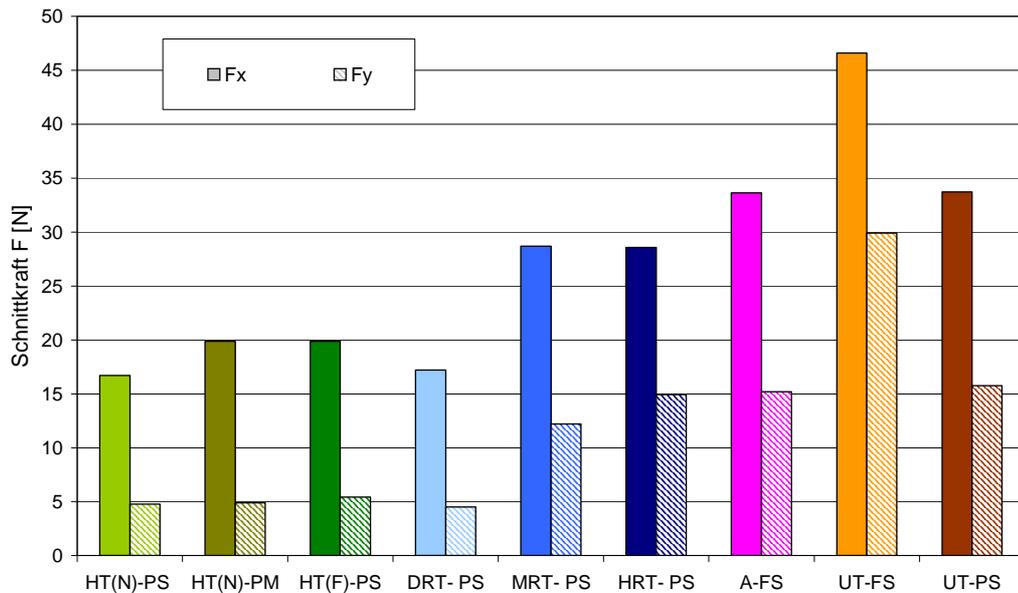


Abbildung 113: Schnittkräfte beim Fügen. Die Schnittkräfte der Querbearbeitung sind in schraffierten Flächen aufgetragen (längs zur Faser x, quer zur Faser y).

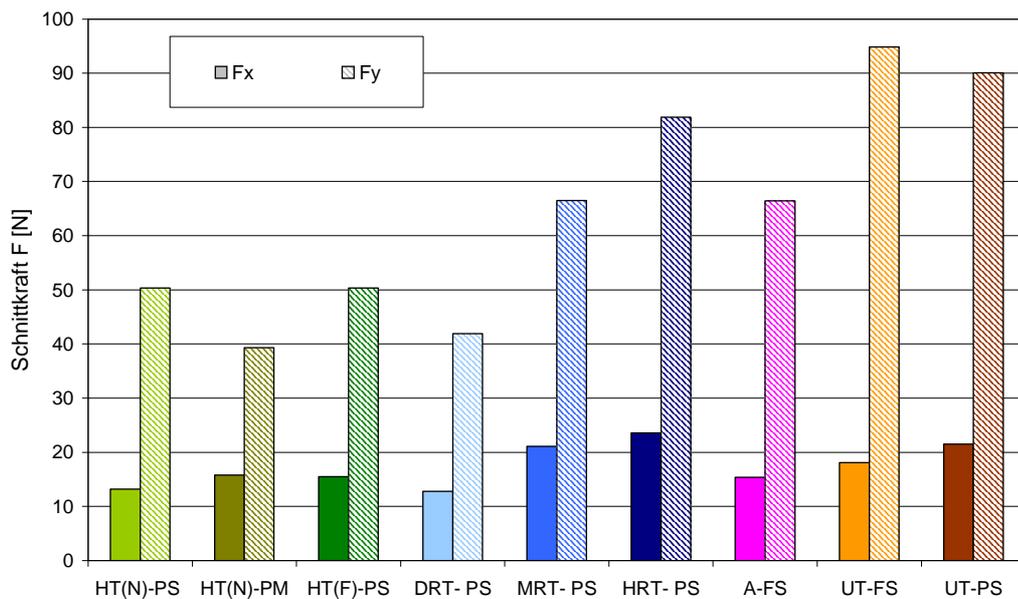


Abbildung 114: Schnittkräfte beim Nuten. Die Schnittkräfte der Querbearbeitung sind in schraffierten Flächen aufgetragen (längs zur Faser x, quer zur Faser y).

#### 4.5.4 Bewertung und Ausblick

Nach den bisher vorliegenden Kenntnissen stellt die Bearbeitung der behandelten Hölzer keine Anforderungen, die über die Ausstattung eines zeitgemäß ausgerüsteten Betriebes hinausgehen.

Die von den Bearbeitern am häufigsten angesprochenen Auffälligkeiten - Geruchsemissionen und hohe Feinstaubgehalte - stellen keine unlösbaren Aufgaben dar. Sowohl bei den hitzebehandelten als auch bei den acetylierten Hölzern verfliegt der charakteristische Geruch relativ schnell.

Die Bearbeitung von modifizierten Hölzern lässt sich grundsätzlich mit der von unbehandelten Hölzern vergleichen. Die Werkzeugparameter sowie die Bearbeitungsgrößen unterscheiden sich nur gering. Am meisten Anpassung erfordert die Bearbeitung von hitzebehandeltem Holz. Durch die verfahrensspezifischen Eigenschaftsänderungen, abhängig vom Behandlungsgrad, sind Anpassungen bezüglich der Schneidengeometrie, des Anpressdrucks bei der Bearbeitung und der Vorschubgeschwindigkeit erforderlich.

Die Standzeiten bei der Bearbeitung modifizierter Hölzer sind gleich hoch oder geringfügig höher zu erwarten. Untersuchungen zur Standzeit und zur Verschmutzung bzw. Verharzung der Werkzeuge wurden innerhalb des Projekts aufgrund des geringen zur Verfügung stehenden Probekörperumfangs nicht durchgeführt.

Die Feinstaubproblematik ist durch geeignete Absaugtechnik zu beherrschen. Dies gilt vor allem für die Bearbeitung von hitzebehandelten Hölzern, da hier nur eine sehr geringe Spanbildung und eine sehr starke Staubbelastung zu beobachten war.

Hinsichtlich der Entsorgung wurden aus den beteiligten Verkehrskreisen noch keine Probleme vorgetragen.

## 4.6 Verträglichkeit mit anderen Werkstoffen

Die Frage der Verträglichkeit konnte bei der Durchführung des Vorhabens nicht in dem für den Praktiker gewünschten Umfang berücksichtigt werden. Dies auch deshalb nicht, weil pauschale Aussagen zu den meisten Themen, wie z. B. Verträglichkeit mit Dichtprofilen und Dichtstoffen, nicht gemacht werden können.

In Tabelle 26 sind Aussagen zur Verträglichkeit, soweit sie allgemein gemacht werden können, zusammengefasst. Weitere Informationen sind in Verbindung mit dem vorliegenden Forschungsprojekt nicht möglich.

Um Klarheit in der praktischen Anwendung zu erhalten, ist es notwendig, die für die Verträglichkeit erforderlichen Nachweise objektbezogen durchzuführen. Bei der objektbezogenen Überprüfung ist dabei nicht nur das vergütete Holz, sondern auch der Einfluss anderer Werkstoffe zu klären.

1.0	Vergütung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Holzvernetzung mit DMDHEU	Melamin-Behandlung	Wachs-/Harz-Imprägnierung	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	unbehandelt	unbehandelt	unbehandelt
1.1	Hersteller	New Option Wood	New Option Wood	Finn-forest	Uni Göttingen	Solutia	Tilo	SHR - Merk	SHR - Merk			
1.2	Allgemeine Bezeichnung	NOW	NOW	Thermo-holz			Natwood	Acetylierung	Acetylierung			
<b>2.0 Wirkprinzipien und Farbkennzeichnung der Vergütungsverfahren im Projekt</b>												
2.1	Lumenfüllung											
2.2	Zellwandfüllung											
2.3	Hydroxylgruppen-Reaktion											
2.4	Hydroxylgruppen-Vernetzung											
2.5	Zellwandstrukturänderung											
2.6	unbehandelt											
<b>3.0 Holzarten im Forschungsprojekt</b>												
3.1	Lateinische Bezeichnung	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus pinaster</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Pinus sylvestris</i>
3.2	Allgemeine Bezeichnung	Kiefer	See-Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Buche	Kiefer	Buche	Fichte	Kiefer
3.3	Kurzzeichen	HT(N)-PS	HT(N)-PM	HT(F)-PS	DRT-PS	MRT-PS	HRT-PS	A-FS	A-PS	UT-FS	UT-PA	UT-PS

1.0	Vergütung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Holzvernetzung mit DMDHEU	Melamin-Behandlung	Wachs-/Harz-Imprägnierung	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	unbehandelt	unbehandelt	unbehandelt
<b>4.0 Hinweise auf notwendige Überprüfung der Verträglichkeit</b>												
4.1	Dichtstoffe DIN 52452	Bei derzeitigem Kenntnisstand keine weiteren Einschränkungen.								---	---	---
4.2	Dichtprofile DIN 52452	Bei derzeitigem Kenntnisstand keine weiteren Einschränkungen.								---	---	---
4.3	Eisenmetalle	Bei derzeitigem Kenntnisstand keine weiteren Einschränkungen.						Korrosion		---	---	---
	Nichteisenmetalle	Bei derzeitigem Kenntnisstand keine weiteren Einschränkungen.						Korrosion		---	---	---
4.4	Kunststoffe Thermoplaste	Bei derzeitigem Kenntnisstand keine weiteren Einschränkungen.								---	---	---
4.5	Kunststoffe Duroplaste	Bei derzeitigem Kenntnisstand keine weiteren Einschränkungen.								---	---	---
4.6	Kunststoffe Elastomere	Bei derzeitigem Kenntnisstand keine weiteren Einschränkungen.								---	---	---

Tabelle 26: Zusammenstellung mit den Hinweisen auf mögliche Unverträglichkeiten

## 4.7 Gesundheits-/Umweltverhalten

Zum Umwelt- und Gesundheitsverhalten der dimensionsstabilisierten Hölzer liegen noch keine umfassenden Erkenntnisse vor, so dass eine abschließende Bewertung derzeit nicht möglich ist.

Aufgrund der bei der Herstellung verwendeten Verfahren und Zusatzstoffe lässt sich abschätzen, dass die dimensionsstabilisierten Hölzer in ihrem Umwelt- und Gesundheitsverhalten in wesentlichen Punkten mit Holzwerkstoffen vergleichbar sind.

Bei der Bearbeitung von dimensionsstabilisiertem Holz müssen deswegen wenigstens die bei Holzwerkstoffen allgemein notwendigen Arbeitsschutzmaßnahmen beachtet werden, wie z. B. die Einhaltung der Luftgrenzwerte (MAK-, TRK-Werte) gas- und staubförmiger Emissionen sowie erforderlichenfalls die Benutzung von Körperschutzmitteln gegen unmittelbaren Hautkontakt und Verletzungen durch Splitter.

Bei der Nutzung von Erzeugnissen aus dimensionsstabilisiertem Holz durch den Verbraucher kann bei einigen Produkten eine Geruchsemission auftreten, z. B. Brandgeruch bei Thermoholz oder Essiggeruch bei acetyliertem Holz. Dieser Geruch ist bei der hier betrachteten Verwendung an Fenstern ohne Bedeutung, da das dimensionsstabilisierte Holz in diesem Fall nur kleinflächig und im Außenbereich eingesetzt wird<sup>[31]</sup>.

Hinsichtlich der Entsorgung sind Produkte aus dimensionsstabilisiertem Holz aus jetziger Sicht ebenfalls grundsätzlich mit Holzwerkstoffprodukten vergleichbar. Sie lassen sich wie diese energetisch oder stofflich verwerten.

Insgesamt ist die Anwendung von dimensionsstabilisiertem Holz ökologisch grundsätzlich positiv zu bewerten, weil auf diesem Wege Holzprodukte mit verbesserter Dauerhaftigkeit unter Verzicht auf Biozide hergestellt werden können.

---

30 **Thaler, M.; 1999:** Rahmenmaterialwahl beim Fensterkauf – eine Marktstudie; Diplomarbeit; Fachhochschule Rosenheim – Fachbereich Holztechnik

31 **Fischer, J.; Reifenstein, H.; 2003:** „Vergütete Hölzer vor dem Hintergrund des Umwelt- und Verbraucherschutzes“; Tagungsband, S. 157 - 175; 23. Holzschutztagung der DGfH

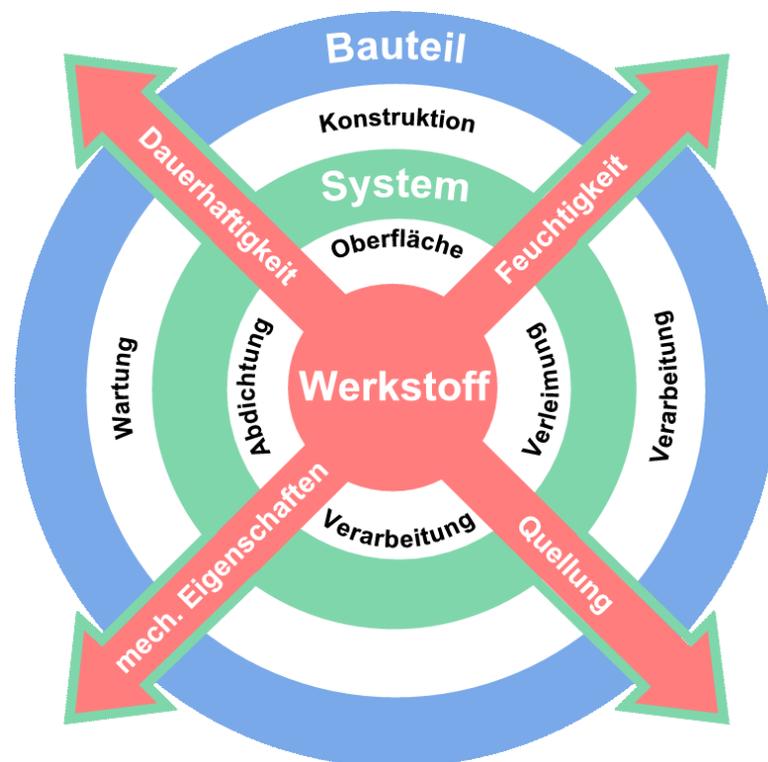
## 5 Bauteil

### 5.1 Allgemeines

Bei Fenstern und Fassaden aus Holz wird in der Regel von einer Nutzungserwartung von 40 Jahren<sup>[32]</sup> ausgegangen. Die angenommene Nutzungserwartung setzt aber voraus, dass eine regelmäßige Wartung durchgeführt und durch die Konstruktion und Herstellung die eingesetzten Werkstoffe und Systeme in ihrem Zusammenwirken abgestimmt und zum Bauteil zusammengeführt sind.

Das Ringdiagramm in Abbildung 115 verdeutlicht diese Zusammenhänge noch einmal und vermittelt, dass es sich bei den Bauteilen Fenster und Fassade um geschlossene Systeme handeln muss.

Zugleich ist zur Kenntnis zu nehmen, dass sich die Qualität des Bauteils nicht aus der Summe der Qualität der eingesetzten Werkstoffe und Systeme bildet. Damit wird deutlich, dass nur eine optimale Abstimmung zwischen Werkstoff, System und Bauteil den gewünschten Erfolg mit der Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit über einen angemessenen Nutzungszeitraum gewährleistet. Dabei wird ein wirtschaftlich vertretbarer Aufwand für die Wartung vorausgesetzt.



**Abbildung 115:** Darstellung der Verknüpfung zwischen Werkstoff, System und Bauteil als Voraussetzung für ein gebrauchstaugliches Fenster

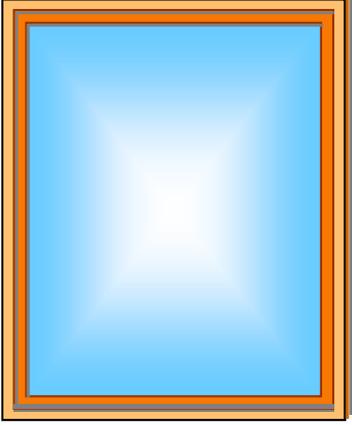
3	Bauteil		Abschätzung der Gebrauchstauglichkeit des Bauteils unter Berücksichtigung der Konstruktion, der notwendigen Schutzmaßnahmen bei den zu erwartenden Einwirkungen aus Nutzung und Umgebungseinflüssen
---	---------	---	---

Tabelle 27: Ausschnitt aus Tabelle 2; Einführung mit der Beschreibung der Ziele bei der Entwicklung und Bewertung von Bauteilen

Für die erfolgreiche Konstruktion und Herstellung eines Fensters und einer Fassade ist die richtige Festlegung der Anforderungen eine notwendige Voraussetzung. Auch das Umfeld ist in diese Betrachtung mit einzubeziehen.

Aus der Erfahrung der vergangenen Jahre ergeben sich folgende Grundsätze und Erkenntnisse:

- ⇒ Bei der Planung von Gebäuden und von Bauteilen für Gebäude ist eine Auseinandersetzung mit der Feuchtigkeits- und Wasserbelastung notwendig. Dieser Grundsatz behält auch bei der Verwendung von vergütetem Holz seine Gültigkeit.
- ⇒ Durch die berechtigte Forderung nach einer weitgehend luftdichten Hüllfläche von Gebäuden treten in den Fugen der Fenster erhöhte Feuchtebelastungen durch die Feuchtigkeit der Raumluft auf.
- ⇒ Abgesehen von Schäden aus Wasser und Feuchtigkeit treten die meisten Schäden durch eine Überforderung der Bauteile auf, wenn die Anforderungen falsch vorgegeben sind. Auch daran wird durch die Verwendung von vergütetem Holz keine Änderung eintreten.
- ⇒ Die Anforderungen an die Funktion sind auf der Grundlage der Produktnorm für Fenster festzulegen.

## 5.2 Werkstoffgerechtes Konstruieren und Verhalten im Differenzklima

Die allgemeinen Grundsätze einer werkstoffgerechten Konstruktion bleiben zunächst auch bei vergütetem Holz erhalten. Soweit vergütetes Holz der direkten Witterungseinwirkung ausgesetzt oder durch ablaufendes Wasser belastet wird, ist durch die zur Witterungsseite geneigte Profilgestaltung und die Vermeidung von schmalen kapillaraktiven Fugen für eine kontrollierte und unmittelbare Wasserableitung zu sorgen.

Bei der Festlegung der Profil- und Rahmenquerschnitte sind die mechanischen Eigenschaften des vergüteten Holzes zu beachten. Soweit Bauteile DIN 1052 „Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken“ zuzuordnen sind, muss für das vergütete Holz der Nachweis der Verwendbarkeit durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder durch eine Zustimmung im Einzelfall geführt werden. Neben der Bemessung der Rahmenquerschnitte auf Durchbiegung und der Tragfähigkeit von mechanischen Verbindungen gilt dies insbesondere für das Bruchverhalten, welches durch die Bruchschlagarbeit ausgedrückt wird. Sie ist bei hitzebehandeltem Holz ungünstiger als bei unbehandeltem Holz und bei den übrigen im Projekt untersuchten Vergütungsverfahren.

Bei der Verwendung von mechanischen Befestigungs- und Verbindungsmitteln ist die Korrosionsbeständigkeit zu klären, dies insbesondere bei der Verwendung von Eisenmetallen in Verbindung mit acetyliertem Holz.

Bei der Profilgestaltung ist die Sprödigkeit und die damit verbundene Gefahr von Holzausrissen zu beachten. Dies gilt nach derzeitiger Kenntnis insbesondere für hitzebehandeltes Holz.

Für die Verklebung sind geeignete Klebstoffe zu verwenden, wobei ein allgemeiner Nachweis der Brauchbarkeit nach DIN EN 204 keinen ausreichenden Anhalt für die Eignung gibt. Die Eignung ist durch eine objektbezogene Prüfung nachzuweisen.

