

## **Endbericht zum DBU-Projekt**

# **Einsatz von modifiziertem Holz zur Verbesserung der Eigenschaften von Holzfenstern**

**Aktenzeichen: 22362**



**Abteilung für Holzbiologie und Holzprodukte,  
Burckhardtinstitut,  
Georg-August-Universität Göttingen**

Abteilungsleiter: Professor. Dr. Holger Militz  
Projektleiter: Andreas Krause  
Büsgenweg 4, 37077 Göttingen,  
Tel: 0551 392051, Fax: 0551 399646  
E-Mail: [akrause2@gwdg.de](mailto:akrause2@gwdg.de)

Göttingen, April 2008

**PROJEKTJAHRE 2005 BIS 2007 DMDHEU UND WACHSBEHANDLUNG .....12**

**1 EINLEITUNG .....13**

1.1 Grundlagen ..... 14

1.1.1 Holzmodifizierung mit Dimethylol-dihydroxy-ethylenurea ..... 14

1.1.2 Prinzip der Heißdampftrocknung ..... 19

1.1.3 Holzbehandlung mit Wachs ..... 21

1.2 Ziele ..... 22

1.3 Meilensteine ..... 23

1.4 Rahmenbedingungen..... 24

**2 GRUNDLAGENFORSCHUNG .....28**

2.1 Beschichtbarkeit der Wachsbehandlung..... 28

2.2 Mechanische Eigenschaften Holz ..... 28

2.2.1 Klimatisierung..... 29

2.2.1.1 Bestimmung von statischem Elastizitätsmodul, Biegefestigkeit und Biegearbeit ..... 29

2.2.2 Bestimmung der Bruchschlagarbeit..... 33

2.2.3 Oberflächenhärte ..... 38

2.2.4 Schraubenausziehstand..... 40

2.3 Kapillare Wasseraufnahme ..... 42

2.4 Quellung ..... 48

2.5 Wasserdampfdiffusion..... 51

2.6 Thermische Eigenschaften..... 52

2.7 Hydrophobierung bei Holzvernetzung ..... 56

<b>3</b>	<b>ANWENDUNG</b>	<b>57</b>
<b>3.1</b>	<b>Herstellen von modifiziertem Holz</b>	<b>57</b>
3.1.1	Behandlung mit DMDHEU	57
3.1.2	Wachsbehandlung	63
<b>3.2</b>	<b>Verklebung zu Lamellen</b>	<b>66</b>
<b>3.3</b>	<b>Beschichtungstests</b>	<b>74</b>
3.3.1	QUV-Bewitterung	75
3.3.2	Hafffestigkeitstests	82
<b>3.4</b>	<b>Herstellung von Bauteilen</b>	<b>86</b>
<b>3.5</b>	<b>Bewitterung von Bauteilen</b>	<b>86</b>
<b>4</b>	<b>IMPLEMENTIERUNG</b>	<b>86</b>
<b>4.1</b>	<b>Bau und Test von Prototypen</b>	<b>87</b>
<b>4.2</b>	<b>Einbruchhemmung, Dauerfunktion testen</b>	<b>87</b>
<b>4.3</b>	<b>Planung der Implementierung in KMU</b>	<b>89</b>
4.3.1	Analyse der Fensterproduktion bei Variotec	89
4.3.2	Implementierung des DMDHEU Verfahrens und der Wachsbehandlung	92
<b>5</b>	<b>DISKUSSION</b>	<b>94</b>
<b>5.1</b>	<b>Holzvernetzung (DMDHEU)</b>	<b>94</b>
5.1.1	Vorteile des Verfahrens:	94
5.1.2	Nachteile des Verfahrens:	95
<b>5.2</b>	<b>Wachsbehandlung</b>	<b>95</b>
5.2.1	Vorteile des Verfahrens:	95
5.2.2	Nachteile des Verfahrens:	96
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>97</b>

<b>PROJEKTJAHR 2007 / 2008 MELAMINBEHANDLUNG</b> .....	<b>99</b>
<b>7 EINLEITUNG</b> .....	<b>100</b>
<b>8 WIRKPRINZIP DER MELAMINMODIFIZIERUNG</b> .....	<b>100</b>
<b>9 VORUNTERSUCHUNGEN</b> .....	<b>102</b>
<b>10 PROZESSOPTIMIERUNG</b> .....	<b>103</b>
10.1 Vorgehensweise und untersuchte Eigenschaften.....	103
10.2 Versuche zur Lösungsstabilität.....	104
<b>10.3 Prozess 1</b> .....	<b>107</b>
10.3.1 Prozessverlauf.....	108
10.3.2 Feuchtigkeitsgehalte, Lösungsaufnahme und WPG .....	108
10.3.3 Rissuntersuchung .....	110
10.3.4 Verformungen, Zellkollaps und Verschalungen.....	112
10.3.5 Wasserlagerung.....	113
10.3.6 Bestimmung von N-Gehalt .....	114
10.3.7 Festigkeitseigenschaften .....	115
<b>10.4 Prozess 2</b> .....	<b>116</b>
10.4.1 Prozessverlauf.....	116
10.4.2 Feuchtigkeitsgehalte, Lösungsaufnahme und WPG .....	117
10.4.3 Rissuntersuchung .....	118
10.4.4 Verformungen, Zellkollaps und Verschalungen.....	119
10.4.5 Wasserlagerung.....	120
10.4.6 Bestimmung von N-Gehalt .....	120
10.4.7 Festigkeitseigenschaften .....	121
<b>10.5 Prozess 3</b> .....	<b>122</b>
10.5.1 Prozessverlauf.....	122
10.5.2 Feuchtigkeitsgehalte, Lösungsaufnahme und WPG .....	122
10.5.3 Rissuntersuchung .....	123



10.5.4	Verformungen, Zellkollaps und Verschalungen.....	124
10.5.5	Wasserlagerung.....	124
10.5.6	Bestimmung von N-Gehalt .....	125
10.5.7	Festigkeitseigenschaften .....	126
<b>10.6</b>	<b>Prozess 4.....</b>	<b>126</b>
10.6.1	Prozessverlauf.....	126
10.6.2	Feuchtigkeitsgehalte, Lösungsaufnahme und WPG .....	127
10.6.3	Rissuntersuchung .....	128
10.6.4	Verformungen, Zellkollaps und Verschalungen.....	129
10.6.5	Wasserlagerung.....	129
10.6.6	Bestimmung von N-Gehalt .....	130
10.6.7	Festigkeitseigenschaften .....	130
<b>10.7</b>	<b>Rückblick Prozess 1 bis Prozess 4 .....</b>	<b>132</b>
<b>10.8</b>	<b>Prozess 5.....</b>	<b>134</b>
10.8.1	Prozessverlauf.....	134
10.8.2	Bestimmung von N-Gehalt .....	135
10.8.3	Festigkeitseigenschaften .....	136
10.8.4	Vergleich der Festigkeiten Prozess 1 bis Prozess 5 .....	138
10.8.5	Dimensionsstabilität.....	141
10.8.6	Dauerhaftigkeit gegen holzabbauende Pilze.....	142
<b>11</b>	<b>IMPLEMENTIERUNG BEI VARIOTEC .....</b>	<b>145</b>
<b>12</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>146</b>
<b>13</b>	<b>ANHANG.....</b>	<b>148</b>
13.1	Beschichtungssysteme .....	148
13.2	Präsentation der Firma Variotec.....	152

**Abbildungsverzeichnis:**

ABBILDUNG 1: STRUKTURFORMEL VON DMDHEU (QUELLE: MILITZ, HILL 2005, VERÄNDERT)	15
ABBILDUNG 2: REAKTIONSSCHEMA FÜR DIE REAKTION VON DMDHEU MIT HOLZ NACH PETERSEN	18
ABBILDUNG 3: MODELL EINES WIRKMECHANISMUS VON DMDHEU IN DER HOLZZELLWAND	19
ABBILDUNG 4: PRÜFUNGSaufbau FÜR DEN BIEGEVERSUCH	30
ABBILDUNG 5: ELASTIZITÄTSMODUL (E-MODUL) $[N \cdot MM^{-2}]$ VON HOLZ IN ABHÄNGIGKEIT VON HOLZART UND BEHANDLUNG	31
ABBILDUNG 6: BIEGEFESTIGKEIT $[N \cdot MM^{-2}]$ VON HOLZ IN ABHÄNGIGKEIT VON HOLZART UND BEHANDLUNG	32
ABBILDUNG 7: BIEGEARBEIT $[KJ \cdot MM^{-2}]$ VON HOLZ IN ABHÄNGIGKEIT VON HOLZART UND BEHANDLUNG	33
ABBILDUNG 8: FÜR DIE PRÜFUNG VORBEREITETES PENDELSCHLAGWERK	34
ABBILDUNG 9: BRUCHSCHLAGARBEIT $[KJ \cdot MM^{-2}]$ VON HOLZ IN ABHÄNGIGKEIT VON HOLZART UND BEHANDLUNG	35
ABBILDUNG 10: ZUSAMMENHANG ZWISCHEN BIEGEARBEIT UND BRUCHSCHLAGARBEIT	36
<b>ABBILDUNG 11: A: STUMPFES BRUCHBILD; B: KURZFASERIGES BRUCHBILD; C: LANGFASERIGES BRUCHBILD; D: BRUCH IN SCHICHTEN; E: BRUCHBILD MIT GERADEN BRUCHKANTEN; BEISPIEL FÜR EIN SPRÖDES BRUCHVERHALTEN</b>	37
ABBILDUNG 12 PRÜFUNGSaufbau FÜR DIE BRINELLHÄRTE	38
ABBILDUNG 13: OBERFLÄCHENHÄRTE (BRINELL) $[N \cdot MM^{-2}]$ VON HOLZ IN ABHÄNGIGKEIT VON HOLZART UND BEHANDLUNG	39
ABBILDUNG 14: PRÜFUNGSaufbau FÜR DEN SCHRAUBENAUSZIEHWIDERSTAND	41
ABBILDUNG 15: SCHRAUBENAUSZIEHWIDERSTAND $[N]$ VON HOLZ IN ABHÄNGIGKEIT VON HOLZART UND BEHANDLUNG	42
ABBILDUNG 16: TANGENTIALE WASSERAUFNAHME IN ABHÄNGIGKEIT VON ZEIT UND BEHANDLUNG.	45
ABBILDUNG 17: RADIALE WASSERAUFNAHME IN ABHÄNGIGKEIT VON ZEIT UND BEHANDLUNG.	46

ABBILDUNG 18: LONGITUDINALE WASSERAUFNAHME IN ABHÄNGIGKEIT VON DER ZEIT UND DER BEHANDLUNG	46
ABBILDUNG 19: WASSERAUFNAHMEKOEFFIZIENT IN ABHÄNGIGKEIT VON DER ANATOMISCHEN RICHTUNG UND DER BEHANDLUNG	47
ABBILDUNG 20 QUELLUNG [%] IN RADIALER RICHTUNG NACH TAUCHEN MIT IMPRÄGNIERUNG	49
ABBILDUNG 21 QUELLUNG [%] IN TANGENTIALER RICHTUNG NACH TAUCHEN MIT IMPRÄGNIERUNG	49
ABBILDUNG 22: QUELLUNG [%] IN LONGITUDINALER RICHTUNG NACH TAUCHEN MIT IMPRÄGNIERUNG	50
ABBILDUNG 23: REDUZIERUNG DER QUELLUNG (ASE) IN ABHÄNGIGKEIT VON DER BEHANDLUNG.	51
ABBILDUNG 24: ISOMET 104 ZUR MESSUNG DER THERMISCHEN EIGENSCHAFTEN	52
ABBILDUNG 25: WÄRMEKAPAZITÄT [ $\text{KJ} \cdot \text{KG}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] IN ABHÄNGIGKEIT VON BAUMART UND BEHANDLUNG	53
ABBILDUNG 26: SPEZIFISCHE WÄRMELEITFÄHIGKEIT [ $\text{W} \cdot \text{M}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] BEI 27 °C IN ABHÄNGIGKEIT VON HOLZART UND BEHANDLUNG	55
ABBILDUNG 27: TEMPERATURLEITFÄHIGKEIT [ $\text{M}^2 \cdot \text{S}^{-1}$ ] IN ABHÄNGIGKEIT VON HOLZART UND BEHANDLUNG	55
ABBILDUNG 28: ABLAUF DES PROZESSES ZUR HERSTELLUNG VON BELMADUR® HOLZ NACH DEM VERFAHREN DER BASF AG	58
ABBILDUNG 29: IMPRÄGNIERKESSEL (A) UND HEIßDAMPFTROCKNER (B) FÜR DIE BEHANDLUNG IM PILOTMAßSTAB AM IFHH	58
ABBILDUNG 30: PROZESSABLAUF DER HEIßDAMPFTROCKNUNG UND REAKTION WÄHREND DER BEHANDLUNG VON KIEFERN SPLINTHOLZ FÜR DAS PROJEKT	60
ABBILDUNG 31: VERGLEICH DER FIXIERUNG DES PROBENMATERIALS NACH VERSCHIEDENEN METHODEN. FA-METHODE: EXTRAKTION UND MESSUNG DES FORMALDEHYDS; N-METHODE: EXTRAKTION UND MESSUNG DES N-GEHALTES	62
ABBILDUNG 32 : KLASSIFIZIERUNG VON RISSEN AUF DER HOLZ OBERFLÄCHE NACH DER BEHANDLUNG MIT DMDHEU. A: GENERELLES VORKOMMEN VON OBERFLÄCHENRISSEN B: AUSPRÄGUNG DER STÄRKE DER RISSE	63
ABBILDUNG 33: GEWICHTSZUNAHME VON KIEFERN SPLINTHOLZ NACH DER IMPRÄGNIERUNG MIT VERSCHIEDENEN WACHSEN	64
ABBILDUNG 34: PROZESSABLAUF BEI DER BEHANDLUNG MIT WACHS. A: VORHEIZEN VON WACHS UND HOLZ, B: IMPRÄGNIEREN BEI VAKUUM UND DRUCK, C: HEIßES	

HOLZ IM WACHS NACH DER IMPRÄGNIERUNG, D: ABTROPFEN UND OBERFLÄCHEN REINIGEN	66
ABBILDUNG 35: BRUCHKRAFT [N] DER KLEBEFUGE NACH EN 302-1 A1	69
ABBILDUNG 36: HOLZBRUCHANTEIL [%] DER KLEBEFUGE NACH EN 302-1/ A1	70
ABBILDUNG 37: BRUCHKRAFT [N] DER KLEBEFUGE NACH EN 302-1 A2	70
ABBILDUNG 38: HOLZBRUCHANTEIL DER KLEBEFUGE NACH EN 302-1/ A2	71
ABBILDUNG 39:WASSERAUFNAHME [%] NACH A2 BELASTUNG.	72
ABBILDUNG 40: BRUCHKRAFT [N] DER KLEBEFUGE NACH EN 302-1 A2	72
ABBILDUNG 41: HOLZBRUCHANTEIL DER KLEBEFUGE NACH EN 302-1/ A2	73
ABBILDUNG 42: GEWICHTSVERÄNDERUNG WÄHREND 5 BEWITTERUNGSZYKLEN, BESCHICHTUNGSSYSTEM PRIMER / SP. POLYMERHARZ	80
ABBILDUNG 43: GEWICHTSVERÄNDERUNG WÄHREND 5 BEWITTERUNGSZYKLEN, BESCHICHTUNGSSYSTEM MEHRPHASENPOLYMER	80
ABBILDUNG 44: GEWICHTSVERÄNDERUNG WÄHREND 5 BEWITTERUNGSZYKLEN, BESCHICHTUNGSSYSTEM ACRYLAT 1	81
ABBILDUNG 45: GEWICHTSVERÄNDERUNG WÄHREND 5 BEWITTERUNGSZYKLEN, BESCHICHTUNGSSYSTEM PRIMER / ACRYLAT 2	81
ABBILDUNG 46: ABHEBEFESTIGKEIT [MPA] IN ABHÄNGIGKEIT VON BESCHICHTUNG UND BEHANDLUNG	84
ABBILDUNG 47: HAFTFESTIGKEIT DER BESCHICHTUNG [%] IN ABHÄNGIGKEIT VON BEHANDLUNG UND BESCHICHTUNG	85
ABBILDUNG 48: FENSTERWAND FÜR EIN PASSIVHAUS	87
ABBILDUNG 49: VERKLEBUNG VON LAMELLEN UND ISOLIERUNG ZU KANTELN MIT PUR- KERN	90
ABBILDUNG 50: FRÄSEN UND PROFILIEREN DER KANTELN	90
ABBILDUNG 51: DIE KANTELN WERDEN ZU FLÜGEL ODER RAHMEN ZUSAMMEN GEKLEBT UND GESCHLIFFEN.	90
ABBILDUNG 52: DIE FÜR DIE BESCHLÄGE NOTWENDIGEN LÖCHER WERDEN GEBOHRT ODER GEFRÄST.	91
ABBILDUNG 53: DER FLÜGEL, BZW. RAHMEN WIRD GRUNDIERT UND BESCHICHTET	91
ABBILDUNG 54: DARSTELLUNG EINES FLUSSDIAGRAMS ZUR HERSTELLUNG VON FENSTERN BEI DER VERWENDUNG VON MODIFIZIERTEM HOLZ.	93
<b>ABBILDUNG 55: STRUKTURFORMEL MELAMIN</b>	100
<b>ABBILDUNG 56: DARSTELLUNG DER WIRKPRINZIPIEN ZUR HOLZVERGÜTUNG BEI DEN VERSCHIEDENEN VERFAHREN</b>	102

<b>ABBILDUNG 57: FIXIERUNG [%] DES MELAMINS IN ABHÄNGIGKEIT DER ZEIT UND DER TEMPERATUR</b>	103
<b>ABBILDUNG 58: WPG [%] BEI 10%IGER MELAMINLÖSUNG MIT VERSCHIEDENEN ZUSÄTZEN</b>	106
<b>ABBILDUNG 59: ASE [%] BEI 10%IGER MELAMINLÖSUNG MIT VERSCHIEDENEN ZUSÄTZEN</b>	107
<b>ABBILDUNG 60: TROCKNUNGSDIAGRAMM VON PROZESS 1</b>	108
<b>ABBILDUNG 61: SCHEMA DES BRETTEINSCHNITTS; ZUORDNUNG DER POSITIONEN EINZELNER PRÜFKÖRPER IM BRETT WICHTIG; (BLAU = FEUCHTEANALYSE; GELB U. GRÜN = VERSCHALUNGSPRÜFKÖRPER)</b>	109
<b>ABBILDUNG 62: ANSICHT VON INNENRISSEN UNTER DEM AUFLICHTMIKROSKOP</b>	111
<b>ABBILDUNG 63: ANSICHT DER INNENRISSSE IM DURCHLICHTMIKROSKOP (A UND B: 40-FACH VERGRÖßERT; C: 200-FACH VERGRÖßERT)</b>	111
<b>ABBILDUNG 64: MELAMINBEHANDELTE PRÜFKÖRPER VON VORNE UND SEITLICH</b>	112
<b>ABBILDUNG 65: TROCKNUNGSDIAGRAMM VON PROZESS 2</b>	117
<b>ABBILDUNG 66: TROCKNUNGSDIAGRAMM VON PROZESS 3</b>	122
<b>ABBILDUNG 67: TROCKNUNGSDIAGRAMM VON PROZESS 4</b>	127
<b>ABBILDUNG 68: VERGLEICH DER WASSERLAGERUNG DER PROZESSE 1-4</b>	133
<b>ABBILDUNG 69: VERGLEICH DER WASSERLAGERUNG DER PROZESSE 1-4</b>	133
<b>ABBILDUNG 70: VERGLEICH DER WASSERLAGERUNG DER PROZESSE 1-4</b>	134
<b>ABBILDUNG 71: TROCKNUNGSPROZESS VON PROZESS 5</b>	135
<b>ABBILDUNG 72: VERGLEICH DER GEMESSENEN BRUCHSCHLAGARBEIT [KJ/M<sup>2</sup>] UND DER BERECHNETEN BIEGEARBEIT [KJ/M<sup>2</sup>] GEMESSEN AN PRÜFKÖRPERN VON PROZESS 5</b>	138
<b>ABBILDUNG 73: E-MODUL [N/MM<sup>2</sup>] DER PRÜFKÖRPER AUS DEN PROZESSEN 1 BIS 5 UND VON UNBEHANDELTEN KONTROLLEN, DARGESTELLT IST AUCH DIE ANZAHL DER UNTERSUCHTEN PRÜFKÖRPER</b>	139
<b>ABBILDUNG 74: BIEGEFESTIGKEIT [N/MM<sup>2</sup>] DER PRÜFKÖRPER AUS DEN PROZESSEN 1 BIS 5 UND VON UNBEHANDELTEN KONTROLLEN, DARGESTELLT IST AUCH DIE ANZAHL DER UNTERSUCHTEN PRÜFKÖRPER</b>	140
<b>ABBILDUNG 75: BIEGEARBEIT [KJ/M<sup>2</sup>] DER PRÜFKÖRPER AUS DEN PROZESSEN 1 BIS 5 UND VON UNBEHANDELTEN KONTROLLEN, DARGESTELLT IST AUCH DIE ANZAHL DER UNTERSUCHTEN PRÜFKÖRPER</b>	141

<b>ABBILDUNG 76: ANTI-SWELL-EFFICIENCY (ASE) DES BEHANDELTEN HOLZES AUS PROZESS 5, VERGLEICH DER ASE MIT AUSWASCHUNG (MIT EN 84) UND OHNE AUSWASCHUNG (OHNE EN 84)</b>	142
<b>ABBILDUNG 77: EINGEBAUTE PRÜFKÖRPER AUF PRÜFPILZ; JEWEILS 2 BEHANDELTE UND 2 UNBEHANDELTE KONTROLLEN IN EINEM PRÜFGEFÄß</b>	143
<b>ABBILDUNG 78: MASSEVERLUST DER BEHANDELTEN PRÜFKÖRPER AUS PROZESS 5 UND DER UNBEHANDELTEN KONTROLLEN DURCH <i>CONIOPHORA PUTEANA</i>; VERSUCHSDAUER 8 WOCHEN</b>	143
<b>ABBILDUNG 79: MASSEVERLUST DER BEHANDELTEN PRÜFKÖRPER AUS PROZESS 5 UND DER UNBEHANDELTEN KONTROLLEN DURCH <i>TRAMETES VERSICOLOR</i>; HOLZART DER MITGEFÜHRTEN VIRULENZEN IST BUCHE, VERSUCHSDAUER 8 WOCHEN</b>	144
<b>ABBILDUNG 80: FENSTER-PROTOTYP VON VARIOTEC, RAHMEN AUS MELAMINMODIFIZIERTEM KIEFERNHOLZ</b>	145

**Tabellenverzeichnis:**

TABELLE 1: WIRKMECHANISMEN DER DMDHEU-BEHANDLUNG .....	16
TABELLE 2: ÜBERSICHT ÜBER DIE VERWENDETEN WACHSE.....	64
TABELLE 3: ÜBERSICHT ÜBER DIE VERWENDETEN KLEBSTOFFE .....	67
TABELLE 4: ÜBERSICHT DER BEANSPRUCHUNG DER VERKLEBUNG NACH EN 302-1 .....	68
TABELLE 5: ÜBERSICHT ÜBER VERWENDETE BESCHICHTUNGSSYSTEME .....	74
TABELLE 6: BEWERTUNGSSCHEMA DER RISSMENGE (IN ANLEHNUNG AN DIN ISO 4628-4,1997 ).....	76
TABELLE 7: BEWERTUNGSSCHEMA DER RISSBREITE (IN ANLEHNUNG AN DIN ISO 4628-4, 1997).....	76
TABELLE 8: DARSTELLUNG DER BESCHICHTETEN PRÜFKÖRPERN NACH 5 BEWITTERUNGSZYKLEN.....	78
TABELLE 9: ERGEBNISSE DER GETESTETEN EIGENSCHAFTEN AN EINEM MIT DMDHEU BEHANDELTEM PROTOTYP .....	88
TABELLE 14: VERWENDETE CHEMIKALIEN ZUR PH-WERT ERHÖHUNG DER LÖSUNG ....	105
<b>TABELLE 15: ERMITTELTE FEUCHTIGKEITSGEHALTE, LÖSUNGS-AUFNAHMEN UND WPG IN %.....</b>	<b>109</b>
TABELLE 16: REIHENFOLGE DES PRÜFKÖRPEREINSCHNITTS, BEGINNEND VON AUßEN .....	110
<b>TABELLE 17: AUSMAß DER RISSE AUSGEWERTET NACH DER EDG RICHTLINIE .....</b>	<b>110</b>

TABELLE 18: AUSWERTUNG DER INNENRISSE.....	111
<b>TABELLE 19: ERGEBNISSE DER VERSCHALUNGSTESTS: MITTENSCHNITT UND GABELPROBE .....</b>	<b>113</b>
<b>TABELLE 20: ERGEBNISSE DER WASSERLAGERUNG.....</b>	<b>114</b>
TABELLE 21: STICKSTOFFGEHALT [%] UND FIXIERUNG [%] UNTERTEILT IN INNEN- UND AUßENBEREICHE DES BRETTES .....	115
TABELLE 22: FESTIGKEITSEIGENSCHAFTEN VON PRÜFKÖRPERN AUS PROZESS 1 UND UNBEHANDELTEN KONTROLLEN .....	115
<b>TABELLE 23: ERMITTELTE FEUCHTIGKEITSGEHALTE, LÖSUNGS-AUFNAHMEN UND WPG IN %.....</b>	<b>118</b>
<b>TABELLE 24: AUSMAß DER RISSE AUSGEWERTET NACH DER EDG RICHTLINIE .....</b>	<b>118</b>
<b>TABELLE 25: AUSWERTUNG DER INNENRISSE.....</b>	<b>119</b>
<b>TABELLE 26: ERGEBNISSE DER VERSCHALUNGSTESTS: MITTENSCHNITT UND GABELPROBE .....</b>	<b>119</b>
TABELLE 27: ERGEBNISSE DER WASSERLAGERUNG .....	120
<b>TABELLE 28: STICKSTOFFGEHALT [%] UND FIXIERUNG [%] UNTERTEILT IN INNEN- UND AUßENBEREICHE DES BRETTES .....</b>	<b>121</b>
<b>TABELLE 29: FESTIGKEITSEIGENSCHAFTEN VON PRÜFKÖRPERN AUS PROZESS 2 UND UNBEHANDELTEN KONTROLLEN .....</b>	<b>121</b>
<b>TABELLE 30: ERMITTELTE FEUCHTIGKEITSGEHALTE, LÖSUNGS-AUFNAHMEN UND WPG IN %.....</b>	<b>123</b>
<b>TABELLE 31: AUSMAß DER RISSE AUSGEWERTET NACH DER EDG RICHTLINIE .....</b>	<b>123</b>
<b>TABELLE 32: AUSWERTUNG DER INNENRISSE.....</b>	<b>123</b>
<b>TABELLE 33: ERGEBNISSE DER VERSCHALUNGSTESTS: MITTENSCHNITT UND GABELPROBE .....</b>	<b>124</b>
<b>TABELLE 34: ERGEBNISSE DER WASSERLAGERUNG.....</b>	<b>125</b>
<b>TABELLE 35: STICKSTOFFGEHALT [%] UND FIXIERUNG [%] UNTERTEILT IN INNEN- UND AUßENBEREICHE DES BRETTES .....</b>	<b>125</b>
<b>TABELLE 36: FESTIGKEITSEIGENSCHAFTEN VON PRÜFKÖRPERN AUS PROZESS 3 UND UNBEHANDELTEN KONTROLLEN .....</b>	<b>126</b>
<b>TABELLE 37: ERMITTELTE FEUCHTIGKEITSGEHALTE, LÖSUNGS-AUFNAHMEN UND WPG IN %.....</b>	<b>128</b>
<b>TABELLE 38: AUSMAß DER RISSE AUSGEWERTET NACH DER EDG RICHTLINIE .....</b>	<b>128</b>
<b>TABELLE 39: AUSWERTUNG DER INNENRISSE.....</b>	<b>128</b>

<b>TABELLE 40: ERGEBNISSE DER VERSCHALUNGSTESTS: MITTENSCHNITT UND GABELPROBE</b> .....	129
<b>TABELLE 41: ERGEBNISSE DER WASSERLAGERUNG</b> .....	129
<b>TABELLE 42: STICKSTOFFGEHALT [%] UND FIXIERUNG [%] UNTERTEILT IN INNEN- UND AUßENBEREICHE DES BRETTES</b> .....	130
<b>TABELLE 43: FESTIGKEITSEIGENSCHAFTEN VON PRÜFKÖRPERN AUS PROZESS 4 UND UNBEHANDELTEN KONTROLLEN</b> .....	131
<b>TABELLE 44: VERGLEICH DER PROZESSE 1 BIS 4</b> .....	132
<b>TABELLE 45: STICKSTOFFGEHALT [%] UND FIXIERUNG [%] UNTERTEILT IN INNEN- UND AUßENBEREICHE DES BRETTES</b> .....	136
<b>TABELLE 46: FESTIGKEITSEIGENSCHAFTEN VON PRÜFKÖRPERN AUS PROZESS 5 UND UNBEHANDELTEN KONTROLLEN</b> .....	136
<b>TABELLE 47: FESTIGKEITSEIGENSCHAFTEN BERECHNETE BIEGEARBEIT [KJ/M<sup>2</sup>] UND GEMESSENE BRUCHSCHLAGARBEIT [KJ/M<sup>2</sup>]</b> .....	137
<b>TABELLE 10: BESCHICHTUNGSSYSTEM PRIMER/ SP. POLYMERHARZ WÄHREND 5 BEWITTERUNGSZYKLEN</b> .....	148
<b>TABELLE 11: BESCHICHTUNGSSYSTEM MEHRPHASENPOLYMER WÄHREND 5 BEWITTERUNGSZYKLEN</b> .....	149
<b>TABELLE 12: BESCHICHTUNGSSYSTEM ACRYLAT 1 WÄHREND 5 BEWITTERUNGSZYKLEN</b> .....	150
<b>TABELLE 13: BESCHICHTUNGSSYSTEM PRIMER / ACRYLAT 2 WÄHREND 5 BEWITTERUNGSZYKLEN</b> .....	151



---

# **Projektjahre 2005 bis 2007**

## **DMDHEU und Wachsbehandlung**

## 1 Einleitung

In Anbetracht der Begrenztheit aller nicht-erneuerbaren Energieträger und mit Blick auf die Preisentwicklung in der jüngsten Zeit, sollte ein Umdenken hin zu natürlichen und vor allem erneuerbaren bzw. nachwachsenden Materialien stattfinden. So bietet der Werkstoff Holz eine gute Alternative zu nicht nachhaltig verfügbaren Werkstoffen, da er sich gut bearbeiten lässt, ein angenehmes Wohnklima schafft und sehr ansprechend ist. Ein weiterer Vorteil besteht, neben der umweltfreundlichen Entsorgung und den Recyclingsmöglichkeiten von Holz, vor allem in dem geringeren Energieaufwand der bei der Produktherstellung im Vergleich zu Aluminium oder Kunststoff erforderlich ist.

Holzfenster konkurrieren in Deutschland im Wesentlichen mit Kunststofffenstern. Während Holzfenster aufgrund negativer Eigenschaften, wie einer geringen biologischen Dauerhaftigkeit, Dimensions- und UV-Stabilität, seltener Verwendung finden, lassen sich Kunststofffenster z.B. durch Extrusionsverfahren einfach und kostengünstig herstellen. Der größte Nachteil der Holzfenster ist sicherlich das Quell- und Schwindverhalten des Holzes, woraus sich kurze Wartungsintervalle des Beschichtungssystems und Schwierigkeiten mit der Passgenauigkeit ergeben. So werden derzeit nur ca. 20 % der Fenster aus Holz und 55 % aus PVC verkauft. Alufensterrahmen haben einen Marktanteil von 17 % und Rahmen aus Holz und Alu werden zu 4 % verwendet.

Um künftig höhere Marktanteile zu erzielen, sollen die Nachteile des Holzes durch Holzmodifizierung reduziert und gleichzeitig die gewünschten Holzeigenschaften erreicht werden. Bekannte Verfahren zur Holzmodifizierung sind Hitze-, Silizium-, DMDHEU-Behandlung, Furfurylierung oder Acetylierung. Aber auch andere Verfahren wie Behandlungen mit Wachsen oder Ölen verbessern das Verhalten des Holzes unter Einfluss von Wasser. Anforderungen an Holzfenster sind z.B. eine erhöhte Resistenz gegenüber holzerstörende Pilze sowie eine ein reduziertes Quell- und Schwindverhalten, welches zu einer erhöhten

Dimensionstabilität führt und sich so positiv auf die Haltbarkeit von Beschichtungen auswirkt.

Holzfenster müssen regelmäßig gepflegt werden, weshalb immer öfter die Entscheidung zu Gunsten des Kunststofffensters ausfällt. Modifizierungsverfahren haben daher das Ziel, wartungsärmere Materialien herzustellen. Außerdem stellen sie eine Alternative zur Behandlung mit konventionellen biozidhaltigen Holzschutzmitteln dar. Durch verschiedene Modifizierungsverfahren werden die mechanischen Eigenschaften des Holzes verändert, was bei Fenstern von entscheidender Bedeutung ist. Durch die Verbesserung der Wärmeisolierung der Fenster lasten große Gewichte auf den Fensterrahmen, die von dem Material dauerhaft tragen werden müssen (z. B. 300 kg bei 9 m<sup>2</sup> Fensterfläche im Falle einer Dreifach-Verglasung).

## 1.1 Grundlagen

### 1.1.1 Holzmodifizierung mit Dimethylol-dihydroxy-ethylenurea

Der Gebrauchsname dieser Verbindung lautet Dimethylol-dihydroxy-ethylenharnstoff (DMDHEU, Abbildung 1), der IUPAC-Name ist 1,3-Bis(hydroxymethyl)-4,5-dihydroxyimidazolidin-2-on (BG CHEMIE 1995). DMDHEU hat die Summenformel C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> und wird aus Harnstoff, Glyoxal und Formaldehyd hergestellt. Es handelt sich um einen zyklischen Harnstoff und trägt vier reaktive Gruppen, zwei N-Methylolgruppen mit hoher Reaktivität und zwei Hydroxylgruppen mit geringerer Reaktivität. DMDHEU ist seit Jahrzehnten aus der Textilindustrie bekannt, wo es zur Behandlung von Baumwoll- und Baumwollpolyestergewebe eingesetzt wird, um diese Textilien pflegeleicht und knitterfrei zu gestalten.

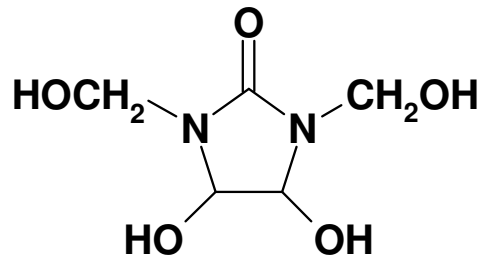


Abbildung 1: Strukturformel von DMDHEU (Quelle: MILITZ, HILL 2005, verändert)

Die Verbindung hat eine Molekularmasse von  $178,17 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ , eine Dichte von etwa  $1,2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  bei einer 45 %igen wässrigen Lösung und ist bei  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  mit Wasser mischbar. Der pH-Wert liegt bei genannter Konzentration bei 5 - 6.

DMDHEU kann auch als Holzvernetzer fungieren und ist somit ein Verfahren der chemischen Holzmodifizierung.

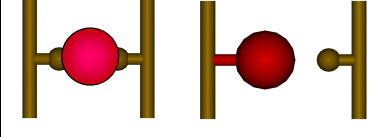
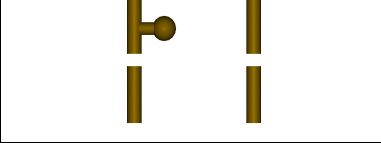
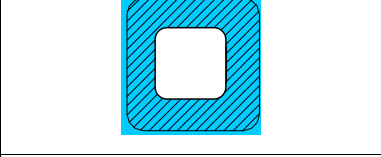
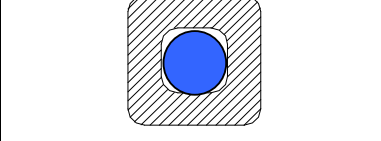
### Chemische Holzmodifizierung:

Die Hydroxylgruppen der Holzpolymere sind die reaktivsten Bestandteile des Holzes und damit für die vielfältigen Wechselwirkungen innerhalb der Holzkomponenten sowie zwischen den Bestandteilen der pflanzlichen Zellwand verantwortlich. Die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Holzes werden durch sie in entscheidendem Maße bestimmt. Die Hydroxylgruppen sind hauptsächlich für seine hydrophilen Eigenschaften verantwortlich. Ein wechselnder Gehalt an Wasser innerhalb der Zellwand bewirkt zum einen das Quellen und Schwinden des Holzes, und zum anderen ermöglicht es Pilzen durch die vorhandene Holzfeuchte das Holz zu zersetzen.

Seit den 50er Jahren wurden nun diverse wissenschaftliche Ansätze gewählt, um die Holzzellwand zu modifizieren. Zu den thermisch-chemischen Verfahren zählen z.B. die Wärme- oder Hitzebehandlungsverfahren. Das Prinzip der chemischen Modifikation basiert auf dem Austausch oder der Blockade dieser Hydroxylgruppen durch eine andere, hydrophobe Substanz, die möglichst durch

eine kovalente Bindung am Holzpolymer oder durch Eigenpolymerisation im Holz fixiert sein soll.

**Tabelle 1: Wirkmechanismen der DMDHEU-Behandlung**

1. Quervernetzen von Hydroxylgruppen	
2. Verändern von Zellwandstrukturen	
3. Füllung von Zellwänden	
4. Füllung von Zelllumen	

1. Quervernetzen oder Verändern von Hydroxylgruppen durch chemische Reaktion der OH-Gruppen des Holzes miteinander oder mit anderen reaktive Gruppen. Wasser kann nicht mit diesen Gruppen interagieren. Z. B. bei Holzvernetzung; Hitzebehandlung; Acetylierung

2. Verändern von Zellwandstrukturen durch hydrolytische oder oxidative Umwandlung der Zellwandstrukturen. Wasser kann nicht mit diesen Gruppen interagieren, Festigkeitseigenschaften werden verändert. Z. B. bei Hitzebehandlung; Nebenreaktion bei den meisten anderen Verfahren

3. Füllung von Zellwänden durch Stoffe, die in die Zellwände des Holzes eingelagert und eventuell fixiert werden. Z. B. bei Melaminbehandlung; Holzvernetzung; Acetylierung

4. Füllung von Zelllumen durch Stoffe, die in die Lumina des Holzes eingelagert und eventuell fixiert werden. Z. B. bei Melaminbehandlung; Wachs-, Paraffin- und Ölbehandlung.

In Abhängigkeit von ihrer Reaktionsweise mit den Hydroxylgruppen werden die modifizierenden Chemikalien klassifiziert. Sie lassen sich entsprechend der resultierenden Zellwand-Additiv-Bindungen in ester-, acetat- und etherbildende Verbindungsklassen einteilen. Bei einigen polymerisierbaren Chemikalien und Siliziumverbindungen wird die Kombination aus einer Reaktion mit den Hydroxylgruppen innerhalb der Zellwand und einer Eigenkondensation vermutet.

Neben der Modifizierung unter dem Einsatz von reaktiven Chemikalien unterscheidet man die Modifizierung mit Wachsen, Paraffinen und Ölen. Dabei findet in der Regel keine Reaktion mit der Zellwand, sondern nur eine Einlagerung in den Zelllumen statt. Die hier vorgestellten Techniken der Holzmodifizierung haben einen unterschiedlichen Entwicklungsstand, so dass Prozesstechnologie und Materialeigenschaften vielfach nicht optimiert sind.

Die Einlagerung und Reaktion von DMDHEU in die Holzzellwände erfolgt durch Imprägnierung und Reaktion. Dabei vernetzen sich die Hydroxylgruppen der Zellwandpolymere und die N -Methylolgruppen des DMDHEU miteinander unter Wasserabspaltung (Abbildung 2).

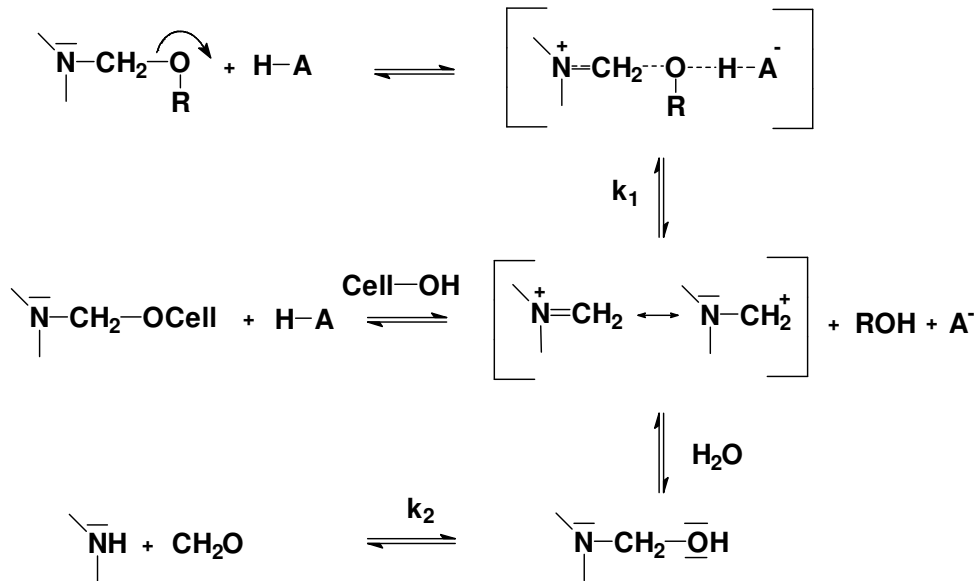
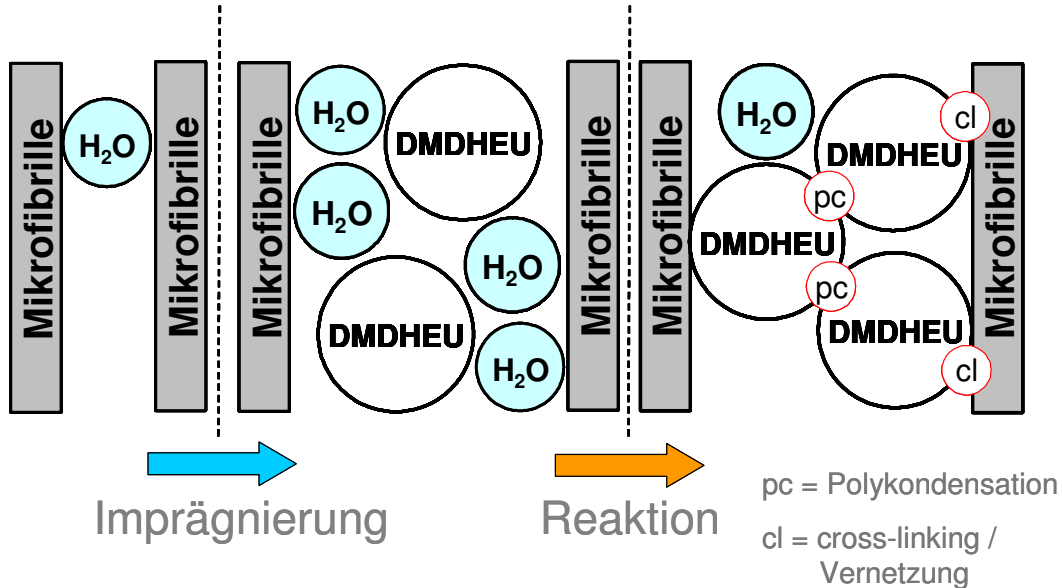


Abbildung 2: Reaktionsschema für die Reaktion von DMDHEU mit Holz nach Petersen

Eine weitere mögliche Reaktion ist die Polykondensation des DMDHEU innerhalb der Zellwand, in diesem Fall findet keine Reaktion mit dem Holz statt, sondern die DMDHEU-Moleküle reagieren, unter Abspaltung von Wasser und Formaldehyd, miteinander.

Außerdem kann eine Dissoziation der N-Methylolgruppen erfolgen, dies ist eine unerwünschte Reaktion. Hierbei wird ebenfalls Formaldehyd (CH<sub>2</sub>O) freigesetzt. Die Reaktion wird durch die Verwendung von Lewissäurekatalysatoren beschleunigt. Besonders geeignet ist Magnesiumchlorid.



**Abbildung 3: Modell eines Wirkmechanismus von DMDHEU in der Holzzellwand**

Durch die Behandlung mit DMDHEU werden gegenüber unbehandeltem Holz viele Eigenschaften verbessert, ohne dabei die Optik und Haptik des Holzes zu verändern. So kann beispielsweise eine erhöhte Dauerhaftigkeit des Holzes, eine gesteigerte Oberflächenhärte und eine Verbesserung der Dimensionsstabilität erzielt werden. Über die Konzentration der Chemikalie in der Imprägnierungslösung wird der Modifizierungsgrad beeinflusst. Der Modifizierungsprozess gliedert sich in zwei Teilschritte, zuerst erfolgt die Imprägnierung des Holzes und anschließend die Vernetzung, d.h. die Chemikalie wird durch das so genannte Curing unter der Hitze des Trockners zur Reaktion gebracht.

### 1.1.2 Prinzip der Heißdampftrocknung

Das Trocknungsprinzip der Heißdampftrocknung besteht darin, dass das Holz durch Wasserdampf, dessen Temperatur höher als 100 °C ist, trocknet. Dieses Trocknungsverfahren findet unter Normaldruck statt und somit ist der Wasserdampf, bei Temperaturen über 100 °C, überhitzt. Dadurch wird Wärme an



das Trockengut abgegeben, diese führt zum Verdampfen der Feuchtigkeit im Holz. Die Temperatur des Holzes überschreitet dadurch den Siedepunkt des Holzes nicht.

Das Volumen einer flüssigen Substanz ist kleiner als das Volumen der gleichen Substanz in gasförmigem Zustand. Wird das flüssige, hygroskopisch gebundene Wasser im Holz in Dampf überführt, wird die Feuchtigkeit durch die Volumenvergrößerung aus dem Holz gedrückt. Die Feuchtigkeit entweicht über die Abluft aus der Trockenkammer. Daher ist keine Kontrolle oder Steuerung der Luftfeuchte im Trockner oder eine Erwärmung von Luft erforderlich.

Bis zum Fasersättigungsbereich erfolgt die Trocknung mit konstant hoher Geschwindigkeit. Dabei siedet das Wasser an der Holzoberfläche und die Wärme wird an das Holz übertragen, worauf die Außenschicht bis zum Fasersättigungsbereich getrocknet wird. Die dort verdampfende Holzfeuchtigkeit wird durch nachströmendes Wasser aus tiefer liegenden Holzschichten ersetzt. Das an die Holzoberfläche gedrückte Wasser wird mit dem Dampfstrom abtransportiert.

Danach werden zunächst die Holzoberfläche und dann der gesamte Holzquerschnitt unter den Fasersättigungsbereich getrocknet. Die Temperatur der Holzoberfläche nimmt mit dem Abtrocknen zu und der Temperaturunterschied zwischen dem Dampf und dem Holz verringert sich. Das hat zur Folge, dass weniger Wärme auf das Holz übertragen wird und somit die Trocknungsgeschwindigkeit abnimmt.

Nachfolgend trocknet das Trockengut auf eine Gleichgewichtsfeuchte in Abhängigkeit von der Temperatur des Dampfes. Die Temperatur der Holzoberfläche und später auch die der Holzmitte gleichen sich der des Dampfes an und die Trocknung reduziert sich.

Der Vorteil liegt in der schnellen Trocknung. Andererseits entstehen bei der Trocknung von Holz ab 100 °C Essig- und Ameisensäure, die sich im Dampf befinden und an kalten Stellen der Trocknungsanlage niederschlagen. Dadurch

korrodieren alle sich im Trockner befindlichen Komponenten, die nicht aus Edelstahl oder Aluminium (Reinheitsgrad über 99,8 %) bestehen. Eine gute Wärmeisolation wirkt der Korrosion etwas entgegen, aber Kondensationsvorgänge lassen sich, besonders in der Endphase des Trocknungsvorgangs, nicht vollständig vermeiden.

### 1.1.3 Holzbehandlung mit Wachs

Die Einbringung von Wachsen, Ölen und Paraffinen in Holz führt zu einer Füllung des Lumen, es findet keine Einbringung in die Zellwand statt. Somit kommt es im Gegensatz zur Behandlung mit DMDHEU nicht zu chemischen Reaktionen mit den Zellwandpolymeren.

Die chemische Zusammensetzung von Wachsen ist sehr unterschiedlich. Wachse werden deshalb durch die mechanisch-physikalischen Eigenschaften beschrieben, und nicht nur durch die chemische Zusammensetzung. Es sind Verbindungen aus einwertigen höheren Paraffinalkoholen und höheren Fettsäuren. Bei einer Temperatur von 20 °C können Wachse „knetbar, fest bis brüchig hart, grob- bis feinkristallin, durchscheinend bis opak“ und polierbar sein, die Schmelztemperatur liegt über 40 °C, wobei Wachse in eine Schmelze übergehen, ohne sich dabei zu zersetzen. Sie verhalten sich in diesem Temperaturbereich niedrigviskos. Die Konsistenz kann im Bereich von formbar bis hart und spröde liegen und ist sehr temperaturabhängig. Es existieren pflanzliche Wachse, zu denen fossile und rezente Wachse wie z. B. Karnaubawachs zählen. Des Weiteren werden tierische und Mineralwachse definiert.

Montanwachse sind fossile Pflanzenwachse und stellen eine besondere Fraktion der Braunkohle dar. Es gibt nur wenige Lagerstätten, in denen diese spezielle Braunkohle vorkommt. In Deutschland sind es die zentralen Braunkohlereserven westlich der Elbe. Bei der Bildung der Braunkohleflöze konnten sich teilweise unzersetzte Pflanzenwachse über Jahrmillionen anreichern. Das rohe Montanwachs ist von schwarzbrauner Farbe und seine Konsistenz hart und spröde. Es setzt sich zu überwiegend aus Estern von Fettsäuren, aus

Wachsalkoholen und aus Harzbestandteilen zusammen. Montanwachs wird für die Anwendung veredelt, beispielsweise indem es gebleicht, verseift und verestert wird. Gereinigt ist das Montanwachs hellgelb bis nahezu weiß und wird u. a. in der Produktion von Pflegemittel und Kosmetik verwendet.

## 1.2 Ziele

Die Idee des Projektes ist es, die Eigenschaften von Holz aus einheimischer nachhaltiger Forstwirtschaft durch die Behandlung mit DMDHEU und Wachsen zu verbessern und im Holzfensterbau einzusetzen.

Das durch Modifizierung verbesserte Holz zeigt eine deutlich erhöhte Dimensionsstabilität, was zu einer Verlängerung der Wartungsintervalle führt.

Auf der Basis von zwei in ihrer Wirkungsweise und Anwendung unterschiedlicher Verfahren soll mindestens ein Modifizierungsverfahren entwickelt werden, mit dem ein deutlich verbessertes Fensterbaumaterial hergestellt werden kann. Ein Ziel und Schwerpunkt dieser Arbeit ist es, das Verfahren in einem Fensterbaubetrieb (KMU) zu integrieren.

Das erste viel versprechende Verfahren für dieses Ziel ist die Behandlung mit DMDHEU. Mit Hilfe dieses Verfahrens wird ein Halbzeug hergestellt, das sich anschließend zu Fensterkanteln weiterverarbeiten lässt. Dieses Verfahren verändert Holz über den gesamten Querschnitt.

Eine zweite Möglichkeit besteht in der Hydrophobierung durch Wachse und ähnliche Stoffe. Bei diesem Verfahren werden die fertig profilierten Kanteln mit einer Wachsimprägnierung in den ersten 5 – 15 mm der Holzoberfläche versehen. Das Holz wird nicht vollständig modifiziert, aber die Bauteileigenschaften werden durch die Hydrophobierung stark positiv beeinflusst.

Das Verfahren, das in grundlegenden Materialeigenschaften die besten Ergebnisse liefert und über eine handhabbare Prozessführung verfügt, wird zur Herstellung von modifiziertem Holz in praxistauglichen Abmessungen verwendet.

Anschließende Bauteiluntersuchungen sollen Aufschluss über die Holzeigenschaften unter Wechselklima, mechanischer Beanspruchung und Bewitterung geben. In einem weiteren Projektabschnitt soll der Prozess für den Fensterbau optimiert werden und eine mögliche Implementierung in ein KMU der Fensterherstellung untersucht werden.

Schritte:

- 1) Untersuchungen im Labormaßstab (Grundlagenforschung): Vergleich von Behandlung mit DMDHEU und Wachsbehandlung im Hinblick auf die speziellen Materialeigenschaften, die für den Fensterbau entscheidend sind.
- 2) Herstellung und Test von Bauteilen in größeren Abmessungen (Anwendungsforschung)
- 3) Implementierung (vorwettbewerbliche Entwicklung): Bau und Test von Prototypen und Planung der Implementierung eines Verfahrens in ein KMU.

### 1.3 Meilensteine

Folgende Planung wurde zu Beginn des Projektes aufgestellt:

Ein Meilenstein wird zum Ende des zweiten und zu Beginn des dritten Projektabschnittes eingefügt. Es sollen alle bisherigen Projekterkenntnisse zusammengeführt und gemeinsam beurteilt werden. An Hand der Ergebnisse entscheiden die Projektpartner in Zusammenarbeit mit der DBU, ob und wie der dritte Projektabschnitt durchgeführt wird. Sollte sich keines der untersuchten Verfahren für eine Implementierung als geeignet erweisen, kann das Projekt mit diesem Meilenstein abgebrochen werden.

Beurteilungskriterien für den Meilenstein werden in einer ersten Projektphase „Planung der Implementierung“ gemeinsam aufgestellt. Die Hauptbeurteilungskriterien werden durch folgende Aufzählung umrissen:

- Windbeanspruchung
- Schlagregendichtheit
- Schallschutz
- Energieeinsparung und Wärmeschutz
- Bedienungskräfte
- mechanische Festigkeit
- mechanische Dauerhaftigkeit (Dauerfunktionsprüfung)
- Einbruchhemmung

Durch den bisherigen Projektverlauf kommt es zu Abweichungen von der ursprünglichen Einschätzung. Für die Verfahren ergaben sich während der Projektphase andere vordergründige Kriterien, die in eine Entscheidung mit einbezogen werden sollten.

Eine Einschätzung zu diesen Punkten ist in den Ergebnissen dargestellt und wurde in dem Kapitel Handlungsempfehlung zusammenfassend dargestellt.

## 1.4 Rahmenbedingungen

Die Rahmenbedingungen für dieses Projekt haben sich im Laufe des Projektfortschrittes verändert. Die Änderungen wirken sich sowohl positiv als auch negativ auf das weitere Vorgehen im Projekt aus.

### **Neue Chancen:**

Die Rahmenbedingungen des Marktes haben sich in den beiden Projektjahren zu Gunsten dieses Projektes verbessert.

Ein Beispiel für die verbesserten Rahmenbedingungen besteht in der politischen Förderung von modifiziertem Holz. Die Gütegemeinschaft RAL definiert in Zusammenarbeit mit dem Verband für Fenster und Fassaden e.V. (VFF) Qualitätsstandards für Mitgliedsbetriebe, die Holzfenster produzieren. Diese Qualitätsstandards haben eine starke Marktdurchdringung erreicht, da die

Qualitätskriterien vom VFF in Merkblättern festgeschrieben wurden und für die Mitgliedsbetriebe verbindlich sind. Diese Qualitätskriterien werden in vielen Ausschreibungen als Standard von den Bauherren eingefordert.

Die Arbeitsgruppe des VFF, die sich damit beschäftigt, welche Holzarten für den Fensterbau verwendet werden können (HO.06), hat ein neues Merkblatt entwickelt (HO.06-3). Dieses Merkblatt wurde speziell für modifiziertes Holz entwickelt, um den neuartigen alternativen Verfahren den Zugang zum Fensterbaumarkt zu erleichtern. Die in diesem Projekt erhobenen Daten können dazu verwendet werden eine Eintragung des verfahren in das Merkblatt zu erreichen und so die Marktzugänglichkeit für verschiedenen Marktteilnehmer zu ermöglichen.

Ein weiterer Trend des Holzfenstermarktes unterstützt zurzeit zusätzlich die Entwicklung von modifizierten Hölzern. Die Versorgung mit tropischen Hölzern für den Fensterbau aus Südostasien wird zunehmend schlechter. Dabei handelt es sich hauptsächlich um die Holzarten der Handelsgruppe „*Dark Red Meranti*“ mit einer Dichte von mehr als  $450 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Die Folgen für den deutschen Markt sind im Wesentlich geprägt durch drastisch steigende Preise und falsche Deklarationen von minderwertigen Ersatzhölzern. Diese Entwicklung erleichtert zusätzlich den Markteintritt von modifiziertem Holz in den Fensterbaumarkt.

### **Externe Projektpartner**

In dieses Projekt sind von Beginn an Partner involviert, die zwar nicht offizielle Projektbeteiligte sind, aber durch die guten Beziehungen zu den Partnern als externe Projektpartner das Projekt unterstützen. Es handelt sich im Wesentlichen um die Produzenten der Modifizierungschemikalien.

Innerhalb der Projektlaufzeit hat sich die Zusammensetzung dieser Partner verändert. Zu Projektbeginn waren zwei externe Partner bereit das Projekt zu unterstützen. Ein weiterer Partner konnte während des Projektzeitraumes gewonnen werden.

1. Von Beginn an war die BASF AG als Lieferant für DMDHEU und eigenständiger Entwickler der Belmadur® Technologie, welche auf der Verwendung von DMDHEU basiert, bereit das Projekt zu unterstützen. In der ersten Projektphase wurde von der BASF AG Holz der Fa. Variotec mit Belmadur® behandelt und für die Projektzwecke untersucht. Leider hat sich die Strategie der BASF AG ungünstig für dieses Projekt entwickelt. Bei Gesprächen zwischen Variotec und der BASF AG wurde keine gemeinsame Basis für eine zukünftige Zusammenarbeit gefunden. Dies bezieht sich insbesondere auf die preisliche Gestaltung für die Technologie. Eine gute Zusammenarbeit zwischen dem IfHH und der BASF AG existiert nach wie vor, sodass weitere Untersuchungen stattfinden können. Die BASF AG ist auch weiterhin bereit, Produkte für dieses Projekt zur Verfügung zu stellen.

2. Gute Kontakte bestanden zwischen der Fa. Clariant AG und dem IfHH zu Projektbeginn. Diese Unterstützung der Fa. Clariant AG fand durch die Lieferung von Produkten (Wachse) inklusive einer Beratung über die Auswahl geeigneter Produkte statt. Die Zusammenarbeit zwischen dem IfHH und der Firma Clariant AG hat sich in dem Projektzeitraum so positiv entwickelt, dass eine langfristige vertragliche Kooperation zwischen der Clariant AG und dem IfHH entstanden ist. Ziel dieser Zusammenarbeit ist es Produkte der Clariant AG (unter anderem Wachse) für die Behandlung von Holz einzusetzen. Durch diese neue Qualität der Zusammenarbeit werden Ergebnisse entstehen, die in dieses Projekt mit einfließen werden und so die Entwicklung einer Wachsbehandlung für den Fensterbau beschleunigen.

3. Ein weiterer externer Projektpartner wurde für das Projekt gewonnen. Dabei handelt es sich um die Firma INEOS GmbH. Die INEOS ist ein großer Hersteller von Melaminharzen. Melamine weisen ein vergleichbares Potential für die Holzmodifizierung auf wie DMDHEU. Melaminharze sind Derivate des Melaminmoleküls und weisen durch ihre Vielfalt einen großen Pool an potentiell geeigneten Produkten auf. Versuche an Furnieren, die im IfHH durchgeführt

wurden, zeigten bereits die Eignung von verschiedenen Melaminprodukten. Die INEOS hat ihrerseits zugesagt, das Projekt durch die Lieferung von Produkten zu unterstützen.

Melamin kann alternativ zu DMDHEU für die Holzmodifizierung verwendet werden, wenn DMDHEU für dieses Projekt nicht mehr als mögliches Verfahren angesehen wird (gemeinsame Diskussion zum Meilensteintreffen). Für die Behandlung von Massivholz mit Melamin im Pilotanlagenstadium liegen bisher wenige Erfahrungen vor. Deshalb ist es notwendig zusätzlich an der Prozessentwicklung und Prozessoptimierung zu arbeiten, bevor eine Entscheidung zur Implementierung getroffen werden kann.

### **Personal**

Die personelle Situation hat sich im Vergleich zu Projektbeginn verändert. Leider steht der Projektbearbeiter Herr Lars Schwerdtfeger dem IfHH nicht mehr für die Bearbeitung zur Verfügung.

Als Nachfolger von Herrn Schwerdtfeger wurde Frau Sabrina Stumpf eingestellt, um das Projekt weiter zu bearbeiten. Frau Stumpf beendete Ihr Studium an der Fakultät für Forstwissenschaften der Georg August Universität Göttingen im Jahr 2006 mit einem Abschluss als Master of Science mit dem Schwerpunkt auf Holzbiologie und Holztechnologie. Frau Stumpf hat sich bereits während Ihrer Masterarbeit mit dem Thema „Modifiziertes Holz und deren praktischen Anwendungen im Fensterbau“ beschäftigt. Sie ist nach Ansicht des IfHH hervorragend geeignet dieses Projekt weiterzubearbeiten und zu einem erfolgreichen Ende zu führen.



## 2 Grundlagenforschung

### 2.1 Beschichtbarkeit der Wachsbehandlung

Die ersten orientierenden Untersuchungen zur Beschichtbarkeit von wachsbehandeltem Holz zeigten, dass die üblichen Beschichtungen für Holz (hydrophile, wasserbasierte Lacke und Lasuren) nicht für die Beschichtung geeignet sind. Die einzelnen Untersuchungen dazu werden hier nicht dargestellt, weil keine konkret verwertbaren Ergebnisse erzielt werden konnten. Untersucht wurden vier verschiedene Beschichtungssysteme, die üblicherweise für die Beschichtung von Holzfenstern eingesetzt werden.

Die Beschichtungen haften nicht auf dem behandelten Holz, bzw. bildeten aufgrund der abstoßenden Wirkung des Waxes keine homogenen Beschichtungen.

Weitere Beschichtungen wurden untersucht und im Punkt „Anwendungsforschung: Beschichtungen testen“ dargestellt.

### 2.2 Mechanische Eigenschaften Holz

Um die relevanten mechanischen Eigenschaften bestimmen zu können, werden Prüfkörper der beiden zu untersuchenden Baumarten Kiefersplintholz (*Pinus sylvestris*) und Buche (*Fagus sylvatica*) verwendet. Die Prüfkörper werden dahingehend vorbereitet, dass die Kontrollen und die mit Wachs behandelten Prüfkörper auf Prüfungsabmessung gesägt und gehobelt werden. Mit den DMDHEU-behandelten Prüfkörper wird nach der Behandlung ebenso verfahren. Die Wachsbehandlung wird anschließend an die Prüfkörperherstellung durchgeführt.