Bei den verleimten Querschnitten mit Lamellen aus vergütetem und nichtvergütetem Holz ist das Stehvermögen bei Klimaänderung gegenüber dem Klima bei der Verklebung der Hölzer zu untersuchen. Die Notwendigkeit, diese Frage abzuklären, gilt nicht nur bei Verwendung der Querschnitte im Differenzklima, sondern auch bei gleichem Umgebungsklima, soweit dies vom Klima der Herstellung abweicht.

Im Rahmen des Vorhabens konnten Untersuchungen zum Stehvermögen nur in begrenztem Umfang durchgeführt werden.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen zeigt sich, dass eine Minimierung der Verformung dadurch erreicht werden kann, dass die Lamellen aus vergütetem Holz und aus nichtvergütetem Holz mit unterschiedlicher Feuchtigkeit verleimt werden. Die Feuchtigkeit ist dabei auf den späteren Anwendungsbereich und das Verhalten des Holzes abzustimmen.

Durch den unsymmetrischen Aufbau der Querschnitte zeigte sich eine Neigung zur Verformung (Abbildung 116). Eine gesicherte Aussage über das Ausmaß der Verformung ist derzeit nicht möglich, so dass weitere Untersuchungen notwendig sind. Diese Feststellung gilt nicht nur für vergütetes Holz, sondern gleichermaßen bei der Verleimung unterschiedlicher Holzarten.

Bedingt ist die Neigung zur Verformung durch die unterschiedlichen Quellungskoeffizienten und der unterschiedlichen Ausgleichsfeuchte im Bereich des Fasersättigungspunktes. Die Unterschiede werden auch aus den in Abbildung 117 dargestellten Arbeitsbereichen bis zu einer Luftfeuchtigkeit von 100 % deutlich.

In Tabelle 28 sind verschiedene Querschnitte ausgehend von monolithischen Querschnitten bis zum Querschnitt im Schichtenaufbau dargestellt.

Bei der Anwendung von vergütetem Holz ist die Verwendung aller in Tabelle 28 dargestellten Querschnitten denkbar. Im Hinblick auf eine mögliche Geruchsbelastigung und die nicht vollständig geklärten Fragen des Gesundheits- und Umweltverhaltens ist die Verwendung von monolithischen Querschnitten aus vergütetem Holz im Einzelfall abzuklären.

Die Untersuchungen zur Oberflächenbehandlung haben gezeigt, dass eine zufriedenstellende Behandlung bei allen Vergütungsverfahren, so weit sie im Verfahren eingeschlossen sind, möglich ist.

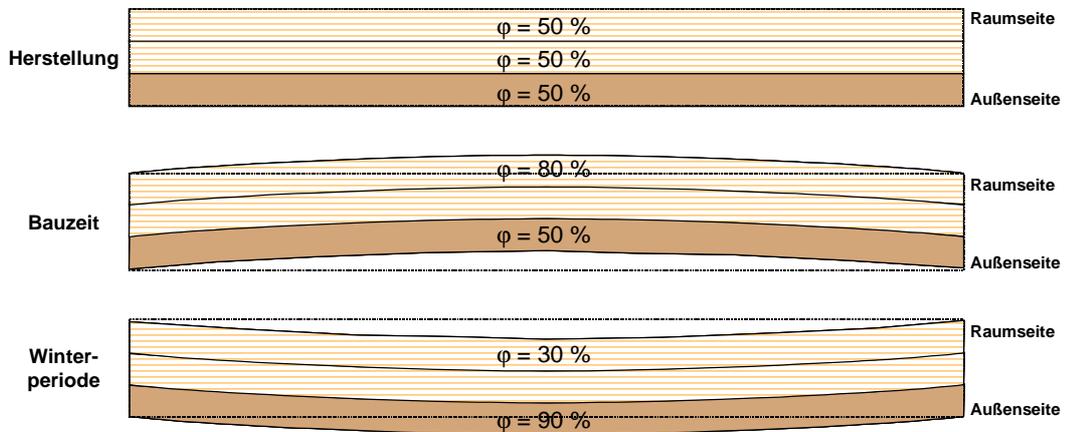


Abbildung 116: Verformung von verleimten Querschnitten mit Lamellen aus vergütetem und nicht vergütetem Holz

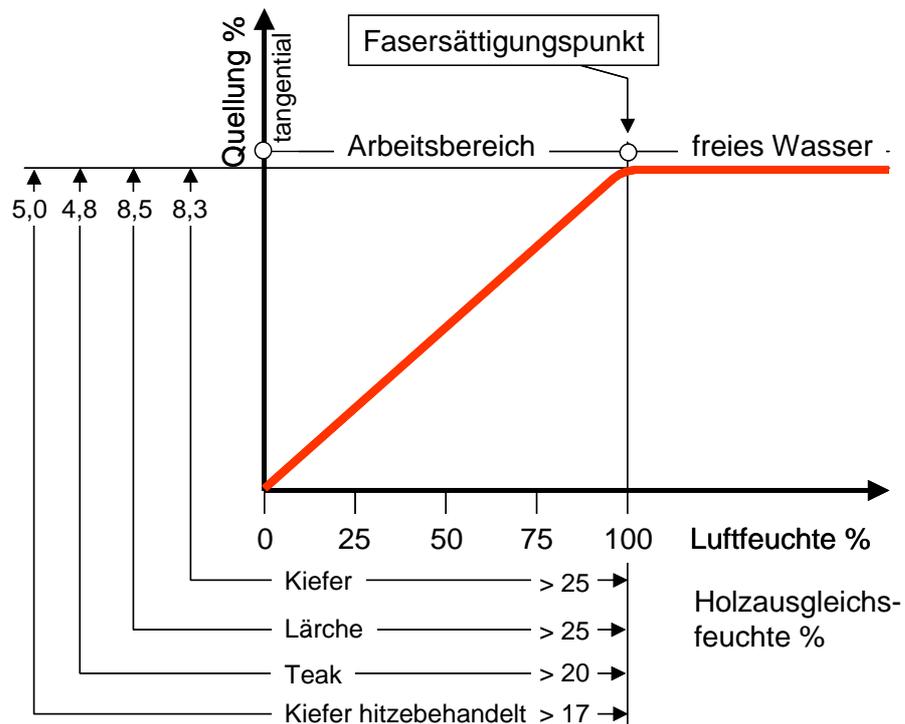


Abbildung 117: Vereinfachte Darstellung der unterschiedlichen Holzausgleichsfeuchten in Bezug zur relativen Luftfeuchte zwischen verschiedenen Holzarten und hitzebehandelter Kiefer sowie Angabe der tangentialen Quellung

Profil	Aufbau	Verbund
<p><b>Vollholz</b> monolithisch</p>		voll
<p><b>Verbundholz</b> alle Lagen aus gleichem Holz</p>		verklebt
<p><b>Verbundholz</b> aus unterschiedlichem Holz</p>		verklebt
<p><b>Verbund</b> Decklagen aus Holz, auch aus unterschiedli- chen Holzarten Mittellage aus verschie- denen Werkstoffen</p>		verklebt
<p><b>Schichten</b> Decklagen aus Holz, auch aus unterschiedli- chen Holzarten Mittellage aus verschie- denen Werkstoffen</p>		mechanisch verbunden

Tabelle 28: Prinzipien des Profilaufbaus für verklebte Querschnitte

### 5.3 Quellen und Schwinden

Das Quellen und Schwinden des Holzes sind wesentliche Merkmale für den Konstrukteur, da er die damit verbundene Querschnittsänderung bei der Erarbeitung einer Konstruktion berücksichtigen muss.

Die im Kapitel 3.3 beschriebenen Versuchsergebnisse zeigen, dass durch die Vergütung eine Verbesserung des Verhaltens bei Änderung der Feuchtigkeitseinwirkung auftritt und damit die bisherigen Erschwernisse bei der Konstruktion gemindert werden. Die Änderungen der Querschnitte aus Feuchtigkeitseinwirkungen können aber auch bei vergütetem Holz nicht außer Acht gelassen werden.

Da sich der Wert der Fasersättigung, d. h. die Ausgleichsfeuchtigkeit, bei der Luftfeuchtigkeit von 100 % durch die Vergütung ändert, ist die bisherige Betrachtung der Holzfeuchtigkeit bezogen auf das Darrgewicht im Vergleich der vergüteten Hölzer untereinander nicht mehr geeignet.

1.0	Vergütung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Holzvernetzung mit DMDHEU	Melamin-Behandlung	Wachs-/Harz-Imprägnierung	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	unbehandelt	unbehandelt	unbehandelt
1.1	Hersteller	New Option Wood	New Option Wood	Finn-forest	Uni Göttingen	Solutia	Tilo	SHR - Merk	SHR - Merk			
1.2	Allgemeine Bezeichnung	NOW	NOW	Thermo-holz			Natwood	Acetylierung	Acetylierung			
<b>2.0</b>	<b>Wirkprinzipien und Farbkennzeichnung der Vergütungsverfahren im Projekt</b>											
2.1	Lumenfüllung											
2.2	Zellwandfüllung											
2.3	Hydroxylgruppen-Reaktion											
2.4	Hydroxylgruppen-Vernetzung											
2.5	Zellwandstrukturänderung											
2.6	unbehandelt											
<b>3.0</b>	<b>Holzarten im Forschungsprojekt</b>											
3.1	Lateinische Bezeichnung	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus pinaster</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Pinus sylvestris</i>
3.2	Allgemeine Bezeichnung	Kiefer	See-Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Buche	Kiefer	Buche	Fichte	Kiefer
3.3	Kurzzeichen	HT(N)-PS	HT(N)-PM	HT(F)-PS	DRT-PS	MRT-PS	HRT-PS	A-FS	A-PS	UT-FS	UT-PA	UT-PS

1.0	Vergütung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Holzvernetzung mit DMDHEU	Melamin-Behandlung	Wachs-/Harz-Imprägnierung	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	unbehandelt	unbehandelt	unbehandelt
8.0	<b>Quellung</b> Die Betrachtungen zur Quellung des Holzes beziehen sich nicht wie üblich auf die Änderung der Holzfeuchte, sondern auf die Änderung der Luftfeuchte, da sich die Holzgleichsfeuchte der untersuchten Hölzer stark unterscheidet und deshalb im konkreten Anwendungsfall die Änderung der Luftfeuchte für die Beurteilung des Verhaltens des Holzes herangezogen werden muss.											
8.1	<b>Differentielle Quellung tangential in % bei Änderung der Luftfeuchte um 1 % für Bereiche der Luftfeuchte von</b>											
	90% bis 100%	0,19	0,17	0,15	0,14	0,29	0,38	0,27	0,25	0,51		0,27
	30% bis 90%	0,05	0,04	0,04	0,06	0,08	0,08	0,08	0,04	0,09		0,08
	0% bis 30%	0,02	0,02	0,02	0,03	0,05	0,03	0,03	0,02	0,04		0,05
8.2	<b>Differentielle Quellung radial in % bei Änderung der Luftfeuchte um 1 % für Bereiche der Luftfeuchte von</b>											
	90% bis 100%	0,05	0,04	0,04	0,04	0,07	0,10	0,07	0,06	0,13		0,07
	30% bis 90%	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,02	0,04		0,04
	0% bis 30%	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02		0,02

**Tabelle 29:** Zusammenstellung der differentiellen Quellung für die untersuchten Hölzer für die Bereiche der Luftfeuchtigkeit

- Bereich A: 0 bis < 30 % Luftfeuchtigkeit
- Bereich B: 30 bis < 90 % Luftfeuchtigkeit
- Bereich C: 90 bis 100 % Luftfeuchtigkeit

Der Bereich B mit Luftfeuchtigkeiten zwischen 30 % und 90 % ist der in der praktischen Anwendung häufigste Bereich der Veränderung der Luftfeuchtigkeit.

Bei der Anwendung der Kennwerte des Quellens und Schwindens ist es deshalb zweckmäßig, von den bisherigen Gepflogenheiten des Bezugs auf die Holzfeuchtigkeit abzuweichen und die relative Luftfeuchtigkeit als Bezugsgröße zu nehmen. Dies ist deshalb zu empfehlen, weil die Holzgleichsfeuchte zwischen den verschiedenen Vergütungsverfahren unterschiedlich ist und wesentlich von der Holzgleichsfeuchte des unbehandelten Holzes abweicht. Die Versuchsergebnisse und die Abhängigkeiten zwischen Holzgleichsfeuchten und Quellung sind in Tabelle 29 zusammengefasst.

In Tabelle 30 werden die für die praktische Anwendung gerundeten Kennwerte der differentiellen Quellung angegeben. Die Werte der differentiellen Quellung in % gelten für den Bereich der Luftfeuchtigkeit von 30 – 90 %. Dies entspricht dem Bereich, in dem planmäßige Feuchtigkeitsbelastungen an Außenwandbauteilen auftreten.

Nr.	Holzart	Vergütung	Holzausgleichsfeuchtigkeit für die relative Luftfeuchtigkeit von			Differenzielle Quellung bei Änderung der Luftfeuchtigkeit von 1 % für den Bereich 30 – 90 %	
			100 %	90 %	30 %	tangential	radial
1	Kiefer	Hitzebehandlung	19 %	11 %	2,9 %	0,04 %	0,02 %
2	Kiefer	Holzvernetzung mit DMDHEU	18 %	14 %	3,4 %	0,06 %	0,03 %
3	Kiefer	Melamin-Behandlung	22 %	15 %	4,6 %	0,08 %	0,04 %
4	Kiefer	Wachs-/Harz-Imprägnierung	24 %	14 %	2,9 %	0,08 %	0,04 %
5	Buche	Acetylierung	20 %	14 %	3,4 %	0,08 %	0,04 %
6	Kiefer	Acetylierung	16 %	10 %	2,4 %	0,04 %	0,02 %
7	Buche	unbehandelt	28 %	17 %	4,1 %	0,09 %	0,04 %
8	Fichte	unbehandelt	30 %	-	-	0,08 %	0,04 %
9	Kiefer	unbehandelt	30 %	18 %	4,8 %	0,08 %	0,04 %
10	Lärche	unbehandelt	25 %	-	-	0,09 %	0,04 %
11	Teak	unbehandelt	20 %	-	-	0,08 %	0,04 %

**Tabelle 30:** Zusammenstellung der differenziellen Quellung für verschiedene Holzarten mit und ohne Vergütung bezogen auf die Änderung der Luftfeuchtigkeit. Die Werte gelten für die Luftfeuchtigkeit von 30 – 90 %. Bei dem Vergütungsverfahren Hitzebehandlung lag Holz der Klasse Thermo-D entsprechend der Klassifizierung der finnischen ThermoWood Association vor.

Die Breitenänderung eines Querschnitts mit tangentialem Faserverlauf Abbildung 118 ergibt sich aus der Beziehung:

$$\Delta b = \frac{\alpha_{dt} \cdot \Delta \varphi}{100} \cdot b \text{ [mm]}$$

- $\Delta b$  = Änderung der Rahmenbreite in mm
- $\alpha_{dt}$  = Differenzielle Quellung in tangentialer Richtung in % (Quellung) / % (Luftfeuchteänderung)
- $\Delta \varphi$  = Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit in %
- $b$  = Rahmenbreite

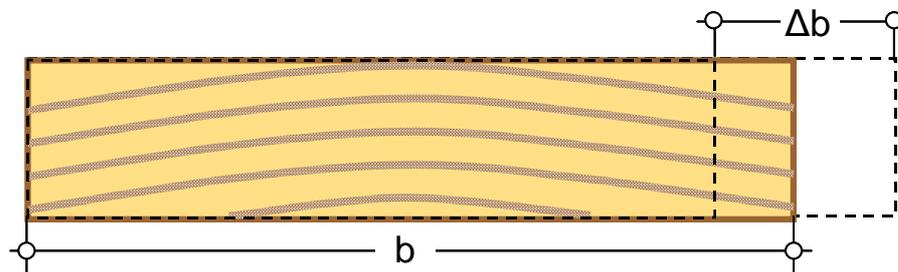


Abbildung 118: Darstellung der Breitenveränderung

Die Unterschiede des Quellens und Schwindens zwischen vergütetem Holz und nichtvergütetem Holz sind am Beispiel eines Rahmens von 150 mm Breite in Abbildung 119 dargestellt.

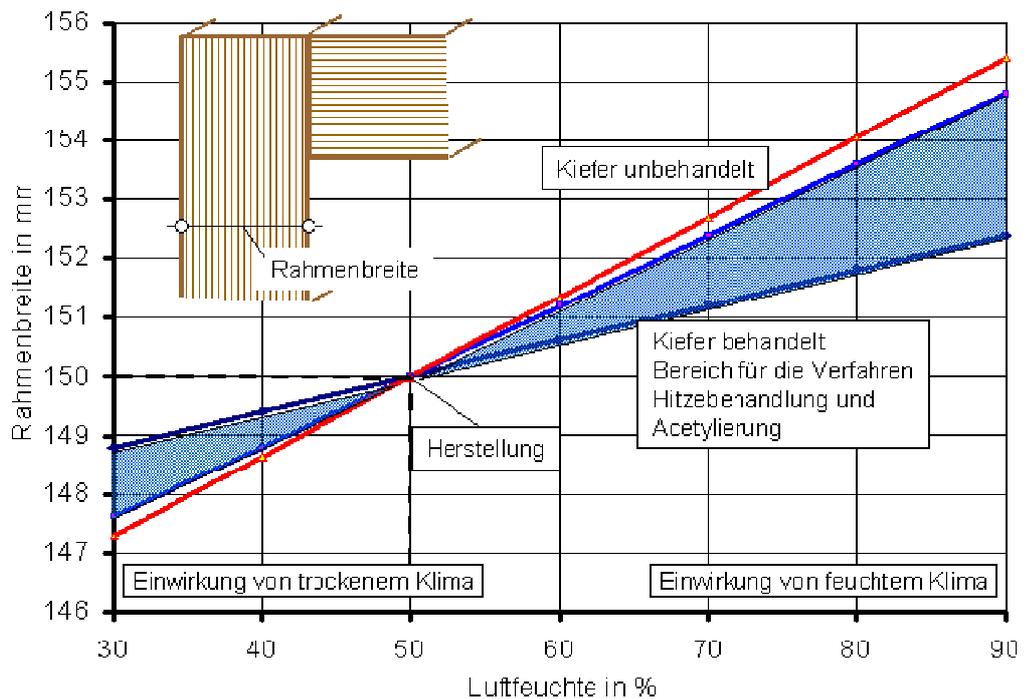


Abbildung 119: Unterschiedliche Quellung zwischen vergütetem und unbehandeltem Holz bei einer Rahmenbreite von 150 mm im Bereich der Luftfeuchtigkeit zwischen 30 und 90 % bei einem Herstellungsklima von 20 °C und 50 % relative Feuchte

## 5.4 Feuchteaufnahme und Feuchteabgabe

Eine Übersicht über die Feuchte-Transportvorgänge bei bewitterten Fensterhölzern gibt Abbildung 120. Feuchtigkeit wird in flüssiger und dampfförmiger Form aufgenommen und abgegeben.