### 2.2.1 Klimatisierung

Alle Prüfkörper werden mindestens eineinhalb Wochen bis zur Gewichtskonstanz im Normklima (DIN 50 014-20/65-1) von  $20\text{ °C} \pm 1$  und  $65\% \pm 3$  relativer Luftfeuchte klimatisiert. Sowohl Temperatur als auch Feuchte wirken sich auf die einzelnen Festigkeiten und Eigenschaften des Holzes aus. Um Messfehler durch den Einfluss von Feuchte zu minimieren und somit eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, ist eine Klimatisierung auf einen identischen Ausgangszustand unabdingbar. Während der Messungen soll das Holz keinen entscheidenden Temperatur- und Feuchteunterschieden ausgesetzt sein. Deshalb werden die Prüfkörper vor der Prüfung nur kurz außerhalb des Normklimas gelagert.

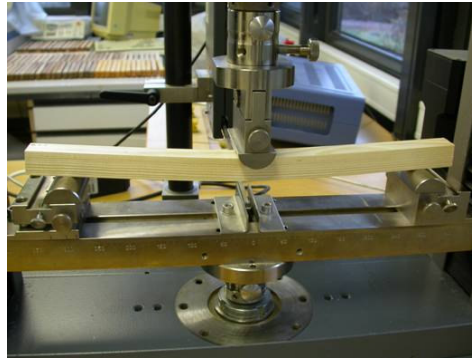
#### 1.1.1.1 Bestimmung von statischem Elastizitätsmodul, Biegefestigkeit und Biegearbeit

In diesem Versuch werden mit Hilfe einer Universalprüfmaschine der Firma Zwick bei einer Messung eines Prüfkörpers statisches Elastizitätsmodul (E-Modul), Biegefestigkeit und Biegearbeit ermittelt. Das statische E-Modul ist ein Materialkennwert und beschreibt die Verformungssteifigkeit des Prüfkörpers im elastischen Bereich. Der E-Modul ist der Kehrwert der Dehnungszahl, darunter ist die Spannung zu verstehen, die erforderlich ist, um einen Stab der Länge  $l$  auf  $2 \cdot l$  zu verlängern.

Die Biegefestigkeit entspricht dem Widerstand des Holzes gegen Bruch unter Biegebeanspruchung und stellt eine der wichtigsten Materialkennwerte dar. Sie wird aus der höchsten errechneten Biegespannung bis zum Bruch ermittelt. Während der Biegeprüfung treten sowohl Zug- als auch Druckkräfte auf.

Die Biegearbeit ist ein Maß für die maximalmögliche absorbierte Energie, des Holzes bei einer Biegebeanspruchung. Es lassen sich so Aussagen über die

Sprödigkeit des Materials treffen. Die Biegearbeit korreliert mit der Schlagzähigkeit (Bruchschlagarbeit).



**Abbildung 4: Prüfungsaufbau für den Biegeversuch**

Der Drei-Punkt-Biegeversuch (Abbildung 4) ist eine wichtige Untersuchung dieser Arbeit, da Fensterrahmen u.a. auch Belastungen dieser Art ausgesetzt sind.

Die Prüfkörper müssen fehlerfrei sein und einen quadratischen Querschnitt, mit der Kantenlänge  $20 \pm 1$  mm aufweisen. Die Gesamtlänge beträgt in Faserrichtung in diesem Fall 360 mm. Die Prüfkörperoberflächen müssen planparallel und eben sein, sodass die Querschnittsabmessungen auf 0,5 % Genauigkeit bestimmbar sind. Die Prüfkörper sollen einen kantenparallelen Verlauf der radialen und tangentialen Richtung des Holzes aufweisen.

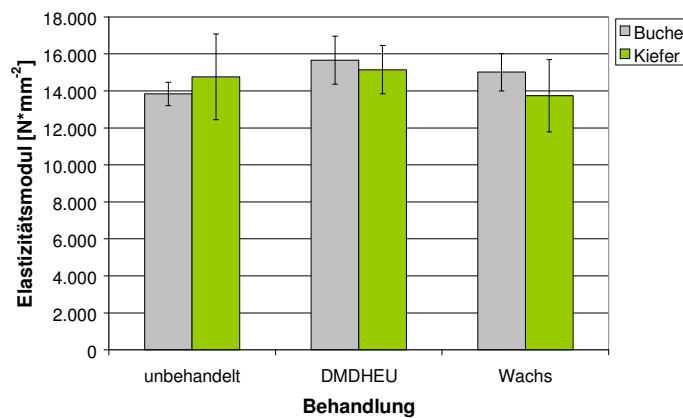
Der Versuch wird mit einer Universal-Materialprüfmaschine (Z10 der Allround-Line) der Firma ZWICK ROELL durchgeführt, die dazugehörige Software testXpert® liefert die entsprechenden Messwerte.

Von den beiden Baumarten liegen je drei Behandlungsvarianten vor, DMDHEU, Wachs und eine unbehandelte Referenz. Von jeder Variante gibt es je 10 Prüfkörper.

Vor der Prüfung werden die Prüfkörperbreiten und -höhen mit Hilfe einer Schieblehre in der Mitte der Prüfkörper gemessen und in die Prüfsoftware testXpert® eingegeben.

Das E-Modul zeigt keinen signifikanten Unterschied zwischen allen Prüfkörpern (Abbildung 5). Sowohl zwischen Buche und Kiefer als auch zwischen den Behandlungen wird kein Unterschied im E-Modul gemessen.

Das E-Modul ist eine wichtige Größe um die Dimensionierung der Materialstärke bei Fensterrahmen und Flügel zu berechnen. Da kein Unterschied zwischen behandeltem Holz und unbehandeltem Holz vorliegt, braucht diese Größe bei der Berechnung nicht angepasst zu werden.

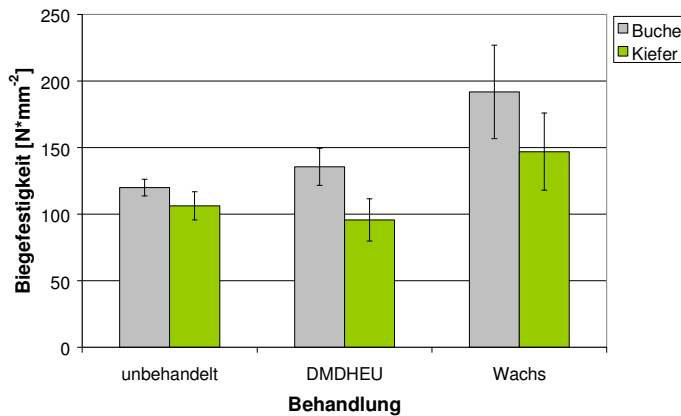


**Abbildung 5: Elastizitätsmodul (E-Modul) [N\*mm<sup>-2</sup>] von Holz in Abhängigkeit von Holzart und Behandlung**

Die Biegefestigkeit der behandelten und unbehandelten Prüfkörper ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Buche zeigt bei allen Varianten eine etwas höhere Biegefestigkeit als das Kiefersplintholz. Die Behandlung mit DMDHEU führt nicht zu einer Veränderung der Biegefestigkeit, während nach der Behandlung mit Wachs eine ca. 40 % höhere Biegefestigkeit gemessen wird. Allerdings ist auch die Standardabweichung bei der mit Wachs behandelten Kiefer höher. Die höhere Biegefestigkeit der Prüfkörper, die mit Wachs behandelt wurden, resultiert

wahrscheinlich aus dem Ausfüllen der Zelllumen. Dadurch wird die Druckfestigkeit erhöht und damit auch die Biegefestigkeit.

Die Veränderung bei der mit Wachs behandelten Kiefer wird jedoch wahrscheinlich unter praktischen Bedingungen keine Auswirkungen haben, weil die geringe Wachsaufnahme, wie sie unter praxisnahen Bedingungen angestrebt wird, nicht zu einer signifikanten Erhöhung der Biegefestigkeit führt.



**Abbildung 6: Biegefestigkeit [N\*mm<sup>-2</sup>] von Holz in Abhängigkeit von Holzart und Behandlung**

Die Biegearbeit (Abbildung 7) ist eine Größe, die normalerweise nicht zu Charakterisierung von Holz verwendet wird. Diese Größe ist allerdings bei modifiziertem Holz von großer Wichtigkeit, weil sie ein Maß für die Sprödigkeit des neuen Materials ist. Die Biegearbeit ist ein Maß wie viel Energie das Holz absorbiert, bevor es zum Versagen kommt. Im Vergleich zur Bruchschlagarbeit ist diese Größe unter statischen Bedingungen und nicht unter dynamischen Bedingungen ermittelt worden.

Die Biegearbeit zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Holzarten und den Behandlungen. Buche weist eine höhere Biegearbeit auf als Kiefer. Die mit Wachs behandelten Prüfkörper zeigen keinen signifikant Unterschied zu den unbehandelten Prüfkörpern. Durch die Behandlung mit DMDHEU wird die

Biegearbeit stark reduziert. Da die Biegefestigkeit und das E-Modul vergleichbar hoch sind, ist die reduzierte Biegearbeit auf eine reduzierte plastische Dehnung zurückzuführen.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass durch die Einlagerung des DMDHEU in die Holzzellwand, das plastische Verhalten des Materials verändert wird, wodurch die geringere Biegearbeit resultiert. Die Biegearbeit korreliert mit der Bruchschlagarbeit (siehe unten). Deshalb wird vermutet, dass aus dem modifizierten Holz gebaute Fenster empfindlicher gegen dynamische Belastungen (z.B. zuschlagen durch Luftzug) sind, als Fenster aus unbehandeltes Holz.

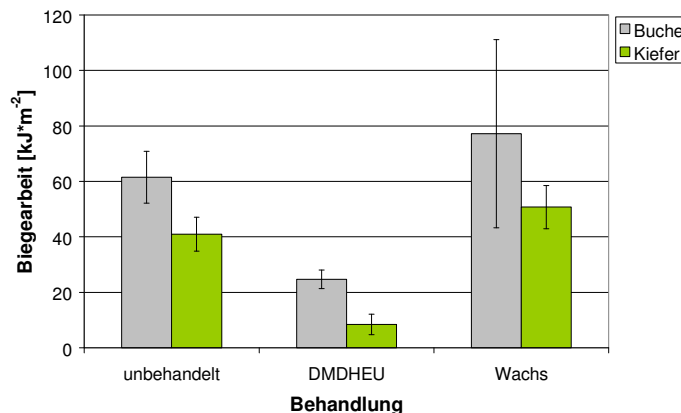


Abbildung 7: Biegearbeit [kJ\*mm<sup>-2</sup>] von Holz in Abhängigkeit von Holzart und Behandlung

### 2.2.2 Bestimmung der Bruchschlagarbeit

Die Bruchschlagarbeit gibt eine Aussage über das Verhalten des Holzes bei schlagartiger Beanspruchung. Diese Kenngröße ist bei Fenstern weniger entscheidend als beispielsweise bei Werkzeugstielen (Axt, Hammer). Doch auch Fenster können schlagartigen Belastungen ausgesetzt sein, wenn sie aufgrund von Zugluft zuschlagen.

Hierbei werden ebenfalls fehlerfreie Prüfkörper mit stehenden Jahrringen verwendet. Die Prüfkörperstäbe besitzen einen quadratischen Querschnitt mit

20 mm Kantenlänge und 300 mm Länge in Faserrichtung. Es ist auf Planparallelität der gegenüberliegenden und Rechtwinkligkeit der benachbarten Seitenflächen zu achten (DIN 52 189-1, 1981).

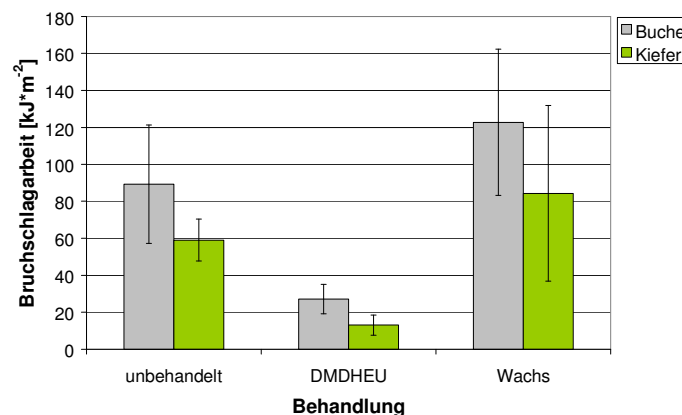
Von jeder Holzart liegen drei Behandlungsvarianten vor, DMDHEU, Wachs und unbehandelte Referenz. Von jeder Variante gibt es je 25 Proben mit stehenden Jahrringen. Die Bruchschlagarbeit wird mit einem Pendelschlagwerk (Abbildung 8) bestimmt. Die Querschnittsmaße der Prüfkörper müssen in der Mitte der Prüfkörper auf 0,1 mm bestimmt werden. Zur Bestimmung der Bruchschlagarbeit werden die Prüfkörper symmetrisch an die Widerlager des Pendelschlagwerks angelegt, sodass die Hammerscheide auf die radiale Fläche des Holzes trifft und die Prüfkörper in tangentialer Richtung durchschlägt, d. h. das Pendel trifft auf die stehenden Jahrringe. Es ist vorgesehen, dass der Prüfkörper mit einem Schlag durchtrennt wird. Falls dies nicht der Fall sein sollte und die beiden Stabhälften nach der Prüfung noch durch Fasern miteinander verbunden sind, ist dies zu vermerken. Des Weiteren ist für jede Probe das Bruchbild, stumpf (herausragende Fasern < 3 mm Länge) oder faserig festzuhalten (Abbildung 11).



**Abbildung 8: Für die Prüfung vorbereitetes Pendelschlagwerk**

Die Bruchschlagarbeit ist in Abbildung 9 dargestellt. Es zeigen sich starke Unterschiede zwischen den Holzarten und zwischen den Behandlungen. Buche

weist, wie zu erwarten, eine höhere Bruchschlagarbeit auf als Kiefersplintholz. Die mit Wachsbehandelten Prüfkörper zeigen einen etwas höheren Mittelwert im Vergleich zum unbehandelten Holz. Da aber auch die Streuung der Werte deutlich höher ist (hohe Standardabweichung) kann nicht abschließend festgestellt werden, ob mit einer höheren Bruchschlagarbeit bei dem mit Wachsbehandelten Holz zu rechnen ist. Da durch die Behandlung die Zugfestigkeit nicht verbessert werden kann, würde sich eine höhere Bruchschlagarbeit auf die erhöhte Druckfestigkeit zurückführen lassen. Bei den mit DMDHEU behandelten Prüfkörpern ist eine sehr starke Reduzierung der Bruchschlagarbeit festzustellen. Die Ursachen dieser Reduzierung sind nicht vollständig aufgeklärt. Ob durch die geringe Bruchschlagarbeit des mit DMDHEU behandelten Holzes Nachteile bei der Verwendung für Holzfenster auftreten, wird nur die praktische Erfahrung zeigen, da eine dynamische Belastung nur selten während der Benutzung auftritt (z.B. Zuschlagen des Fensters).



**Abbildung 9: Bruchschlagarbeit [kJ\*mm<sup>-2</sup>] von Holz in Abhängigkeit von Holzart und Behandlung**

Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Bruchschlagarbeit und der Biegearbeit. Beide Werte sind von der Holzfeuchtigkeit weitgehend unabhängig und drücken die Menge an Energie aus, die ein Material aufnehmen kann, bevor ein Versagen auftritt. Der Unterschied zwischen beiden Werten ist, dass die



Bruchschlagarbeit eine dynamische Größe ist, während die Biegearbeit statisch ermittelt wird. In der Abbildung 10 ist die Bruchschlagarbeit im Vergleich zur Biegearbeit dargestellt. Über die Mittelwerte der Behandlungsvarianten zeigt sich ein statistischer Zusammenhang. Die Bruchschlagarbeit ist ca. das 1,5 fache der Biegearbeit. Durch diesen Zusammenhang kann zukünftig auf die relativ aufwendige Messung der Bruchschlagarbeit verzichtet werden und die Biegearbeit, die automatisiert bei der Messung der Biegefestigkeit mit gemessen wird als Bewertungs- und Beurteilungskriterium herangezogen werden.

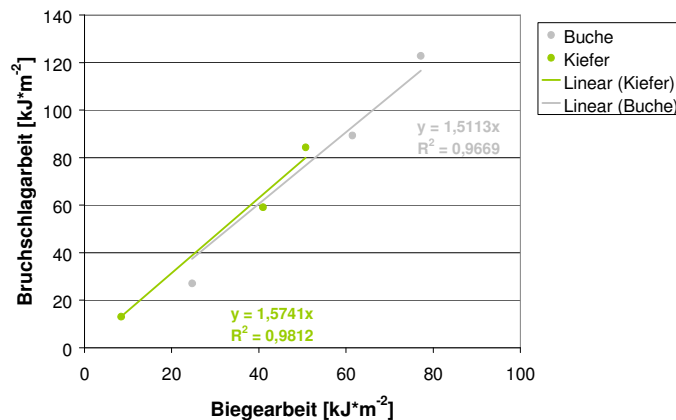
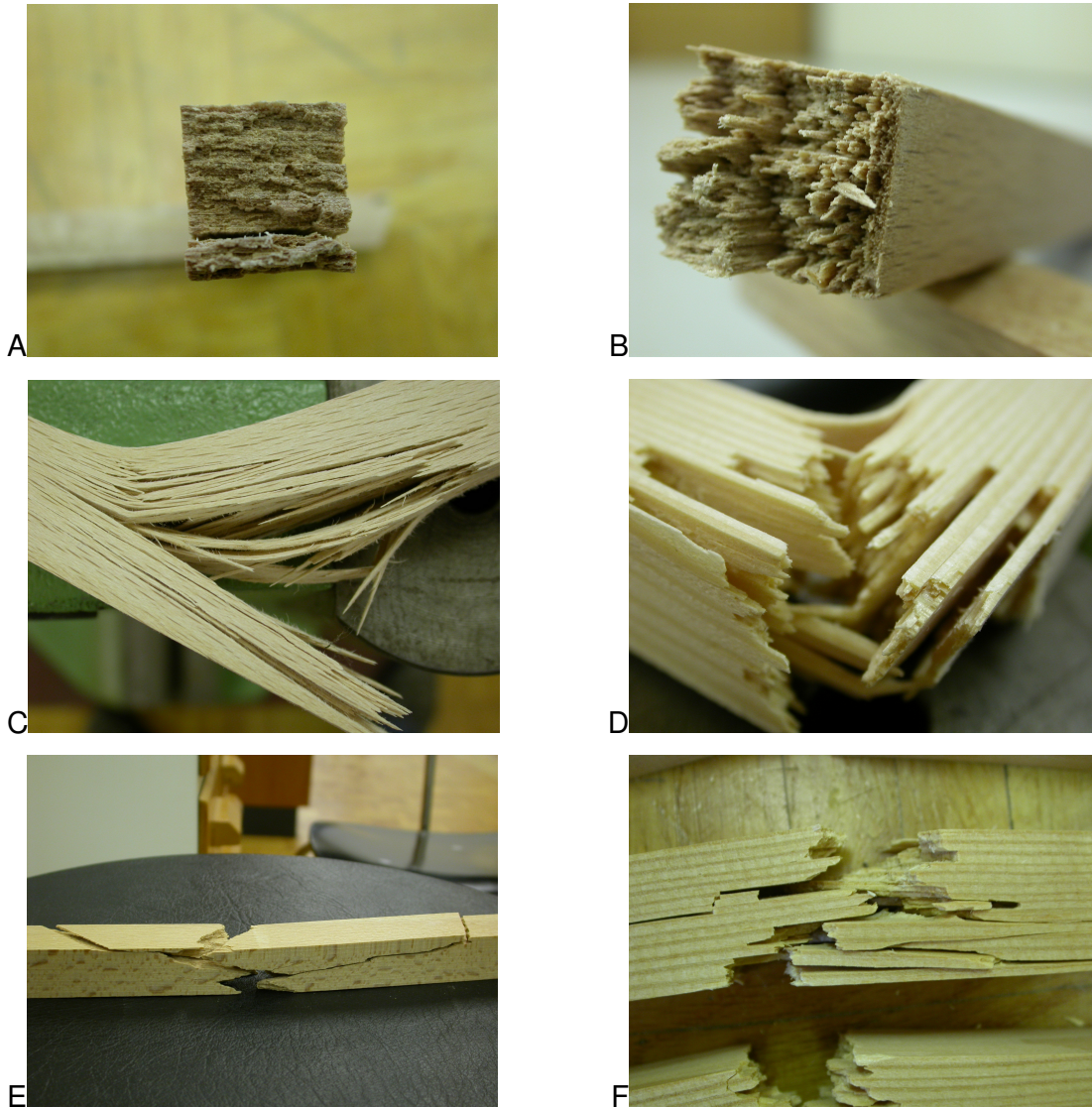


Abbildung 10: Zusammenhang zwischen Biegearbeit und Bruchschlagarbeit

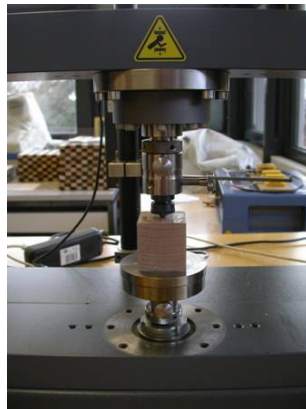
Die Abbildung 11 zeigt Bilder von den Bruchstellen, des Holzes nach der Messung der Bruchschlagarbeit. In der Regel weist das Holz, welches langfaserig bricht (C) eine höhere Bruchschlagarbeit, als Holz welches kurzfaserig bricht (B). Das Brechen des Holzes in viele einzelne Stücke (E und F) ist ein typisches Verhalten von Holz, welches mit DMDHEU behandelt wurde.



**Abbildung 11: A: Stumpfes Bruchbild; B: Kurzfaseriges Bruchbild; C: Langfaseriges Bruchbild; D: Bruch in Schichten; E: Bruchbild mit geraden Bruchkanten; Beispiel für ein sprödes Bruchverhalten**

### 2.2.3 Oberflächenhärte

Die Oberflächenhärte beschreibt den Widerstand des Holzes gegenüber der Eindringung eines härteren Körpers. Prinzipiell gibt es statische und dynamische Verfahren. Die hier untersuchte Brinellhärte (EN 1534, 2000) ist ein statisches Messverfahren und wird in Europa häufig für Holz verwendet. Eine 10 mm große Stahlkugel wird mit 1000 N für 25 s in das Holz eingedrückt. Die Härte wird anhand des Eindrucks, den die Kugel nach der Entlastung im Holz hinterlässt, bestimmt. Im Bezug auf Fensteranwendungen ist sie wichtig, um z.B. Aussagen über den Widerstand gegenüber Hagel zu treffen.



**Abbildung 12 Prüfungsaufbau für die Brinellhärte**

Es werden fehlerfreie Prüfkörper geprüft. Die unbehandelten und die mit Wachs behandelten Proben sind quadratisch und besitzen eine Seitenlänge von 50 mm. Wobei die Jahrringe senkrecht bzw. parallel zu den Seitenflächen liegen müssen. Abweichend von der Norm weisen die mit DMDHEU behandelten Prüfkörper eine Dimension von 40x40x25 mm<sup>3</sup> auf, weil würfelförmige Prüfkörper mit diesen Abmessungen nur schlecht mit DMDHEU behandelt werden können.

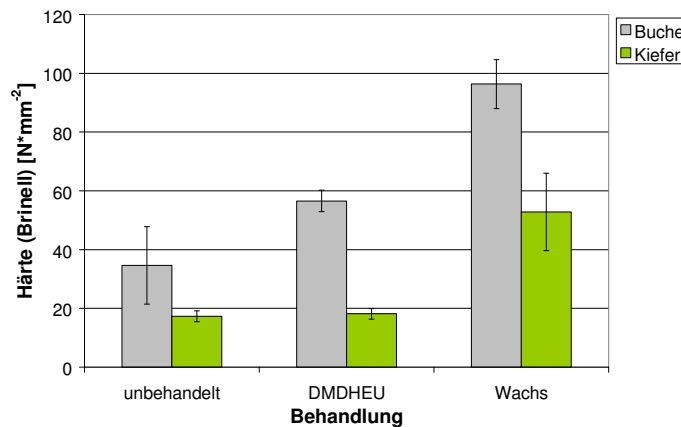
Von jeder Holzart liegen drei Behandlungsvarianten vor, DMDHEU, Wachs und unbehandelte Referenz. Von jeder Variante gibt es je 10 Prüfkörper.

Der Versuch wird mit einer Universal-Materialprüfungsmaschine der Firma ZWICK ROELL durchgeführt, die Werte werden von der Software testXpert<sup>®</sup> berechnet.

In der Abbildung 13 ist die Härte dargestellt. Sowohl zwischen den Holzarten und den Behandlungen gibt es deutliche Unterschiede. Buche weist gegenüber dem Kiefersplintholz eine größere Härte auf. Bei der Buche wird die Härte sowohl durch die Behandlung mit DMDHEU als auch mit Wachs gesteigert. Die Härte des Kiefernholzes nach der Behandlung mit DMDHEU ist im Vergleich zum unbehandelten Holz nicht erhöht. Normalerweise wurde eine Erhöhung erwartet, da bekannt ist, dass durch die Behandlung mit DMDHEU die Oberflächenhärte verbessert wird.

Durch die Behandlung mit Wachs wird die Härte des Kiefernholzes stark erhöht. Im Vergleich zur unbehandelten Kiefer wird die Härte um ca. 300 % gesteigert.

Eine verbesserte Oberflächenhärte wirkt sich positiv auf die hergestellten Fenster aus, da die Resistenz sowohl gegenüber Beschädigungen beim Transport und Einbau als auch gegenüber Hagelschlag verbessert wird.



**Abbildung 13: Oberflächenhärte (Brinell) [N\*mm<sup>-2</sup>] von Holz in Abhängigkeit von Holzart und Behandlung**

#### 2.2.4 Schraubenausziehwiderstand

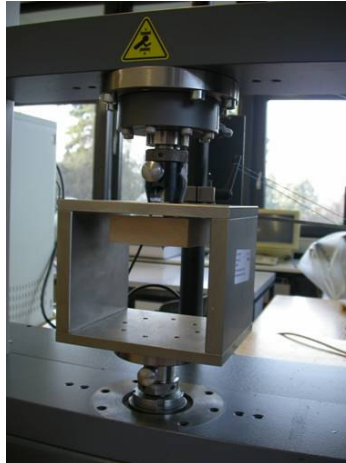
In Anlehnung an die Norm EN 320 wird hiermit eine verarbeitungstechnische Eigenschaft untersucht. Gemessen wird die Kraft, die bei einer bestimmten Einschraubtiefe notwendig ist, um eine Schraube aus dem Holz zu ziehen. Die Werte sind stark vom Prüfverfahren abhängig, bislang gibt es nur für Holzwerkstoffe eine international anerkannte Prüfvorschrift. Faktoren, welche die Prüfung zusätzlich zum Holz beeinflussen sind z.B. Material und Form der Schrauben, Prüfgeschwindigkeit oder Art des Einbringens der Schrauben.

Diese Prüfung ist für Fenster wichtig, weil gerade die Scharniere und damit auch die Schrauben besonderen Belastungen ausgesetzt sind. Hier wirkt sich der Hebelarm des Fensters punktuell in voller Höhe aus, wenn das Fenster nicht geschlossen ist.

Fehlerfreie Prüfkörper der Dimension 75x75x25 mm<sup>3</sup> werden für diese Prüfung verwendet (EN 320, 1993).

Von jeder Holzart liegen drei Behandlungsvarianten vor, DMDHEU, Wachs und unbehandelte Referenz. Von jeder Variante gibt es 15 Prüfkörper mit liegenden Jahrringen.

Der Versuch wird mit einer Universal-Materialprüfungsmaschine der Firma ZWICK ROELL durchgeführt (Abbildung 14), die Werte werden von der Prüfsoftware testXpert<sup>®</sup> ermittelt.



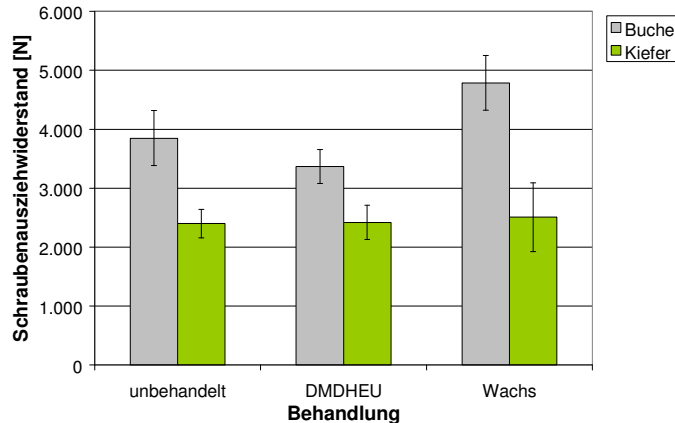
**Abbildung 14: Prüfungsaufbau für den Schraubenauszieh Widerstand**

Für diesen Versuch sind im Vorfeld einige Vorbereitungen notwendig. In der Prüfkörpermitte werden 19mm tiefe Löcher mit Hilfe eines 3mm Bohrers vorgebohrt. Die Schrauben werden anschließend so tief eingeschraubt, dass  $15 \pm 0,5$  mm des vollständigen Gewindes sich im Prüfkörper befinden. Die verwendeten Schrauben sind DIN 7983 C-H Linsensenk-Blechschauben, galvanisch verzinkt der Maße 4,2x38 mm. Für die praktische Überprüfung eines bestimmten Fenstersystems sollten die Schrauben verwendet werden, die normalerweise bei diesem speziellen System eingesetzt werden.

Bei der Messung werden die Schraubenköpfe in eine Öse gehängt, womit sie anschließend in die Höhe gezogen werden. Der Prüfkörper wird von einem Rahmen zurückgehalten. Es ist darauf zu achten, dass Schraube und Öse möglichst gut aufeinander abgestimmt und die Schraubenköpfe ausreichend stabil sind.

In der Abbildung 15 sind die Ergebnisse dieses Versuches dargestellt. Die Buche weist gegenüber der Kiefer einen höheren Widerstand auf. Für das Kiefernholz wird kein Unterschied zwischen dem behandelten Holz und dem unbehandelten Holz festgestellt. Für die Anwendung im Fensterbau sind die Verbindungsmittel gut entwickelt und stellen keine wesentliche Schwachstelle dar, so dass davon

ausgegangen werden kann, dass auch sowohl bei der Behandlung mit DMDHEU als auch bei der Behandlung mit Wachs keine neue Schwachstelle auftreten wird.



**Abbildung 15: Schraubenausziehewiderstand [N] von Holz in Abhängigkeit von Holzart und Behandlung**

### 2.3 Kapillare Wasseraufnahme

Die Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme überprüft die Wasseraufnahme des Holzes in Abhängigkeit der anatomischen Hauptrichtung. Diese Untersuchung wird in Anlehnung an die DIN 52617 (1987) „Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen“ durchgeführt. Diese Norm wurde für die Beurteilung von Fassadenputz konzipiert. Für die Beurteilung von Holz wurde sie deshalb angepasst.