Folgende Transport- und Speichervorgänge sind wirksam:

- ⇒ Wasserdampf-Sorption
- ⇒ Wasserdampf-Diffusion
- ⇒ Kapillare Wasseraufnahme
- ⇒ Wasserabgabe durch Trocknung

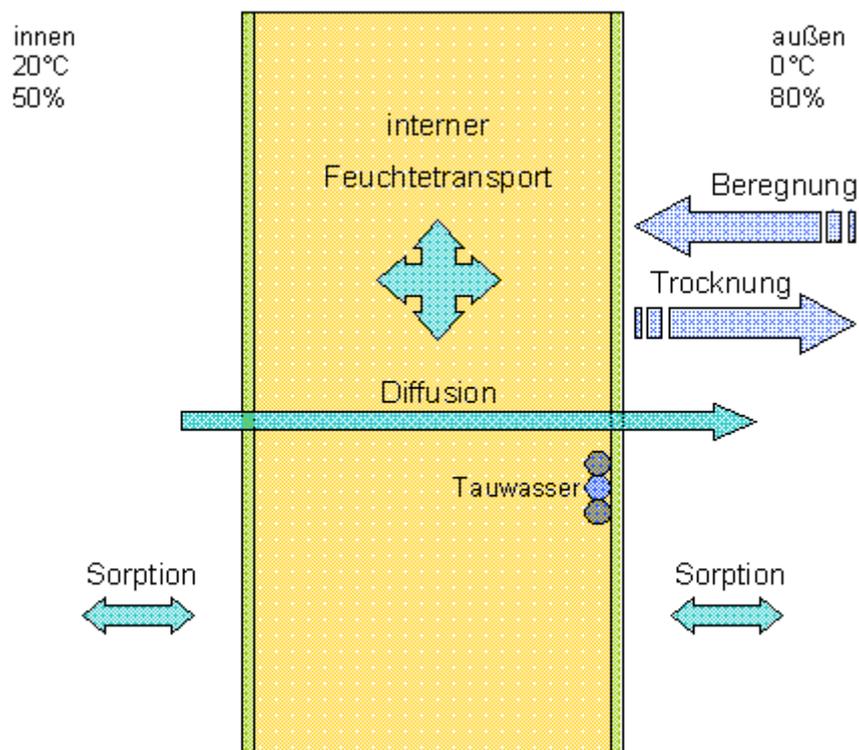


Abbildung 120: Übersicht über die Feuchte-Transportvorgänge an einem Fensterrahmen unter durchschnittlichen winterlichen Verhältnissen

#### 5.4.1 Wasserdampf-Sorption

Jeder poröse Stoff nimmt mit der Zeit eine Stofffeuchte an, die von der umgebenden Luftfeuchte abhängt. Man bezeichnet diese Feuchte als Gleichgewichtsfeuchte, Sorptionsfeuchte oder hygroskopische Feuchte.

Die Wasserdampf-Sorption hängt in erster Linie von der relativen Luftfeuchte der Umgebung ab. Die Temperatur hat im bauphysikalisch interessanten Bereich nur einen geringen Einfluss auf den Stoffaustausch. Bei der Sorption ist zu unterscheiden zwischen langfristigen Vorgängen, welche durch die Jahreszeiten geprägt sind, und kurzfristigen, vom Tagesgang abhängigen Vorgängen.

Die langfristigen Sorptionsvorgänge beeinflussen die Holzfeuchtigkeiten zu beiden Seiten des Fensters. Die dabei aufgenommenen und wieder abgegebenen Feuchtigkeitsmengen sind sehr gering und bewegen sich im Bereich von wenigen Gramm je m<sup>2</sup> Fläche. Auch bei kurzfristigen Schwankungen der Luftfeuchtigkeit werden ebenfalls nur sehr geringe Feuchtigkeitsmengen ausgetauscht. Schmidt<sup>[33]</sup> hat bei zyklischen Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 30 % und 70 % an Nadelholzoberflächen eine maximale Aufnahme bzw. Abgabe von 12 g/m<sup>2</sup> ermittelt.

#### 5.4.2 Wasserdampf-Diffusion

Die Wasserdampfdiffusion ist ein Transportprozess, der durch die thermische Eigenbewegung der Wasserdampfmoleküle entsteht. Der gerichtete Teilchenstrom wird durch Konzentrations- oder Temperaturunterschiede ausgelöst. Sofern auf dem Transportweg keine Phasenumwandlung des Wasserdampfes in flüssiges Wasser oder Eis auftritt, wird der Feuchtehaushalt des Holzes nicht beeinflusst, weil die auf der einen Seite eintretende Feuchtigkeit auf der anderen Seite wieder abgegeben wird.

Unter den folgenden durchschnittlichen winterlichen Außenbedingungen ist mit einem durchschnittlichen Diffusionsstrom von 0,12 g Wasserdampf je Stunde und je Quadratmeter Rahmenfläche zu rechnen.

Außentemperatur:	0 °C
Luftfeuchtigkeit außen:	80 %
Raumtemperatur:	20 °C
Luftfeuchtigkeit innen:	50 %

Bei diffusionsoffenen Beschichtungen ( $s_d < 0,5$  m) tritt unter diesen Randbedingungen kein Tauwasser im Querschnitt auf. Durch eine Wasserdampf-Diffusion verbleibt also keine zusätzliche Feuchtigkeit im Holz.

Welche Feuchtigkeiten beim Einsatz diffusionsdichterer Beschichtungen oder bei einseitiger Beschichtung im Holzquerschnitt zu erwarten sind, geht aus Tabelle 31 hervor. Hier sind die berechneten Tauwassermassen während einer 60-tägigen Tauperiode für verschiedene Beschichtungsvarianten zusammengestellt.

Variante	Beschichtung		Tauwasserausfall kg/m <sup>2</sup>
	raumseitig	außenseitig	
1	ohne	ohne	0,000
2	$s_d = 0,5$ m	$s_d = 0,5$ m	0,000
3	$s_d = 1,0$ m	$s_d = 1,0$ m	0,000
4	$s_d = 1,5$ m	$s_d = 1,5$ m	0,003
5	ohne	$s_d = 0,5$ m	0,000
6	ohne	$s_d = 1,0$ m	0,010
7	ohne	$s_d = 1,5$ m	0,066

Tabelle 31: Rechnerischer Tauwasserausfall im Rahmenquerschnitt (IV 68) unter durchschnittlichen winterlichen Klimabedingungen

Wie aus der Zusammenstellung in Tabelle 31 hervorgeht, tritt unter durchschnittlichen Winterbedingungen bei einem symmetrischen Aufbau, also bei gleichartiger Beschichtung, auf beiden Seiten des Fensters nur bei stark diffusionshemmenden Beschichtungen ( $s_d > 1,4$  m) Tauwasser in unbedenklichen Mengen auf.

Bei einseitiger Beschichtung der Fenster ist der Tauwasserausfall etwas größer,, aber bei nicht zu dichten, äußeren Beschichtungen ( $s_d > 1,5$  m) für sich allein gesehen noch immer tolerierbar. Das Tauwasser tritt an der Grenzschicht zwischen Holz und äußerer Beschichtung auf. Dabei ist jedoch nicht zu erwarten, dass sich hier ein Wasserfilm oder Wassertropfen zwischen Holz und Anstrichfilm ausbilden. Vielmehr wird das ausgefallene Tauwasser sofort auf kapillarem Weg vom Holz aufgenommen und in der Tiefe verteilt, so dass sich letztlich ein insgesamt etwas höherer Feuchtegehalt in den Außenbereichen des Profils einstellt.

### 5.4.3 Kapillare Wasseraufnahme

Die Kapillarleitung stellt die effizienteste Form des Feuchtetransports dar. Während in dampfförmiger Phase einige Milligramm oder Gramm Feuchtigkeit übertragen werden, kann durch Kapillarleitung Wasser im Kilogrammereich transportiert werden<sup>[34]</sup>. Problematisch wird der kapillare Wassertransport dann, wenn über Fehlstellen an der Oberfläche der Konstruktion Wasser angesaugt und im Inneren des Holzes über weite Strecken in abgedeckte und nach außen abgedichtete Bereiche verteilt wird, wo es nicht oder nur verzögert wieder abgegeben werden kann. Die Bestrebungen gehen somit dahin, den sehr intensiven Kapillartransport im Inneren des Holzes auf ein möglichst geringes Niveau zu bringen. Ansatzpunkte können auch die hier besprochenen Vergütungsverfahren bieten.

Die treibende Kraft für den Kapillartransport ist der kapillare Überdruck, der sich aufgrund der Oberflächenspannung des Wassers und den Adhäsionskräften an den Grenzflächen zur Porenwandung bildet. Der Kapillartransport im Inneren eines porösen Materials wird entweder von diesem Kapillardruck oder vom Wassergehaltsgradienten bestimmt.

Da die kapillare Wasseraufnahme die Hauptbelastung für Fenster- und Fassadenkonstruktionen darstellt, wurde sie im Rahmen des Projektes weiter untersucht. Die Ergebnisse und die Bewertung sind in Abschnitt 5.5 enthalten.

### 5.4.4 Wasserabgabe durch Trocknung

An feuchten Oberflächen setzt ein Trocknungsvorgang ein, welcher geprägt ist durch das Dampfdruckgefälle zwischen der Verdunstungsoberfläche und der Umgebung. Solange der kapillare Feuchtetransport aus dem Inneren des Holzes ausreicht, um die Verdunstung an der Oberfläche abzudecken, haben die Stoffeigenschaften (z. B. Diffusionseigenschaften) keinen Einfluss auf die Wasserabgabe. Man spricht vom ersten Trocknungsabschnitt.

Wenn der Kapillarstrom aus dem Inneren nicht mehr ausreicht, um die verdunstende Wassermenge abzudecken, zieht sich der Trocknungsspiegel in das Innere des kapillarporösen Materials zurück. Die Trocknungsgeschwindigkeit sinkt und die Diffusionseigenschaften des Materials bestimmen jetzt mehr und mehr die Feuchteabgabe. Eine ausführliche Beschreibung dieser Vorgänge ist in der Dissertation Schwarz<sup>[35]</sup> enthalten.

## 5.5 Kapillare Wasseraufnahme

### 5.5.1 Allgemeines

Die physikalischen Grundlagen der kapillaren Wasseraufnahme sind in Kapitel 5.4 behandelt.

Das Eindringen von flüssigem Wasser speziell über Hirnholzflächen ist auch dann zu vermeiden, wenn am vergüteten Holz keine oder nur eine geringe Gefährdung durch Pilzwachstum zu erwarten ist. Diese Feststellung ist deshalb notwendig, weil nicht ausgeschlossen werden kann, dass Klebstoffe, andere Werkstoffe oder Zusatzteile im System bei einer hohen Feuchtigkeitsbelastung zu Problemen führen. Dies gilt z. B. für die Beschichtung der Oberfläche, die Glasabdichtung und die Korrosion von metallischen Teilen.

Die kapillare Wasseraufnahme eines porösen Stoffes lässt sich gemäß DIN 52617 durch den Kennwert des Wasseraufnahmekoeffizienten beschreiben.

Der Kennwert gibt an, welche Wassermasse je Einheitsfläche und Wurzel aus der Zeit aufgenommen wird. Die Verwendung dieser Kennzahl setzt jedoch voraus, dass ein linearer Verlauf der Saugkurve über der Wurzel der Zeit auftritt. Bei mineralischen Baustoffen trifft das in aller Regel zu. Umfangreiche Daten liegen darüber bereits vor. Im Gegensatz dazu sind in der Literatur nur vereinzelte Werte über den Werkstoff Holz zu finden <sup>[36]</sup><sup>[37]</sup>.

### 5.5.2 Kapillare Wasseraufnahme von unvergütetem Holz

Die Eigenschaften von Holz unterscheiden sich in mancher Hinsicht von denen mineralischer Baustoffe. Ihre Feuchtetransport-Eigenschaften können zum Teil erheblich variieren, abhängig von:

- ⇒ den Achsrichtungen (axial, tangential, radial),
- ⇒ Kern- und Splintholzanteilen,
- ⇒ Jahresringbreiten und möglichen Harzeinlagerungen,
- ⇒ Inhomogenitäten (z. B. örtlicher Bakterien- oder Pilzbefall).

Die Zahlenangaben zur Wasseraufnahme in Abbildung 121 zeigen bereits große Streuungen. Diese Streuung kann sich noch vergrößern, wenn Holzbereiche vorhanden sind, deren Substanz durch Pilz- oder Mikrobenbefall geschädigt ist<sup>[38]</sup>. Bei dem untersuchten Querschnitt wurden nebeneinanderliegende Bereiche mit einem Wasseraufnahmekoeffizienten im Verhältnis 1:10 festgestellt.

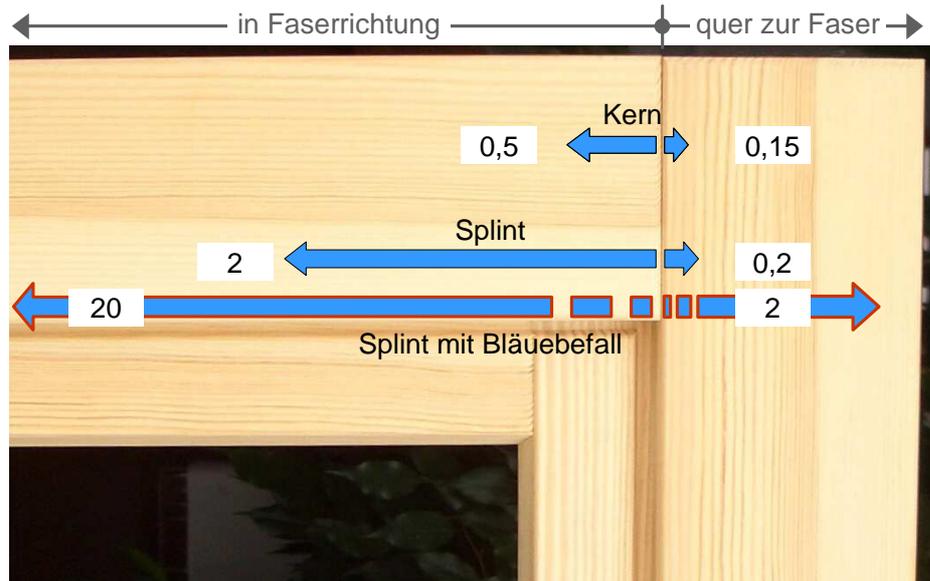


Abbildung 121: Darstellung der Ergebnisse von Untersuchungen des Wasseraufnahmekoeffizienten an unbehandelter Kiefer

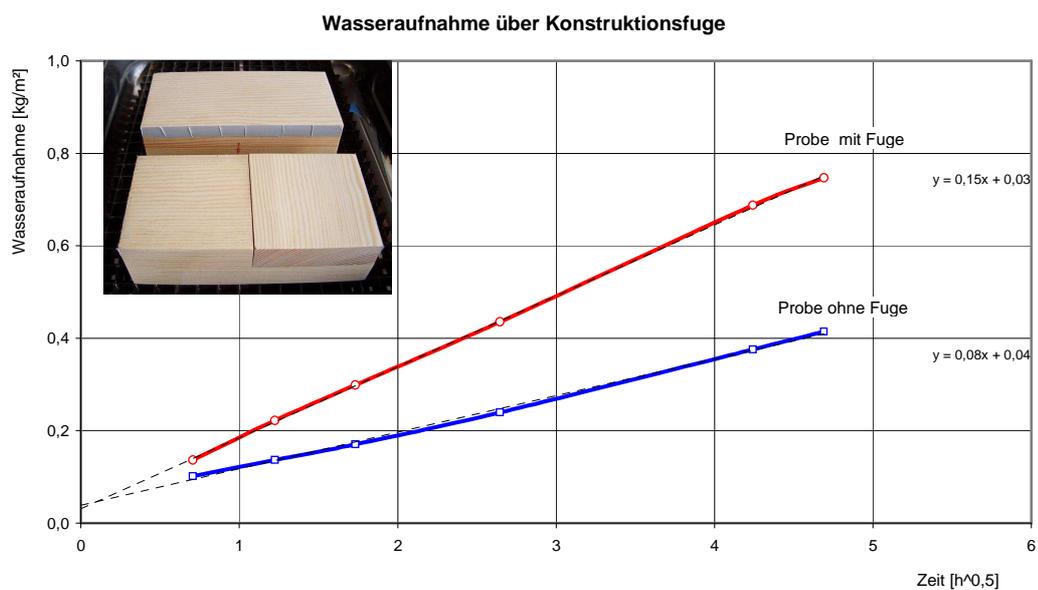


Abbildung 122: Wasseraufnahme an einer Eckverbindung mit und ohne offene Fuge

Begünstigt wird die kapillare Wasseraufnahme durch offene Konstruktionsfugen, wie sie an Rahmen- oder Stoßverbindungen vorkommen. Die Wasseraufnahme über Hirnholz ist in Fugen größer, weil über den kapillaraktiven Spalt Wasser über eine längere Zeit angeboten wird. Bei freiliegenden Hirnholzflächen kann das Wasser abgeführt werden, so dass es nur kurzzeitig einwirken kann. Die Unterschiede werden aus den in Abbildung 122 deutlich.

#### 5.5.2.1 Vergleichsmessungen Holzarten

In einem ersten Schritt wurden zunächst die im Fensterbau verwendeten Hölzer näher untersucht, damit eine spätere Einordnung vergüteter Hölzer möglich ist. Die Ergebnisse der Messungen an jeweils 4 Proben aus unterschiedlichen Quellen sind in Tabelle 32 zusammengestellt. Es handelt sich hierbei jeweils um Mittelwerte.

Holzart	Dichte kg/m <sup>3</sup> atro	Wasseraufnahmekoeffizient [kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> )]	
		in Faserrichtung	quer zur Faser
Fichte	380	1,8	0,21
Kiefer	513	1,8	0,13
Buche	560	1,2	0,18
Hemlock	394	0,8	0,12
Eiche	668	0,8	0,17
Meranti	469	0,3	0,13
Lärche	600	0,3	0,12

Tabelle 32: Wasseraufnahmekoeffizienten von verschiedenen Holzarten. Es handelt sich um Mittelwerte aus jeweils 4 Proben aus unterschiedlichen Quellen.

#### 5.5.2.2 Vergleichsmessungen an Kiefernholz

Einblicke in das Saugverhalten von Kiefernholz bei einem 48-stündigen Saugversuch geben Abbildung 123 bis Abbildung 125.

Bei einer Darstellung der Wasseraufnahme über der Wurzel der Zeit ergeben sich auch bei Hölzern in der Regel lineare Zusammenhänge.

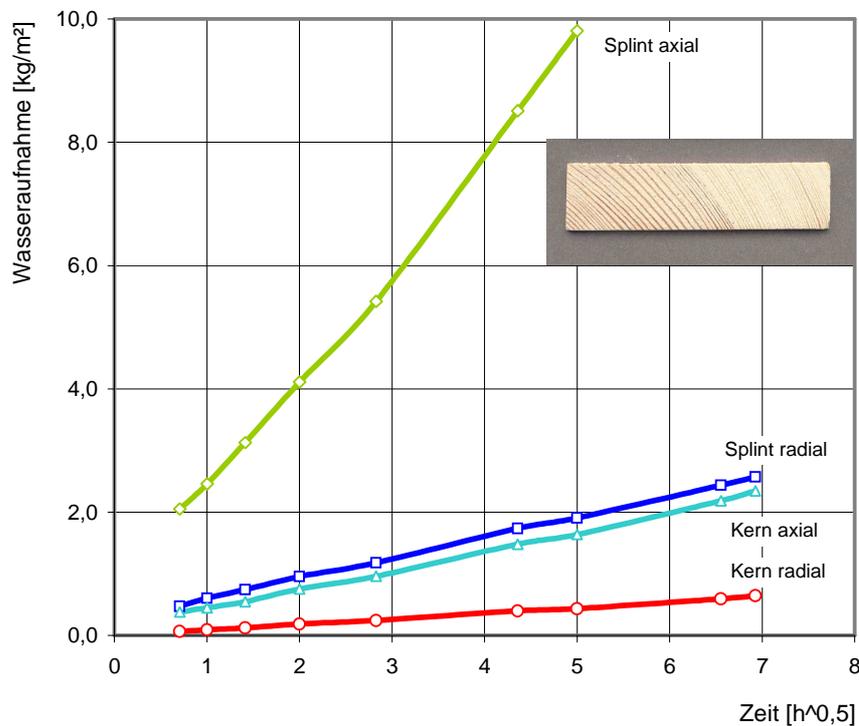


Abbildung 123: Saugkurven einer Kiefernholzprobe im Kern- und Splintbereich

Die kapillare Wasseraufnahme von Holz kann damit auch durch den Wasseraufnahmekoeffizienten  $w$  beschrieben werden. Die  $w$ -Werte lassen sich aus der Steigung der Saugkurven (Abbildung 123) ablesen. Für eine Kiefernholzprobe mit ausgeprägtem Kern- und Splintholzanteil sind die Werte in Tabelle 33 zusammengestellt. Erkennbar wird, dass die größte Wasseraufnahme im Splintholzanteil stattfindet. Hier wird um den Faktor 6 mehr Wasser in Faserrichtung – also über die Hirnholzfläche – aufgenommen als im Kernbereich der Kiefer.