Jeweils 30 Prüfkörper von unbehandelten und wachsbehandelten Kiefernholz werden pro Aufnahme-richtung mit folgenden Abmessungen angefertigt:

radial: 40x40x40 mm<sup>3</sup>

tangential: 40x40x40 mm<sup>3</sup>

longitudinal: 20x20x200 mm<sup>3</sup>



Eine Voruntersuchung der kapillaren Wasseraufnahme an DMDHEU behandeltem Kiefersplintholz zeigte kein verändertes Aufnahmeverhalten, deshalb wurde der Versuch ausschließlich mit den mit Wachs behandelten Prüfkörpern durchgeführt. Zunächst werden alle Prüfkörper bei 20 °C und 65 % Luftfeuchte klimatisiert und anschließend mit wasserfester Versiegelungsmasse so versiegelt, dass nur die anatomische Hauptrichtung, die für die Wasserberührung vorgesehen ist und die jeweilige Gegenseite, frei bleiben. Die so vorbereiteten Prüfkörper werden nun auf einen mit Wasser getränkten Schwamm gelegt. Der Schwamm wird regelmäßig befeuchtet, um die optimale und gleichmäßige Benetzung der Prüfflächen der Proben zu garantieren.

Um die aufgenommene Wassermenge zu messen, wird das Gewicht der Prüfkörper durch regelmäßiges Wiegen bestimmt. Die kapillare Aufnahme in diesem Versuch wurde für 216 h (9 d) durchgeführt.

Mit den ermittelten Werten der Wasseraufnahme wird der Wasseraufnahmekoeffizient  $\omega$  bestimmt. Dieser kennzeichnet die durch kapillare oder absorptive Kräfte bedingte flächenbezogene Wasseraufnahme von Baustoffen bei Oberflächenbenetzung ohne nennenswerten Überdruck (DIN 52 617). Für die Berechnung des Wasseraufnahmekoeffizienten wird die flächenbezogene Wasseraufnahme  $W$  graphisch in Relation zur Quadratwurzel der Zeit  $t$  dargestellt. Für die annähernd linearen Bereiche der Kurve wird anschließend der Wasseraufnahmekoeffizient aus der Steigung der resultierenden Geraden ermittelt:

$$\omega_t = \frac{\Delta W_t}{\Delta \sqrt{t}}$$

$\omega$  = Wasseraufnahmekoeffizient

$W_t$  = flächenbezogene Wasseraufnahme [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ]

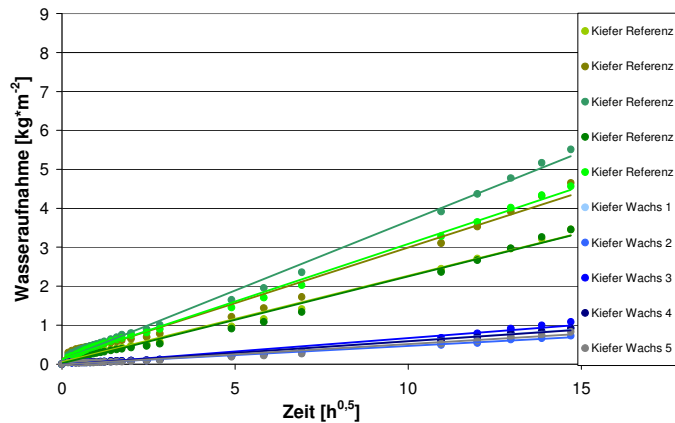


Wie an den folgenden Abbildungen zu sehen ist, nimmt die Wasseraufnahme relativ zur Wurzel der Zeit linear zu. Die unbehandelten Referenzen zeigen hier eine wesentlich stärkere Wasseraufnahme als die mit Wachs behandelten Prüfkörper. Während die Wasseraufnahme der unbehandelten Proben je nach Prüfkörper stärker variiert, zeigen die Prüfkörper der wachsbehandelten Kiefer eine einheitliche Wasseraufnahme.

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 16 bis Abbildung 18) ist die Wasseraufnahme in Abhängigkeit der Zeit dargestellt. Die Zeitachse wurde nicht linear, sondern als Wurzel dargestellt, damit die Wasseraufnahme einen linearen Verlauf aufweist.

Die tangentiale Wasseraufnahme (Abbildung 16) zeigt die geringsten Werte im Vergleich zu den anderen anatomischen Richtungen. Die Wasseraufnahme ist in hohem Maß von der Anatomie des Holzes abhängig. Je nach dem, wie die Kapillaren angeordnet sind, kann die Wasseraufnahme schneller oder langsamer erfolgen. Da es weniger Kapillaren in tangentialer Richtung im Vergleich zur radialen Richtung gibt ist die Wasseraufnahme hier geringer.

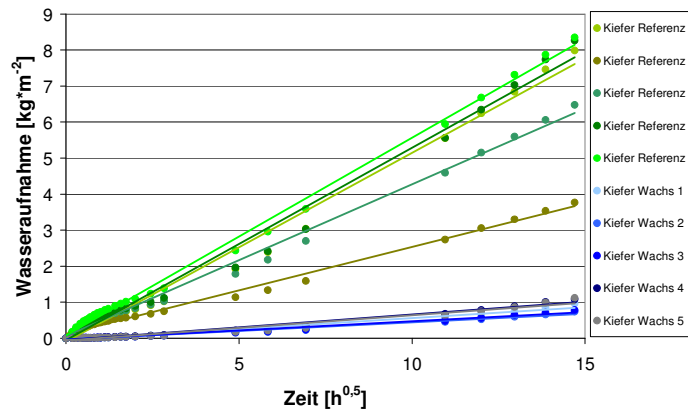
Die mit Wachs behandelten Prüfkörper zeigen eine stark verringerte Aufnahme. Eine Wasseraufnahme findet jedoch auch nach der Behandlung mit Wachs noch statt. Dieses Verhalten ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass an der Oberfläche die Holzzellwand frei liegt und die Aufnahme über die Kapillaren in der Holzzellwand stattfinden kann. Diese sind jedoch so klein, dass die Wachspolymere dort nicht eindringen können.



**Abbildung 16: Tangentiale Wasseraufnahme in Abhängigkeit von Zeit und Behandlung.**

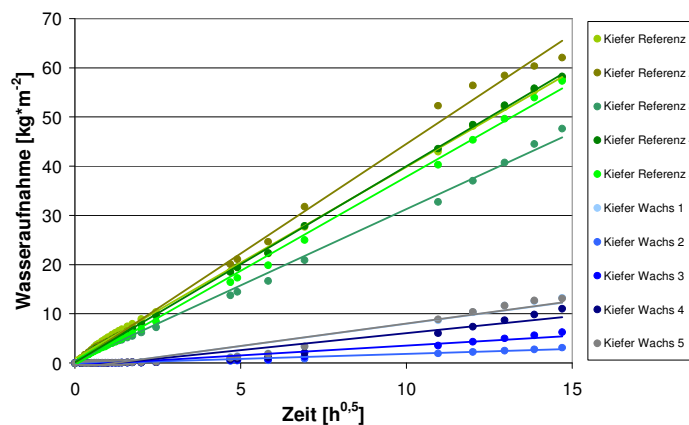
Die Wasseraufnahme ist bei unbehandeltem Holz in radialer Richtung (Abbildung 17) etwas höher als in tangentialer Richtung. Ursache dafür sind die Holzstrahlen, die bei der tangentialen Richtung für zusätzliche Kapillaren sorgen.

Die Wasseraufnahme zwischen radialer und tangentialer Richtung bei den wachsbehandelten Prüfkörpern ist nicht unterschiedlich.



**Abbildung 17: Radiale Wasseraufnahme in Abhängigkeit von Zeit und Behandlung.**

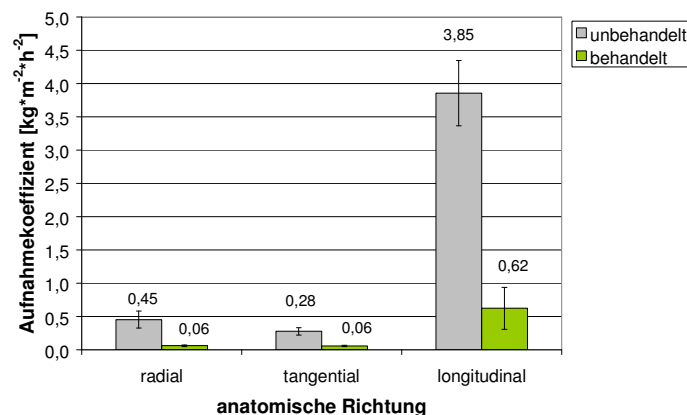
Die Wasseraufnahme in Faserrichtung (axial oder auch longitudinal) ist deutlich größer als in die anderen Richtungen. Im Vergleich zur tangentialen Richtung beträgt die Aufnahme in Faserrichtung ca. das 10fache. Verantwortlich für die starke Wasseraufnahme ist die axiale Anordnung der Fasern, die im lebenden Baum für den vertikalen Wassertransport sorgen.



**Abbildung 18:longitudinale Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der Zeit und der Behandlung**

Die Abbildung 19 zeigt den Wasseraufnahmekoeffizienten der Prüfkörper in Abhängigkeit zur anatomischen Hauptrichtung. Es ist deutlich zu sehen, dass die

Werte der behandelten Hölzer unter denen der unbehandelten Prüfkörper liegen. Besonders auffällig ist die reduzierte Wasseraufnahme in longitudinaler Richtung. Die Aufnahme von flüssigem Wasser des Kiefernholzes wird demnach durch die Behandlung mit Wachs stark reduziert. Die mit Wachsbehandelten Prüfkörper zeigen sowohl in radialer als auch in tangentialer Richtung einen gleich hohen Wasseraufnahmekoeffizienten. Möglicherweise trägt eine Füllung der Holzstrahlzellen dazu bei, dass das Wasser ausschließlich über die Holzzellwand transportiert werden kann. Der Anteil der Zellwandfläche am radialen bzw. tangentialen Querschnitt wird in etwa gleich hoch sein.



**Abbildung 19: Wasseraufnahmekoeffizient in Abhängigkeit von der anatomischen Richtung und der Behandlung**

Der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient in longitudinaler Richtung ist ca. 10fach höher als in die anderen anatomischen Richtungen. Die Ursache dafür ist vermutlich, dass die Kapillaren in der Zellwand, die nicht mit Wachs gefüllt sind, ebenfalls in longitudinaler Richtung verlaufen und so das Wasser leichter transportiert werden kann.

Die kapillare Wasseraufnahme ist ein entscheidender Faktor bei der Qualität von Fenstern. Während bei Regen durch die offenen Fugen das Wasser kapillar eindringen kann, besteht bei der Trocknung nur die Möglichkeit der Diffusion, welche sehr viel langsamer abläuft. Deshalb entsteht oft eine Auffeuchtung in

Holzfenstern, die als Folge Pilzbefall und vollständige Zerstörung des Fensters nach sich ziehen kann.

Eine Reduktion der kapillaren Wasseraufnahme in dem hier gezeigten Ausmaß würde zu einer stark verbesserten Resistenz gegenüber einer Auffeuchtung führen.

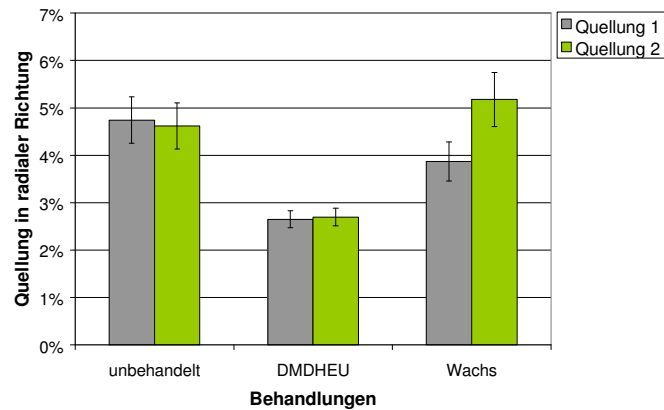
## 2.4 Quellung

Durch den Tauchversuch sind Aussagen über die Maximalquellung des Holzes möglich. Die Prüfung wird in Anlehnung an die Norm DIN 52184 durchgeführt. Die fehlerfreien Kiefernprüfkörper haben einen quadratischen Querschnitt mit den Maßen 25x25x15 mm. Auf einem in radialer und tangentialer Richtung kantenparallelen Verlauf der Jahrringe ist zu achten.

Es werden mit DMDHEU behandelte Prüfkörper, mit Wachs behandelte Prüfkörper und unbehandelte Kontrollen untersucht.

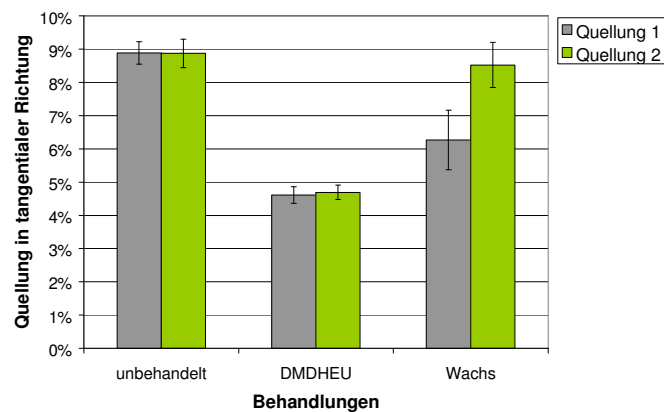
Zur Ermittlung der maximalen Quellung werden die Prüfkörper darr getrocknet und anschließend unter Vakuum mit Wasser imprägniert. Es werden je Behandlung 15 Prüfkörper untersucht. Nach der Imprägnierung verbleiben die Prüfkörper noch 24 h im Wasser und werden gewogen. Anschließend wird dieser Vorgang wiederholt.

Wie an den folgenden Abbildungen (Abbildung 20 bis Abbildung 22) zusehen ist, wird das Quellungsvermögen der Prüfkörper durch eine DMDHEU Behandlung in alle anatomische Hauptrichtungen deutlich reduziert. Auch die mit Wachs behandelten Prüfkörper weisen nach der 1. Imprägnierung eine reduzierte Quellung auf. Nach der zweiten Imprägnierung ist keine wesentliche Reduzierung mehr erkennbar.



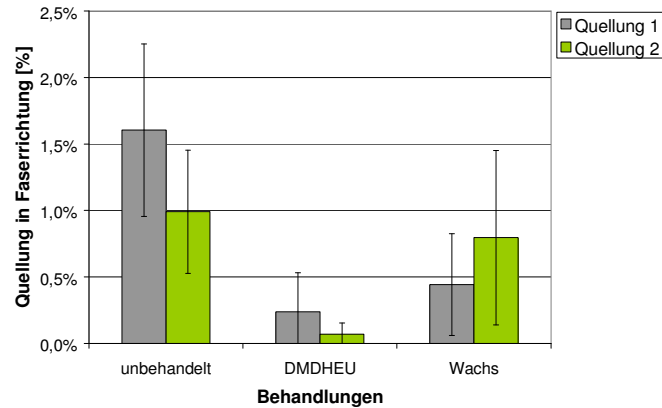
**Abbildung 20 Quellung [%] in radialer Richtung nach Tauchen mit Imprägnierung**

Die Quellung in tangentialer Richtung ist im Vergleich zu den anderen anatomischen Richtungen am höchsten.



**Abbildung 21 Quellung [%] in tangentialer Richtung nach Tauchen mit Imprägnierung**

Die Quellung in Faserrichtung (longitudinal) ist so gering, dass der Messfehler die Werte schon stark beeinflusst. Für die meisten Anwendungen im Fensterbau wird die longitudinale Quellung vernachlässigt, weil diese keinen Einfluss auf das Bauteil ausübt.



**Abbildung 22: Quellung [%] in longitudinaler Richtung nach Tauchen mit Imprägnierung**

In der Abbildung 23 ist die Anti Swell Efficiency (ASE) dargestellt. Die ASE gibt an, um wie viel Prozent das Quellungsvermögen des behandelten Holzes im Vergleich zum unbehandelten Holz reduziert wurde. Die angegebenen Standardabweichung beim unbehandelten Holz zeigt die natürliche Schwankungsbreite bei dieser Maßangabe. Das mit DMDHEU behandelte Holz zeigt ca. 50 % ASE. Das bedeutet, dass das Holz nur ca. 50 % soviel arbeitet wie unbehandeltes Kiefernspiltholz. Das mit Wachsbehandelte Holz zeigt im Gegensatz dazu eine ASE von ca. 30 % nach der 1. Imprägnierung und 0 % ASE nach der 2. Imprägnierung. Dieses Verhalten ist dadurch zu erklären, dass die Wachsbehandlung die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme reduziert, aber nicht die für die Quellung verantwortliche Zellwand chemisch verändert.

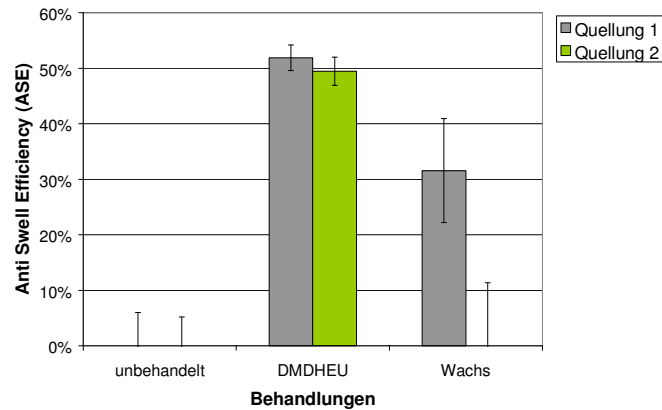


Abbildung 23: Reduzierung der Quellung (ASE) in Abhängigkeit von der Behandlung.

Das Quellungsverhalten des mit DMDHEU behandelten Holzes ist dem Quellungsverhalten von hochwertigen tropischen Hölzern, wie z.B. Teak, vergleichbar.

## 2.5 Wasserdampfdiffusion

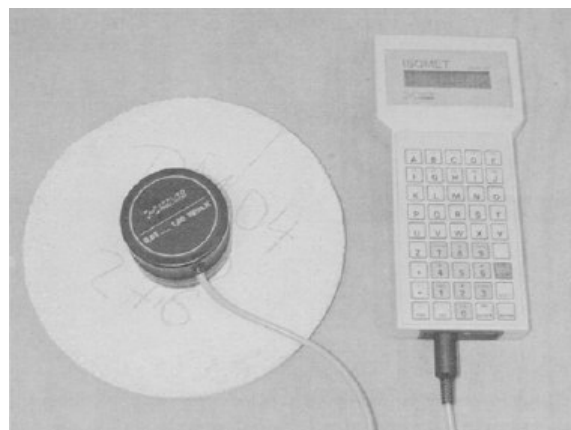
Die Wasserdampfdiffusion wurde in diesem Projekt bisher noch nicht untersucht. Die Untersuchung dieser Materialeigenschaft soll noch im laufenden Projektjahr stattfinden. Aus Untersuchungen anderer Projekte ist bekannt, dass sich die Wasserdampfdiffusion von Holz nach der Behandlung mit DMDHEU nicht signifikant von unbehandeltem Holz unterscheidet. Das Holz für die Untersuchungen wurde jedoch im Labormaßstab behandelt. Diese Behandlung unterschied sich stark von dem semiindustriellen Behandlungsverfahren, welches in diesem Projekt verwendet wird. Für das mit Wachs behandelte Holz wird erwartet, dass die Wasserdampfdiffusion im Vergleich zum unbehandelten Holz langsamer abläuft.



## 2.6 Thermische Eigenschaften

Die Thermischen Eigenschaften, die in diesem Projekt untersucht werden, sind: Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit. Diese Eigenschaften sind für das Projekt von Bedeutung, weil die Fenster eine hohe Wärmedämmung und damit eine geringe Wärmeleitfähigkeit erreichen sollen. Es wird von den Behandlungen allerdings nicht erwartet, dass das Material mehr isolierend wirkt als unbehandeltes Holz, da bei beiden Verfahren (DMDHEU und Wachsbehandlung) Stoffe in das Holz eingelagert werden, die zu einer Dichteerhöhung führen und deshalb wahrscheinlich auch Wärme besser leiten werden.

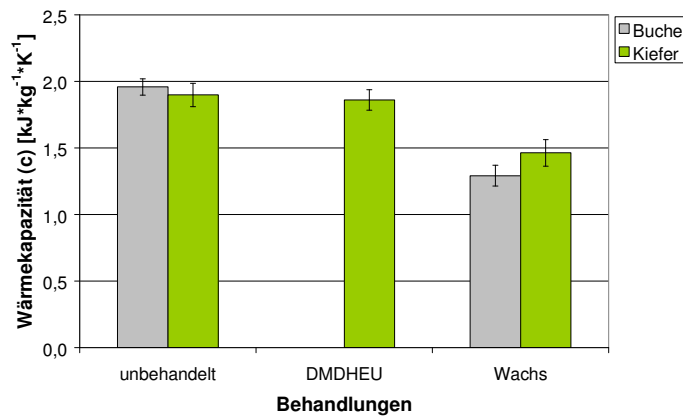
Die Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit wurde extern an der Technischen Universität in Zvolen von Prof. Dr. M. Babiak mittels eines ISOMET 104 durchgeführt. Das Messprinzip basiert auf dem statischen Zustand der Wärmeleitung, der erreicht wird, wenn die Prüfkörper zwischen zwei Platten einem Temperaturgefälle ausgesetzt sind. Die Abbildung 24 zeigt dieses Messgerät.



**Abbildung 24: ISOMET 104 zur Messung der thermischen Eigenschaften**

Die Wärmekapazität ist ein Begriff aus der Thermodynamik und bezeichnet das Vermögen eines Körpers, Energie in Form von thermischer Energie zu speichern.

Die Wärmekapazität von Holz hängt im Wesentlichen von der Holzart und der Holzfeuchtigkeit ab. In Abbildung 25 ist die Wärmekapazität von unbehandeltem Holz (Buche und Kiefer) im Vergleich zu mit DMDHEU behandelter Kiefer und mit Wachs behandelter Kiefer und Buche dargestellt. Die beiden Holzarten unterscheiden sich nicht signifikant von einander. Ebenso zeigt die mit DMDHEU behandelten Kiefernprüfkörper eine vergleichbar hohe Wärmekapazität. Die Wärmekapazität von den mit Wachs behandelten Kiefernprüfkörpern ist deutlich geringer als die des unbehandelten Holzes. Hervorgerufen wird dieser Effekt wahrscheinlich durch die erhöhte Dichte des mit Wachs behandelten Holzes. Die Wärmekapazität wird auf das Gewicht und nicht auf das Volumen bezogen, wodurch sich bei gleicher Prüfkörpergröße und vergleichbarem Messwert, rechnerisch die Kapazität reduziert.



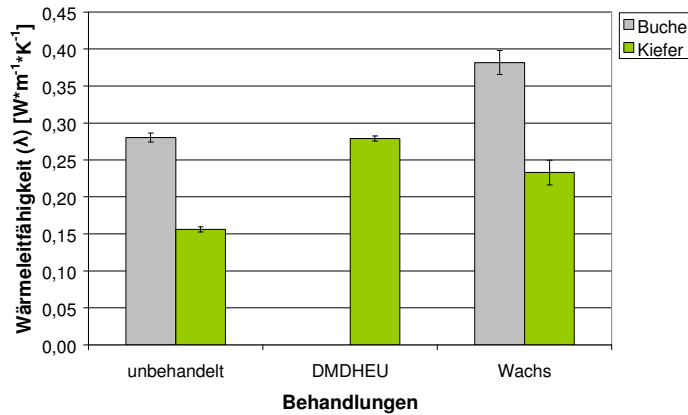
**Abbildung 25: Wärmekapazität [kJ·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>] in Abhängigkeit von Baumart und Behandlung**

Die Wärmeleitfähigkeit eines Festkörpers, einer Flüssigkeit oder eines Gases ist bestimmt durch die Geschwindigkeit, mit der sich die Erwärmung an einem Punkt durch den Stoff ausbreitet. Die Wärmeleitfähigkeit ist also das Vermögen eines Stoffes thermische Energie mittels Wärmeleitung in Form von Wärme zu transportieren.

Bei Festkörpern ist der Wärmestrom bzw. Wärmefluss in erster Näherung direkt proportional zum Temperaturunterschied  $\Delta T$  an zwei gegenüber liegenden Oberflächen, der in Kelvin oder Grad Celsius gemessen wird. Der Wärmestrom selber wird in Joule pro Sekunde oder Watt angegeben.

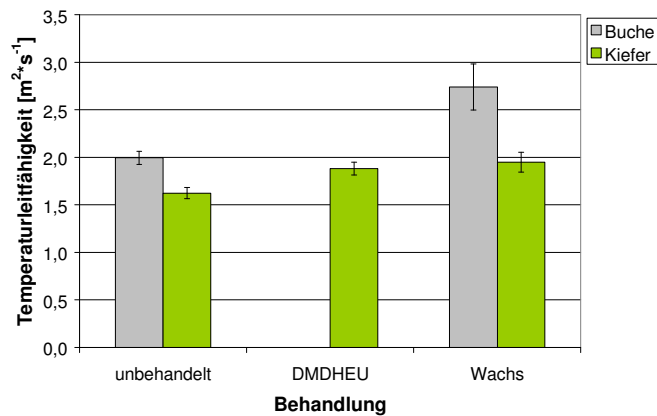
Die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes, oft mit  $\lambda$ , bezeichnet, gibt an, welche Wärmemenge  $Q$  in der Zeit  $t$  und bei einem Temperaturunterschied  $\Delta T$  durch die Fläche  $A$  strömt. Die Einheit der Wärmeleitfähigkeit, auch Wärmeleitzahl genannt, ergibt sich somit zu  $J/(K \times m \times s)$  bzw.  $W/(K \times m)$ .

Die spezifische Wärmeleitfähigkeit ist in Abbildung 26 dargestellt. Die Wärmeleitfähigkeit hängt von der Holzart, der Dichte und der Holzfeuchtigkeit ab. Die Wärmeleitfähigkeit der Buche ist ca. 30 % höher als die Wärmeleitfähigkeit von Kiefer. Die erhöhte Dichte der Prüfkörper nach der Behandlung führt zu einer verbesserten Wärmeleitfähigkeit bei allen Holzarten. Die Wärmekapazität der mit DMDHEU und Wachs behandelten Kiefer ist nicht höher als die Wärmekapazität der Buche. Aus technischer Sicht ist deshalb dieser Anstieg kein einschränkendes Kriterium, weil viele der zurzeit für den Fensterbau verwendeten Holzarten eine vergleichbare Dichte wie Buche aufweisen und deshalb vermutlich auch eine vergleichbare Wärmeleitfähigkeit zeigen. Durch angepasste Konstruktionen des Fensters (siehe Anhang: Arbeit von Variotec) z.B. durch Dämmstoffkerne in der Konstruktion, ist es möglich auch mit modifiziertem Holz passivhaustaugliche Fenster zu konstruieren.



**Abbildung 26: Spezifische Wärmeleitfähigkeit [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] bei 27°C in Abhängigkeit von Holzart und Behandlung**

Die Temperaturleitfähigkeit ist eine Materialkonstante, die zur Beschreibung der zeitlichen Veränderung der räumlichen Verteilung der Temperatur durch Wärmeleitung als Folge eines Temperaturgefälles dient. Sie verhält sich ähnlich der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , die zur Beschreibung des Energietransportes dient. In der Abbildung 27 ist die Temperaturleitfähigkeit in Abhängigkeit der Holzart und der Behandlung dargestellt. Buche weist eine höhere Temperaturleitfähigkeit auf als Kiefer. Durch die Behandlung (Wachs und DMDHEU) wird die Leitfähigkeit geringfügig aber signifikant erhöht.



**Abbildung 27: Temperaturleitfähigkeit [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ] in Abhängigkeit von Holzart und Behandlung**

## 2.7 Hydrophobierung bei Holzvernetzung

Bei der Planung des Projektes wurde erwartet, dass sich durch eine Hydrophobierung des Holzes mit Hilfe von Additiven in DMDHEU, die positiven Eigenschaften des Holzes nach der Behandlung weiter verbessern lassen. Die Voruntersuchungen an den mit Wachs behandelten Hölzern zeigten jedoch, dass durch die Hydrophobierung verschiedene andere für die Verarbeitung wichtige Eigenschaften, wie Verklebbarkeit und Beschichtbarkeit verschlechtert werden. Da das mit DMDHEU behandelte Holz ein Halbzeug ist, ist in jedem Fall eine Verklebung und auch Beschichtung notwendig. Aus diesem Grund wurde diese Zielrichtung nicht weiter verfolgt. Stattdessen wurde der Punkt der Beschichtbarkeit mit neuen angepassten Beschichtungssystemen ausführlicher untersucht als es im Voraus geplant wurde.

## 3 Anwendung

### 3.1 Herstellen von modifiziertem Holz

Im Folgenden wird die Herstellung des mit DMDHEU und Wachs modifizierten Holzes dargestellt.

#### 3.1.1 Behandlung mit DMDHEU

Die Behandlung am IfHH wird nach dem gleichen Verfahren durchgeführt wie es auch großtechnisch umgesetzt wird. Die Chargengrößen und die Abläufe unterscheiden sich, aber das Behandlungsprinzip ist vergleichbar. Es wurden mehre Chargen Kiefern behandelt. Aus diesem Holz wurden sowohl die Prüfkörper für die Laboruntersuchungen gefertigt, als auch die Fensterbauteile für die praxisnahen Versuche beim Projektpartner Variotec.

In der Abbildung 28 ist ein Prozessschema dargestellt, wie es von der BASF AG verwendet wird. Der Ablauf des Prozesses in Göttingen entspricht im Wesentlichen dem dargestellten Ablauf.

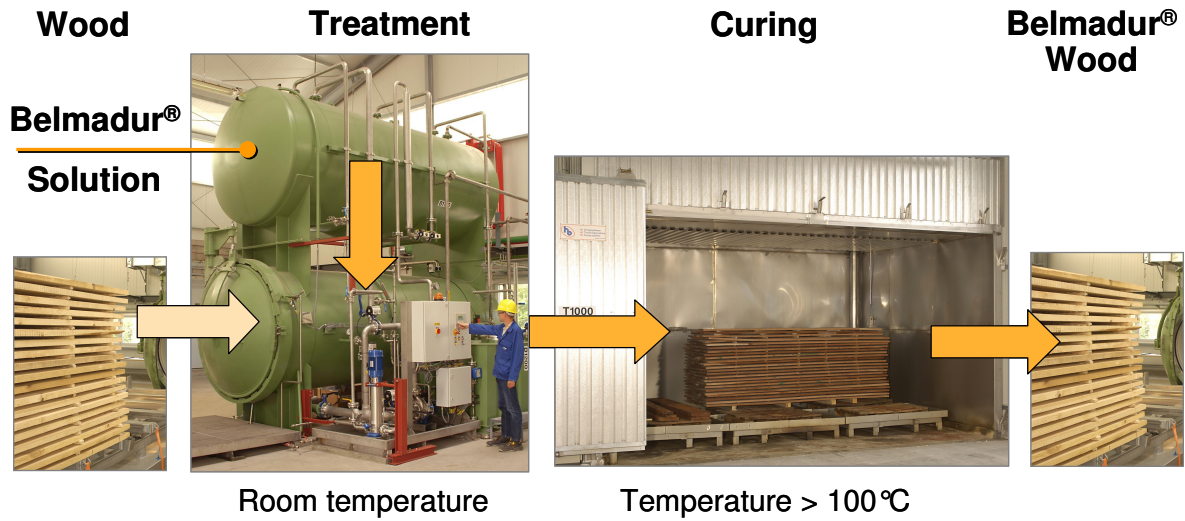


Abbildung 28: Ablauf des Prozesses zur Herstellung von Belmadur® Holz nach dem Verfahren der BASF AG

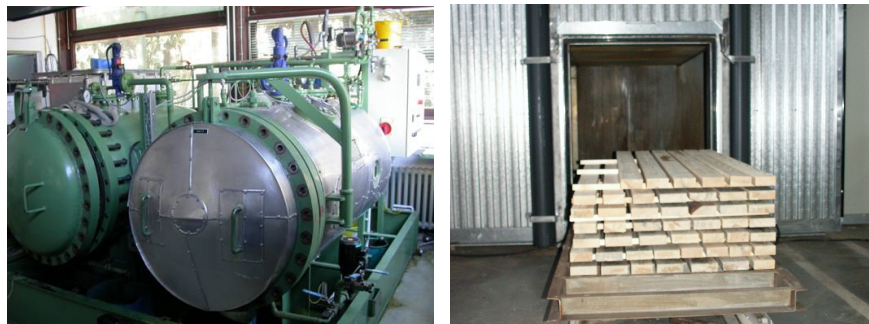


Abbildung 29: Imprägnierkessel (A) und Heißdampftrockner (B) für die Behandlung im Pilotmaßstab am IfHH

Der Prozess besteht aus mehreren Schritten:

1. Vakuum-Druck-Imprägnierung
2. Heißdampftrocknung mit Reaktion
3. Qualitätskontrolle

### 3.1.1.1 Vakuum-Druck-Imprägnierung

Dieser Prozessschritt orientiert sich an Imprägnierungen für herkömmliche wasserlösliche Holzschutzmittel. Das Holz wird im Imprägnierkessel bei Raumtemperatur für 30 min bei 60 mbar evakuiert. Anschließend erfolgt das Fluten der des Kessels mit der Imprägnierlösung, gefolgt von einer Druckphase von 12 bar für 2 h. Ein kurzes Nachvakuum 500 mbar für 15 min entfernt die überschüssige Lösung aus dem Holz. Nach dem Abpumpen der Restlösung wird das Holz aus dem Kessel entnommen.

### 3.1.1.2 Heißdampftrocknung mit Reaktion

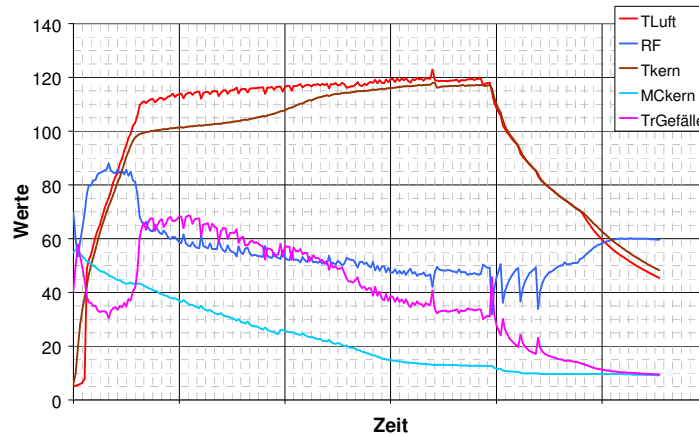
Das Holz wird direkt nach der Imprägnierung in den Holz Trockner eingebracht. Ein spezielles Programm in mehreren Phasen sorgt für die Trocknung und Reaktion des Holzes. Folgende Phasen werden im Trocknungsverlauf unterschieden:

- Aufheizen auf ca. 100 °C bei hoher Luftfeuchtigkeit
- Aufheizen auf über 100 °C und Herstellen der Heißdampf Atmosphäre
- Trocken des Holzes und Reaktion durch Verweilen des Holzes in der Heißdampf Atmosphäre
- Abkühlen des Holzes auf weniger als 100 °C bei Sattdampf
- Abkühlen des Holzes auf ca. 50 °C
- Konditionieren des Holzes

In der Abbildung 30 ist solch ein Prozessverlauf graphisch dargestellt. Die einzelnen Phasen lassen sich nicht immer deutlich voneinander unterscheiden. Zu beachten ist, dass die Holzfeuchtigkeit nicht exakt gemessen wird, weil die Messung bei hohen Temperaturen und/oder hoher Feuchtigkeit ungenau ist und weil durch die DMDHEU-Lösung die Leitfähigkeit des Holzes und damit auch die gemessene Feuchtigkeit verändert wird. Der Temperaturverlauf und die Dauer der



Trocknungs- und Reaktionsphase sind im Wesentlichen abhängig von der Holzart und der Dimension des Holzes. Eine gezielte Optimierung wurde in diesem Projekt nicht durchgeführt, der Verlauf entspricht der Standardbehandlung des lfHH.



**Abbildung 30: Prozessablauf der Heißdampftrocknung und Reaktion während der Behandlung von Kiefernspiltholz für das Projekt**

### 3.1.1.3 Qualitätskontrolle

Eine Qualitätskontrolle des behandelten Holzes im Anschluss an die Trocknung und Reaktion ist unerlässlich. Es müssen dabei verschiedene Qualitätskriterien überprüft werden:

- Verteilung des DMDHEU im Holz
- Fixierung des DMDHEU
- Trocknungsqualität des Holzes
  - i. Holzfeuchtigkeit und Verteilung
  - ii. Verschalung oder Verformung
  - iii. Risse

Die Transportvorgänge im Holz während der Trocknung sind Bewegungen des Wassers von innen nach außen, die durch kapillare Zugkräfte und Diffusion hervorgerufen werden. Das im nicht ausreagierten Zustand wässrige DMDHEU

könnte dabei mittransportiert werden, was zu einer Ungleichverteilung im Holz führt.

Für die Analyse der Fixierung des DMDHEU wurden verschiedene Verfahren verwendet. 1. Extraktion des Holzes mit HCl und Analyse der Formaldehydgehaltes und 2. Bestimmung des Stickstoffgehaltes vor und nach einer Auswaschung mit Wasser. Die Methodik beider Verfahren wurde durch die Promotion von Dr. Falko Wepner untersucht (DBU-Stipendium). Ein Vergleich beider Verfahren (Abbildung 31) zeigt, dass verschiedene Resultate erzielt werden. Die Methode der Säureextraktion erreicht eine mittlere Fixierung von  $69 \% \pm 3 \%$ , während die Stickstoffanalyse eine Fixierung von durchschnittlich  $82 \% \pm 7 \%$  aufweist. Erklärt wird diese Differenz dadurch, dass bei beiden Meßmethoden unterschiedliche systematische und zufällige Fehler die Ergebnisse beeinflussen. Es ist notwendig bestimmte fehlerbehaftete Annahmen zu treffen um die Daten als Fixierung interpretieren zu können.

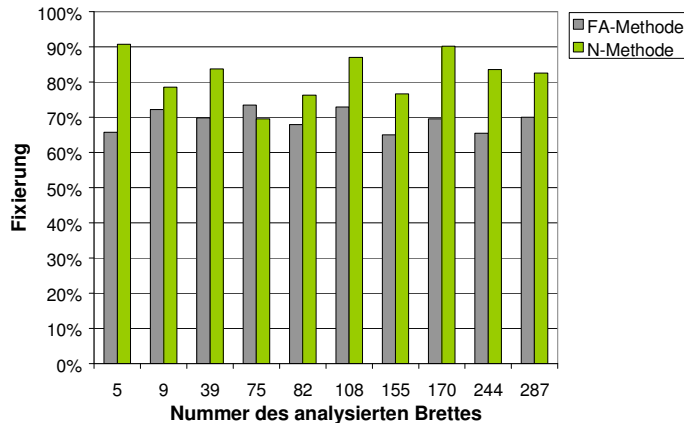
Aus anderen Untersuchungen zeigte sich, dass die über die Stickstoffmethode berechnete Fixierung genauere Angaben über die Fixierung liefert. Von einer ausreichenden Fixierung des DMDHEU im Holz wird ausgegangen, wenn mehr als 80 % Fixierung nach dieser Methode erreicht werden.

Die Verteilung des DMDHEU im Holz wird überprüft, in dem Proben aus verschiedenen Bereichen entnommen werden:

- 1) Bretter aus verschiedenen Positionen im Trockner
- 2) Proben aus der Brettmitte und den Enden
- 3) Oberflächen nahe Proben und Proben aus dem Brettkern

Es wurden keine Unterschiede bei der Verteilung oder Fixierung gefunden bei Brettern, die sich an verschiedenen Positionen im Trockner während der Trocknung befanden. Bei der Analyse der Verteilung des DMDHEU innerhalb eines Brettes wurde festgestellt, dass etwas höhere Konzentrationen an DMDHEU in den äußeren Schichten sind (Brettenden und oberflächennahe Schichten).

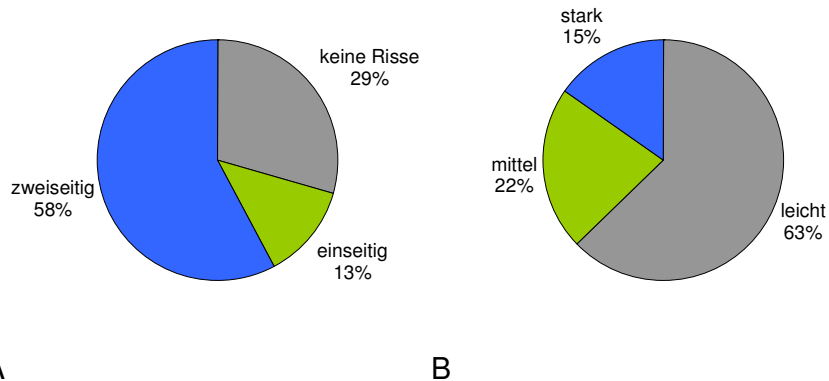
Dieser Unterschied in der Chemikalienverteilung beeinflusst jedoch nicht nachweisbar die Ergebnisse der folgenden Tests.



**Abbildung 31: Vergleich der Fixierung des Probenmaterials nach verschiedenen Methoden.**  
**FA-Methode: Extraktion und Messung des Formaldehyds; N-Methode: Extraktion und Messung des N-Gehaltes**

Der Prozess für die Behandlung von Holz mit DMDHEU im Heißdampftrockner weist einen anderen Verlauf auf, als ein Prozess für die herkömmliche Trocknung von Holz mit überhitztem Heißdampf. Die Prozesse Trocknung und Reaktion finden während der Behandlung im Heißdampf gleichzeitig statt. Die Qualität der Trocknung hat einen starken Einfluss auf das Holz nach dem Prozess. Deshalb wird der Reaktionsprozess regelmäßig bezüglich der Trocknung evaluiert.

In Abbildung 32 ist die Qualität der Trocknung bezüglich der Risse am Beispiel eines nicht optimalen Prozesses dargestellt. Zwei Drittel des Holzes weisen Oberflächenrisse auf, die zu einem Drittel eine mittlere bis starke Ausprägung haben. Das Holz aus diesem Prozess war aus diesem Grund nur eingeschränkt verwendbar.



**Abbildung 32 : Klassifizierung von Rissen auf der Holzoberfläche nach der Behandlung mit DMDHEU. A: Generelles Vorkommen von Oberflächenrissen B: Ausprägung der Stärke der Risse**

Holz welches grundsätzlich frei von Rissen ist, ist aufgrund der Wuchsmerkmale und des anspruchsvollen Prozesses zurzeit noch nicht herstellbar. Durch die Optimierung des Prozesses ist es aber möglich, Holz herzustellen, welches weniger als ein Drittel Oberflächenrisse in nur leichter Ausprägung aufweist.

### 3.1.2 Wachsbehandlung

Zu Beginn dieses Projektes wurden unterschiedliche Wachse der Firma Clariant AG auf die Eignung für die Behandlung von Holz untersucht. Die Wachse wurden in Zusammenarbeit mit Clariant entsprechend nach Tropfpunkt, Viskosität und chemischer Konstitution ausgewählt. Die ausgesuchten Produkte sind in der folgenden Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht über die verwendeten Wachse

Bezeichnung	Produktname	Typ	Tropfpunkt	Viskosität
Wax 1	Licowax E	Esterwax	79-83°C	30mPa s
Wax 2	TP Licocene 1302	PP Polypropylenewax	90°C	200mPa s
Wax 3	Licowax PED 522	Polyetylenewax	102-107°C	300mPa s
Wax4	TP Licocene 3401	PE Polyethylenewax	114°C	550mPa s

In einem Vorversuch wurde Kiefer mit diesen Wachsen imprägniert und entsprechend der Gewichtszunahme ausgewertet (Abbildung 33). Die Imprägniertemperatur lag dabei ca. je 20 °C über dem Tropfpunkt des Wachses. Die Imprägnierung wurde an würfelförmigen Prüfkörpern mit einer Kantenlänge von 40 mm durchgeführt, bei 50 mbar Vakuum für 30 min und 12 bar Druck für 2 h.

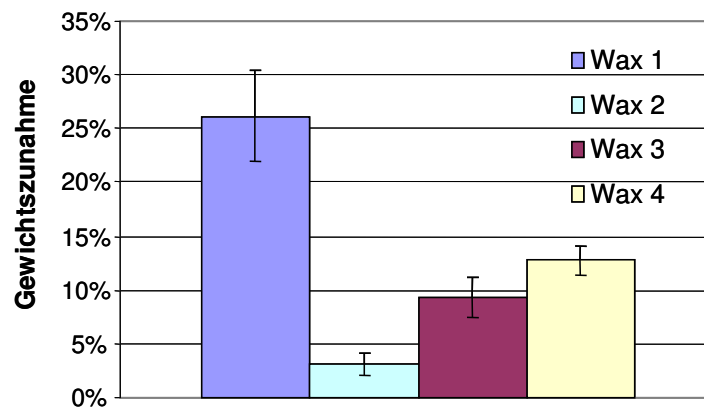


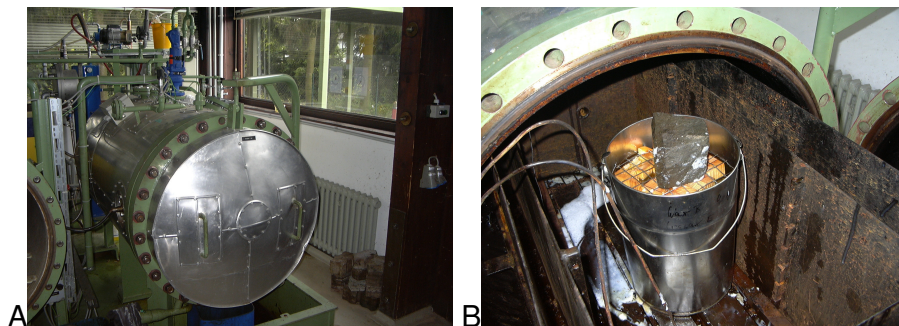
Abbildung 33: Gewichtszunahme von Kiefersplintholz nach der Imprägnierung mit verschiedenen Wachsen

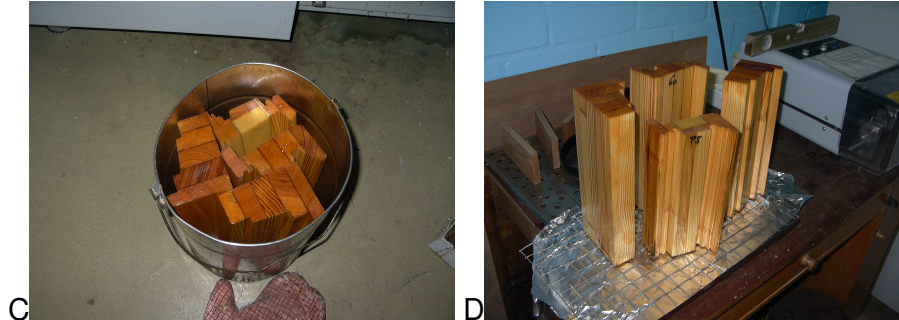
In diesem Vorversuch zeigt sich, dass die Gewichtszunahme je nach verwendetem Wachs variiert. Nur Wax 1 (Licowax E) erreicht in diesem Versuch eine ausreichende Gewichtszunahme, so dass alle weiteren Untersuchungen mit diesem Wachs durchgeführt werden.

Licowax E ist ein Esterwachs, hergestellt aus Montanwachs, aus zweiwertigen Alkoholen, das über einen Tropfpunkt von ca. 82 °C, eine Säurezahl von etwa 18 mg KOH/g und eine Verseifungszahl von 145 mg KOH/g verfügt. Die Dichte liegt bei einer Temperatur von 23 °C bei 1,02 g/cm<sup>3</sup> und die Viskosität beträgt ca. 30 mPa\*s bei 100 °C. Das Wachs hat eine blassgelbe Färbung.

### 3.1.2.1 Prozessablauf im Labor/Pilotmaßstab

Die Prüfkörper werden 24 h bei 40 °C in einem Trockenschrank vorgetrocknet und anschließend mindestens einen Tag bei 103 °C darr getrocknet. Das Wachs wird auf 82 °C erhitzt, um es zu verflüssigen. Die Prüfkörper werden in dem flüssigen Wachs platziert und in einem auf 110 °C vorgeheizten Druck-/Vakuumkessel für 0,5 h bei 400 mbar imprägniert. Anschließend wird für eine halbe Stunde ein Überdruck von 10,5 bar angelegt.





**Abbildung 34: Prozessablauf bei der Behandlung mit Wachs. A: Vorheizen von Wachs und Holz, B: Imprägnieren bei Vakuum und Druck, C: Heißes Holz im Wachs nach der Imprägnierung, D: Abtropfen und Oberflächen reinigen**

Die Prüfkörper werden aus dem flüssigen Wachs entfernt und verbleiben nun noch zum Abkühlen bei einer Temperatur von 70 °C im Trockenschrank. Die Qualität der Behandlung wird anhand der Gewichtszunahme des Holzes mit Wachs beurteilt. Bei einer Gewichtszunahme von mehr als 30 % wird von einer ausreichenden Eindringung des Wachses in die Prüfkörper ausgegangen.

Für die hier durchgeführten Untersuchungen wird eine Vollimprägnierung der Prüfkörper angestrebt, um die Eigenschaften an einem gleichmäßigen Material beurteilen zu können.

Unter Praxisbedingungen soll keine Vollimprägnierung durchgeführt werden, um Material einzusparen. Die Eigenschaften der Bauteile verhalten sich vergleichbar, wenn eine Schutzschicht aus Wachs eine gewisse Eindringtiefe im Holz erreicht hat.

### 3.2 Verklebung zu Lamellen

Die Verklebung des modifizierten Holzes zu Lamellen wurde nach dem Standard EN 301 in Verbindung mit EN 302-1 (Klebstoffe für tragende Anwendungen) untersucht. Im Gegensatz zu dem Standard wurde hier nicht der Klebstoff untersucht, sondern das System aus modifiziertem Holz und Klebstoff. Das Basismaterial war daher nicht wie im Standard vorgeschrieben Buchenholz,

sondern jeweils das modifizierte Holz. Bei der Bewertung der Ergebnisse aus diesen Versuchen müssen diese geänderten Bedingungen berücksichtigt werden. Eine ausführliche Beschreibung des Versuches konnte bis zur Fertigstellung dieses Berichtes nicht mehr erfolgen, da die Ergebnisse erst kurz vorher vorlagen.

Für die Verklebung wurden verschiedene Klebstoffe verwendet. In der folgenden Tabelle 3 befindet sich eine Übersicht über die Produkte.

**Tabelle 3: Übersicht über die verwendeten Klebstoffe**

Bez.	Art	Hersteller	Produkt	Verwendung in
PVAc	Polyvinylacetat mit Härter	Jowat	Jowacoll 102.26	Test 1
MUF	Melamin-Harnstoff-Formaldehyd / Härter	Casco	1244 / 2542	Test 1
CA	Hydroxymethyliertes Resorcinol	IfHH	Coupling Agent / Haftvermittler	Test 1
MUF	Melamin-Harnstoff-Formaldehyd	Dynea	Prefere 4535	Test 2
PRF	Phenol-Resorzinol-Formaldehyd	Dynea	Prefere 4040	Test 2
EPI	Emulgiertes Polymeres Isocyanat	Dynea	Prefere 6151	Test 2

Die zu untersuchenden Kombinationen aus Klebstoff und modifiziertem Holz wurden nach Anweisung des Herstellers verklebt. Anschließend wurden die Prüfkörper nach EN 302-1 beansprucht, bevor die Zugfestigkeit der Klebefuge gemessen wurde.



In der EN 302-1 werden folgende Beanspruchungen aufgeführt (Tabelle 4):

**Tabelle 4: Übersicht der Beanspruchung der Verklebung nach EN 302-1**

Belastung	Behandlung	Geforderte Bruchkraft
A1	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 7 Tage in Normklima (20 °C; 65% rel. F.)</li> </ul>	2000 N
A2	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 7 Tage in Normklima (20 °C; 65% rel. F.)</li> <li>○ 4 Tage untergetaucht in Wasser (15 °C)</li> </ul>	1200 N
A3	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 7 Tage in Normklima (20 °C; 65% rel. F.)</li> <li>○ 4 Tage untergetaucht in Wasser (15 °C)</li> <li>○ 7 Tage Trocknung bei Normklima</li> </ul>	1600 N
A4	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 7 Tage in Normklima (20 °C; 65% rel. F.)</li> <li>○ 6 h untergetaucht in Wasser (kochend)</li> <li>○ 2 h untergetaucht in Wasser (15 °C)</li> </ul>	1200 N
A5	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 7 Tage in Normklima (20 °C; 65% rel. F.)</li> <li>○ 6 h untergetaucht in Wasser (kochend)</li> <li>○ 2 h untergetaucht in Wasser (15 °C)</li> <li>○ 7 Tage Trocknung bei Normklima</li> </ul>	1600 N

Von den, in der EN 302-1 vorgeschriebenen, Belastungen wurden im ersten Test die Belastungen A1 und A2 untersucht und im zweiten Test nur A2, weil A1 leicht von den Klebstoffen erreicht wurde.

In der Abbildung 35 ist die Bruchkraft der Zugscherbruchkraft nach der Belastung A1 dargestellt. Die rote Linie markiert den vom Standard geforderten Wert. Zwischen den Klebstoffen, Haftvermittler und Behandlungen ist kein Unterschied zu erkennen. Die vom Standard geforderten Werte werden bei allen Prüfungen

nicht erreicht. Die Ursache für die geringe Zugscherbruchkraft liegt darin begründet, dass statt Buche, wie im Standard vorgeschrieben, Kiefersplintholz verwendet wurde. Dieses Kiefersplintholz weist eine geringe Holzfestigkeit auf als Buche, daher können keine hohen Werte bei der Zugscherbruchkraft erreicht werden.

Die Abbildung 36 zeigt, dass bei nahezu allen unbehandelten Prüfkörpern ein Holzbruchanteil von 100 % erreicht wurde. Bei der Prüfung wurde deshalb die maximal mögliche Kraft für das Holz überschritten und nicht für den Klebstoff. Die mit Wachs behandelten Prüfkörper zeigen einen wesentlich geringeren Holzbruchanteil, der zwischen 10 % und 40 % liegt. Allerdings ist die Bruchkraft nicht signifikant unterschiedlich zu dem unbehandelten Holz.

Nach der Belastung der Klebefuge durch die Belastung A1 klebt das mit Wachs behandelte Holz vergleichbar gut wie das unbehandelte Holz. Die Verwendung des Haftvermittlers wirkt sich nur auf den Holzbruchanteil der mit Wachs behandelten Prüfkörper aus. Der Holzbruchanteil bei diesen Behandlungen steigt um 10 % bzw. 30 %.

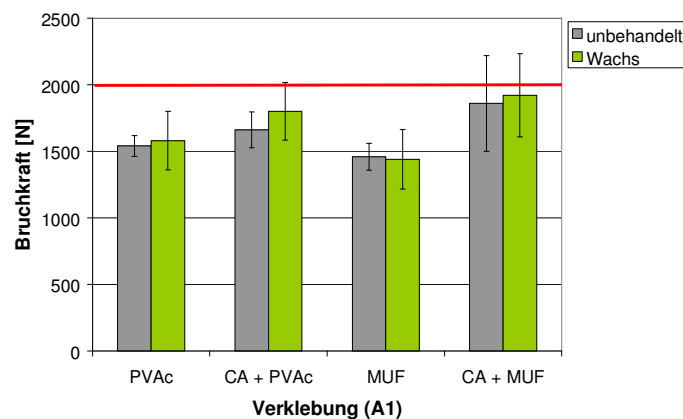


Abbildung 35: Bruchkraft [N] der Klebefuge nach EN 302-1 A1

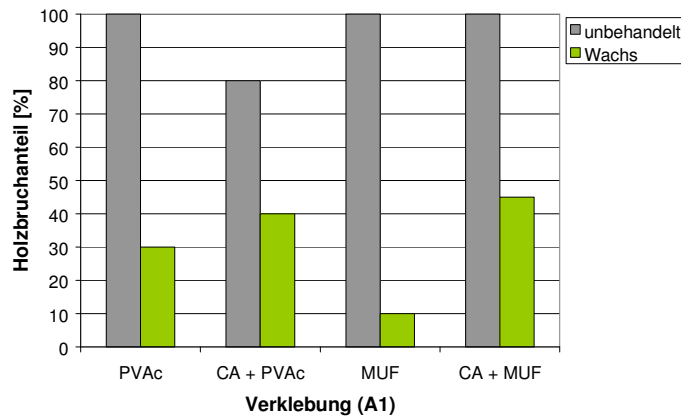


Abbildung 36: Holzbruchanteil [%] der Klebefuge nach EN 302-1/ A1

Nach der Belastung A2 werden die Prüfkörper im feuchten, bzw. nassen Zustand geprüft. Die geforderte Zugscherbruchkraft ist deshalb auch deutlich geringer. In der Abbildung 37 ist die Zugscherbruchkraft für das verklebte Kiefernholz nach der Belastung A2 dargestellt. Das unbehandelte Holz erreicht bei der Behandlung mit PVAc die geforderte Mindestzugscherbruchkraft von 1200 N. Die Verwendung des Haftvermittlers bewirkt, dass die Verklebung mit PVAc und Haftvermittler die geforderte Kraft erreicht. Die Bruchkraft der mit Wachs behandelten Prüfkörper ist deutlich geringer. Die einzige Verklebung, die die geforderte Kraft von 1200 N erreicht, ist die Verklebung mit MUF und Haftvermittler.

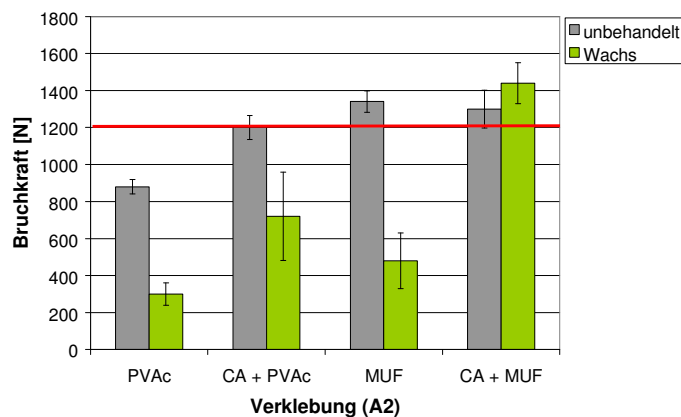


Abbildung 37: Bruchkraft [N] der Klebefuge nach EN 302-1 A2

Die Klebefuge wird sowohl beim unbehandelten Holz als auch bei dem mit Wachs behandelten Holz stark beansprucht. Diese Beanspruchung zeigt sich besonders in dem Holzbruchanteil (Abbildung 38). Im Vergleich zur Beanspruchung A1 sinkt der Holzbruchanteil. Bei dem unbehandelten Holz ist noch ein Holzbruchanteil zwischen 30 % und 100 % messbar. Das mit Wachs behandelte Holz erreicht nur bei der Verklebung mit MUF und Haftvermittler einen höheren Holzbruchanteil.

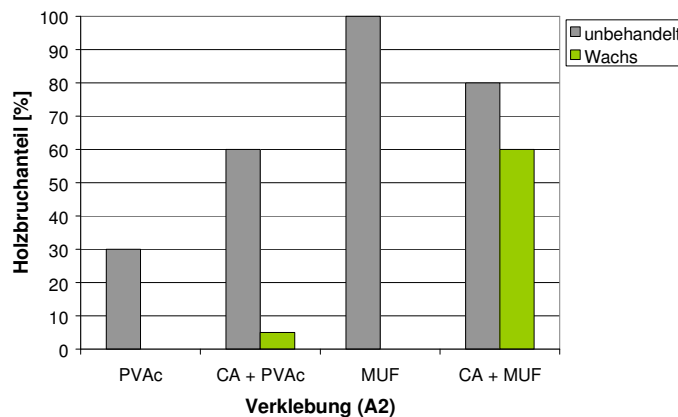


Abbildung 38: Holzbruchanteil der Klebefuge nach EN 302-1/ A2

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die Verklebung von wachsbehandelten Prüfkörpern mit dem MUF-Klebstoff, bei Verwendung eines geeigneten Haftvermittlers, erfolgreich ist. Diese Ergebnisse sollten noch anhand der weiteren Belastungen A3 bis A5 überprüft werden und mit anderen Tests wie z.B. EN 302-2 und EN 302-4 bestätigt werden.

In der Abbildung 39 ist die Wasseraufnahme dargestellt, die die Prüfkörper nach der Belastung A2 zeigten. Bei den mit Wachs behandelten Prüfkörpern ist die Wasseraufnahme im Gegensatz zum unbehandelten Holz wesentlich verringert.

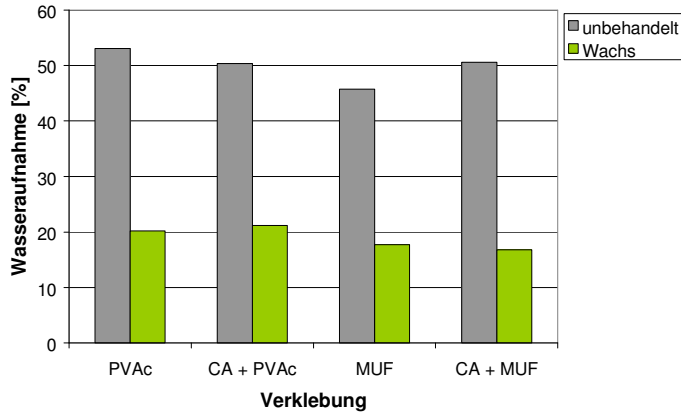


Abbildung 39: Wasseraufnahme [%] nach A2 Belastung.

In einer weiteren Untersuchung wurden verschiedene andere Klebstoffe untersucht. Es wurde in diesen Tests ausschließlich die Belastung A2 untersucht, um ein schnelles Screening verschiedener Klebstoffe zu ermöglichen. Die maximale Zugscherbruchkraft dieser Untersuchung ist in Abbildung 40 dargestellt. Das unbehandelte Holz zeigt sowohl bei MUF als auch bei PRF eine ausreichend hohe Bruchkraft.