Saugrichtung	Holzanteil	Wasseraufnahmekoeffizient [kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> )]
in Faserrichtung	Splint	1,80
in Faserrichtung	Kern	0,31
quer zur Faser	Splint	0,33
quer zur Faser	Kern	0,09

Tabelle 33: Wasseraufnahmekoeffizienten für Kiefernholz

Welche Wassermengen während des 48-stündigen Saugvorgangs vom Holz aufgenommen und gespeichert werden, gehen aus Abbildung 124 und Abbildung 125 hervor. Die Diagramme zeigen die Feuchtigkeitsprofile jeweils für den Kern- und Splintbereich und jeweils in zwei Achsen (in Faserrichtung und quer zur Faserrichtung).

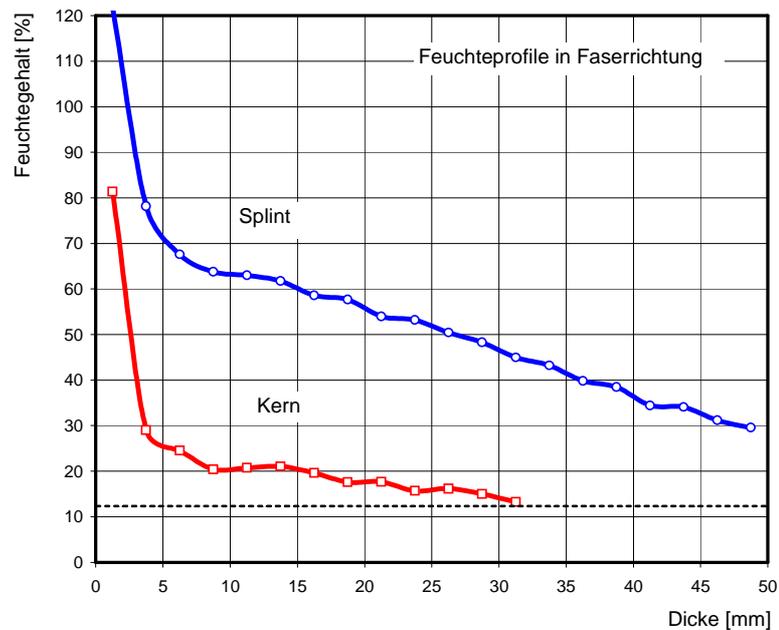


Abbildung 124: Feuchteprofil in Faserrichtung im Holzquerschnitt nach 48-stündigem Saugversuch

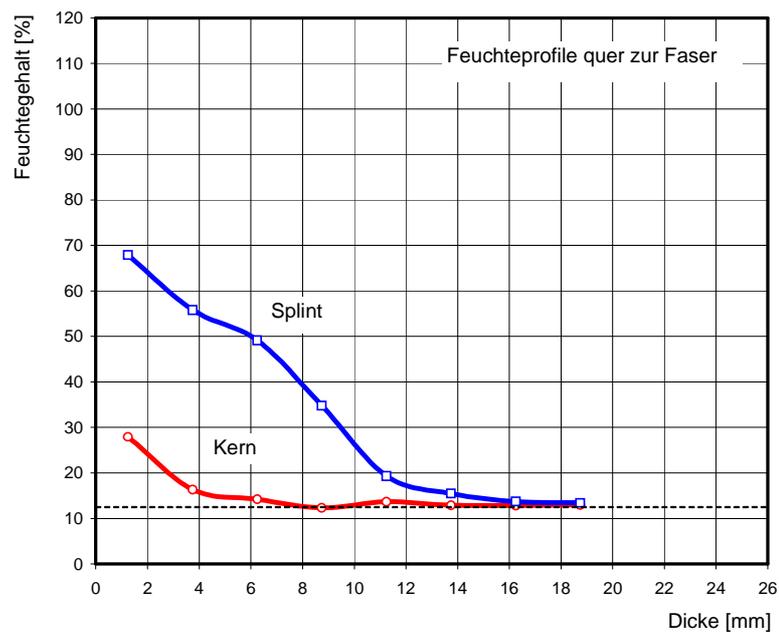


Abbildung 125: Feuchteprofil quer zur Faser im Holzquerschnitt nach 48-stündigem Saugversuch

Die Versuche an nichtvergütetem Holz zeigen die hohe Wasseraufnahme über Hirnholz, die sich bis zum 10-fachen erhöhen kann, wenn durch Pilz- oder Mikrobenbefall vorgeschädigtes Holz vorhanden ist.

### 5.5.3 Kapillare Wasseraufnahme von vergütetem Holz

Um die Auswirkungen einer Holzvergütung auf den Kapillartransport zu untersuchen, sollten definierte Probenpaare aus behandeltem und unbehandeltem Holz für die Saugversuche vorhanden sein. Nicht immer sind solche vergleichbaren Probenpaare aus einem Stammabschnitt erhältlich. Daher sind in einigen Fällen Vergleichsmessungen an einer größeren Zahl unterschiedlicher Proben notwendig geworden, um erste Tendenzen einer Holzvergütung abzuleiten.

#### 5.5.3.1 Wasseraufnahme von thermisch behandeltem Kiefernholz

Für die Untersuchungen standen mehrere Vergleichsproben aus dem gleichen Stammabschnitt zur Verfügung. Ein Teil der Proben wurde thermisch behandelt, der andere Teil blieb als Referenz unbehandelt. Die Messungen erlauben damit einen unmittelbaren Vergleich über die Wirkungen einer thermischen Behandlung auf den kapillaren Wassertransport.

Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 126 am Beispiel einer Holzprobe dargestellt. Insgesamt wurden 4 unterschiedliche Proben einer Charge untersucht. Abgesehen von einer durch Bläuepilz befallenen Probe zeigen die Ergebnisse keine nennenswerten Unterschiede.

Die Darstellung in Abbildung 126 zeigt relativ kleine Unterschiede im kapillaren Saugvermögen von thermisch behandeltem und unbehandeltem Holz. In axialer Richtung ist das Saugvermögen praktisch identisch. Geringe Abweichungen zwischen behandeltem und unbehandeltem Holz ergeben sich beim Saugen in radialer Richtung. Bei dem hier untersuchten unbehandelten Holz ist der w-Wert in beiden axialen Saugrichtungen (im Bild durch Pfeile gekennzeichnet) identisch. Die Saugkurven liegen übereinander. Bei dem thermisch behandelten Holz weichen die Werte voneinander ab. Näheren Einblick in die Einzelergebnisse gibt Tabelle 34.

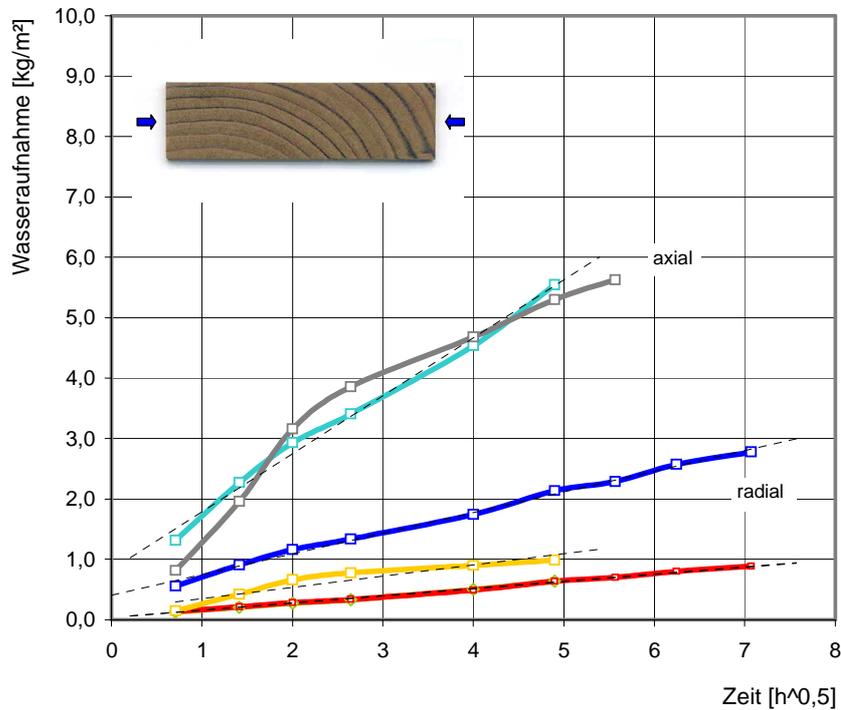


Abbildung 126: Zeitverlauf der kapillaren Wasseraufnahme von thermisch behandelter Kiefer im Vergleich zu jeweils unbehandelten Vergleichsproben aus gleichem Stammabschnitt. Die rote und hellblaue Kurve zeigen das Verhalten des unbehandelten Holzes.

Probe	Saugrichtung	Behandlung	Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> ]
Ki-560 →	quer zur Faser	thermisch	0,34
		ohne	0,12
Ki-561 ←	quer zur Faser	thermisch	0,18
		ohne	0,12
Ki-562	in Faserrichtung	thermisch	0,94
		ohne	0,96

Tabelle 34: Wasseraufnahmekoeffizienten für thermisch behandeltes Kiefernholz. Die Pfeile kennzeichnen die Saugrichtung gemäß Abbildung 126.

Die Ergebnisse der vorgestellten Untersuchungen beruhen auf Holzproben einer Charge. Wie aus Abbildung 126 ersichtlich ist, handelt es sich dabei um Kiefernholz mit relativ großer Jahrringbreite und einer Dichte von  $\rho_0 = 460 \text{ kg/m}^3$ . Weitere Untersuchungen mit größerem Probenumfang sind erforderlich, um Widersprüche aus früheren Messungen zu klären.

### 5.5.3.2 Wasseraufnahme von thermisch behandeltem Fichtenholz

Für diese Untersuchungen standen Proben aus thermisch behandelter und unbehandelter Fichte einer Charge zur Verfügung. Das thermisch behandelte Holz stammt aus einer Thermobehandlung unter Schutzgas-Atmosphäre. Bei diesem Verfahren liegen die Prozesstemperaturen bei etwa  $170 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 127 gegenübergestellt. Das obere Diagramm zeigt das kapillare Saugverhalten von unbehandeltem Fichtenholz, das untere Diagramm das von thermisch behandeltem Holz aus gleicher Charge.

Die Einzelergebnisse der Saugversuche sind in Tabelle 35 zusammengestellt. Wegen der fehlenden Zuordnung einzelner Probenpaare können hier nur die gemittelten Wasseraufnahmekoeffizienten der untersuchten Vergleichsproben einzelner Chargen gegenübergestellt werden.

Probe	Saugrichtung	Behandlung	Wasseraufnahmekoeffizient [ $\text{kg/m}^2 \text{ h}^{0,5}$ ]
Fi-T-110	quer zur Faser	thermisch	0,12 – 0,22
Fi-0-130		ohne	0,16 – 0,21
Fi-T-111	in Faserrichtung	thermisch	0,50 – 0,80
Fi-0-131		ohne	0,70 – 1,00

Tabelle 35: Wasseraufnahmekoeffizienten für thermisch behandeltes Fichtenholz im Vergleich zu unbehandeltem Fichtenholz

Auch in diesem Fall zeigen sich keine signifikanten Unterschiede in der Wasseraufnahme von thermisch behandeltem und unbehandeltem Fichtenholz.

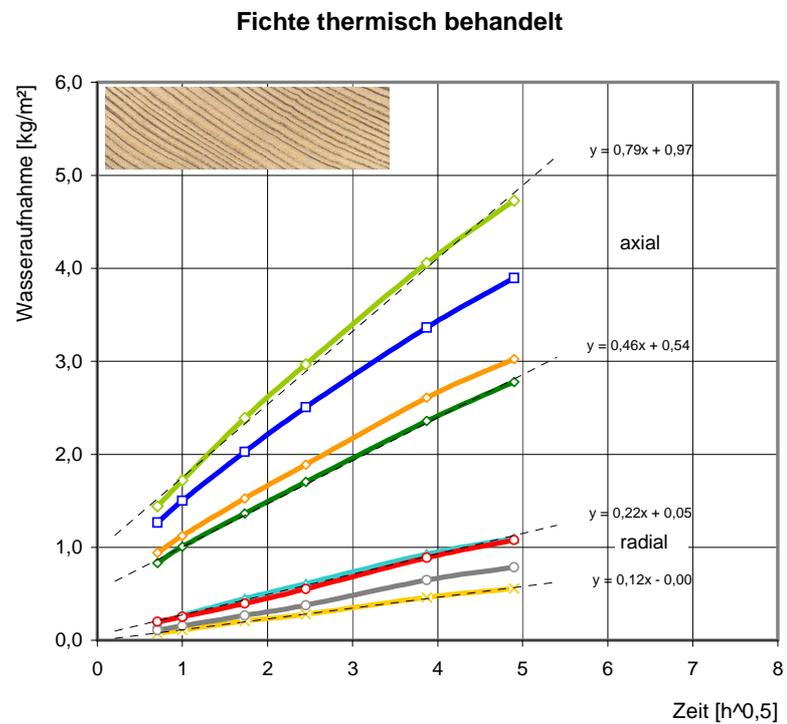
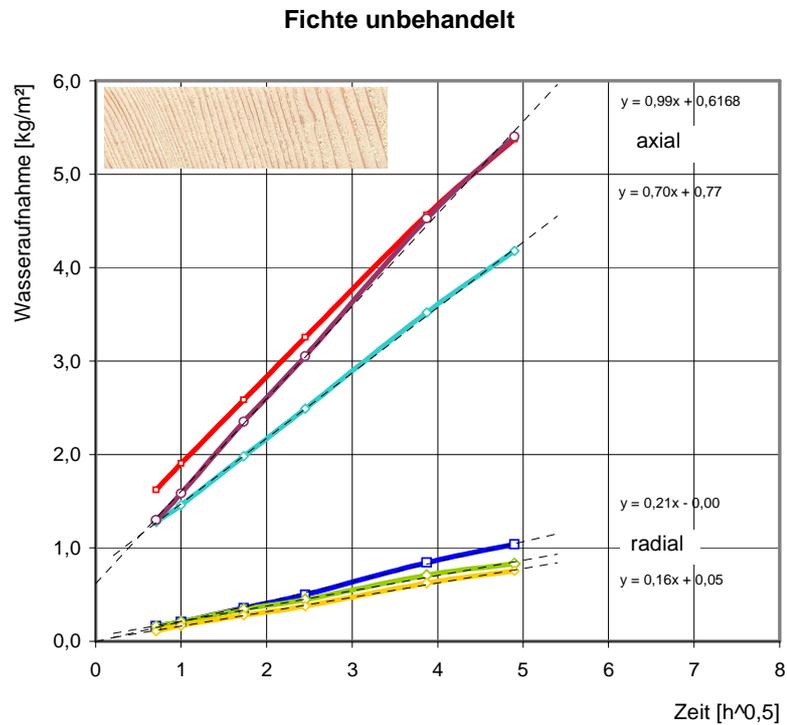


Abbildung 127: Zeitverlauf der kapillaren Wasseraufnahme von thermisch behandelter Fichte (Diagramm unten) und im Vergleich dazu von unbehandelter Fichte aus der gleichen Charge (Diagramm oben)

Offene Konstruktionsfugen begünstigen auch bei vergütetem Holz die kapillare Wasseraufnahme, wie dies bereits für unbehandeltes Holz festgestellt wurde. Abbildung 128 zeigt einen Versuch an einer Rahmenecke mit geschlossener und mit offenen Fugen. Der Unterschied zwischen den offenen Fugen und der geschlossenen Fuge ist deutlich erkennbar. Bei den offenen Fugen zeigt es sich, dass sich bei einer Änderung der Fugenbreite von 1 auf 2 mm auch die Wasseraufnahme verdoppelt.

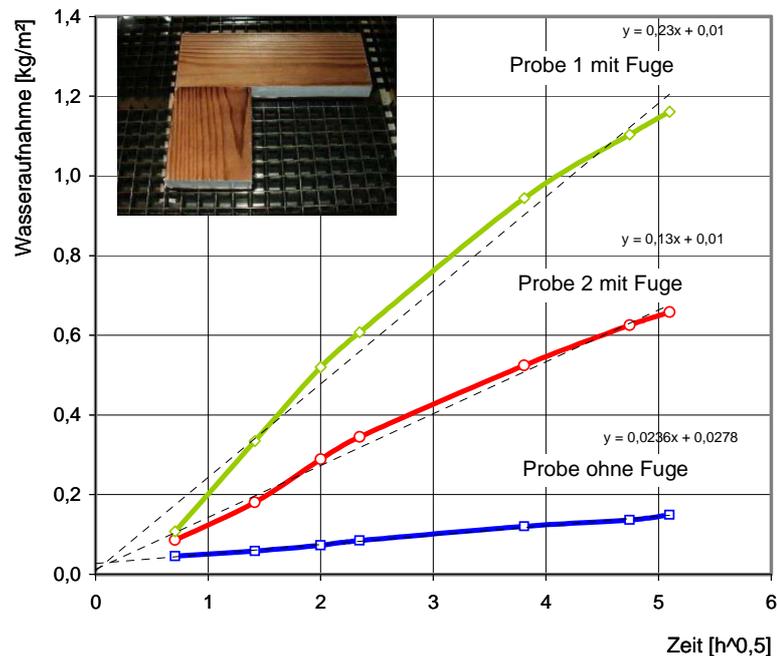


Abbildung 128: Wasseraufnahme an Rahmenverbindungen mit und ohne Fugen. Die Probe 2 hat eine Fuge von 1 mm, die Probe 1 eine Fuge von 2 mm.

### 5.5.3.3 Wasseraufnahme von Melaminharz behandelter Kiefer

Die Untersuchungen konnten mit speziell hergestellten Holzproben durchgeführt werden. Für die Imprägnierung der Proben wurden zwei unterschiedliche Melaminharz-Konzentrationen (10 % und 20 %) eingesetzt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind am Beispiel einer Versuchsserie in Tabelle 36 aufgelistet und in Abbildung 129 und Abbildung 130 grafisch dargestellt. Insgesamt wurden vier unterschiedliche Holzproben jeweils mit und ohne Imprägnierung untersucht.

Die Untersuchungen zeigen bei allen Proben eine einheitliche Tendenz. Die Wasseraufnahme gegenüber unbehandeltem Holz sowohl quer zur Faser als auch in Faserrichtung nimmt deutlich ab. In Faserrichtung nimmt das Holz im Mittel nur 30 % der Wassermasse auf, die ein unbehandelter Probekörper aus dem gleichen Holz aufnimmt. Auch die Feuchtigkeitsprofile im Holz spiegeln dieses Verhalten deutlich wieder. Abbildung 131 zeigt in einer Gegenüberstellung die Feuchtigkeitsgehalte des behandelten und des unbehandelten Holzes nach 24 Stunden Saugzeit in Faserrichtung.