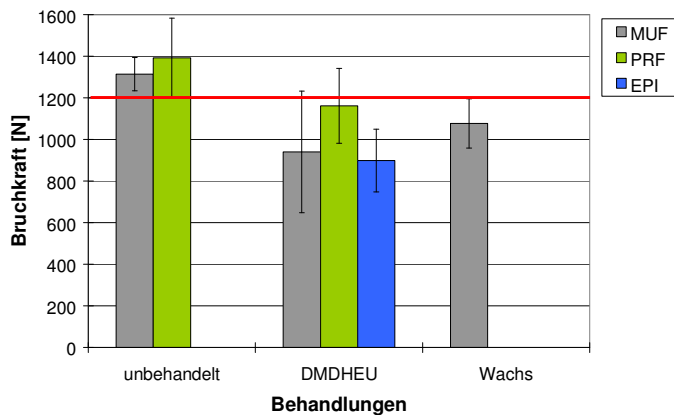


Abbildung 40: Bruchkraft [N] der Klebefuge nach EN 302-1 A2

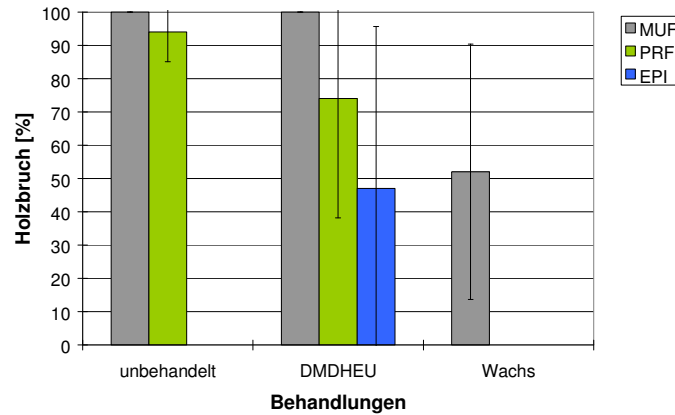


Abbildung 41: Holzbruchanteil der Klebefuge nach EN 302-1/ A2

Die Holzbruchanteile (Abbildung 41) sind ebenfalls bei 100 % bzw. 95 %.

Das mit DMDHEU behandelte Holz erreicht die geforderte Bruchkraft von 1200 N nicht. Allerdings ist der Holzbruchanteil relativ hoch (bei MUF bei 100 %), so dass vermutete werden kann, dass die Festigkeit des Holzes in diesem Fall geringer war als die Festigkeit der Klebefuge. Das mit Wachs behandelte Holz, welches mit MUF verklebt wurde erreicht die geforderte Bruchkraft nicht. Die erreichte Bruchkraft ist aber im Vergleich zu dem vorher durchgeführten Versuch (Abbildung 37 und Abbildung 38; MUF von Casco) wesentlich höher. Der Holzbruchanteil ist nach der Verklebung mit dem MUF von Dynea höher.

Durch die Verwendung von Haftvermittlern wird die Verklebbarkeit weiter gesteigert werden können. Als Schlussfolgerung für dieses Projekt ist zu sagen, dass die Verklebung von mit Wachsbehandeltem Holz gegenüber unbehandeltem Holz relativ kompliziert ist, aber durch die Verwendung von geeigneten Klebstoffen und geeigneten Haftvermittlern kann eine ausreichend feste Verklebung sichergestellt werden.

Die relativ geringe Klebefestigkeit des mit DMDHEU behandelten Holzes ist sollte noch einmal überprüft werden, da aus anderen Projekten bekannt ist, dass die Verklebung von mit DMDHEU behandeltem Holz in der Regel unproblematisch ist.

Weitere Untersuchungen nach EN 301 und EN 302 sollten durchgeführt werden, da die Verklebung eine Schlüsseltechnologie bei der Herstellung von Fenstern ist.

### 3.3 Beschichtungstests

Verschiedene Umwelteinflüsse wirken auf Holz im Außenbereich. UV-Licht, Wasser, Temperaturschwankungen und mechanische Einflüsse greifen die Oberfläche des Holzes an. Obwohl die Bewitterung vornehmlich die Holzoberfläche betrifft, hat sie auch Auswirkungen auf die Haltbarkeit von Beschichtungssystemen. Durch ständige feuchtigkeitsbedingte Dimensionsänderungen des Holzes kommt es zu Rissen in Beschichtung und Holz und somit zu Angriffsflächen für holzabbauende Mikroorganismen.

Bei zwei Beschichtungssystemen wurde zusätzlich ein Primer auf Alkydharzbasis verwendet.

**Tabelle 5: Übersicht über verwendete Beschichtungssysteme**

Hersteller	Produktname	Lösemittel	Bezeichnung	Auftrag
Akzo Nobel	Glasurit Eco High Solid	Wasser	spezial Polymerharz	Spritzen 3Mal
Akzo Nobel	Ratio Fensterweiß	Wasser	Mehrphasenpolymer	Spritzen 3Mal
Akzo Nobel	WF 360	Wasser	Acrylat 1	Spritzen 3Mal
Akzo Nobel	WF 380	Wasser	Acrylat 2	Spritzen 3Mal
Akzo Nobel	Rubbol SP 110	Wasser	Primer	Streichen 1 Mal

### 3.3.1 QUV-Bewitterung

Die Schnellbewitterung, auch QUV-Test genannt, wird in Anlehnung an prEN 927-6 (2002) durchgeführt. Bei diesem Verfahren werden im Labor Prüfkörper künstlich bewittert und so der Einfluss von Bewitterungsfaktoren auf das Holz simuliert.

Vor der eigentlichen Versuchsdurchführung wird die Beschichtung visuell beurteilt und zur einfacheren Datenerfassung am Computer eingescannt (Canon Scanner, 300 dpi), wobei besonders auf Fehler in der Beschichtung zu achten ist. Vor und auch nach der Bewitterung werden die Massen der Prüfkörper aufgenommen, um abschließend die Feuchtaufnahme während der Bewitterung zu berechnen.

Im QUV-Gerät sind die Prüfkörper pro Zyklus den folgenden Beanspruchungen ausgesetzt:

- 1) 24 h Kondensation bei  $45 \pm 3$  °C
- 2) 2,5 h UV-Belastung bei  $60 \pm 3$  °C
- 3) 0,5 h Beregnung

Die Schritte 2) und 3) werden hierbei 48 Mal wiederholt. Ein vollständiger Zyklus dauert 168 Stunden, der 5 Mal wiederholt wird.

Nach der künstlichen Bewitterung werden die Prüfkörper nach folgenden Kriterien untersucht.

- Bewertung des Rissgrades (DIN ISO 4628-4, 1997)
- Gewichtsänderung

Der Rissgrad bewertet die Risse in einer Beschichtung nach Menge, Größe und Tiefe (DIN ISO 4628-4, 1997). Die Risse werden visuell beurteilt und den Rissgraden 0 bis 5 zugeordnet. Dabei werden die Risse mit Bildern in der Norm verglichen und durch die Verwendung eines Bewertungssystems (siehe Tabelle 6 und Tabelle 7) bewertet.



**Tabelle 6: Bewertungsschema der Rissmenge (in Anlehnung an DIN ISO 4628-4,1997 )**

Kennwert	Menge der Risse
0	keine erkennbaren Risse
1	einzelne Risse, gerade erkennbar
2	wenige Risse, deutlich erkennbare Menge
3	mäßig viele Risse, mittlere Menge
4	viele Risse, große Menge
5	sehr viele Risse, sehr große Menge

**Tabelle 7: Bewertungsschema der Rissbreite (in Anlehnung an DIN ISO 4628-4, 1997)**

Kennwert	Rissbreite
0	keine sichtbaren Risse bei 10-facher Vergrößerung
1	gerade sichtbare Risse bei bis zu 10-facher Vergrößerung
2	gerade sichtbare Risse mit bloßem Auge
3	deutlich sichtbare Risse mit bloßem Auge
4	breite Risse, bis zu 1mm breit
5	sehr breite Risse, mehr als 1 mm breit

Die Risstiefe wird nur angegeben, wenn Angaben dazu möglich sind. Hierbei wird unterschieden in:

- a) Oberflächenrisse
- b) Risse, die durch die Deckschicht gehen, aber darunterliegende Schichten unberührt lassen
- c) Risse, die durch das gesamte Beschichtungssystem gehen.

In der folgenden Darstellung (Tabelle 8) sind die Prüfkörper nach den fünf Bewitterungszyklen dargestellt. Um die Beanspruchung während dem gesamten Bewitterungsverlauf zu verdeutlichen, sind im Anhang Darstellungen der einzelnen Beschichtungssysteme von Zyklus 1-5 beigefügt.




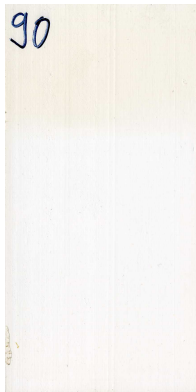
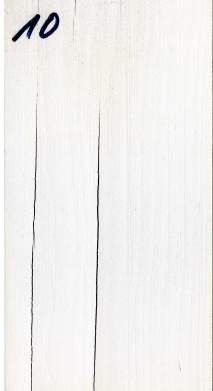

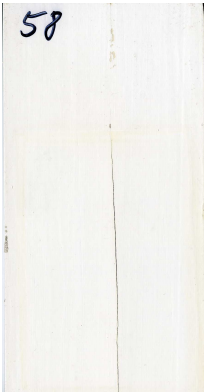
Es wird deutlich, dass die Prüfkörper die in ihrem Beschichtungssystem mit einem Primer vorgrundiert wurden einen besseren Zustand aufweisen, als die Prüfkörper bei denen auf einen Primer verzichtet wurde. Während bei den Beschichtungssystemen ohne Primer nach den 5 Bewitterungszyklen die Holzstruktur deutlich zu erkennen ist, weisen die Beschichtungen mit Primer eine glatte und intakte Oberfläche auf.





Auffällig bei dieser Untersuchung ist die deutliche Verfärbung aller Beschichtungssysteme auf den mit Wachs behandelten Prüfkörper. Schon nach dem 2. Bewitterungszyklus setzt eine bräunliche Verfärbung ein. Auch die positive Auswirkung der Beschichtungssysteme mit Primer auf die Wetterfestigkeit, ist bei den wachsbehandelten Prüfkörpern nicht vorhanden. Während die Oberfläche zwar eine glatte Struktur aufweist, ist die Beschichtung jedoch beschädigt. Risse sind durch das gesamte Beschichtungssystem und die Holzstruktur aufgetreten, die einen möglichen Angriffspunkt für holzerstörende biotische Faktoren bieten. Die größte Beständigkeit gegen Rissbildung hat in dieser Untersuchung das Beschichtungssystem spezial Polymerharz mit Primer.

Auffällig ist, dass die Prüfkörper mit Rissen schon nach dem 1. Bewitterungszyklus eine Rissbildung aufweisen. Bei der üblichen

Versuchsdurchführung der künstlichen Bewitterung ist solch eine frühe Beschädigung normalerweise nicht sichtbar.

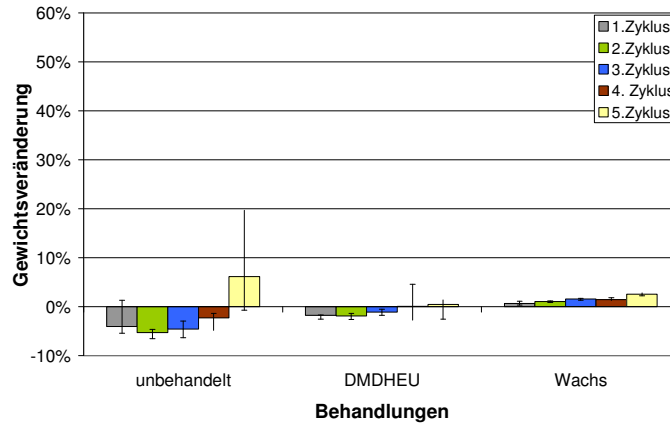
**Tabelle 8: Darstellung der beschichteten Prüfkörpern nach 5 Bewitterungszyklen**

	Mehrphasen Polymer	Acrylat 1	Primer / Acrylat 2	Primer / sp. Polymerharz
<b>Unbehandelte Kiefer</b>	<p>20</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Holzstruktur sichtbar,</li> <li>- Rissgrad 2/3 c</li> </ul>	<p>42</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Holzstruktur sichtbar</li> <li>- Rissgrad 2/3 b-c</li> </ul>	<p>65</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- glatte Oberfläche</li> <li>- Rissgrad 1/3 c</li> </ul>	<p>90</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- glatte Oberfläche</li> <li>- Rissgrad 0</li> </ul>
<b>DMDHEU Kiefer</b>	<p>10</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Holzstruktur erkennbar</li> <li>- Rissgrad 1/3 c</li> </ul>	<p>34</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Holzstruktur erkennbar</li> <li>- Rissgrad 1/3 c</li> </ul>	<p>58</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- glatte Oberfläche</li> <li>- Rissgrad 1/3 c</li> </ul>	<p>82</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- glatte Oberfläche</li> <li>- Rissgrad 0</li> </ul>

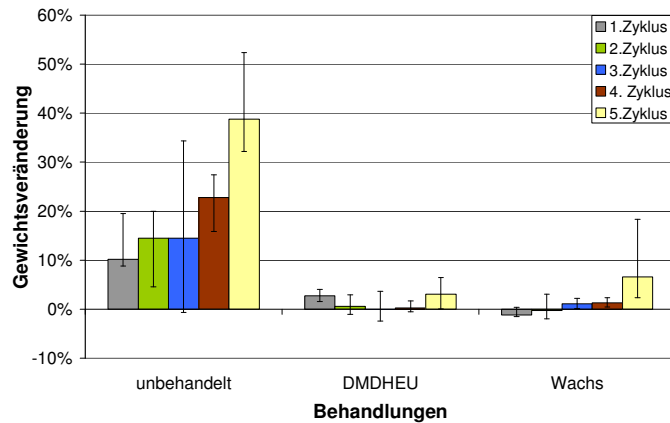
Wachs Kiefer	 <p>3</p>	 <p>25</p>	 <p>50</p>	 <p>79</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dunkelfärbung</li> <li>- Rissgrad 2/4 c</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dunkelfärbung</li> <li>- Rissgrad 1/3 c</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dunkelfärbung</li> <li>- Rissgrad 3/3</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dunkelfärbung</li> <li>- glatte Oberfläche</li> <li>- Rissgrad 3/2 a</li> </ul>

Die Feuchteaufnahme der unbehandelten Prüfkörper während der Bewitterung ist deutlich höher, als bei modifizierten Prüfkörpern. Dies ist bei allen unbehandelten Prüfkörpern zu beobachten, besonders auffällig ist sie jedoch bei den Beschichtungssystemen ohne Primer. Hier kommt es nach dem 5. Bewitterungszyklus bis zu einer 40 %-igen Gewichtszunahme (Abbildung 43 und Abbildung 44).

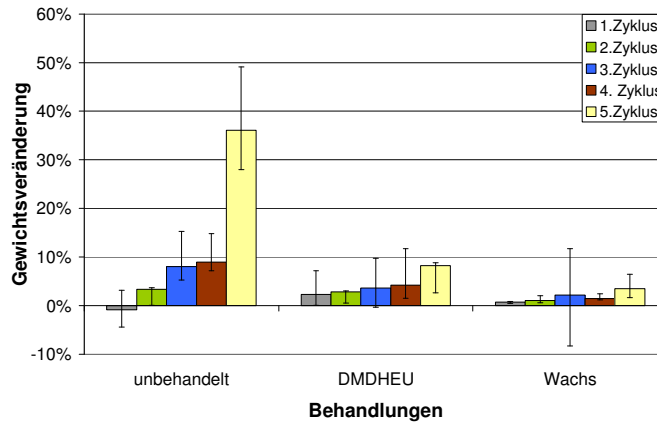
Die modifizierten Prüfkörper zeichnen sich durch eine sehr geringe Gewichtsveränderung aus. Aber auch hier können diese positiven Eigenschaften von einer Beschichtung mit Primer unterstützt werden. Die Gewichtsveränderungen der mit Primern beschichteten modifizierten Prüfkörper (Abbildung 42 und Abbildung 45) sind deutlich niedriger als bei den Beschichtungen ohne Primer.



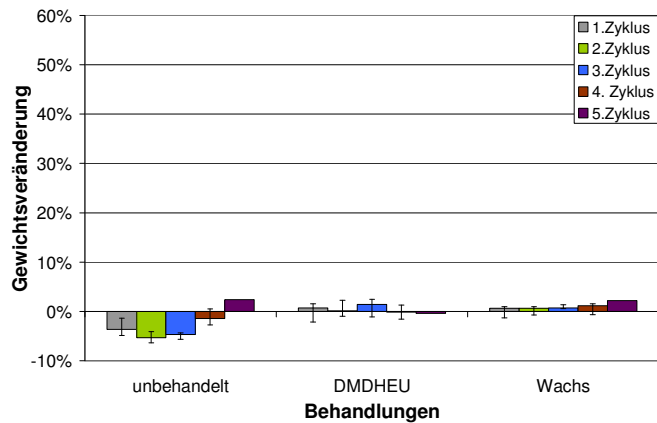
**Abbildung 42: Gewichtsveränderung während 5 Bewitterungszyklen, Beschichtungssystem Primer / sp. Polymerharz**



**Abbildung 43: Gewichtsveränderung während 5 Bewitterungszyklen, Beschichtungssystem Mehrphasenpolymer**



**Abbildung 44: Gewichtsveränderung während 5 Bewitterungszyklen, Beschichtungssystem Acrylat 1**



**Abbildung 45: Gewichtsveränderung während 5 Bewitterungszyklen, Beschichtungssystem Primer / Acrylat 2**

Für die Beschichtungsversuche dieses Projektes wurden weißfarbige Beschichtungssysteme verwendet. Diese Farbwahl ist durch die höhere Beständigkeit von hellen Beschichtungen begründet. Je heller eine Beschichtung ist, desto geringer ist die Temperaturentwicklung, die bei direkter UV-Bestrahlung der Prüfkörper entsteht. Dunkle Beschichtungen können durch Sonneneinstrahlung Oberflächentemperaturen bis ca. 80 °C verursachen. Die

erreichten Temperaturen haben verschiedene Auswirkungen auf das verbaute Holz, wie z.B. verstärkter Harzaustritt oder Spannungen im Holz.

### 3.3.2 Haftfestigkeitstests

Die Adhäsionseigenschaften einer Beschichtung wird über die Haftfestigkeit ermittelt. Diese Haftfestigkeit wird mittels Abreißversuchen untersucht, die nach der in EN ISO 4624 (2003) beschriebenen Methode durchgeführt werden, dem so genannten Dollytest. Dabei wird die minimale Zugspannung gemessen, die erforderlich ist, um die Beschichtung senkrecht zum Substrat abzutrennen. Eine weitere Möglichkeit, die Haftfestigkeit von Beschichtungen zu beurteilen, ist der Gitterschnitttest gemäß DIN EN ISO 2409, (1992). Hierbei wird nicht die Abreißkraft gemessen, sondern die Haftfestigkeit der Beschichtung wird rein visuell bewertet. Im Folgenden werden beide Methoden näher erläutert.

#### Dollytest

Das Zugprüfgerät für die Bestimmung der Haftfestigkeit ist ein Posi-Test<sup>®</sup> Pull-Off Adhesion Tester (De Felsko Corporation, New York, USA). Die Prüfung wird durchgeführt, indem zunächst Aluminium-Prüfstempel (Dollies) mit einem Durchmesser von 20 mm auf die Oberfläche der beschichteten Probe geklebt werden. Als Klebstoff wird der 2-Komponenten Kleber (Araldite 2011, Ciba Specialty Chemicals Corporation, Michigan, USA) verwendet. Bei dem Aufkleben der Dollies ist auf eine saubere Oberfläche des Prüfkörpers und der Dollies sowie auf einen ausreichenden Abstand zwischen den Dollies zu achten, so dass später das Einspannen in das Zugprüfgerät möglich ist.

Nach einer Trocknungszeit von 48 h wird um den Dolly herum der ausgetretene, gehärtete Klebstoff und die Beschichtung bis zum Substrat durchtrennt. In dieser Versuchsdurchführung wird speziell die Nasshaftfestigkeit untersucht. Dafür werden die Prüfkörper nach dem Anbringen der Frässpur für 2 h unter Wasser gelagert.

Anschließend wird der Dolly in das Zugprüfgerät eingespannt und senkrecht zur Prüfkörperoberfläche abgezogen. Die Zugkraft darf hierbei nur um 1 MPa/s erhöht werden.

Für die Auswertung des Versuches wird die minimale Zugspannung, die nötig ist um die Beschichtung abzutrennen, erfasst sowie die visuelle Beurteilung der Bruchfläche berücksichtigt.

Wie in Abbildung 46 zu erkennen ist, erreichen die Beschichtungen auf den modifizierten Hölzern eine deutlich höhere Abhebefestigkeit, als auf dem Unbehandelten. Das bedeutet, dass beide Modifizierungsarten beschichtbar sind. Während man bei der Beschichtung der DMDHEU behandelten Hölzer keine bestimmten Faktoren berücksichtigen muss, sind bei der Beschichtung der mit Wachs hydrophobierten Hölzer bestimmte Arbeitsschritte zu berücksichtigen. Zum einen müssen die hydrophobierten Prüfkörper vor der Beschichtung gehobelt werden, um einen besseren Kontakt zwischen Oberfläche und Beschichtung herzustellen. Zum anderen müssen geeignete Beschichtungssysteme mit Primern gewählt werden.

Generell erreichen die Prüfkörper mit einer Primer-Beschichtung gute Abhebefestigkeiten. Bei den DMDHEU modifizierten Prüfkörpern erreichen die beiden Beschichtungssysteme mit Primer Abhebefestigkeiten von ca. 2 MPa. Die höchste Abhebefestigkeit erreicht hier jedoch die Acrylat1-Beschichtung. Die Wachsprüfkörper weisen mit Primer-Beschichtungen die höchsten Abhebefestigkeitswerte auf.



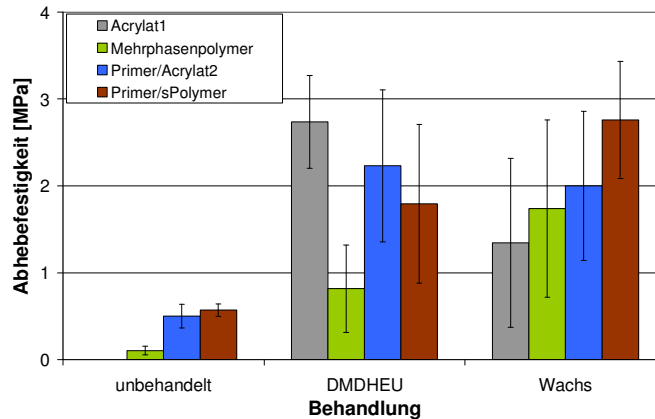


Abbildung 46: Abhebefestigkeit [MPa] in Abhängigkeit von Beschichtung und Behandlung

### Gitterschnitttest

Der Gitterschnitttest wird in Anlehnung an DIN EN ISO 2409 durchgeführt. Die beschichteten Prüfkörper werden vor der Prüfung für zwei Wochen bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte konditioniert..

Die Schnitte werden in einem Winkel von ca. 45° zur longitudinalen anatomischen Hauptrichtung durchgeführt. Mit gleichmäßigem Druck wird mit Hilfe einer Schablone ein Gitterfeld (10x10 Felder) in die Beschichtung geritzt. Die Schnitte müssen bis zum Untergrund gehen, sollen das Holz aber nicht beschädigen. Auf dieses Schnittgitter wird ein Stück Klebeband geklebt und gründlich geglättet. Zwischen dem Klebeband und der Beschichtung muss ein gleichmäßiger, guter Kontakt bestehen. Lufteinschlüsse müssen entfernt werden. Innerhalb von fünf Minuten wird das Klebeband mit einem Winkel von ca. 60° zur Zugrichtung entfernt.

Die Auswertung erfolgt anhand der verbliebenen Quadrate der Gitterschnittfläche, die nicht durch das Abziehen des Klebebands entfernt wurden.

Die Versuchsdurchführung des Gitterschnitttests unterscheidet sich sehr stark von der des Dollytest. Während der Dollytest die tatsächliche Kraft misst, die nötig ist um die Beschichtung abzuziehen, handelt es sich bei dem

Gitterschnitttest um eine sehr subjektive Auswertung. Dieser Test wurde dennoch durchgeführt, da anzunehmen war, dass sie die Beschichtungen eher schräg abziehen als senkrecht abheben lassen.

Wie in Abbildung 47 dargestellt, erreicht bei dieser Versuchsdurchführung das Beschichtungssystem Acrylat 1 auf den modifizierten Prüfkörpern keine gute Haftfestigkeit. Bis zu 25 % der Gitterschnittfelder lassen sich abziehen. Eine Anwendung dieses Beschichtungssystems auf DMDHEU- oder Wachsbehandelten Hölzern ist, trotz guter Abhebefestigkeiten bei dem Dollytest (Abbildung 46), daher nicht zu empfehlen.

Auffällig ist bei dem Gitterschnitttest, dass die Beschichtungen auch auf den unbehandelten Proben gut haften. Eine eindeutige Differenzierung, bezüglich der Behandlung mit und ohne Primer ist bei dieser Versuchsdurchführung nicht zu beobachten.

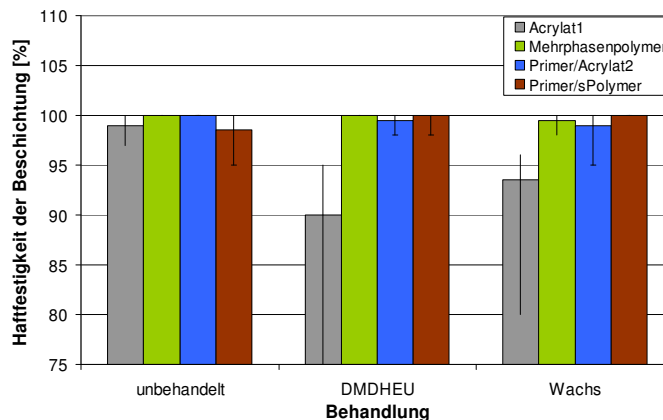


Abbildung 47: Haftfestigkeit der Beschichtung [%] in Abhängigkeit von Behandlung und Beschichtung

### **3.4 Herstellung von Bauteilen**

Für die Herstellung diverser Bauteile wurden mehrerer Chargen Holz mit DMDHEU modifiziert. Die Herstellung von mit Wachs behandelten Bauteilen beschränkt sich bislang auf die im IfHH verfügbaren Dimensionen von ca. 60 cm. Aus dem am IfHH hergestelltem mit DMDHEU modifiziertem Holz wurden diverse Prototypen und Musterstücke gefertigt und getestet. Nähere Einzelheiten können im Anhang im Bericht der Fa. Variotec nachgelesen werden.

Systematische Untersuchungen an Bauteilen wurden bisher nicht durchgeführt, da die Ergebnisse der oben beschriebenen Versuche in die Herstellung mit einfließen sollen. Einige wesentliche Ergebnisse (z.B. Beschichtung) sind erst zum Ende 2006 fertig gestellt worden und werden in die weiteren Entscheidungen mit einfließen.

### **3.5 Bewitterung von Bauteilen**

Die Untersuchungen zu diesem Versuch wurden zu einem großen Teil bei den Beschichtungsversuchen in Abschnitt 3.3 mit untersucht. Geplant ist des Weiteren eine Bewitterung von praxisnahen Bauteilen (Fensterflüglecken), sobald die entsprechenden Systeme gemeinsam festgelegt wurden. Da die Ergebnisse der Beschichtungs- und Verklebungstests in diese Untersuchung mit einfließen müssen, konnte mit der Durchführung noch nicht begonnen werden.

## **4 Implementierung**

Die wesentlichen Punkte der Implementierung werden im 3. Projektjahr bearbeitet. Ziel dieses Teils ist es zu planen und zu evaluieren, unter welchen Bedingungen eine Implementierung eines der Verfahren in die Produktion bei der Fa. Variotec übernommen werden kann.

## 4.1 Bau und Test von Prototypen

Einige Prototypen wurden bereits gebaut und getestet. Nähere Informationen darüber sind im Anhang: „Bericht der Fa. Variotec“ aufgeführt. Der Bau und das Testen weiterer Prototypen wird ein Schwerpunkt des kommenden Projektjahres werden.

In der Abbildung 48 ist die Zeichnung einer Fensterwand dargestellt. Ziel ist es in solchen komplexen Systemen das modifizierte Holz einzusetzen und die notwendigen Zertifizierungen zu erreichen.

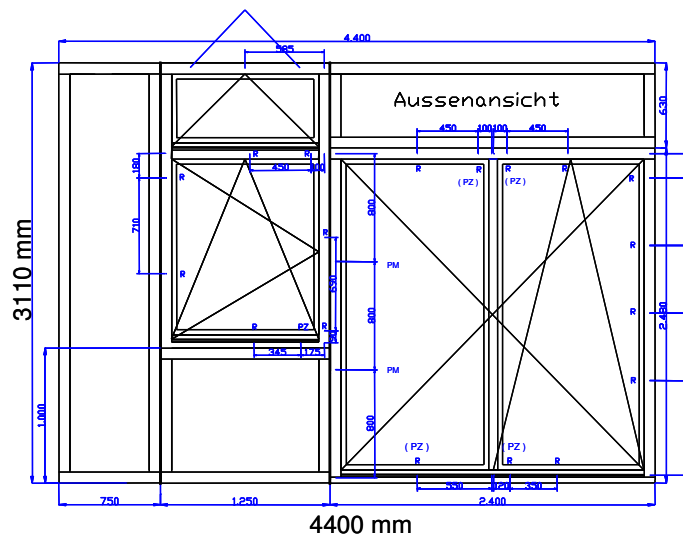


Abbildung 48: Fensterwand für ein Passivhaus

## 4.2 Einbruchhemmung, Dauerfunktion testen

Ein Prototyp aus Holz welches mit DMDHEU behandelt wurde, wurde bereits vom Institut für Fenstertechnik (IFT) geprüft. Eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse befindet sich in der folgenden Tabelle 9. Die Spalten geringster Wert und bester Wert geben jeweils die geringsten und höchsten Werte der

Bewertungsskala an. Der Wert DMDHEU-Fenster gibt den Wert an, der von dem getesteten Fenster erreicht wurde.

**Tabelle 9: Ergebnisse der getesteten Eigenschaften an einem mit DMDHEU behandeltem Prototyp**

<b>Eigenschaft</b>	<b>Geringster Wert</b>	<b>Bester Wert</b>	<b>DMDHEU-Fenster</b>
Widerstandsfähigkeit gegen Windlast	1	5	5
Widerstandsfähigkeit gegen Windlast (Rahmendurchbiegung)	A	C	C
Schlagregendichtheit ungeschützt (A)	1A	9A	9A
Schlagregendichtheit geschützt (B)	1B	7B	7B
Luftdurchlässigkeit	1	4	4
Stoßfestigkeit (Fallhöhe mm)	200	950	950
Wärmedurchgangskoeffizient UW			0,72
Schalldämmung dB			41
Tragfähigkeit von Sicherheitsvorrichtungen			erfüllt
<b>Freiwillige Eigenschaften</b>			
Einbruchhemmung	1	6	2
Dauerfunktion	5000	20000	20000
Mechanische Festigkeit	1	4	4
Bedienungskräfte	1	2	2

Bis auf den Wert „Einbruchhemmung“ wurden bei allen Bewertungskriterien die jeweils besten Bewertungen erreicht. Mit diesem Test konnte gezeigt werden, dass sich durch die Kombination aus mit DMDHEU behandeltem Holz, einer

angepassten Konstruktion und einer hochwertiger Verarbeitung, Holzfenster mit guten Eigenschaften herstellen lassen.

Optimierung des Modifizierungsprozesses:

Die Optimierung des Modifizierungsprozesses wird Schwerpunkt im kommenden Projektjahr. Dabei soll der Fokus auf einen der Modifizierungsprozesse gelegt werden. Für diesen Prozess wird dann ein Ablaufschema für die vollständige Organisation erstellt und optimiert.

Die Optimierung des Modifizierungsprozesses wird hinsichtlich der Parameter Abmessungen und umweltrelevanter Belange weiter durchgeführt.