Probe	Saugrichtung	Behandlung	Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> ]
M-00	quer zur Faser	ohne	0,38
M-10		mit 10 %	0,34
M-20		mit 20 %	0,26
M-00	in Faserrichtung	ohne	1,55
M-10		mit 10 %	1,06
M-20		mit 20 %	0,47

Tabelle 36: Wasseraufnahmekoeffizienten für Melaminharz behandeltes Kiefernholz im Vergleich zu unbehandeltem Kiefernholz

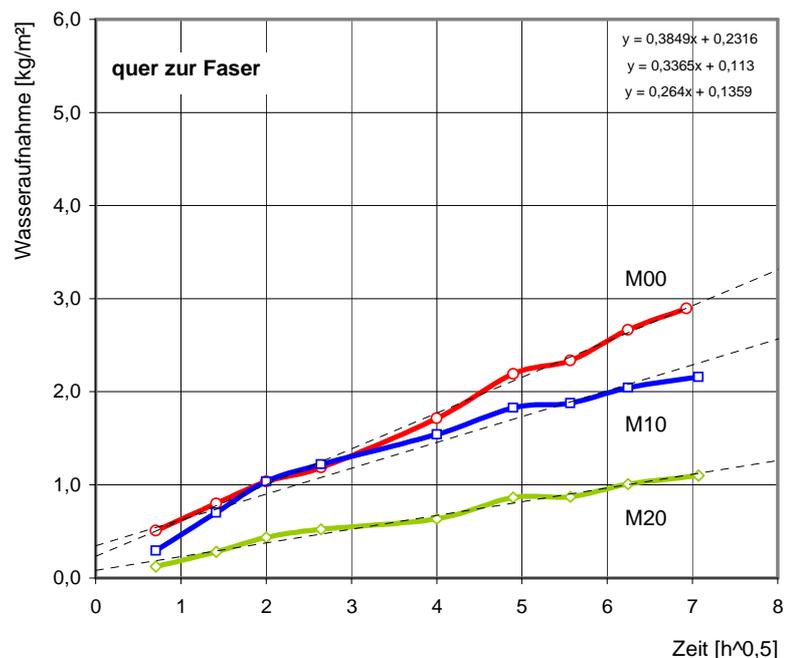


Abbildung 129: Kapillare Wasseraufnahme von Melaminharz behandeltem Kiefernholz quer zur Faser

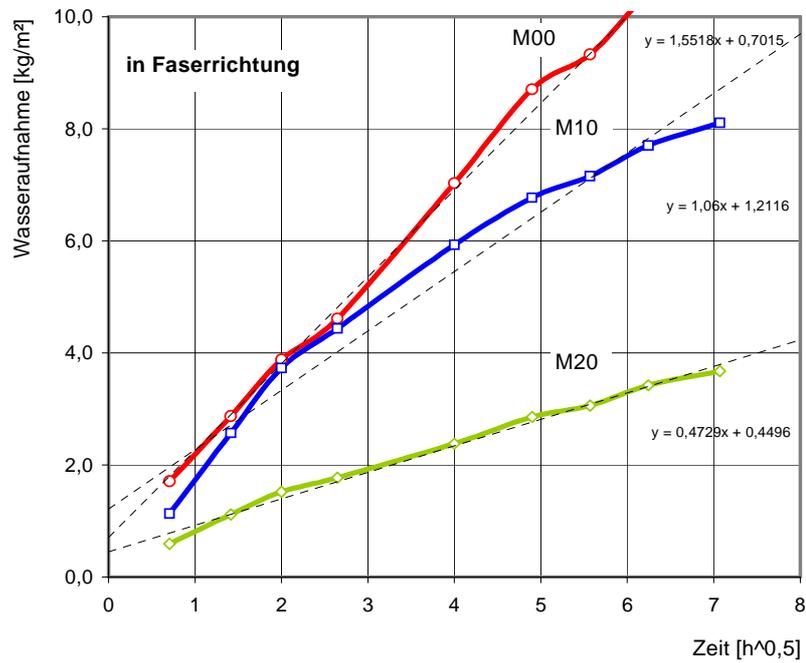


Abbildung 130: Kapillare Wasseraufnahme von Melaminharz behandeltem Kiefernholz in Faser-  
richtung

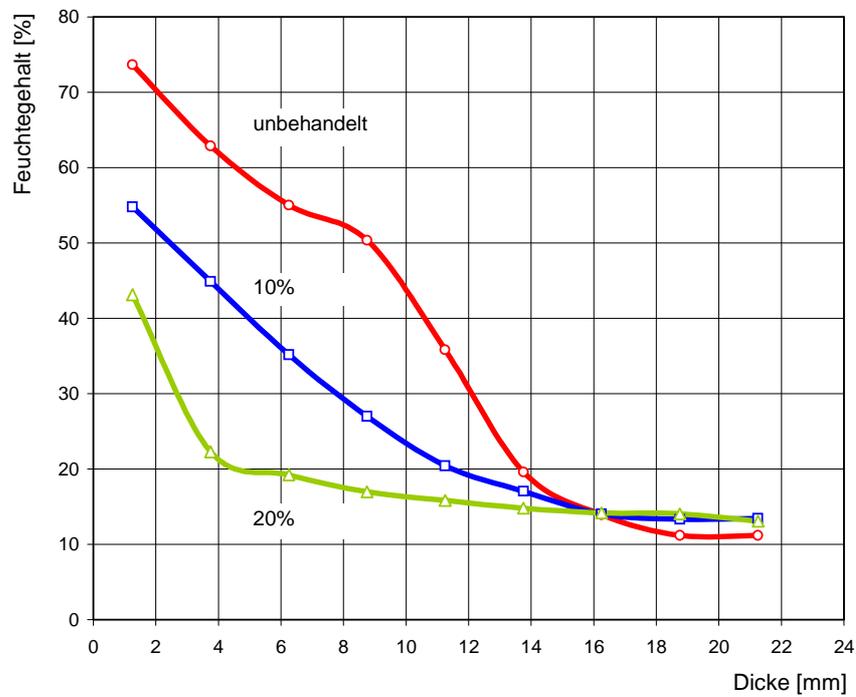


Abbildung 131: Gegenüberstellung der Feuchteprofile in unbehandelten und mit Melaminharz  
behandelten Holzproben nach 24-stündiger Wasseraufnahme über Hirnholz

#### 5.5.3.4 Wasseraufnahme von DMDHEU behandelte Kiefer

Für die Untersuchungen wurden speziell hergestellte Zwillingsproben aus dem gleichen Brett bereitgestellt. Drei unterschiedliche Holzproben, von denen jeweils ein Teil mit DMDHEU behandelt wurde und der andere Teil unbehandelt blieb, standen zur Verfügung. Die Holzstruktur und der Faserverlauf der Probekörper sind identisch. Damit ist ein hohes Maß an Vergleichbarkeit gegeben. Die Ergebnisse der Untersuchungen gehen aus Tabelle 37 sowie aus Abbildung 132 und Abbildung 133 hervor.

Probe	Saugrichtung	Behandlung	Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> ]
DMD-0-111	quer zur Faser	ohne	0,15
DMD-1-111		mit	0,26
DMD-0-352		ohne	0,33
DMD-1-341		mit	0,11
DMD-0-351	in Faserrichtung	ohne	1,40
DMD-1-351		mit	0,50
DMD-0-251		ohne	1,80
DMD-1-251		mit	0,60
DMD-0-141		ohne	2,20
DMD-1-141		mit	0,50

Tabelle 37: Wasseraufnahmekoeffizienten für DMDHEU behandeltes Kiefernholz im Vergleich zu unbehandeltem Kiefernholz

Die Ergebnisse zeigen kein einheitliches Bild: Beim Saugvorgang quer zur Faserrichtung ergeben sich kaum Unterschiede zwischen behandelten und unbehandelten Proben. Auch sind nach Auswertung aller Versuche keine eindeutigen Tendenzen erkennbar. Die Vernetzung führt in einigen Fällen zu einer Verringerung, in anderen Fällen aber auch zu einer Vergrößerung der Wasseraufnahme quer zum Faserverlauf. Beim Saugvorgang in Faserrichtung treten deutliche Unterschiede zwischen behandelten und unbehandelten Proben in Erscheinung. Durch eine Behandlung mit DMDHEU wird eine um den Faktor 3 bis 4 geringere Wassermasse aufgenommen.

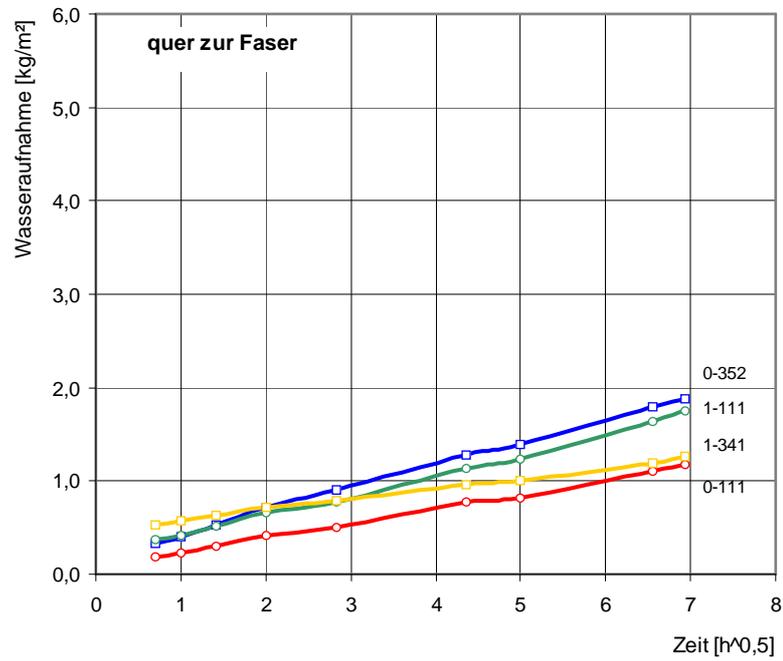


Abbildung 132: Kapillare Wasseraufnahme von DMDHEU behandelter Kiefer quer zur Faser

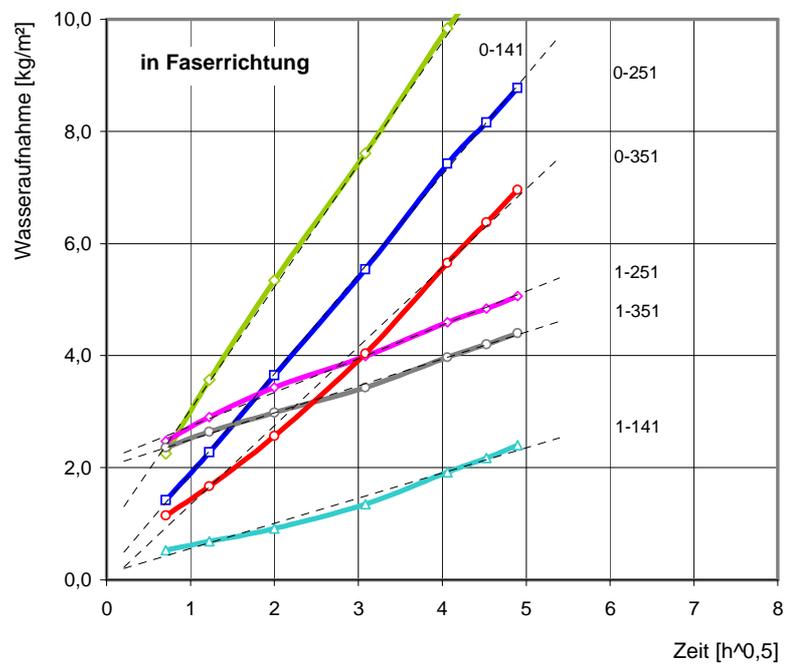


Abbildung 133: Kapillare Wasseraufnahme von DMDHEU behandelter Kiefer in Faserrichtung

In Faserrichtung wird durch eine Holzvernetzung mit DMDHEU die Wasseraufnahme in ungewöhnlicher Weise verändert. Die Saugkurven werden deutlich flacher, haben aber einen ungewöhnlichen Einlaufbereich. In den ersten Minuten des Saugvorgangs nehmen die Proben extrem schnell und deutlich mehr Wasser auf als die unbehandelte Vergleichsprobe. Abbildung 134 verdeutlicht das in der Gegenüberstellung.

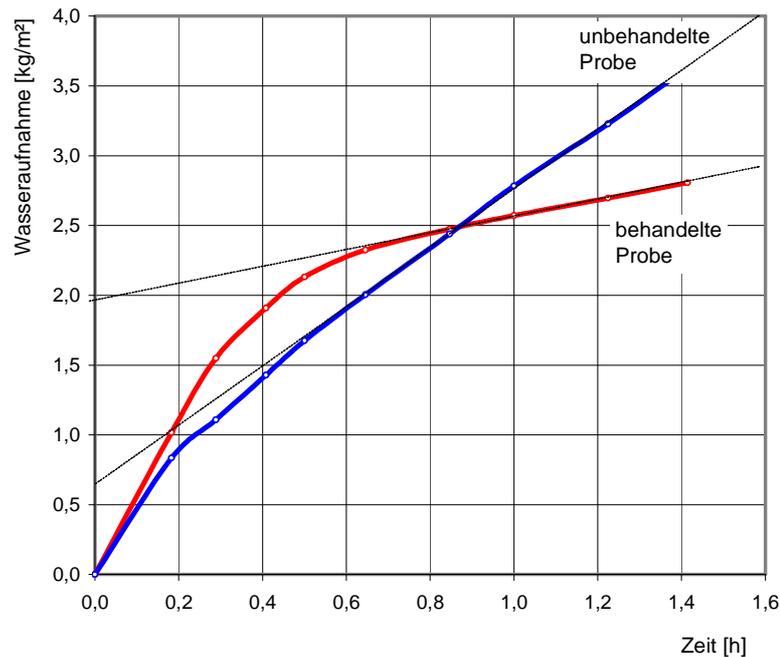


Abbildung 134: Zeitverlauf der kapillaren Wasseraufnahme in den ersten Minuten des Saugvorgangs für unbehandeltes und mit DMDHEU behandeltes Kiefernholz. Die Abszisse ist linear skaliert.

#### 5.5.4 Zusammenfassung

Die kapillare Wasseraufnahme wurde sowohl bei behandeltem als auch bei unbehandeltem Holz mit einer sehr großen Streubreite festgestellt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 38 zur besseren Übersicht nochmals zusammengestellt.

Für die Konstruktion und Herstellung von Fenstern und Fassaden bedeutet es nach wie vor, dass auf die Ausbildung von Fugen besonderer Wert gelegt werden muss, um eine Überbeanspruchung des Systems durch Feuchtigkeitseinwirkung zu vermeiden. Speziell Hirnholzflächen müssen geschützt werden, weil hier ein besonders hohes kapillares Saugvermögen auftritt.

Die großen Streuungen der Wasseraufnahme sind nach den vorliegenden Kenntnissen unter anderem darauf zurückzuführen, das Holz mit Pilz- und Mikrobenbefall beim Probenmaterial vorhanden waren. Diese Feststellung gilt sowohl für das behandelte als auch für das unbehandelte Holz. Inwieweit vorgeschädigtes Holz aus der Produktion von Fenstern und Fassaden ausgeschlossen werden muss, ist in weiteren Versuchen zu klären.

Aus der Betrachtung zur Feuchtigkeitsbelastung der Bauteile ergibt sich, dass die kapillare Wasseraufnahme die größte Feuchtigkeitsbelastung für das Holz darstellt. Daraus folgt, dass auch in Verbindung mit vergütetem Holz die Konstruktion und Herstellung daraufhin ausgerichtet sein muss, freiliegendes Hirnholz bzw. Hirnholz in offenen Konstruktionsfugen zu vermeiden, um die kapillare Wasseraufnahme, die im Wesentlichen über Hirnholz stattfindet, auf ein Minimum zu beschränken.

1.0	Vergütung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Hitzebehandlung	Holzvernetzung mit DMDHEU	Melamin-Behandlung	Wachs-/Harz-Imprägnierung	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	Behandlung mit Essigsäure-Anhydrid	unbehandelt	unbehandelt	unbehandelt
1.1	Hersteller	New Option Wood	New Option Wood	Finnforest	Uni Göttingen	Solutia	Tilo	SHR - Merk	SHR - Merk			
1.2	Allgemeine Bezeichnung	NOW	NOW	Thermoholz			Natwood	Acetylierung	Acetylierung			
<b>2.0 Wirkprinzipien und Farbkennzeichnung der Vergütungsverfahren im Projekt</b>												
2.1	Lumenfüllung											
2.2	Zellwandfüllung											
2.3	Hydroxylgruppen-Reaktion											
2.4	Hydroxylgruppen-Vernetzung											
2.5	Zellwandstrukturänderung											
2.6	unbehandelt											
<b>3.0 Holzarten im Forschungsprojekt</b>												
3.1	Lateinische Bezeichnung	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus pinaster</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Pinus sylvestris</i>
3.2	Allgemeine Bezeichnung	Kiefer	See-Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Buche	Kiefer	Buche	Fichte	Kiefer
3.3	Kurzzeichen	HT(N)-PS	HT(N)-PM	HT(F)-PS	DRT-PS	MRT-PS	HRT-PS	A-FS	A-PS	UT-FS	UT-PA	UT-PS
<b>4.0 Wasseraufnahmekoeffizient w kg/(m<sup>2</sup>h<sup>0,5</sup>)</b>												
4.1	in Faserrichtung	0,13 - 0,35	6,60 - 7,50	0,30 - 0,70	0,50 - 1,05	0,47 - 2,20	0,18	2,80 - 5,10	3,40 - 3,80	1,20	0,70 - 1,80	1,80 - 6,90
4.2	quer zur Faser	0,08 - 0,13	1,00 - 1,50	0,20 - 0,10	0,11 - 0,30	0,26 - 0,35	0,04 - 0,07	0,25 - 3,80	1,10	0,18	0,16 - 0,21	0,13 - 2,53

Tabelle 38: Zusammenstellung der kapillaren Wasseraufnahme längs zur Faser und quer zur Faser für vergütetes und unbehandeltes Holz

## 5.6 Oberflächenbehandlung

Aus der Sicht des Bauherrn sind die Oberflächenbehandlung und die Instandhaltung zentrale Fragen bei der Entscheidung für ein Fenstersystem. Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Versuche zur Oberflächenbehandlung (siehe Abschnitt 4.4) führen zu folgendem Ergebnis:

- ⇒ Durch die einbezogenen Vergütungsverfahren wird die UV-Stabilität und die Bewitterungsstabilität nicht so weit verbessert, dass auf einen Oberflächenschutz des Holzes verzichtet werden kann.
- ⇒ Der notwendige Oberflächenschutz mit einer Lasur mittlerer Schichtdicke hat sich als günstig erwiesen, wobei zur Vermeidung von Bläue eine Imprägnierung zu empfehlen ist.

Bei der Entscheidung für ein Anstrichsystem sollte beim jetzigen Kenntnisstand der Anstrichmittelhersteller mit einbezogen werden.

Für die Wartung gelten die Vorgaben, die auch bei unbehandeltem Holz zu beachten sind. Danach beschränkt sich die Wartung nicht nur auf die Überarbeitung des Anstriches. Es sind auch die Funktion und die Konstruktion in die Wartung mit einzubeziehen. Für den Erfolg der Wartungsmaßnahmen ist es wesentlich, dass Schwachpunkte in der Konstruktion und Ausführung, die sich in der Nutzung der Fenster und Fassaden zeigen, behoben werden.

- 
- 32 **Kompetenzzentrum „kostengünstig qualitätsbewusst bauen“, 09/2004:** „Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten“; IEMB Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e. V. an der TU-Berlin; Info-Blatt Nr. 9.9
  - 33 **Schmidt, K.; 1986:** „Untersuchungen über die Raumklimapufferung durch Holzoberflächen“; Holzforschung und Holzverwertung 38
  - 34 **Künzel, H. M.; 1994:** „Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten“; Dissertation an der Universität in Stuttgart
  - 35 **Schwarz, B.; 1971:** „Die Wärme- und Stoffübertragung an Außenwandoberflächen“; Dissertation an der Universität Stuttgart

- 36 **Breitenberger, J.; 1985:** „Der Wasseraufnahmekoeffizient von Holz und Holzwerkstoffen“; Diplomarbeit an der Fachhochschule Rosenheim
- 37 **Krus, M.; 1998:** „Bestimmung feuchtetechnischer Kennwerte und Berechnung des Feuchtehaushalts von Holz-Prüfkörpern bei natürlicher Bewitterung“; Bauphysik – Berichte aus Forschung und Praxis; IRB-Verlag
- 38 **Willeitner, Hubert; 1971:** „Anstrichschäden infolge Überaufnahmefähigkeit des Holzes“; Holz-Zentralblatt Nr. 157; Stuttgart

## 6 Weiterentwicklung der Konzepte für Holzfenster

### 6.1 Allgemeines

Durch das Forschungsprojekt di-sta war die Aufgabe formuliert, Grundwissen zu erarbeiten, um einen angemessenen Marktanteil für Fenster und Fassaden aus Holz sicherzustellen. Es war das erklärte Ziel, keine genormten Konstruktionen für Fenster und Fassaden, sondern mit vorausschauenden Konzepten Innovationspotenzial aufzubereiten. Mit der Möglichkeit der Holzvergütung war ein geeigneter Werkstoff gegeben, der durch das verbesserte Verhalten gegenüber Wasser und Feuchtigkeit dauerhafte Konstruktionen bei vertretbarem Aufwand für die Wartung ermöglicht.

Die Ziele waren wie folgt formuliert:

- ⇒ Erhaltung des Charakters und des Aussehens des Holzes,
- ⇒ Verbesserung der Dauerhaftigkeit und des Verhaltens bei mechanischen Einwirkungen,
- ⇒ Verlängerung der Wartungsintervalle für Instandhaltung und Instandsetzung und Verbesserung der Instandhaltungs- und Instandsetzungsfreundlichkeit.

Die formulierten Ziele können erreicht werden, wenn die verbesserten Eigenschaften der Werkstoffe und Systeme voll genutzt werden können.

Auch nach einer Verbesserung der Werkstoffeigenschaften ist die Planung der Anforderungen und der Einbindung in ein Bauwerk eine wichtige Voraussetzung bei der Erarbeitung einer Konstruktion für Fenster und Fassaden. Die bei der Planung getroffenen Entscheidungen bestimmen auch das Verhalten der Bauteile während des Nutzungszeitraums.

In Abbildung 135 sind die Zusammenhänge nochmals dargestellt. Bei der Planung der technischen Anforderungen sind die normativen Festlegungen in DIN EN 14351-1 „Fenster und Türen - Produktnorm, Leistungseigenschaften“ zu beachten.

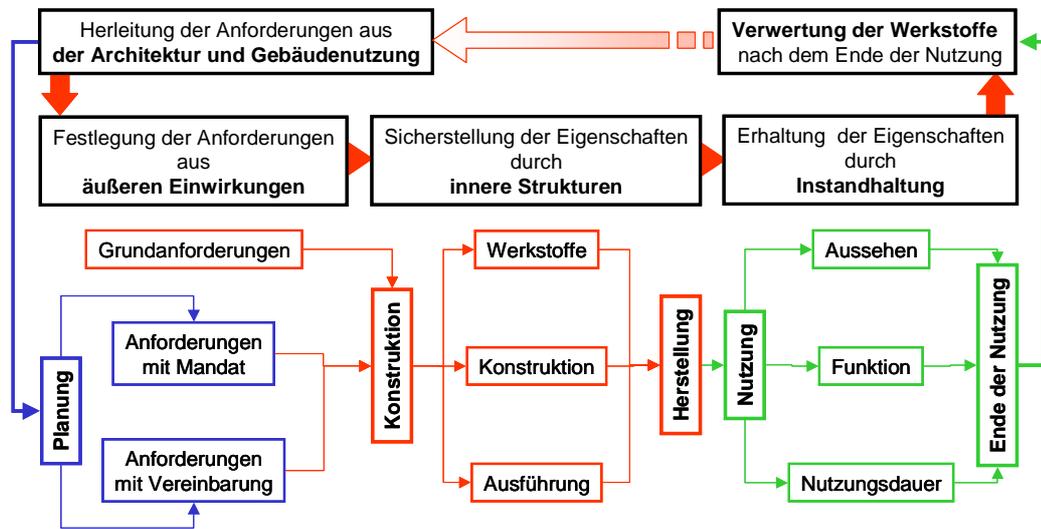


Abbildung 135: Struktur zur Erarbeitung einer Konstruktion mit Betrachtung des gesamten Nutzungszeitraums

## 6.2 Nutzung

Die Grundlage der Konstruktion innovativer Fenster und Fassaden sind Verbundholz, Sandwich- und Schichtenaufbauten (Tabelle 1). Nach dem derzeitigen Entwicklungsstand ist die Anwendung von dimensionsstabilisiertem Holz nach dem Schichten-Modell am einfachsten umzusetzen, da auf den Grundprofilen von Holz-Aluminium-Fenstern aufgebaut werden kann.

Bei der Anwendung verklebter Profile aus verschiedenen Hölzern oder aus unterschiedlichen Materialien, wie sie Verbundholz- oder Verbundprofile darstellen (Tabelle 1), war neben der Verklebung die Formstabilität bei Änderung der Holzfeuchte zu klären.

Auch war die Frage der Oberflächenbehandlung wichtig und zwar im Hinblick auf die Erhaltung des natürlichen Aussehens des Holzes im Außenbereich der Fenster und der einfachen Instandhaltung.

Das Holzfenster der Zukunft muss neu definiert werden, wobei in die weitere Entwicklung auch Holzwerkstoffe mit einzubeziehen sind. Als Holzwerkstoff wird auch vergütetes Holz bezeichnet.

In Abbildung 136 ist das Szenario aufgezeigt, das dem Projekt zu Grunde liegt. Wichtig ist bei der Weiterentwicklung die Beachtung der Schlüsselfaktoren, d. h. die Einbeziehung des Bauherrn in die Betrachtung und die Zukunftsprojektion mit den wesentlichen Eigenschaften und Optionen für die Zukunft.

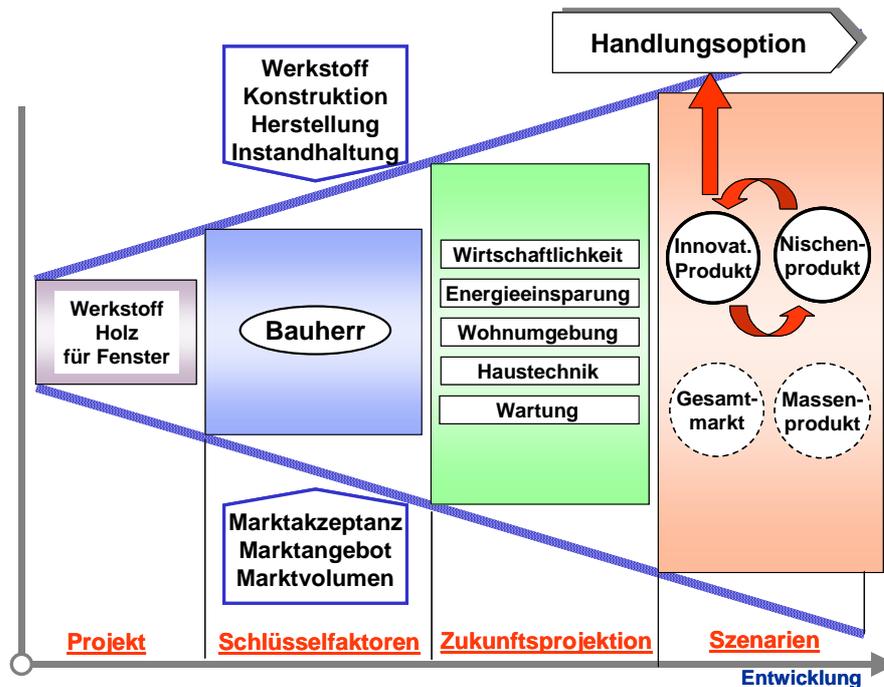


Abbildung 136: Entwicklung der Szenarien für die Einordnung von Fenstern aus vergütetem Holz

Aus den entwickelten Szenarien ergibt sich, dass es im derzeitigen Entwicklungsstand der Holzvergütung sinnvoll erscheint, aus vergütetem Holz hergestellte Fenster in den Bereich der Nischenprodukte und in den Bereich der innovativen Produkte einzustufen. Nach dem Kenntnisstand ist es nicht Erfolg versprechend, ein Produkt für den Gesamtmarkt und damit ein Massenprodukt anzustreben.

Aus den Szenarien ergeben sich dann entsprechend der Zielsetzung des Projektes die Handlungsoptionen, die in Abbildung 137 skizziert sind. Danach war es nicht das Ziel des Vorhabens, Fenster zu entwickeln. Ziel war es, Wissen für den Konstrukteur und Verarbeiter zur Verfügung zu stellen, das sie in die Lage versetzt, neue Fenster den Wünschen der Bauherrn und Architekten entsprechend unter Beachtung der Gebrauchstauglichkeit zu entwickeln.

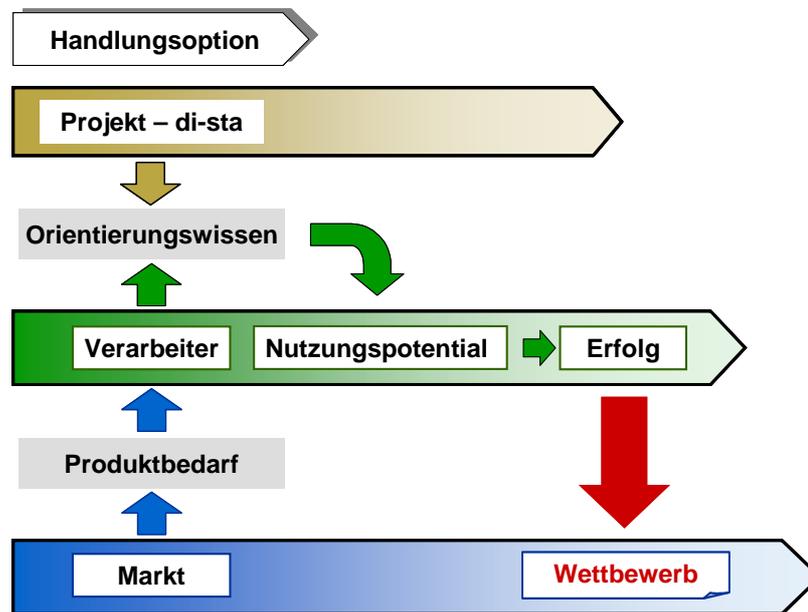


Abbildung 137: Handlungsoption – abgeleitet aus den Szenarien zur Darstellung und Anwendung des Orientierungswissens

### 6.3 Anforderungen an Qualität und Qualitätsüberwachung

Die Ergebnisse der Untersuchungen im Projekt haben gezeigt, dass die Qualität des vergüteten Holzes sowohl von der Qualität des Eingangsmaterials als auch des unbehandelten Holzes und von der Qualität der Vergütung bestimmt wird.

Bei der Qualität des Eingangsmaterials können die allgemeinen Grundsätze, wie sie z. B. in DIN EN 942 festgelegt sind, als Anhalt dienen. Die Forderung ist aber dahingehend zu erweitern, dass von Mikroorganismen befallenes Holz für Außenbauteile keine Verwendung finden kann. Diese Forderung gilt auch dann, wenn durch die Vergütungsverfahren die Dauerhaftigkeit im Allgemeinen verbessert wird.

Die Entwicklung von Qualitätskriterien im Vergütungsprozess war nicht Gegenstand des Projekts. Die zum Teil großen Streuungen der Eigenschaftswerte nach der Vergütung zeigen aber, dass Handlungsbedarf besteht, um die technisch mögliche Verbesserung der Eigenschaften durch die Dimensionsstabilisierung auch sicherzustellen.

## 6.4 Konzepte für innovative Fenster

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Untersuchungen an dimensionsstabilisierten Hölzern zeigen, dass sich durch die Vergütung

- ⇒ die Eigenschaften des Holzes, die in Verbindung mit dem Verhalten bei Feuchtigkeitseinwirkung stehen, verbessern.
- ⇒ die mechanischen Eigenschaften des Holzes in Abhängigkeit des Vergütungsverfahrens unterschiedlich verändern.

Das für den Planer, den Konstrukteur und den Verarbeiter notwendige Wissen ist für die in das Forschungsprojekt einbezogenen Vergütungsverfahren in den Informationsblättern „Orientierungswissen“ zusammengefasst. Die Struktur der Informationsblätter ist aus Abbildung 138 ersichtlich.

Die mechanischen Eigenschaften der dimensionsstabilisierten Hölzer müssen deshalb durch eine werkstoffgerechte Konstruktion, durch ausreichende Rahmenquerschnitte und durch den Einsatz geeigneter Verbindungsmittel berücksichtigt werden. Da die Veränderungen sowohl eine Verbesserung als auch eine Verschlechterung darstellen können, kann eine generelle Aussage nicht gemacht werden. Bei der Anwendung in statisch tragenden Elementen sind deshalb die bauaufsichtlichen Auflagen zu berücksichtigen.

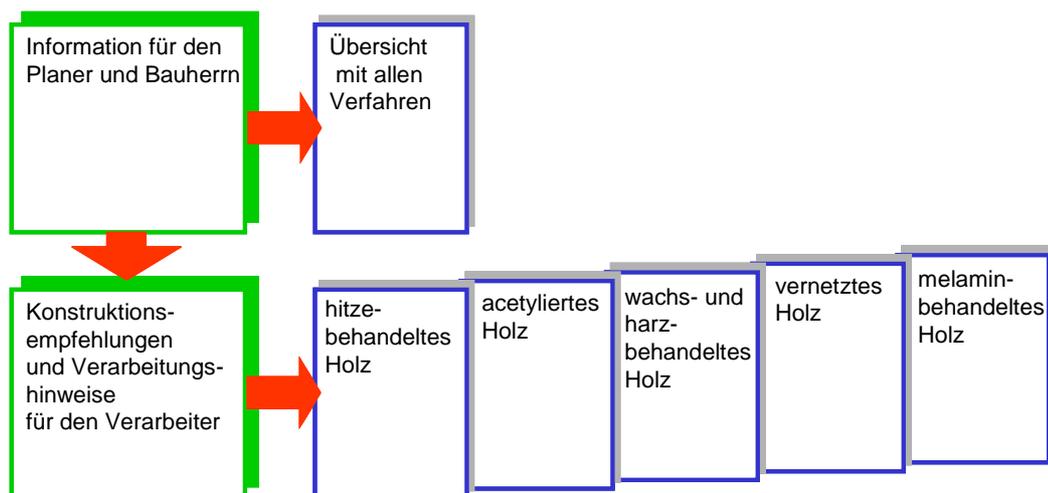


Abbildung 138: Struktur der Informationsblätter zum Orientierungswissen

Bei der Entwicklung neuer Konstruktionen für Fenster und Fassaden ist zunächst von technischen Anforderungen, die aus den Regelwerken folgen, auszugehen. Sie müssen in jedem Fall sichergestellt sein. Die Entwicklung der technischen Anforderungen und auch die Einbindung in die Haustechnik sollten dabei vorausschauend Berücksichtigung finden.

Im Mittelpunkt müssen aber die Wünsche des Bauherrn und die veränderten Umgebungsbedingungen, die sich aus den Gebäuden ergeben, stehen.

Für Fenster sind in Tabelle 39 mögliche Konstruktionskonzepte, abgeleitet aus den dargestellten Profilaufbauten, dargestellt. Die Querschnittsformen B bis D gehen dabei davon aus, dass die verschiedenen Schichten der Konstruktionen unterschiedliche Aufgaben zu erfüllen haben und diese hinsichtlich ihrer Aufgaben optimiert sind.

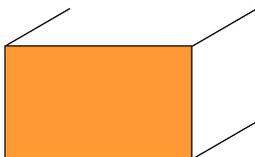
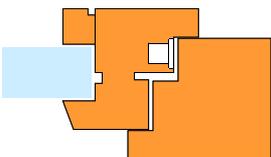
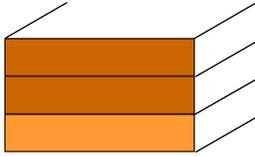
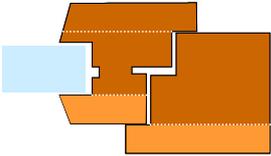
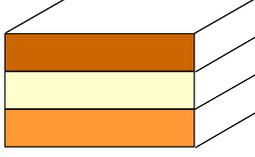
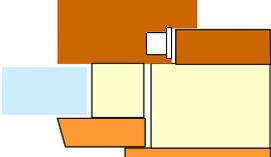
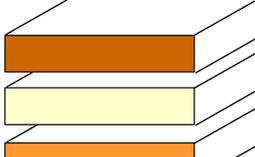
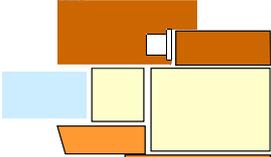
Querschnitt	Profil	Aufbau	Konzept der Konstruktion
A	Vollholz		
B	Verbundholz alle Lagen aus Holz		
C	Sandwich Decklagen aus Holz Mittellage aus verschiedenen Werkstoffen		
D	Schichten Decklagen aus Holz Mittellage aus verschiedenen Werkstoffen		

Tabelle 39: Prinzipieller Aufbau von Fensterkonstruktionen unter Verwendung von dimensionsstabilisiertem Holz

Die prinzipielle Unterteilung in Wetterschutz, Funktionsschicht und Dekorationsschicht ist in Abbildung 139 dargestellt. Langfristig ist dabei anzustreben, dass das Glas planmäßig statische Aufgaben mit übernimmt und auch für die Anbringung von Beschlägen herangezogen werden kann. Die Funktionsschicht insgesamt muss dabei auch besondere Eigenschaften, wie erhöhten Wärmeschutz, Schallschutz aber auch Beschusshemmung, sicherstellen können.

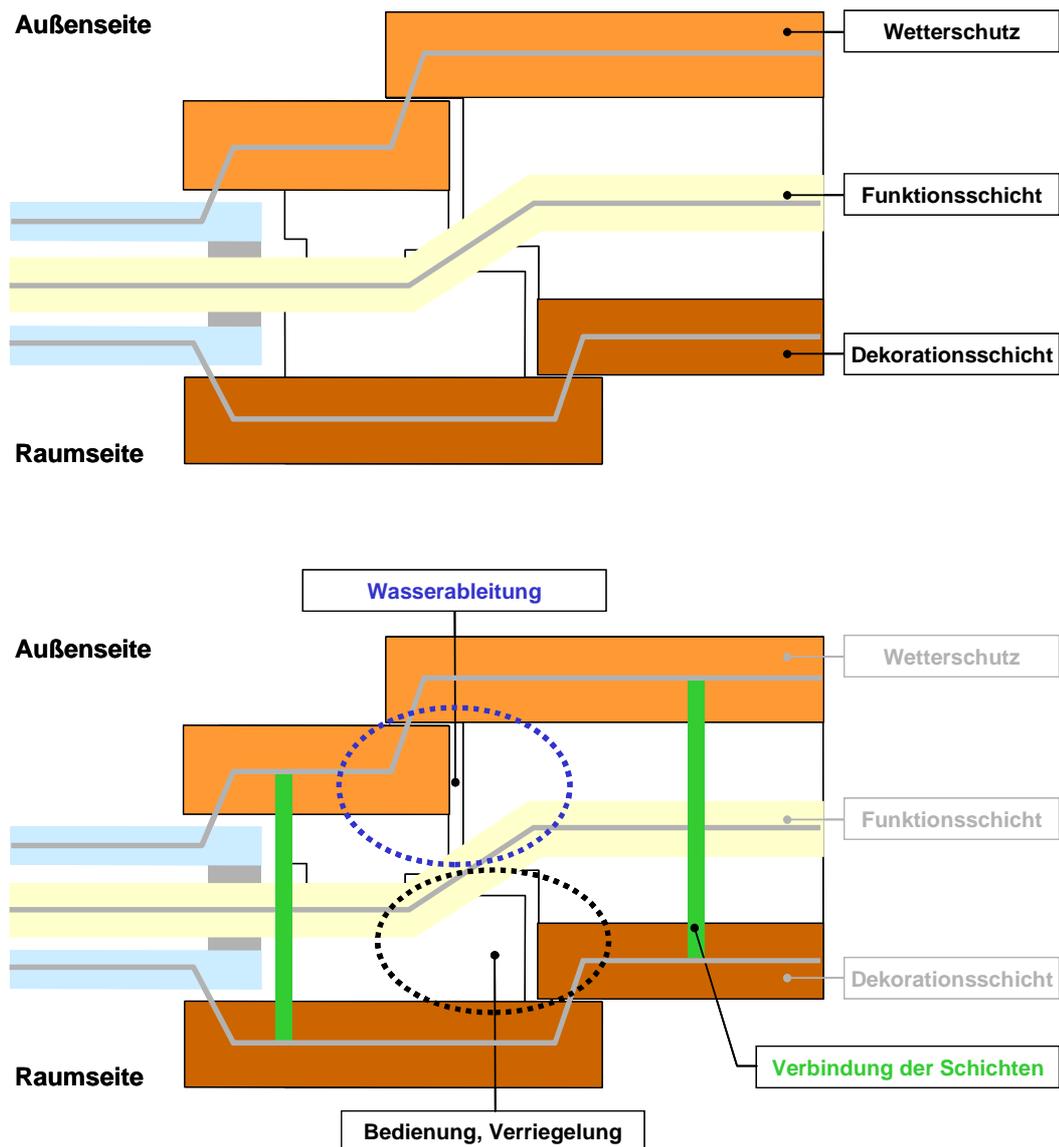


Abbildung 139: Prinzipielle Struktur zum Schichtenaufbau von Fensterkonstruktionen mit der Zuordnung von spezifischen Eigenschaften zu den einzelnen Schichten

Abbildung 140 zeigt ein Holzfenster in Anlehnung an DIN 68121, bei dem der Aufbau optimiert ist und den drei Schichten unterschiedliche Aufgaben zugeordnet sind.