Entscheidungen über den Prozess und die Zielrichtung sollen mit den Partnern und der DBU gemeinsam zur Meilensteinbesprechung getroffen werden.

### **4.3 Planung der Implementierung in KMU**

Die Planung der Implementierung wird in verschiedene Abschnitte gegliedert:

#### **4.3.1 Analyse der Fensterproduktion bei Variotec**

Der erste Schritt der Planung betrifft die Analyse des Ist-Zustands. Dazu wird einer der Produktionsprozess schrittweise analysiert und dokumentiert. In den folgenden Abbildungen (Abbildung 49 bis Abbildung 53) sind die wesentlichen Schritte für die Herstellung von Fensterflügeln bei der Fa. Variotec dargestellt. Die Dokumentation erfolgt für die Herstellung von Fenstern nach Passivhausstandard.

Abbildung 49 zeigt die Verklebung von Lamellen und Isoliermaterial zu den Rohfensterkanteln.



**Abbildung 49: Verklebung von Lamellen und Isolierung zu Kanteln mit PUR-Kern**

Anschließend werden die Kanteln abgelängt, gefräst und profiliert (Abbildung 50), um das entsprechende Profil (Rahmen oder Flügel) und die Fugstellen zu erhalten.



**Abbildung 50: Fräsen und Profilieren der Kanteln**

Die einzelnen Kanteln werden durch Verklebung zu Rahmen oder Flügeln zusammengefügt (Abbildung 51). Anschließend wird die Oberfläche geschliffen.



**Abbildung 51: Die Kanteln werden zu Flügel oder Rahmen zusammen geklebt und geschliffen.**

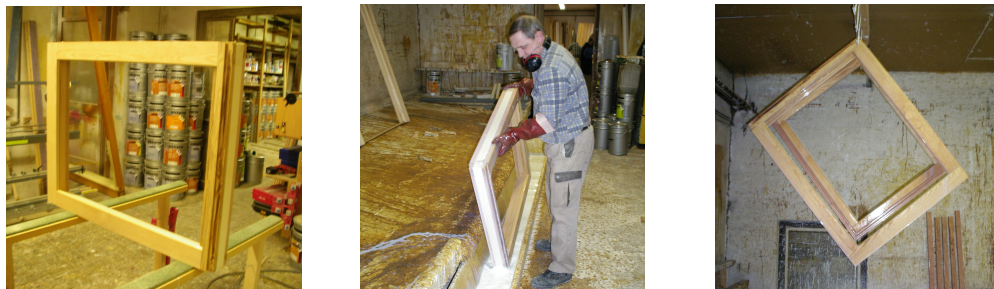


Nach dem Verkleben und Schleifen werden an den Stellen, an denen sich später die Scharniere und der Schließmechanismus befinden, die notwendigen Bohrungen oder Einfräsungen (Abbildung 52) vorgenommen.



**Abbildung 52: Die für die Beschläge notwendigen Löcher werden gebohrt oder gefräst.**

Die unbeschichteten Flügel oder Rahmen werden anschließend beschichtet (Abbildung 53). Die Beschichtung besteht aus mehreren Arbeitsdurchgängen, bei denen die Grundierung (Tauchverfahren) und mehrere Deckschichten (Spritzverfahren) durchgeführt werden.



**Abbildung 53: Der Flügel, bzw. rahmen wird grundiert und beschichtet**

Weitere Schritte bei der Fensterproduktion wurden erfasst aber nicht bildlich dokumentiert, da nicht erwartet wird, dass bei diesen Arbeitsschritten Änderungen aufgrund des Modifizierungsverfahrens notwendig sind. Zu dem weiteren Arbeitsablauf gehören folgende Arbeitsschritten:

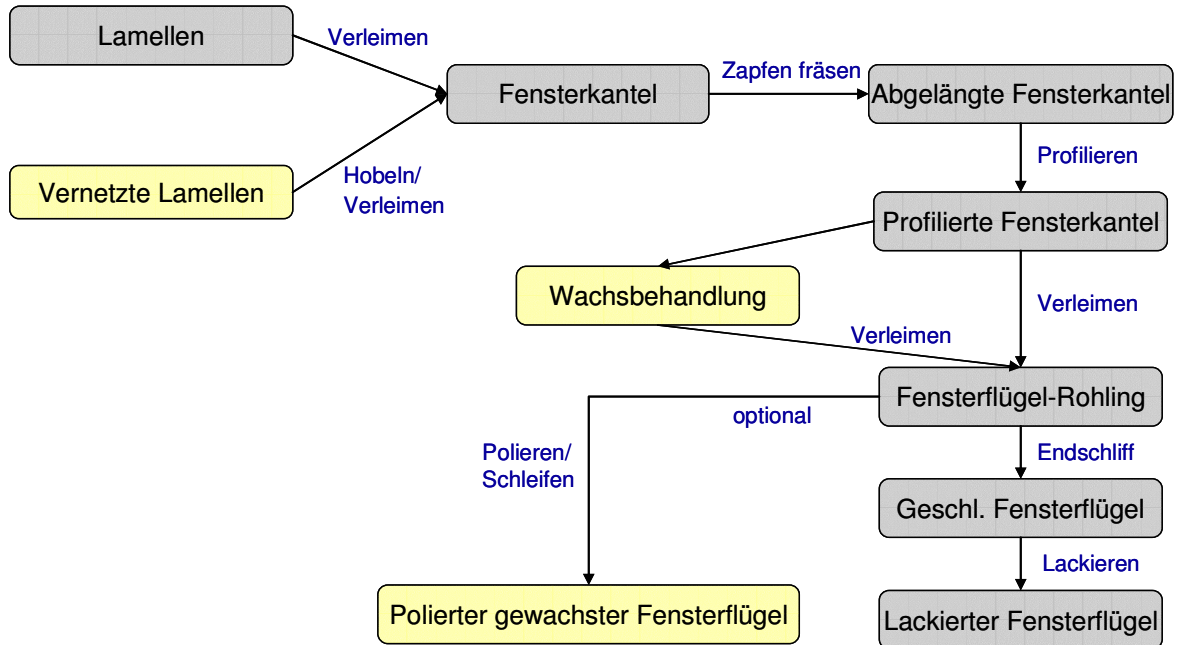
- 1) Anbringen der Beschläge
- 2) Einsetzen der Glasscheibe
- 3) Anbringen der Dichtungen



- 4) Verbinden von Rahmen und Flügel (Hochzeit)
- 5) Einbau im Objekt

#### **4.3.2 Implementierung des DMDHEU Verfahrens und der Wachsbehandlung**

Aus der Aufnahme des Produktionsablaufes der Fensterproduktion bei Variotec wurde ein Prozessflussdiagramm erstellt (Abbildung 54). In diesem Diagramm wurde der Ablauf noch einmal schematisch dargestellt. Zusätzlich wurde in dieses Schema die Verarbeitung von modifiziertem Holz integriert. Die mit DMDHEU behandelten Lamellen (Vernetzte Lamellen) werden als Ausgangsmaterial dem Prozess zugeführt. Für eine Implementierung dieser Behandlung oder einer Behandlung mit Melamin muss nicht der bisherige Produktionsprozess verändert werden, sondern die Produktion der vernetzten Lamellen würde der Fensterproduktion vorgeschaltet. Diese Art der Integration ist sehr vorteilhaft, da nicht in die bestehenden Prozessflüsse eingegriffen werden muss oder Material aus dem Prozess ausgeschleust und wieder eingeschleust werden muss.



**Abbildung 54: Darstellung eines Flussdiagramms zur Herstellung von Fenstern bei der Verwendung von modifiziertem Holz.**

Die Wachsbehandlung würde sinnvoller Weise zu einem späteren Zeitpunkt integriert werden, als die Behandlung mit DMDHEU. Ein optimaler Prozessschritt im Ablauf der Fensterherstellung ist nach dem die Fensterkanten fertig profiliert sind, direkt bevor sie zu einem Rahmen oder Flügel gefügt werden.

Der Vorteil der Behandlung an dieser Stelle besteht darin, dass alle oberflächennahen Teile und die kritischen Bereiche der späteren Fugen behandelt werden und so geschützt sind, während nahezu kein Abfall an behandeltem Holz entsteht.

Nachteil dieses Zeitpunktes ist es, dass das Material in den schon bestehenden Prozess integriert werden muss.

## 5 Diskussion

Nach dem Ende des zweiten Projektjahres wurde ein Meilenstein integriert, bei dem entschieden werden sollte, ob und mit welchem Verfahren im Projekt weitergearbeitet wird.

Um die Diskussion darüber zu unterstützen wird im Folgenden eine zusammenfassende Bewertung der einzelnen Verfahren gegeben, um eine gemeinsame weitere Entscheidung vorzubereiten.

### 5.1 Holzvernetzung (DMDHEU)

#### 5.1.1 Vorteile des Verfahrens:

- **Materialeigenschaften:** Das mit DMDHEU behandelte Holz zeichnet sich durch eine hohe Dimensionsstabilität aus. Im Vergleich zu unbehandeltem Holz ist das Quellen und Schwinden um ca. 50% reduziert. Da die Behandlung den ganzen Holzquerschnitt umfasst, kann es als Halbzeug beliebig bearbeitet werden. Die Verarbeitung ist nicht unterschiedlich zu unbehandeltem Holz.
- **Bauteileigenschaften:** Das Material lässt sich leicht verkleben und beschichten.
- **Implementierung:** Das Verfahren vor Beginn der Fensterfertigung integriert werden würde, muss der Prozess der Fensterherstellung nicht verändert werden.
- **Produkttests:** Ein Fensterprototyp, der aus behandeltem Holz hergestellt wurde, wurde vom PfB getestet und zeigte hervorragende Fenstereigenschaften.

### 5.1.2 Nachteile des Verfahrens:

- **Materialeigenschaften:** Das Holz wird durch die Behandlung spröder. Die Produktstabilität bei dynamischen Belastungen mit hohem Energieeintrag könnte so beeinträchtigt werden. Die Wasseraufnahme ist im Vergleich zu unbehandeltem Holz nicht reduziert.
- **Bauteileigenschaften:** Das behandelte Holz zeigt eine Neigung zur Rissbildung nach dem Prozess und auch während der Bewitterung, die für eine Anwendung im Fensterbau problematisch sein könnte. Während des Fensterfertigungsprozesses werden größere Anteile des Materials durch die Holzbearbeitung entfernt. Diese Holzreste führen zu höheren Gesamtkosten und zu Fragen der weiteren Verwertung.
- **Implementierung:** Der Prozess benötigt spezielle Anlagentechnik, die bisher nicht bei Variotec vorhanden ist. Eine kostengünstige Behandlung wird sich voraussichtlich nur in einem größeren Maßstab realisieren lassen, so dass nicht alles hergestelltes Holz durch die eigene Fensterproduktion verbraucht wird.
- **Produkttests:** Die durchgeführten Produkttests geben noch keine Auskunft über reduzierte Wartungsintervalle und Kosten durch eine längere Haltbarkeit des Fenstersystems.

## 5.2 Wachsbehandlung

### 5.2.1 Vorteile des Verfahrens:

- **Materialeigenschaften:** Durch die Behandlung mit Wachs lässt sich das Holz ausgezeichnet hydrophobieren. Zusätzlich werden verschiedene mechanische Eigenschaften verbessert.
- **Bauteileigenschaften:** Die Bauteile werden nur dort modifiziert, wo es wirklich notwendig ist.

- **Implementierung:** Die Behandlung wird in einem relativ späten Produktionsschritt durchgeführt. Es werden Abfälle an modifiziertem Holz vermieden. Vermutlich lässt sich die Behandlung auf einem relativ kleinen Niveau umsetzen, der für KMU vorteilhaft ist.

### 5.2.2 Nachteile des Verfahrens:

- **Materialeigenschaften:** Eine permanente Reduzierung des Quells und Schwindens kann nicht erreicht werden.
- **Bauteileigenschaften:** Beschichtung und Verklebung erfordern einen höheren technischen Aufwand. Die Problematik der Reinigung der Oberflächen ist bis nicht für einen technischen Prozess gelöst worden.
- **Implementierung:** Für die großtechnische Anwendung dieses Verfahrens steht zurzeit noch kein geeigneter industrieller Prozess zur Verfügung. Die Rahmenbedingungen für solch einen Prozess können benannt werden.
- **Produkttests:** Für das mit Wachs behandelte Holz wurden bisher keine Prototypen hergestellt und getestet.

## 6 Zusammenfassung

In diesem Projekt wird die Eignung von modifiziertem Holz für den Bau von Holzfenstern untersucht. Dazu werden zwei unterschiedliche Modifizierungsverfahren gewählt, die sich zum einen in der Art der Modifizierung unterscheiden und zum anderen zu verschiedenen Zeitpunkten des Produktionsablaufs der Fensterherstellung integrieren lassen.

Ziel des Projektes ist es, beide Modifizierungsverfahren zu vergleichen und die Implementierung eines der beiden Verfahren für einen KMU Fensterbaubetrieb (Variotec) zu planen.

Für das Erreichen dieses Zieles wurden die Materialeigenschaften des modifizierten Holzes untersucht (Grundlagenforschung). Außerdem wurde das Verhalten von verschiedenen Bauteilen im System getestet (Anwendungsforschung). Die 3. Phase des Projektes, die „Implementierung“, soll sowohl eine Analyse des Fensterproduktionsprozesses und eine Planung zur erfolgreichen Implementierung der Holzmodifizierung, als auch den Bau und Test von Prototypen beinhalten.

Zum Ende des zweiten Projektjahres ist ein Meilensteinpunkt geplant, bei dem über den zukünftigen Verlauf des Projektes gemeinsam entschieden werden soll. Zur Vorbereitung dieser Entscheidung wurden die Vor- und Nachteile beider Verfahren gegenüber gestellt.

Ein Fazit aus Sicht der Projektbearbeiter zeigt folgendes Bild:

**Holzvernetzung:** Dieses Verfahren weist verschiedene Materialvorteile gegenüber unbehandeltem Holz auf. Ein Fensterprototyp aus DMDHEU behandeltem Holz zeigt bei fast allen Beurteilungskriterien die höchsten Werte. Auf Grund der Strategie der BASF AG gestaltet sich die Implementierung bei Variotec eher schwierig. Alternativ zu DMDHEU könnte der Einsatz von Melaminharzen untersucht werden, die ein vergleichbares Potential aufweisen.

**Wachsbehandlung:** Dieses Verfahren zeigt hervorragende Eigenschaften bezüglich der Hydrophobierung und mechanischen Eigenschaften des Holzes. Im Gegensatz dazu ist eine Verklebung und Beschichtung mit herkömmlichen Mitteln der Holzindustrie nicht ohne weiteres möglich. Das Verfahren bietet ökologische Vorteile, da nahezu kein Abfall während der Produktion entsteht. Es steht jedoch noch kein geeignetes industrielles Verfahren zur Verfügung, mit dem eine Umsetzung in einem KMU durchgeführt werden kann.

Weitere Erkenntnisse bezüglich der Prozesse und Holzeigenschaften werden im laufenden Projektjahr erwartet. Dazu gehören unter anderem die Optimierung der Prozesse und die Untersuchung von Bauteilen und Prototypen.

# Projektjahr 2007 / 2008

## Melaminbehandlung



## 7 Einleitung

In den nachstehenden Kapiteln wird die Holzmodifizierung mit Melamin dargestellt. Diese Modifizierung wird als Alternative zu den zuvor geplanten Modifizierungen mit DMDHEU und Wachs gewählt. Um ähnliche Schwierigkeiten bei der Umsetzung in einem industriellen Prozess zu vermeiden, werden zunächst Informationen zur Melaminmodifizierung und zu möglicherweise existierenden Patenten zusammengetragen. Um Modifizierungen im großen Maßstab besser planen zu können, werden Voruntersuchungen mit kleinen Prüfkörpern im Labor durchgeführt. Diese Voruntersuchen ergeben erste Erkenntnisse für die spätere Prozessoptimierung.

## 8 Wirkprinzip der Melaminmodifizierung

Die Holzmodifizierung mit Melaminharzen entspricht den Modifizierungsverfahren durch polymerisierbare Chemikalien. Melaminharze sind Derivate des Melaminmoleküls und weisen durch ihre Vielfalt einen großen Pool an potentiell geeigneten Produkten auf.

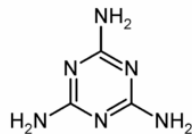
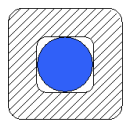


Abbildung 55: Strukturformel Melamin

Der Einsatz von natürlichen Harzen und verschiedenen Polymeren zur Holzmodifizierung wird schon seit vielen Jahrzehnten untersucht. Das Augenmerk der meisten Behandlungen richtete sich auf die Verbesserung der Festigkeitseigenschaften, z.B. der Oberflächenhärte. Zu Beginn der 90iger-Jahre wurde die Forschung mit diesen Chemikalien wieder belebt, nun jedoch nicht ausschließlich zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, sondern auch zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit und der Dimensionsstabilität.

Man unterscheidet Chemikalien, die ausschließlich in die Zelllumina eingelagert werden, von Chemikalien, die mit Zellwandpolymeren reagieren. Harze, die ausschließlich im Zelllumen eingelagert werden ohne in die Zellwände einzudringen oder chemisch zu reagieren, setzen zwar die Wasseraufnahme herab und verbessern die Härte- und Abriebeigenschaften des Holzes. Sie tragen jedoch nur geringfügig zu einer verbesserten Dauerhaftigkeit und Dimensionsstabilität des Holzes bei. Stoffe, die in die Zellwand eindringen können, diese vollständig durchdringen und zusätzlich mit Zellwandbestandteilen reagieren oder dort polykondensieren, können alle Eigenschaften des Holzes verändern. Durch die Behandlung mit Melaminharzen wird eine Verbesserung der Resistenz gegenüber Pilzabbau bis zu Dauerhaftigkeitsklasse 2 in Anlehnung an DIN EN 350 und eine Erhöhung der Dimensionsstabilität mit Quell- und Schwindverbesserungen bis zu 30% erreicht (Rapp und Peek 1996; Lukowsky, Peek *et al.* 1998; Lukowsky, Büschelberger *et al.* 1999). Eine leichte Erhöhung des E-Moduls konnte gezeigt werden. Die Verbesserung der Eigenschaften ist ganz wesentlich von der Art des verwendeten Harzes und der Konzentration abhängig.

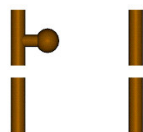
Wirkprinzipien der Melaminmodifizierung:



Füllung der Lumen und/oder Gefäße im Holz; keine Veränderung der Zellwand



Füllung der Zellwände des Holzes



Veränderung von Zellwandstrukturen, Depolymerisation der Cellulose oder Degradation der Hemicellulose

Die Holzmodifizierung mit Melamin ist vergleichbar mit den Modifizierungsverfahren der Furfurylierung und Holzvernetzung mit DMDHEU. Einige der Verfahren werden bereits industriell umgesetzt bzw. stehen kurz vor einer Markteinführung.
























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

Abbildung 56: Darstellung der Wirkprinzipien zur Holzvergütung bei den verschiedenen Verfahren

## 9 Voruntersuchungen

Vor den eigentlichen Modifizierungsprozessen werden Vorversuche im Labormaßstab durchgeführt, um speziell die Aushärtungsparameter des Melamins zu untersuchen. Versuche mit verschiedenen Aushärtungstemperaturen und Reaktionszeiten zeigen, dass die Fixierung relativ unabhängig von der Temperatur ist. Das Melamin weist bei 80 °C und nach 6 Stunden ähnliche Fixierungswerte auf, wie bei höheren Temperaturen und längeren Zeiträumen (Abbildung 57).

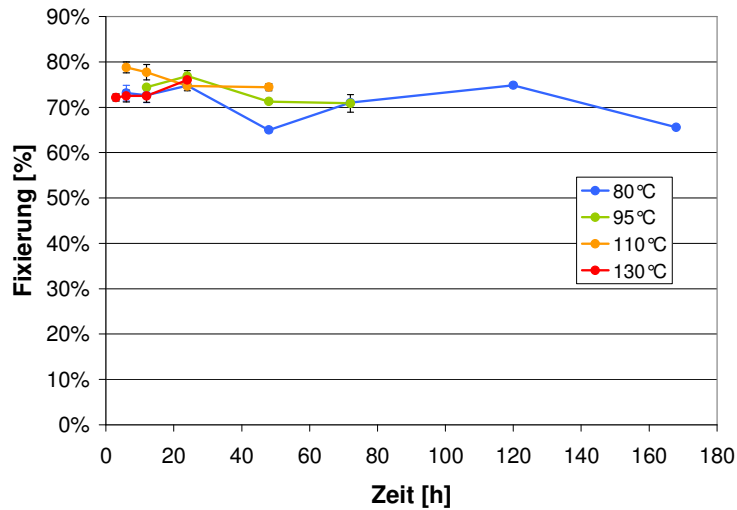


Abbildung 57: Fixierung [%] des Melamins in Abhängigkeit der Zeit und der Temperatur

## 10 Prozessoptimierung

### 10.1 Vorgehensweise und untersuchte Eigenschaften

Die Melaminmodifizierung von Holz gliedert sich in folgende Arbeitsschritte:

1. Vakuum-Druck-Imprägnierung der Kiefern Bretter mit 10 %iger Lösung
  - 45 Minuten Vorvakuum bei 50 mbar
  - 2 Stunden Druck bei 12 bar
  - 30 Minuten Nachvakuum bei 500 mbar
2. Trocknungsprozess zur Aushärtung des Melamins, Optimierung der Prozessparameter (Temperatur; Zeit; Feuchte)
3. Erhöhung des pH-Wertes der Restlösung

Die Imprägnierlösung besteht aus:

- 10 % Melamin Madurit MW 840/75 WA der Firma INEOS  
Melamines
- 1 % Triethanolamin
- NaOH zur (temporären) Einstellung des pH-Wertes auf 10.

Nach der Vakuum-Druck-Imprägnierung wird die Lösungsaufnahme des Holzes bestimmt. Nach der Trocknung werden das Weight Percent Gain (WPG) und die Feuchte des modifizierten Holzes bestimmt, bevor weitere Untersuchungen zur Holzqualität durchgeführt werden. Hierbei werden speziell Trocknungsrisse, Verformung des Holzes, die Fixierung des Melamins, Spannungen und mechanische Festigkeiten untersucht. In den Kapiteln 10.3 bis 10.8 sind die Modifizierungsprozesse 1 bis 5 dargestellt und die Auswertung der untersuchten Eigenschaften.

## 10.2 Versuche zur Lösungsstabilität

Zu Beginn der Prozessoptimierungsreihe stellt sich heraus, dass die Melaminlösung nicht stabil ist. Während der Imprägnierung in Prozess 1, kommt es zur Ausflockung des Melamins in der Imprägnierlösung. Daraufhin werden verschiedene Laborversuche zur Beeinflussung der Stabilität der Lösung durchgeführt mit der Erkenntnis, dass der pH-Wert zu der Stabilität der Imprägnierlösung beiträgt. Es zeigt sich, dass die Melaminlösung vor dem Imprägniervorgang auf pH 10 eingestellt werden muss, um stabil zu bleiben. Um das geeignete Additiv mit pH puffernden Eigenschaften zu finden werden verschiedene Chemikalien ausprobiert. Diese sind in Tabelle 10 aufgelistet. Zudem werden verschiedene Aushärtungstemperaturen ausprobiert.

Tabelle 10: verwendete Chemikalien zur pH-Wert Erhöhung der Lösung

Grundlösung	Additive	Aushärtungs- temperatur	Abkürzung
Melamin 10%ig	keine	80 °C	M 80
Melamin 10%ig	keine	120 °C	M 120
Melamin 10%ig	Trietahnlamin bis pH 10	80 °C	MT 80
Melamin 10%ig	Trietahnlamin bis pH 10	120 °C	MT 120
Melamin 10%ig	Pentandiol	80 °C	MP 80
Melamin 10%ig	Pentandiol	120 °C	MP 120
Melamin 10%ig	Pentandiol und Trietahnlamin bis pH 10	80 °C	MPT 80
Melamin 10%ig	Pentandiol und Trietahnlamin bis pH 10	120 °C	MPT 120
Melamin 10%ig	Diethylenglykol und Trietahnlamin bis pH 10	80 °C	MDT 80
Melamin 10%ig	Diethylenglykol und Trietahnlamin bis pH 10	120 °C	MDT 120

Die Auswirkung dieser Chemikalien auf das modifizierte Holz sind am WPG (Abbildung 58) und an der Anti-Swell-Efficiency (ASE) (Abbildung 59) zu sehen. Prüfkörper mit den Maßen 25 x 25 x 10 mm<sup>3</sup> (rad x tan x long) werden mit den verschiedenen Lösungen imprägniert und im Anschluss ausgehärtet (siehe Tabelle 10). Im Anschluss daran werden die Prüfkörper in Zyklen einer Wassertränkung und einer anschließenden Trocknung ausgesetzt. Während dieser 10 Zyklen werden sowohl die Masse als auch die Dimensionen ermittelt. Zum einen lassen sich so die WPG's der einzelnen Lösungen ermitteln (Abbildung

58) und deren Entwicklung während der Wasserbehandlung verfolgen. Zum anderen wird so die Dimensionsstabilität der behandelten Prüfkörper getestet. Anhand der Graphiken ist zu erkennen, dass Diethylenglykol und auch Pentandiol aufgrund von niedrigen WPG und ASE Werten nicht als Additive geeignet sind. Triethanolamin hingegen erweist sich als geeigneter Puffer, der das WPG und die Dimensionsstabilität im Vergleich zur ursprünglichen Melaminlösung nur minimal beeinflusst.

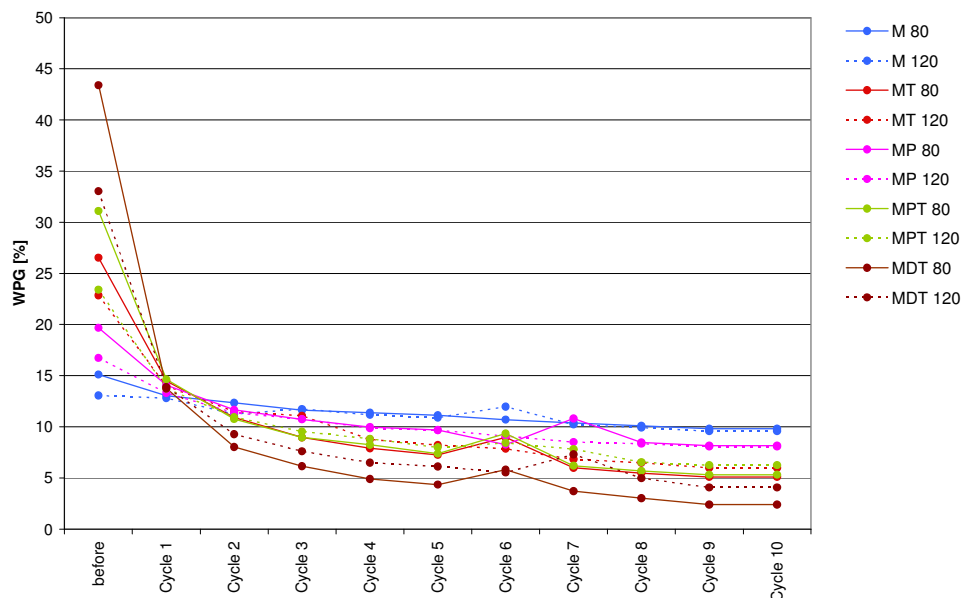


Abbildung 58: WPG [%] bei 10%iger Melaminlösung mit verschiedenen Zusätzen

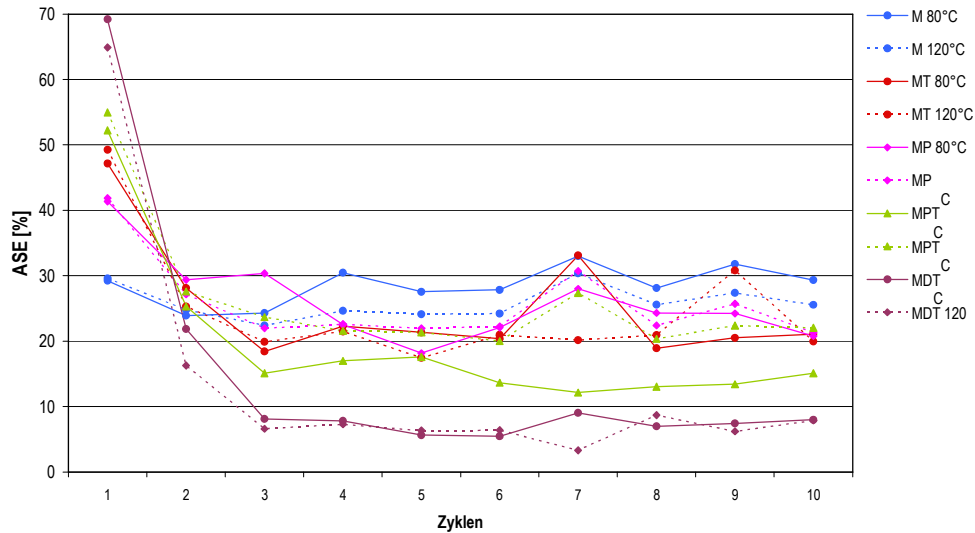


Abbildung 59: ASE [%] bei 10%iger Melaminlösung mit verschiedenen Zusätzen

In den Prozessen 2 bis 5 ist das Kiefernholz daraufhin mit einer 10 %igen Melaminlösung und einem Zusatz von 1 % Triethanolamin imprägniert worden. Um den pH-Wert stabil zu halten wird nach jedem Durchgang die Imprägnierlösung mit NaOH auf pH Wert 10 eingestellt.

### 10.3 Prozess 1

Für den ersten Behandlungsprozess wird noch die 10 %ige Melaminlösung ohne einen pH puffernden Zusatz verwendet. Während dieser ersten Imprägnierung des Holzes zeigt sich, dass die Melaminlösung nicht stabil ist. Die dargestellten Ergebnisse des Prozess 1 beziehen sich daher nur auf eine geringere Stichprobe (10 Better) als ursprünglich geplant, da die Imprägnierung vorzeitig abgebrochen und mit unbehandelten Holzdummyes weitergearbeitet werden muss.



### 10.3.1 Prozessverlauf

In Abbildung 60 sind die Trocknungsparameter von Prozess 1 dargestellt. Es handelt sich bei diesem Prozess um eine Heißdampftrocknung, bei dem die Temperatur 110 °C beträgt.