Vergütetes Holz ist für die Verwendung als Wetterschutz vorgesehen. Die Dekorationsschicht kann mit dekorativem Holz, welches normalerweise im Innenausbau eingesetzt wird, ausgeführt werden. Die Funktionsschicht kann je nach Anforderungen aus unterschiedlichen Werkstoffen ausgeführt und in der Schichtung weiter unterteilt werden, wenn es z. B. darum geht, die Wärmedämmung zu verbessern und erhöhte mechanische Eigenschaften sicherzustellen.



Abbildung 140: Aufbau eines Profilquerschnittes für Fenster mit Optimierung der Eigenschaften der einzelnen Schichten

In Abbildung 141 bis Abbildung 145 sind verschiedene Konstruktionsmöglichkeiten skizziert.

Die Skizzen in Abbildung Abbildung 141 bis Abbildung 144 zeigen dabei konventionelle Grundprinzipien.

Die Skizze in Abbildung 145 geht davon aus, dass das Glaselement als tragendes Element eingesetzt wird und die Steifigkeit und Stabilität des Flügels sichert.

Im Zusammenwirken von Holz und Glas sind dabei die Eigenschaften der unterschiedlichen Werkstoffe zu beachten. Es ist deshalb insbesondere das Verhalten der Verklebung zu klären. Dabei sind auch die möglichen Risiken und die Bedingungen bei der Herstellung abzuklären (Abbildung 145).

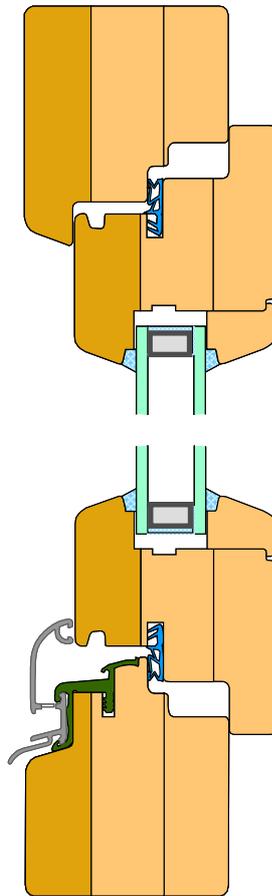
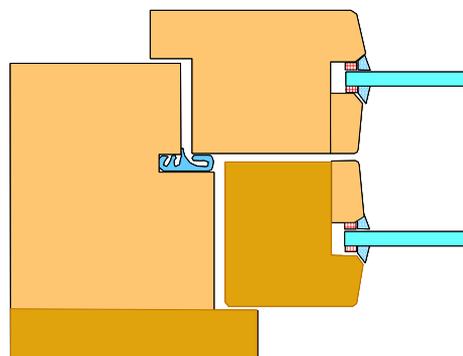


Abbildung 141: Profilquerschnitt eines Holzfensters als Einfachfenster mit Isolierglas und Rahmenprofilen aus Verbundquerschnitten von vergütetem und unbehandeltem Holz. Das vergütete Holz übernimmt dabei die Aufgabe des Wetterschutzes.



### Wetterschutz

Abbildung 142: Profilquerschnitt eines Holzfensters als Verbundfenster mit Isolierglas und Rahmenprofilen aus Verbundquerschnitten von vergütetem und unbehandeltem Holz. Das vergütete Holz übernimmt dabei die Aufgabe des Wetterschutzes.

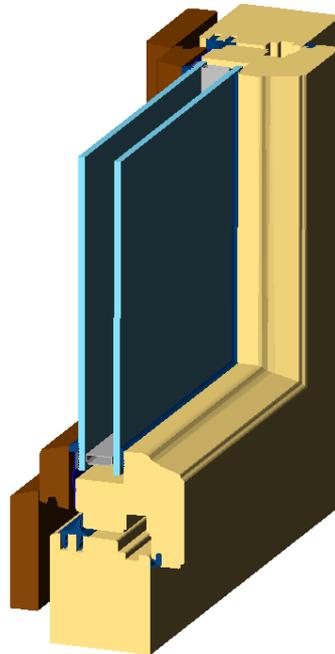


Abbildung 143: Einfachfenster auf der Grundlage eines Holz-Aluminiumfensters mit vorgesetztem Rahmen aus vergütetem Holz

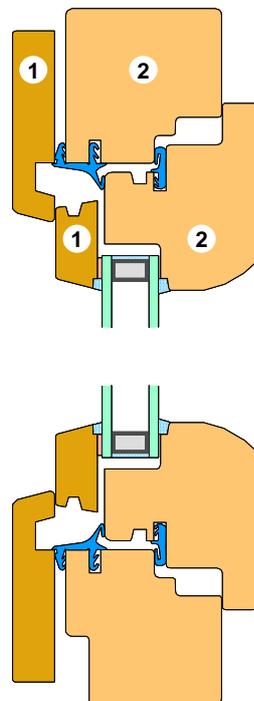


Abbildung 144: Holzfenster mit Vorsatzschale aus vergütetem Holz. Die Vorsatzschale übernimmt dabei die Aufgabe des Wetterschutzes.

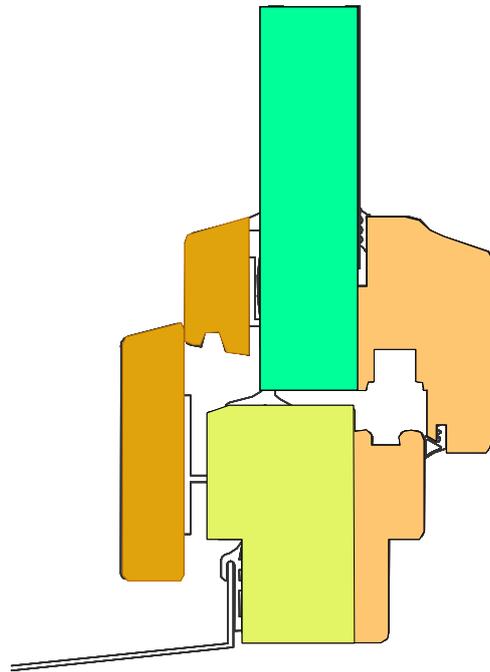


Abbildung 145: Einfachfenster mit Mehrscheiben-Isolierglas, bei dem das Glas als tragendes Element die Steifigkeit des Flügels sicherstellt.

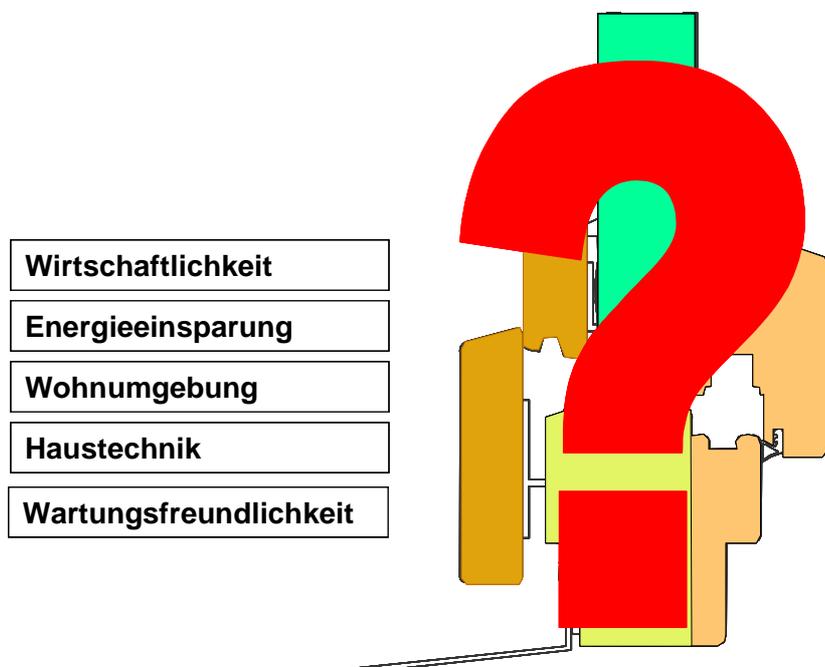


Abbildung 146: Hinweis zur Weiterentwicklung von Fenstern, bei der die Aufgaben der Einzelteile neu definiert werden und eine Einbindung in die Haustechnik vorgesehen ist.

Ein wesentlicher Bereich aus der Sicht des Bauherrn ist die Frage des Oberflächenschutzes in Verbindung mit einer einfachen Instandhaltung. Diese Anforderungen sind auch in Verbindung mit den in der Praxis üblichen Dickschichtlasuren kritisch zu hinterfragen.

Aus der Entwicklung der Lasuranstriche war es notwendig, von den ursprünglichen Dünnschichtlasuren zu Dickschichtlasuren überzugehen. Nur so konnte eine höhere Maßhaltigkeit der Querschnitte erreicht werden, die für die Sicherstellung der Funktion notwendig ist. In Verbindung mit dieser Entwicklung wurde auch der Begriff der maßhaltigen Bauteile und der damit geforderten Oberflächenbehandlung eingeführt.

Der Übergang von lösungsmittelhaltigen Anstrichsystemen zu wasserverdünnbaren Systemen führte dazu, dass in Verbindung mit der Dickschichtlasur die Anstrichüberarbeitung im Rahmen der Instandhaltung aufwendig wurde. In vielen Fällen war es dabei bereits nach kurzer Nutzungsdauer notwendig, die ursprünglich lasierend behandelten Holzoberflächen deckend zu streichen. Diese Entwicklung ist ein wesentliches Problem bei der Entscheidung des Bauherrn für oder gegen Holzfenster.

Ausgehend von den ursprünglichen Forderungen an maßhaltige Bauteile müssen die Anforderungen an die Beschichtung in Verbindung mit dimensionsstabilisiertem Holz kritisch hinterfragt werden. Querschnittsveränderungen aufgrund von Änderungen der Feuchtigkeit werden durch die Vergütung des Holzes gemindert. Insofern muss diese Aufgabe nicht mehr in vollem Umfang von der Beschichtung übernommen werden.

Dies bedeutet, dass für den Feuchtigkeitsschutz aus der Beanspruchung durch Witterungseinwirkung auch geringere Schichtdicken ausreichend sind. Bestimmend für die notwendige Schichtdicke ist deshalb nicht mehr der Feuchtigkeitsschutz, sondern die angestrebten Wartungsintervalle und der notwendige Schutz vor UV-Lichteinwirkung.

Ausgehend von den durchgeführten Schwachstellenanalysen an Fenstern und den möglichen Verbesserungen des Feuchtigkeitsverhaltens ist die notwendige Schichtdicke neu zu definieren. Bei den angesetzten Versuchen ist deshalb bereits von Lasuren mit mittlerer Schichtdicke ausgegangen worden.

Bei der Festlegung des Arbeitsprogramms wurde auf bauaufsichtliche Belange zum Teil Rücksicht genommen. Die Entwicklung während der Laufzeit des Projekts zeigte, dass in Verbindung mit Fenstern und Fassaden zunehmend bauaufsichtliche Nachweise gefordert werden. Dies gilt insbesondere für Verklebungen und mechanische Verbindungen.

Eine grundsätzliche Frage ist auch die Sicherstellung der Qualität der Vergütung. Hier sind Merkmale für das Rohmaterial und auch für das Vergütungsverfahren festzulegen. Dies ist notwendig, um die bei der Anwendung unterstellten Verbesserungen der Eigenschaften sicherzustellen.

Für die Weiterentwicklung der Fenster sind auch die Trends zu beachten, die von der Bevölkerung mehr Mobilität erwarten lassen. Dies ergibt sich zum einen aus der Studie Horizons 2020<sup>[39]</sup>, in der als Denkanstoß für die Zukunft eine globale Mobilität vorausgesagt wird. Zum anderen wird in weiteren Studien beschrieben, dass Eltern nach dem Erwachsenwerden ihrer Kinder Wohnungen in der City bevorzugen, um sowohl dem kulturellen Angebot als auch der notwendigen Versorgung näher zu sein.

Die Entwicklung der Fenster und Fassaden muss diese Trends dahingehend berichtigen, dass

- ⇒ für die globale Mobilität die Eigenschaften der Fenster dem jeweiligen Wohnort anzupassen sind. Dies gilt insbesondere bezüglich der Klimaeinwirkungen.
- ⇒ für den Wechsel vom ländlichen Bereich in den Citybereich eine Modernisierung und Umrüstung der Wohnungen mit vertretbarem Aufwand möglich sein muss. Dies gilt z. B. für die Erneuerung der Fenster in Verbindung mit dem Einbau über Zargen.

## **6.5 Anregung zur Fortführung der Arbeiten**

Die Zielsetzung des Vorhabens bestand darin, für die Verwendung von dimensionsstabilisiertem Holz bei Fenstern und Fassaden Orientierungswissen zu erarbeiten. Die Erarbeitung von Fensterkonstruktionen wurde bewusst ausgeklammert, um der Vorgabe einer genormten Konstruktion entgegenzuwirken. Nach dem heutigen Kenntnisstand hat sich die für Holzfenster gegebene Normung in DIN 68121 als hinderlich für die Weiterentwicklung der Holzfenster erwiesen.

Das Orientierungswissen sollte vielmehr darauf ausgerichtet sein, die Konstrukteure in die Lage zu versetzen, eigene Konstruktionen zu entwickeln.

Bei der Bearbeitung des Vorhabens zeigte sich, dass mit der Verwendung des dimensionsstabilisierten Holzes weitere Randbedingungen zu klären sind, damit der Einsatz zum Erfolg führt.

- 
- 39 **Scharioth, J.; Huber, M.; Schulz, K.; Pallas, M.; 2004:** „Horizons2020 – Ein Szenario als Denkanstoß für die Zukunft“; Untersuchungsbericht der TNS Infratest Wirtschaftsforschung, München

## 7 Anlagen

### 7.1 Anlage 1 - Fragebogen Verarbeitung

Umfrage zur Verarbeitung von stabilisiertem Holz																																											
1. Firma:	<input type="text"/>																																										
2. Ansprechpartner:	<input type="text"/>																																										
3. Welche Art von stabilisiertem Holz wird von Ihnen verarbeitet?	<input type="text"/>																																										
4. Welche Holzarten kommen dabei zum Einsatz?	<input type="text"/>																																										
5. Tritt bei der Verarbeitung eine Geruchsbelästigung oder evtl. andere Beeinträchtigungen auf - z.B. Jucken auf der Haut?	<input type="text"/>																																										
6. Wie ist eine evtl. Geruchs-belästigung einzuschätzen?	<table border="1"> <thead> <tr> <th>leicht</th> <th>mittel</th> <th>stark</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> </tr> </tbody> </table>	leicht	mittel	stark	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>																																				
leicht	mittel	stark																																									
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>																																									
7. Tritt bei der Verarbeitung eine erhöhte Staubbelastung auf und wie äußert sich diese?	<input type="text"/>																																										
8. Wie ist die Sprödigkeit von stabilisiertem Holz zu beurteilen?	<input type="text"/>																																										
9. Wie ist die Spanentwicklung von stabilisiertem Holz aus Ihrer Sicht zu beurteilen? (längs und quer zur Faserrichtung)	<input type="text"/>																																										
10. Können bei der Verarbeitung erhöhte Verschleißerscheinungen der Werkzeuge festgestellt werden?	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>deutlich geringer</th> <th>geringer</th> <th>gleich</th> <th>höher</th> <th>deutlich höher</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>- Standzeit</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> </tr> <tr> <td>- Schnittwiderstand</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> </tr> <tr> <td>- Verschmutzung</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> </tr> <tr> <td>- Verharzung</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> </tr> <tr> <td>- .....</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> </tr> <tr> <td>- .....</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> </tr> </tbody> </table>		deutlich geringer	geringer	gleich	höher	deutlich höher	- Standzeit	<input type="text"/>	- Schnittwiderstand	<input type="text"/>	- Verschmutzung	<input type="text"/>	- Verharzung	<input type="text"/>	- .....	<input type="text"/>	- .....	<input type="text"/>																								
	deutlich geringer	geringer	gleich	höher	deutlich höher																																						
- Standzeit	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>																																						
- Schnittwiderstand	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>																																						
- Verschmutzung	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>																																						
- Verharzung	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>																																						
- .....	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>																																						
- .....	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>																																						
11. Anmerkungen	<input type="text"/>																																										

## 7.2 Anlage 2 - Information für Planer und Bauherrn

Nr.	Anwendungsempfehlung	Vergütungsverfahren				
		A Hitzebehandlung	B Acetylierung	C Wachs-Harz- Imprägnierung	D Holzvernetzung mit DMDHEU	E Melamin- behandlung
1	<b>Einsatzbereiche</b>	Außenanwendung GK 3	Außenanwendung GK 3	Außenanwendung GK 3	Außenanwendung GK 3	Außenanwendung GK 3
2	<b>Qualitätsanforderungen Holz</b>	DIN EN 942 Klasse J2 Bläuefrei	DIN EN 942 Klasse J2 Bläuefrei	DIN EN 942 Klasse J2 Bläuefrei	DIN EN 942 Klasse J2 Bläuefrei	DIN EN 942 Klasse J2 Bläuefrei
3	<b>Qualitätsdokumentation für die Modifizierung</b>	Minimum Temperatur und Zeit Rissfreiheit	Acetylgruppengehalt Rissfreiheit	Mindesteinbringmenge Rissfreiheit	Carbonylgruppengehalt Rissfreiheit	Mindesteinbringmenge Rissfreiheit
4	<b>Verändertes Quellen und Schwinden</b>	ca. 50 % verringert	ca. 50 % verringert	unverändert	ca. 40 % verringert	unverändert
5	<b>Holzfeuchtigkeit</b>	auf ca. 50 % reduziert	auf ca. 50 % reduziert	unverändert	nur in feuchten Bereichen reduziert	etwas in feuchten Bereichen reduziert
6	<b>Wasseraufnahme</b>	Geschwindigkeit und Menge reduziert	Geschwindigkeit und Menge wenig reduziert	Geschwindigkeit und Menge stark reduziert	Geschwindigkeit und Menge nicht reduziert	Geschwindigkeit und Menge wenig reduziert
7	<b>Veränderte mechanische Eigenschaften</b>	Festigkeit, Bruchschlagarbeit / E-Modul verringert	Veränderungen der mechanischen Eigenschaften sind zu erwarten. Eine abschließende Bewertung ist beim derzeitigen Stand noch nicht möglich.			
8	<b>Holzarten</b>	Fichte, Kiefer, Buche, Eiche  (alle Holzarten)	Kiefer, Buche, <i>Pinus radiata</i> (alle imprägnierbaren Holzarten)	Kiefer  (alle imprägnierbaren Holzarten)	Kiefer, Buche Rubberwood  (alle imprägnierbaren Holzarten)	Kiefer  (alle imprägnierbaren Holzarten)
9	<b>Aussehen</b>	brauner Grundton	hellbrauner / gräulicher Grundton	hellbrauner Grundton	keine farbliche Veränderung	keine farbliche Veränderung
10	<b>Geruch</b>	leicht verbrannt	Essiggeruch	ölartig	merklicher Geruch	merklicher Geruch
11	<b>Oberflächenbehandlung</b>	Lasur mit mittlerer Schichtdicke	Lasur mit mittlerer Schichtdicke	Lasur mit mittlerer Schichtdicke	Lasur mit mittlerer Schichtdicke	Lasur mit mittlerer Schichtdicke
12	<b>Instandhaltung</b> (bei mittlerer Witterungsbeanspruchung)	Oberflächenintervalle mind. 2 Jahre	Oberflächenintervalle mind. 2 Jahre	Oberflächenintervalle mind. 2 Jahre	Oberflächenintervalle mind. 2 Jahre	Oberflächenintervalle mind. 2 Jahre
13	<b>Entsorgung</b>	vergleichbar mit Holzwerkstoffen	vergleichbar mit Holzwerkstoffen	vergleichbar mit Holzwerkstoffen	vergleichbar mit Holzwerkstoffen	vergleichbar mit Holzwerkstoffen

- 1) Weitere Versuche und eine Abgrenzung mit den Anforderungen an die Witterungsbeständigkeit und den UV-Schutz sind notwendig.

### 7.3 Anlage 3 - Information für Konstrukteure und Verarbeiter

Die nachfolgenden Informationsblätter A bis E enthalten Verarbeitungsempfehlungen und Hinweise zur Konstruktion für die einzelnen Verfahren zur Dimensionsstabilisierung von Holz.

Die Informationsblätter sind wie folgt gegliedert:

- ⇒ A - Hitzebehandlung
- ⇒ B - Acetylierung
- ⇒ C - Wachs-Harz-Imprägnierung
- ⇒ D - Holzvernetzung mit DMDHEU
- ⇒ E - Melaminbehandlung

Sie geben den Stand zum Zeitpunkt der Durchführung der Versuche. Da die Erkenntnisse in Verbindung mit dimensionsstabilisiertem Holz weiter untersucht werden ist es für den Konstrukteur und Verarbeiter notwendig, sich über die weitere Entwicklung zu informieren.

Besonders wird nochmals darauf hingewiesen, dass die Qualität und Eigenschaften des dimensionsstabilisierten Holzes von der Qualität und den Eigenschaften des dem Vergütungsprozess zugeführten Holzes bestimmt werden. Damit kommt der Vorauswahl des noch unbehandelten Holzes eine besondere Bedeutung zu.

A		Hitzebehandlung (Information für Konstrukteure und Verarbeiter zur Holzart Kiefer)		
<b>1.0 Merkmale</b>				
1.1	Geeignete Holzarten	Kiefer, Buche, Eiche, Fichte und weitere Holzarten		
1.2	Aussehen	Brauner Grundton		
1.3	Geruch	Leicht verbrannt		
1.4	Einsatzbereiche	GK 3		
1.5	Anwendung	Außenbereich: Fenster / Fassaden		
1.6	Einschränkungen	Gesundheitliche Auswirkung nicht bekannt		
1.7	Bearbeitung	Umfeld:		Erhöhte Staubentwicklung
		Werkzeuge:	Geringer Schnittwiderstand, geringe Verharzung	
		Verhalten:	Erhöhte Sprödigkeit	
1.8	Verträglichkeit	Metall:	Keine Einschränkungen bekannt	
		Sonstige Werkstoffe:		
<b>2.0 Eigenschaften</b>				
2.1	Holzfeuchte bei 20 °C/65 % rel. Feuchte	7 – 8 %	Um ca. 50 % reduziert im Vergleich zu unbehandeltem Holz.	
2.1	Differenzielle Quellung $\alpha = \Delta b / \% \Delta \omega$ (30%-90%)	Tangential $\alpha_t = 0,05$ Radial $\alpha_r = 0,02$	Das Quellen und Schwinden wird im Vergleich zu unbehandeltem Holz stark reduziert.	
2.3	Wasseraufnahmekoeffizient $w$ [kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> )]	Quer zur Faserrichtung $w = 0,5$ In Faserrichtung $w = 5,0$	Sehr starke Streuungen; in Faserrichtung von $w = 0,13$ bis 7,5.	
2.4	Mechanische Eigenschaften	Parallel zur Faser Senkrecht zur Faser	Ungünstigere Eigenschaften wie bei unbehandeltem Holz zu erwarten.	
2.5	Mechanische Verbindungen	Schrauben Nägels	Bei statisch beanspruchten Bauteilen ist der Nachweis der Tragfähigkeit notwendig.	
2.6	Verklebung	Dickenverleimung Montageverleimung	Nachweis der Eignung des Klebstoffes notwendig.	
<b>3.0 Konstruktionshinweise</b>				
3.1	Profilgebung	Scharfkantige Profilierung vermeiden		
3.2	Rahmenverbindung / Konstruktionsfugen	Mit unbehandeltem Holz vergleichbar		
<b>4.0 Oberflächenschutz</b>				
4.1	Bläueschutz	erforderlich		
4.2	UV-Schutz	UV-Schutz in der Beschichtung erforderlich		
4.3	Farbgebung	Lasur auf den Grundton des Holzes abstimmen. Dunkle Farbtöne bei deckendem Anstrich vermeiden.		
4.4	Schichtdicke	Mittlere Schichtdicken mit 30 – 60 µm. Gleiche Haftung wie bei unbehandeltem Holz.		
<b>5.0 Wartung</b>				
5.1	Oberfläche	Intervalle mindestens 2 Jahre bei mittlerer Witterungsbeanspruchung mit den üblichen Maßnahmen bei Fugen und Oberflächen		
5.2	Beschläge und sicherheitsrelevante Bereiche	In Abhängigkeit der Nutzung bei Beachtung der bauaufsichtlichen und rechtlichen Vorgaben		
<b>6.0 Entsorgung</b>				
6.1	Abfälle aus Bearbeitung	Verwertung wie Holzwerkstoffe		
6.2	Ende Bauteilnutzung			

<b>B</b>		<b>Acetylierung</b> (Information für Konstrukteure und Verarbeiter zur Holzart Kiefer)		
<b>1.0</b>	<b>Merkmale</b>			
1.1	Geeignete Holzarten	Kiefer, Buche, Pinus radiata (potentiell alle imprägnierbaren Holzarten)		
1.2	Aussehen	Hellbrauner bis gräulicher Farbton		
1.3	Geruch	Essiggeruch		
1.4	Einsatzbereiche	GK 3		
1.5	Anwendung	Außenbereich: Fenster / Fassaden		
1.6	Einschränkungen	Gesundheitliche Auswirkung nicht bekannt		
1.7	Bearbeitung	Umfeld:		Wie unbehandeltes Holz
		Werkzeuge:	Geringe Verharzung	
		Verhalten:	Sprödigkeit leicht erhöht	
1.8	Verträglichkeit	Metall:	Korrosionsgefahr	
		Sonstige Werkstoffe:	Keine Einschränkungen bekannt	
<b>2.0</b>	<b>Eigenschaften</b>			
2.1	Holzfeuchte bei 20 °C/65 % rel. Feuchte	6 – 7 %	Stark reduziert im Vergleich zu unbehandeltem Holz.	
2.1	Differenzielle Quellung $\alpha = \Delta b / \% \Delta \omega$ (30%-90%)	Tangential $\alpha_t = 0,04$ Radial $\alpha_r = 0,02$	Das Quellen und Schwinden wird im Vergleich zu unbehandeltem Holz reduziert.	
2.3	Wasseraufnahmekoeffizient $w$ [kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> )]	Quer zur Faserrichtung $w = 1,0$ In Faserrichtung $w = 3,5$	Die Wasseraufnahme wird sehr stark vom Zustand des unbehandelten Holzes bestimmt.	
2.4	Mechanische Eigenschaften	Parallel zur Faser Senkrecht zur Faser	Ungünstigere Eigenschaften wie bei unbehandeltem Holz zu erwarten.	
2.5	Mechanische Verbindungen	Schrauben Nägel	Bei statisch beanspruchten Bauteilen ist der Nachweis der Tragfähigkeit notwendig.	
2.6	Verklebung	Dickenverleimung Montageverleimung	Nachweis der Eignung des Klebstoffes notwendig.	
<b>3.0</b>	<b>Konstruktionshinweise</b>			
3.1	Profilgebung	Scharfkantige Profilierung vermeiden		
3.2	Rahmenverbindung / Konstruktionsfugen	Mit unbehandeltem Holz vergleichbar		
<b>4.0</b>	<b>Oberflächenschutz</b>			
4.1	Bläueschutz	erforderlich		
4.2	UV-Schutz	UV-Schutz in der Beschichtung erforderlich		
4.3	Farbgebung	Lasur auf den Grundton des Holzes abstimmen. Dunkle Farbtöne bei deckendem Anstrich vermeiden.		
4.4	Schichtdicke	Mittlere Schichtdicken mit 30 – 60 µm. Gleiche Haftung wie bei unbehandeltem Holz.		
<b>5.0</b>	<b>Wartung</b>			
5.1	Oberfläche	Intervalle mindestens 2 Jahre bei mittlerer Witterungsbeanspruchung mit den üblichen Maßnahmen bei Fugen und Oberflächen		
5.2	Beschläge und sicherheitsrelevante Bereiche	In Abhängigkeit der Nutzung bei Beachtung der bauaufsichtlichen und rechtlichen Vorgaben		
<b>6.0</b>	<b>Entsorgung</b>			
6.1	Abfälle aus Bearbeitung	Verwertung wie Holzwerkstoffe		
6.2	Ende Bauteilnutzung			

<b>C</b>		<b>Wachs-Harz-Imprägnierung</b> (Information für Konstrukteure und Verarbeiter zur Holzart Kiefer)		
<b>1.0 Merkmale</b>				
1.1	Geeignete Holzarten	Kiefernspoltholz (alle imprägnierbaren Holzarten möglich)		
1.2	Aussehen	Vertiefung des Holztons (Anfeuerung)		
1.3	Geruch	Wachs-/öhlhaltiger Geruch		
1.4	Einsatzbereiche	GK 3		
1.5	Anwendung	Außenbereich: Fenster / Fassaden		
1.6	Einschränkungen	Gesundheitliche Auswirkung nicht bekannt		
1.7	Bearbeitung	Umfeld:		Wie unbehandeltes Holz
		Werkzeuge:	Geringer Schnittwiderstand, erhöhte Verharzung	
		Verhalten:	Leicht speckige Oberfläche	
1.8	Verträglichkeit	Metall:	Keine Einschränkungen bekannt	
		Sonstige Werkstoffe:	Haftungsstörung möglich	
<b>2.0 Eigenschaften</b>				
2.1	Holzfeuchte bei 20 °C/65 % rel. Feuchte	11 %	Nicht reduziert im Vergleich zu unbehandeltem Holz.	
2.1	Differenzielle Quellung $\alpha = \Delta b / \% \Delta \omega$ (30%-90%)	Tangential $\alpha_t = 0,08$ Radial $\alpha_r = 0,04$	Das Quellen und Schwinden wird im Vergleich zu unbehandeltem Holz nicht reduziert.	
2.3	Wasseraufnahmekoeffizient $w$ [kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> )]	Quer zur Faserrichtung $w = 0,05$ In Faserrichtung $w = 0,18$	Die Wasseraufnahme ist durch die Behandlung stark verzögert.	
2.4	Mechanische Eigenschaften	Parallel zur Faser Senkrecht zur Faser	Leicht verbesserte Eigenschaften, deutliche Steigerung der Rohdichte, Brinellhärte und Schraubenauszugskraft. Bei statisch beanspruchten Bauteilen ist der Nachweis der Tragfähigkeit notwendig.	
2.5	Mechanische Verbindungen	Schrauben Nägeln		
2.6	Verklebung	Dickenverleimung Montageverleimung	Nachweis der Eignung des Klebstoffes notwendig.	
<b>3.0 Konstruktionshinweise</b>				
3.1	Profilgebung	Scharfkantige Profilierung vermeiden		
3.2	Rahmenverbindung / Konstruktionsfugen	Mit unbehandeltem Holz vergleichbar		
<b>4.0 Oberflächenschutz</b>				
4.1	Bläueschutz	erforderlich		
4.2	UV-Schutz	UV-Schutz in der Beschichtung erforderlich		
4.3	Farbgebung	Lasur auf den Grundton des Holzes abstimmen. Dunkle Farbtöne bei deckendem Anstrich vermeiden.		
4.4	Schichtdicke	Mittlere Schichtdicken mit 30 – 60 µm. Geringere Haftung wie bei unbehandeltem Holz.		
<b>5.0 Wartung</b>				
5.1	Oberfläche	Intervalle mindestens 2 Jahre bei mittlerer Witterungsbeanspruchung mit den üblichen Maßnahmen bei Fugen und Oberflächen		
5.2	Beschläge und sicherheitsrelevante Bereiche	In Abhängigkeit der Nutzung bei Beachtung der bauaufsichtlichen und rechtlichen Vorgaben		
<b>6.0 Entsorgung</b>				
6.1	Abfälle aus Bearbeitung	Verwertung wie Holzwerkstoffe		
6.2	Ende Bauteilnutzung			

D Holzvernetzung mit DMDHEU (Information für Konstrukteure und Verarbeiter zur Holzart Kiefer)				
<b>1.0 Merkmale</b>				
1.1	Geeignete Holzarten	Kiefer, Buche, Rubberwood (potentiell alle imprägnierbaren Holzarten)		
1.2	Aussehen	Wie unbehandeltes Holz		
1.3	Geruch	Relativ unverändert		
1.4	Einsatzbereiche	GK 3		
1.5	Anwendung	Außenbereich: Fenster / Fassaden		
1.6	Einschränkungen	Gesundheitliche Auswirkung nicht bekannt		
1.7	Bearbeitung	Umfeld:		Staubbildung leicht erhöht
		Werkzeuge:	Erhöhter Schnittwiderstand, leichte Verharzung	
		Verhalten:	Sprödigkeit leicht erhöht	
1.8	Verträglichkeit	Metall:	Keine Einschränkungen bekannt	
		Sonstige Werkstoffe:		
<b>2.0 Eigenschaften</b>				
2.1	Holzfeuchte bei 20 °C/65 % rel. Feuchte	9 – 10 %	Reduziert im Vergleich zu unbehandeltem Holz.	
2.1	Differenzielle Quellung $\alpha = \Delta b / \% \Delta \omega$ (30%-90%)	Tangential $\alpha_t = 0,06$ Radial $\alpha_r = 0,03$	Das Quellen und Schwinden wird im Vergleich zu unbehandeltem Holz reduziert.	
2.3	Wasseraufnahmekoeffizient $w$ [kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> )]	Quer zur Faserrichtung $w = 0,2$ In Faserrichtung $w = 0,8$	Die Streuung wird durch die Eigenschaften des unbehandelten Holzes stark beeinflusst.	
2.4	Mechanische Eigenschaften	Parallel zur Faser Senkrecht zur Faser	Ungünstigere Eigenschaften wie bei unbehandeltem Holz zu erwarten.	
2.5	Mechanische Verbindungen	Schrauben Nägeln	Bei statisch beanspruchten Bauteilen ist der Nachweis der Tragfähigkeit notwendig.	
2.6	Verklebung	Dickenverleimung Montageverleimung	Nachweis der Eignung des Klebstoffes notwendig.	
<b>3.0 Konstruktionshinweise</b>				
3.1	Profilgebung	Scharfkantige Profilierung vermeiden		
3.2	Rahmenverbindung / Konstruktionsfugen	Mit unbehandeltem Holz vergleichbar		
<b>4.0 Oberflächenschutz</b>				
4.1	Bläueschutz	erforderlich		
4.2	UV-Schutz	UV-Schutz in der Beschichtung erforderlich		
4.3	Farbgebung	Lasur auf den Grundton des Holzes abstimmen. Dunkle Farbtöne bei deckendem Anstrich vermeiden.		
4.4	Schichtdicke	Mittlere Schichtdicken mit 30 – 60 µm. Gleiche Haftung wie bei unbehandeltem Holz.		
<b>5.0 Wartung</b>				
5.1	Oberfläche	Intervalle mindestens 2 Jahre bei mittlerer Witterungsbeanspruchung mit den üblichen Maßnahmen bei Fugen und Oberflächen		
5.2	Beschläge und sicherheitsrelevante Bereiche	In Abhängigkeit der Nutzung bei Beachtung der bauaufsichtlichen und rechtlichen Vorgaben		
<b>6.0 Entsorgung</b>				
6.1	Abfälle aus Bearbeitung	Verwertung wie Holzwerkstoffe		
6.2	Ende Bauteilnutzung			

E			
Melaminbehandlung (Information für Konstrukteure und Verarbeiter zur Holzart Kiefer)			
<b>1.0 Merkmale</b>			
1.1	Geeignete Holzarten	Kiefernspoltholz (alle imprägnierbaren Holzarten möglich)	
1.2	Aussehen	Farbliche Veränderung in Abhängigkeit der Holzart	
1.3	Geruch	Merklicher Geruch	
1.4	Einsatzbereiche	GK 3	
1.5	Anwendung	Außenbereich: Fenster / Fassaden	
1.6	Einschränkungen	Gesundheitliche Auswirkung nicht bekannt	
1.7	Bearbeitung	Umfeld: Werkzeuge: Verhalten:	
1.8	Verträglichkeit	Metall: Sonstige Werkstoffe:	Keine Einschränkungen bekannt
<b>2.0 Eigenschaften</b>			
2.1	Holzfeuchte bei 20 °C/65 % rel. Feuchte	12 %	Nicht reduziert im Vergleich zu unbehandeltem Holz.
2.1	Differenzielle Quellung $\alpha = \Delta b / \% \Delta \omega$ (30%-90%)	Tangential $\alpha_t = 0,08$ Radial $\alpha_r = 0,04$	Das Quellen und Schwinden wird im Vergleich zu unbehandeltem Holz nicht reduziert.
2.3	Wasseraufnahmekoeffizient $w$ [kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> )]	Quer zur Faserrichtung $w = 0,3$ In Faserrichtung $w = 1,3$	Die starken Streuungen in Faserrichtung sind durch die Eigenschaften des unbehandelten Holzes bestimmt.
2.4	Mechanische Eigenschaften	Parallel zur Faser Senkrecht zur Faser	Vergleichbare Eigenschaften wie bei unbehandeltem Holz zu erwarten.
2.5	Mechanische Verbindungen	Schrauben Nägels	Bei statisch beanspruchten Bauteilen ist der Nachweis der Tragfähigkeit notwendig.
2.6	Verklebung	Dickenverleimung Montageverleimung	Nachweis der Eignung des Klebstoffes notwendig.
<b>3.0 Konstruktionshinweise</b>			
3.1	Profilgebung	Scharfkantige Profilierung vermeiden	
3.2	Rahmenverbindung / Konstruktionsfugen	Mit unbehandeltem Holz vergleichbar	
<b>4.0 Oberflächenschutz</b>			
4.1	Bläueschutz	erforderlich	
4.2	UV-Schutz	UV-Schutz in der Beschichtung erforderlich	
4.3	Farbgebung	Lasur auf den Grundton des Holzes abstimmen. Dunkle Farbtöne bei deckendem Anstrich vermeiden.	
4.4	Schichtdicke	Mittlere Schichtdicken mit 30 – 60 µm. Gleiche Haftung wie bei unbehandeltem Holz.	
<b>5.0 Wartung</b>			
5.1	Oberfläche	Intervalle mindestens 2 Jahre bei mittlerer Witterungsbeanspruchung mit den üblichen Maßnahmen bei Fugen und Oberflächen	
5.2	Beschläge und sicherheitsrelevante Bereiche	In Abhängigkeit der Nutzung bei Beachtung der bauaufsichtlichen und rechtlichen Vorgaben	
<b>6.0 Entsorgung</b>			
6.1	Abfälle aus Bearbeitung	Verwertung wie Holzwerkstoffe	
6.2	Ende Bauteilnutzung		