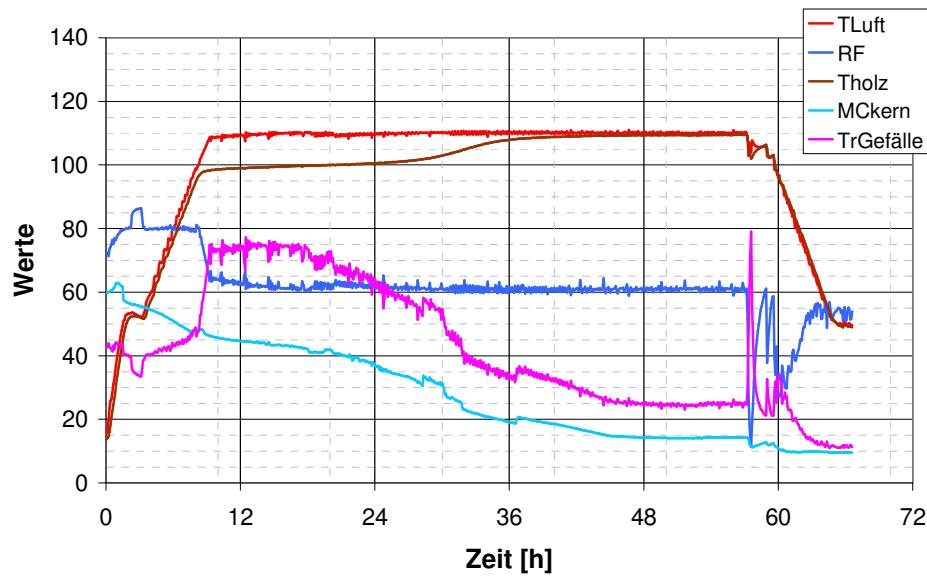


Abbildung 60: Trocknungsdiagramm von Prozess 1

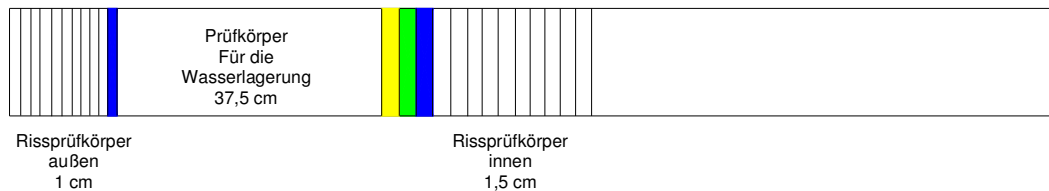
### 10.3.2 Feuchtigkeitsgehalte, Lösungsaufnahme und WPG

In Tabelle 11 ist die Feuchte vor und nach der Imprägnierung und nach dem Trocknungsprozess dargestellt. Die Lösungsaufnahme ist mit 133,53 [%] recht hoch, was jedoch auf das ausgefallenen Melamin zurück zuführen ist. Durch die Ausflockung haben sich zum Teil große Partikel an das Holz angehaftet, sind aber nicht in die Zellwand der Holzzellen eingedrungen, was sich gut anhand des niedrigen WPG von 2,9 [%] nach der Trocknung erkennen lässt.

**Tabelle 11: ermittelte Feuchtigkeitsgehalte, Lösungsaufnahmen und WPG in %**

	Feuchte [%] vor der Imprägnierung	Feuchte [%] nach der Imprägnierung	Feuchte [%] nach der Härtung	Lösungsauf- nahme [%]	WPG [%]
Mittelwerte	5,70	147,64	7,85	133,53	2,93
Standard- abweichung	0,18	14,46	0,24	13,64	1,05

Für die nachfolgenden Untersuchungen werden aus den Brettern Prüfkörper hergestellt, die nach dem Schema in Abbildung 61 eingeschnitten werden. Die Anzahl und die Maße der einzelnen Prüfkörper ist Tabelle 12 zu entnehmen.



**Abbildung 61: Schema des Bretteinschnitts; Zuordnung der Positionen einzelner Prüfkörper im Brett wichtig; (blau = Feuchteanalyse; gelb u. grün = Verschalungsprüfkörper)**

Tabelle 12: Reihenfolge des Prüfkörper einschnitts, beginnend von außen

Anzahl	Bestimmung	Maße (Breite)
10 Querriegel	Innenrissanalyse (äußerer Brettbereich)	1 cm
1 Querriegel	Feuchteanalyse (äußerer Brettbereich)	1 cm
1 Abschnitt	Wasserlagerung	37,5 cm
1 Querriegel	Verschaltungstest (Mittenschnitt)	1,5 cm
1 Querriegel	Verschaltungstest („Gabelprobe“)	1,5 cm
1 Querriegel	Feuchteanalyse (innerer Brettbereich)	1,5 cm
10 Querriegel	Innenrissanalyse (innerer Brettbereich)	1,5 cm
Rest des Brettes	Messungen der Fixierung; Herstellung von Biegeprüfkörper	

### 10.3.3 Rissuntersuchung

Von den behandelten Brettern werden Prüfkörper entnommen die auf Risse untersucht werden. Der Untersuchung liegt die EDG-Richtlinie zugrunde.

Nach der Behandlung mit Melamin werden in Prozess 1 Risse festgestellt, die auf die Trocknungsbedingungen zurück zuführen sind. Der schnelle Anstieg der Temperatur auf 110 °C führt zu Spannungen im Holz. In den folgenden Tabellen sind die Risse die aufgetreten sind aufgelistet.

Tabelle 13: Ausmaß der Risse ausgewertet nach der EDG Richtlinie

Oberflächenrisse	Mittenrisse	Innenrisse	Hirnrisse
keine	keine	stark (weit mehr als 10%)	keine

Tabelle 14: Auswertung der Innenrisse

Rissarten	Anzahl der Prüfkörper mit Rissen	Mittelwert Risslänge [%]	Standardabweichung	Beurteilung nach EDG
Innenrisse außen	8	4,0	4,42	stark
Innenrisse innen	9	4,28	3,16	stark

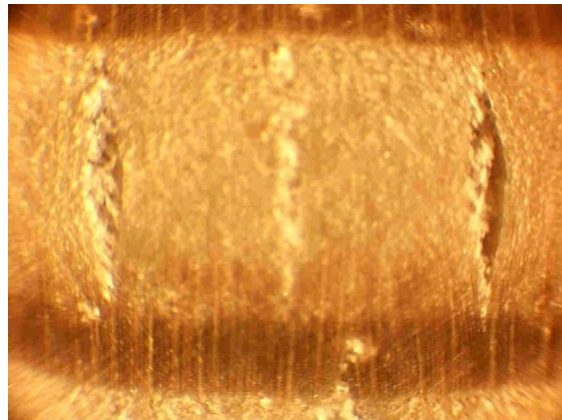
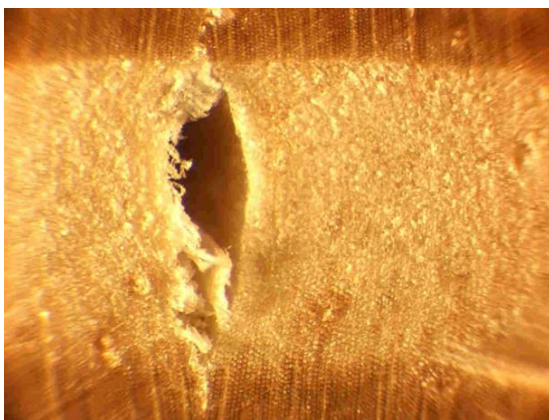


Abbildung 62: Ansicht von Innenrisse unter dem Auflichtmikroskop

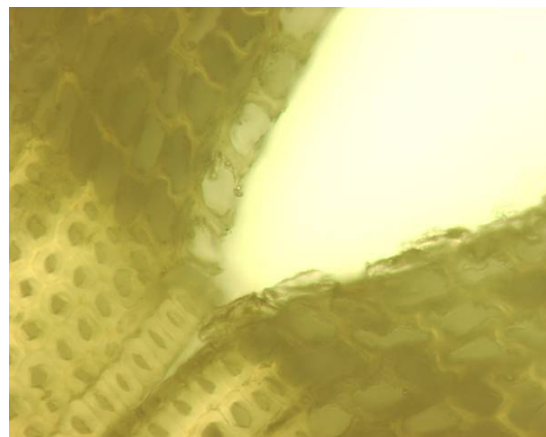
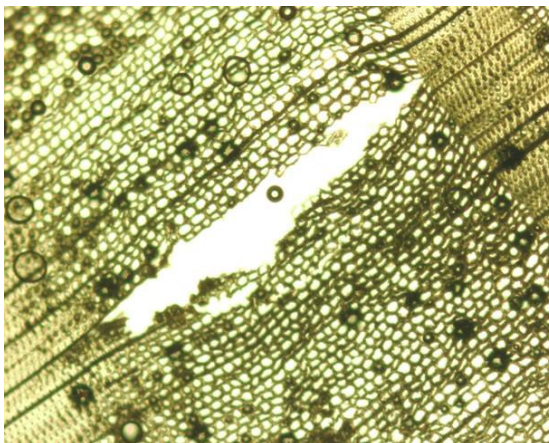


Abbildung 63: Ansicht der Innenrisse im Durchlichtmikroskop (a und b: 40-fach vergrößert; c: 200-fach vergrößert)

Die zahlreichen Innenrisse die an den Prüfkörpern aufgetreten sind, verlaufen nur durch das Frühholz. Normale Trockenrisse verlaufen hingegen meist über den gesamten Jahrring. Bei der mikroskopischen Untersuchung ist deutlich zu sehen, dass die Zellen selber nicht deformiert sind, sondern auseinander laufen. Es ist anzunehmen, dass es während der Trocknung, oder kurz danach, zu Spannungen im Holz gekommen ist, und das Früh- und Spätholz sich hierbei unterschiedlich verhalten haben.

### 10.3.4 Verformungen, Zellkollaps und Verschalungen

Die Verformungen der Prüfkörper werden zunächst optisch durch Fotografieren aufgenommen. Die Prüfkörper weisen nach der Trocknung optisch keine starken Verformungen auf (siehe Beispiele in Abbildung 64). Auch über den Querschnitt der Prüfkörper kann nur an 2 Brettern eine Verformung festgestellt werden.



**Abbildung 64: Melaminbehandelte Prüfkörper von vorne und seitlich fotografiert, um Verformungen zu dokumentieren**

Das Auftreten von Zellkollaps ist ein eindeutiges Zeichen für eine zu schnelle Trocknung oberhalb der Fasersättigung. Zellkollaps steht häufig mit dem Vorkommen von Innenrissen in Zusammenhang. Nach der EDG-Richtlinie wird der Zellkollaps aus der Differenz von kleinster und größter Dicke des Querschnitts ermittelt. An den Prüfkörpern dieser Melaminbehandlung kann kein Zellkollaps festgestellt werden.

Das Ausmaß der Verschalung liefert wichtige Aussagen über Trocknungsfehler, da in diesen Fällen die im Holz eingeschlossenen Spannungen sichtbar werden. Für die Untersuchung der Verschalung werden sowohl Mittenschnitttests (EDG-Richtlinie) durchgeführt, als auch Gabelproben (interner Standard) hergestellt und untersucht (siehe Tabelle 15). Die Verschalung wird anhand Messungen direkt nach der Herstellung und nach einer 48-stündigen Lagerung im Normklima gemessen.

**Tabelle 15: Ergebnisse der Verschalungstests: Mittenschnitt und Gabelprobe**

	Mittelwert [mm]	Standardabweichung
Mittenschnitt vor Klimatisierung	0,35	0,11
Mittenschnitt nach Klimatisierung	0,28	0,09
Gabelprobe vor Klimatisierung	3,80	3,01
Gabelprobe nach Klimatisierung	2,90	1,52

### 10.3.5 Wasserlagerung

Entsprechend einem internen Testdesign werden die Prüfkörper zu einem Drittel in Wasser gestellt, nachdem sie vorab auf Risse untersucht werden. Nach 10, 30 und 60 Minuten werden das Knistern der Prüfkörper und entstehende Risse dokumentiert. Eine Untersuchung auf Risse wird nach 12-16 Stunden und nach

vollständiger Rücktrocknung bei Raumklima nochmals durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Wasserlagerung geben Hinweise auf Trocknungsfehler.

**Tabelle 16: Ergebnisse der Wasserlagerung**

Zeitpunkt	Anteil PK mit Rissen	Mittl. Anzahl Risse pro PK	Minimum Risslänge [mm]	Maximum Risslänge [mm]	Mittelwert Risslänge [mm]
Nach 10 Min.	0,1	1,0	60	60	60,0
Nach 30 Min.	0,1	1,5	60	60	60,0
Nach 60 Min.	0,1	1,3	20	20	20,0
Nach 12-16 St.	0,1	2,0	50	50	50,0
Nach Rücktrocknung	0,9	2,2	10	117	36,3

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass während der Wasserlagerung nur vereinzelt Risse auftreten. Während der Rücktrocknung hingegen sind viele Risse entstanden. Während der ersten Stunde kann ein deutliches Knistern der Prüfkörper vernommen werden.

### 10.3.6 Bestimmung von N-Gehalt

Mit der Analyse des N-Gehalts im Holz können Rückschlüsse auf die Fixierung des Melamins gemacht werden. Da die Prüfkörper nach der Melaminbehandlung im mittleren Bereich des Querschnitts viele Innenrisse aufweisen, wird die Stickstoffbestimmung getrennt für den Innen- und Außenbereich des Holzes durchgeführt. Die N-Bestimmung erfolgte an 5 Brettern. In Tabelle 17 sind zum einen die N-Gehalte vor und nach der Auswaschung dargestellt und zum anderen die daraus berechneten Fixierungswerte.



Tabelle 17: Stickstoffgehalt [%] und Fixierung [%] unterteilt in Innen- und Außenbereiche des Brettes

	N-Gehalt [%]		N-Gehalt [%]		Fixierung [%]	
	vor Auswaschung		nach Auswaschung		nach Auswaschung	
	Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung
Innen	4,57	0,40	4,30	0,40	93,94	0,96
außen	5,09	0,40	4,57	0,49	89,56	3,63

Entgegen den Erwartungen ist im äußeren Bereich keine stärkere Konzentration an Stickstoff zu ermitteln als im inneren Bereich. Die Messungen im Inneren ergeben im Mittel eine 4 % höhere Fixierung als im Außenbereich. Trotz des niedrigen WPG ist die Fixierung recht hoch. Die hohe Fixierung kann auf Reste des ausgefallenen Melamins zurück zuführen sein.

### 10.3.7 Festigkeitseigenschaften

In Tabelle 18 sind die untersuchten Festigkeitseigenschaften von Prozess 1 dargestellt. Im Vergleich zu den Festigkeiten der unbehandelten Prüfkörper weist das modifizierte Holz ähnliche Festigkeiten auf. Das E-Modul des modifizierten Holzes ist leicht höher als das der unbehandelten Kontrollen. Auch die Werte der Biegefestigkeit und der Biegearbeit sind minimal höher als die der Kontrollen. Ein graphischer Vergleich der Festigkeitseigenschaften aller Prozesse ist in Kapitel 10.8.4 dargestellt.

Tabelle 18: Festigkeitseigenschaften von Prüfkörpern aus Prozess 1 und unbehandelten Kontrollen

	E-Modul		Biegefestigkeit		Biegearbeit	
	[N/mm <sup>2</sup> ]		[N/mm <sup>2</sup> ]		[kJ/m <sup>2</sup> ]	
	Mittelwert	Standard-	Mittelwert	Standard-	Mittelwert	Standard-



		abweichung		abweichung		abweichung
Prozess1	12071,58	1896,31	109,24	21,60	14,40	4,97
Unbe- handelt	10430,62	2928,64	95,55	17,92	17,56	4,15

## 10.4 Prozess 2

Die 10 %ige Melaminlösung in Prozess 2 ist mit 1 % Triethanolamin versetzt. Durch diese pH-Wert Stabilisierung kommt es bei dieser Imprägnierung nicht zu einer Ausfällung des Melamins. Der Trocknungsprozess wird wesentlich entschärft um die Trocknungsrisse, die im Prozess 1 aufgetreten sind, zu vermeiden. Die hier dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf 30 Bretter des 2. Prozesses.

### 10.4.1 Prozessverlauf

Die gewählte Trocknungstemperatur in Prozess 2 liegt mit max. 90 °C deutlich unter der Temperatur von Prozess 2. Bei diesem Trocknungsprozess handelt es sich um keine Heißdampftrocknung, sondern verläuft ähnlich einer konventionellen Holz-trocknung. Die Prozessdauer ist mit 10 Tagen relativ lang.

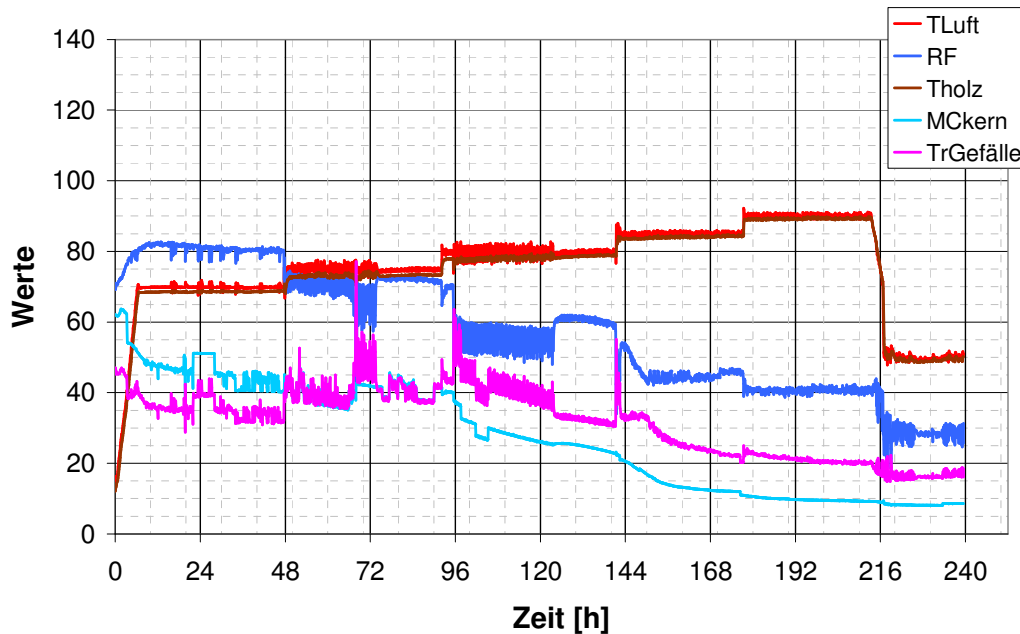


Abbildung 65: Trocknungsdiagramm von Prozess 2

#### 10.4.2 Feuchtigkeitsgehalte, Lösungsaufnahme und WPG

In der nachstehenden Tabelle 19 sind die Holzfeuchten, die Lösungsaufnahme und das WPG nach der Trocknung dargestellt. Die Lösungsaufnahme ist mit einem Wert von 116,94 % etwas geringer, als in Prozess 1. Das WPG hingegen liegt mit 11,72 % deutlich höher als im vorherigen Prozess und ist bei einer Melaminkonzentration von 10 % zu erwarten gewesen.

**Tabelle 19: ermittelte Feuchtigkeitsgehalte, Lösungsaufnahmen und WPG in %**

	Feuchte [%] vor der Imprägnierung	Feuchte [%] nach der Imprägnierung	Feuchte [%] nach der Härtung	Lösungsauf- nahme [%]	WPG [%]
Mittelwerte	14,40	153,43	6,84	116,94	11,72
Standard- abweichung	0,07	16,91	0,16	14,47	1,34

#### 10.4.3 Rissuntersuchung

Von den behandelten Brettern werden 30 Prüfkörper entnommen die nach der EDG-Richtlinie auf Risse untersucht werden.

Nach der Behandlung mit Melamin sind kaum Risse festzustellen, die auf die Trocknungsbedingungen zurückzuführen sind. Risse die auf Vorschädigungen basieren werden nicht berücksichtigt. In den folgenden Tabellen sind die Risse die aufgetreten sind aufgelistet.

**Tabelle 20: Ausmaß der Risse ausgewertet nach der EDG Richtlinie**

Oberflächenrisse	Mittenrisse	Innenrisse	Hirnrisse
an 3 Prüfkörpern	keine	1 Prüfkörper	keine

**Tabelle 21: Auswertung der Innenrisse**

Rissarten	Anzahl der Prüfkörper mit Rissen	Mittelwert Risslänge [%]	Standardabweichung	Beurteilung nach EDG
Innenrisse außen	0	0	0	gering
Innenrisse innen	1	0,03	3,16	mäßig

#### 10.4.4 Verformungen, Zellkollaps und Verschalungen

Die Prüfkörper weisen nach der Trocknung optisch keine starken Verformungen auf. Über den Querschnitt der Prüfkörper kann an 15 Brettern eine Verformung festgestellt werden. Davon sind jedoch 9 Bretter nur leicht verformt. An den Prüfkörpern dieser Melaminbehandlung aus Prozess 2 kann kein Zellkollaps festgestellt werden.

Die Verschalung wird auch hier anhand Messungen direkt nach der Herstellung und nach einer 48-stündigen Lagerung im Normklima gemessen.

**Tabelle 22: Ergebnisse der Verschalungstests: Mittenschnitt und Gabelprobe**

	Mittelwert [mm]	Standardabweichung
Mittenschnitt vor Klimatisierung	0,12	0,10
Mittenschnitt nach Klimatisierung	0,27	0,16
Gabelprobe vor Klimatisierung	2,03	0,85
Gabelprobe nach Klimatisierung	3,97	1,69

### 10.4.5 Wasserlagerung

Wie auch in Prozess 1 werden die behandelten Prüfkörper dieses Prozesses auch der Wasserlagerung unterzogen, um eventuelle Spannungen im Holz zu erkennen. Die Ergebnisse dieser Wasserlagerung sind in der nachstehenden Tabelle 23 aufgeführt.

Tabelle 23: Ergebnisse der Wasserlagerung

Zeitpunkt	Anteil PK mit Rissen	Mittl. Anzahl Risse pro PK	Minimum Risslänge [mm]	Maximum Risslänge [mm]	Mittelwert Risslänge [mm]
Nach 10 Min.	0,15	2,3	40	80	63,3
Nach 30 Min.	0,30	1,9	29	65	43,3
Nach 60 Min.	0,20	2,0	2	44	13,0
Nach 12-16 St.	0,75	2,0	15	236	90,9
Nach Rückrocknung	0,80	1,8	5	70	28,0

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass während der Wasserlagerung deutliche Risse auftreten. Bereits während den ersten Minuten kann ein deutliches Knacken der Prüfkörper vernommen werden.

### 10.4.6 Bestimmung von N-Gehalt

Die Stickstoffbestimmung erfolgt an 10 Brettern. In Tabelle 24 sind die Stickstoffgehalte und die Fixierung im äußeren und inneren Brettbereich angegeben. Im äußeren Bereich der Prüfkörper kann an den ermittelten Fixierungswerten keine eindeutige erhöhte Fixierung des Melamins festgestellt werden.

**Tabelle 24: Stickstoffgehalt [%] und Fixierung [%] unterteilt in Innen- und Außenbereiche des Brettes**

	N-Gehalt [%]		N-Gehalt [%]		Fixierung [%]	
	vor Auswaschung		nach Auswaschung		nach Auswaschung	
	Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung
Innen	3,92	0,49	3,01	0,51	76,50	4,48
außen	4,66	0,46	3,60	0,41	77,28	3,64

#### 10.4.7 Festigkeitseigenschaften

In der nachstehenden Tabelle 25 sind die Festigkeitseigenschaften der Prüfkörper aus Prozess 2 dargestellt. Im Vergleich zu den unbehandelten Kontrollen sind sowohl das E-Modul, als auch die Biegefestigkeit der Melaminprüfkörper minimal erhöht. Die Biegearbeit hingegen ist etwas verringert. Ein Vergleich der Festigkeiten zwischen den einzelnen Prozessen ist in Kapitel 10.8.4 dargestellt.

**Tabelle 25: Festigkeitseigenschaften von Prüfkörpern aus Prozess 2 und unbehandelten Kontrollen**

	E-Modul		Biegefestigkeit		Biegearbeit	
	[N/mm <sup>2</sup> ]		[N/mm <sup>2</sup> ]		[kJ/m <sup>2</sup> ]	
	Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung
Prozess2	12641,11	2135,95	115,42	20,58	13,80	4,40
Unbe-handelt	10430,62	2928,64	95,55	17,92	17,56	4,15

### 10.5 Prozess 3

Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf 30 Bretter des 3. Prozesses der Melaminbehandlung.

#### 10.5.1 Prozessverlauf

Nach der Trocknung bei 90 °C in Prozess 2, wird in Prozess 3 wieder eine Heißdampftrocknung bei 105 °C durchgeführt. Die Prozessdauer reduziert sich dadurch auf 3,5 Tage.

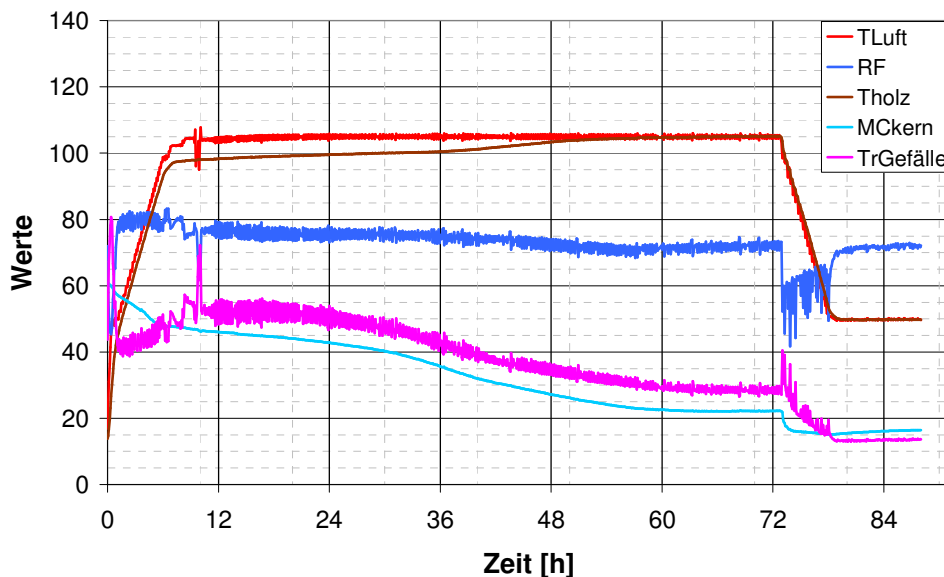


Abbildung 66: Trocknungsdiagramm von Prozess 3

#### 10.5.2 Feuchtigkeitsgehalte, Lösungsaufnahme und WPG

In der nachstehenden Tabelle 26 sind die Holzfeuchten dargestellt. Nach Prozess 3 hat das Holz mit 10,48 % eine etwas höhere Feuchte als nach Prozess 2, was mit der durchgängigen Befeuchtung zur erklären ist. Die Lösungsaufnahme ist mit 106,14 % etwas geringer als bei Prozess 2, das WPG ist jedoch ungefähr gleich.

**Tabelle 26: ermittelte Feuchtigkeitsgehalte, Lösungsaufnahmen und WPG in %**

	Feuchte[%] vor der Imprägnierung	Feuchte [%] nach der Imprägnierung	Feuchte [%] nach der Härtung	Lösungsauf- nahme [%]	WPG [%]
Mittelwerte	16,48	146,82	10,48	106,14	12,39
Standard- abweichung	0,21	22,92	0,21	19,14	2,48

### 10.5.3 Rissuntersuchung

Nach der Trocknung von Prozess 3 können an 10 Prüfkörpern Risse festgestellt werden, die auf die Trocknungsbedingungen zurückzuführen sind. In den folgenden Tabellen sind die Risse die aufgetreten sind aufgelistet. 1/3 der untersuchten Bretter weist erneut die Innenrisse im Frühholz auf, die auf die Trocknung zurückzuführen sind.

**Tabelle 27: Ausmaß der Risse ausgewertet nach der EDG Richtlinie**

Oberflächenrisse	Mittenrisse	Innenrisse	Hirnrisse
keine	keine	an 10 Prüfkörpern	keine

**Tabelle 28: Auswertung der Innenrisse**

Rissarten	Anzahl der Prüfkörper mit Rissen	Mittelwert Risslänge [%]	Standard- abweichung	Beurteilung nach EDG
Innenrisse außen	9	7,44	3,47	stark
Innenrisse innen	10	7,41	4,59	stark



### 10.5.4 Verformungen, Zellkollaps und Verschalungen

Die Prüfkörper weisen nach der Trocknung optisch keine starken Verformungen auf. Über den Querschnitt der Prüfkörper ist an 10 Brettern eine schwache Verformung festzustellen. An den Prüfkörpern aus Prozess 3 kann kein Zellkollaps festgestellt werden. Das Ausmaß der Verschalung liefert wichtige Aussagen über Trocknungsfehler, da in diesen Fällen die im Holz eingeschlossenen Spannungen sichtbar werden. Auch für die Untersuchung der Prüfkörper aus Prozess 3 werden sowohl Mittenschnitttests (EDG-Richtlinie) durchgeführt, als auch Gabelproben (interner Standard) hergestellt und untersucht.

**Tabelle 29: Ergebnisse der Verschalungstests: Mittenschnitt und Gabelprobe**

	Mittelwert [mm]	Standardabweichung
Mittenschnitt vor Klimatisierung	0,01	0,04
Mittenschnitt nach Klimatisierung	0,02	0,04
Gabelprobe vor Klimatisierung	-1,04	0,89
Gabelprobe nach Klimatisierung	1,13	0,94

### 10.5.5 Wasserlagerung

Die Ergebnisse (Tabelle 30) zeigen deutlich, dass während der Wasserlagerung Risse auftreten. Bereits während den ersten Minuten kann ein deutliches Knacken der Prüfkörper vernommen werden.

**Tabelle 30: Ergebnisse der Wasserlagerung**

Zeitpunkt	Anteil PK mit Rissen	Mittl. Anzahl Risse pro PK	Minimum Risslänge [mm]	Maximum Risslänge [mm]	Mittelwert Risslänge [mm]
Nach 10 Min.	0,15	1,7	19	135	60,3
Nach 30 Min.	0,15	2,2	51	90	69,7
Nach 60 Min.	0,15	2,1	45	110	81,7
Nach 12-16 St.	0,25	2,2	30	165	88,4
Nach Rücktrocknung	0,60	2,0	20	92	46,8

### 10.5.6 Bestimmung von N-Gehalt

Die Stickstoffbestimmung erfolgte an 10 Brettern. Tabelle 31 zeigt den Stickstoffgehalt und die daraus berechnete Fixierung des Melamins. Die Fixierung im inneren und äußeren Bereich des Brettes unterscheidet sich nicht wesentlich.

**Tabelle 31: Stickstoffgehalt [%] und Fixierung [%] unterteilt in Innen- und Außenbereiche des Brettes**

	N-Gehalt [%]		N-Gehalt [%]		Fixierung [%]	
	vor Auswaschung		nach Auswaschung		nach Auswaschung	
	Mittelwert	Standard- abweichung	Mittelwert	Standard- abweichung	Mittelwert	Standard- abweichung
Innen	3,45	1,04	2,53	0,79	73,16	4,47
außen	4,64	0,72	3,51	0,68	75,42	6,92

### 10.5.7 Festigkeitseigenschaften

In der nachstehenden Tabelle 32 sind die Festigkeitseigenschaften des modifizierten Holzes aus Prozess 3 dargestellt. Das E-Modul und die Biegefestigkeit der Melaminprüfkörper sind leicht erhöht. Die Biegearbeit der behandelten Prüfkörper ist etwas niedriger, als die der unbehandelten Prüfkörper. Eine graphische Darstellung der Festigkeiten aller Prozesse ist in Kapitel 10.8.4 aufgeführt.

**Tabelle 32: Festigkeitseigenschaften von Prüfkörpern aus Prozess 3 und unbehandelten Kontrollen**

	E-Modul		Biegefestigkeit		Biegearbeit	
	[N/mm <sup>2</sup> ]		[N/mm <sup>2</sup> ]		[kJ/m <sup>2</sup> ]	
	Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung
Prozess3	12458,32	2287,07	109,28	20,56	14,02	4,51
Unbe-handelt	10430,62	2928,64	95,55	17,92	17,56	4,15

### 10.6 Prozess 4

Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf 30 Bretter des 4. Prozesses der Melaminbehandlung.

#### 10.6.1 Prozessverlauf

Im Trocknungsprozess 4 wird erneut eine Heißdampftrocknung durchgeführt. Nachdem bei 1/3 der untersuchten Prüfkörper von Prozess 3 erneut Trocknungsrisse aufgetreten sind, wird diesmal die Temperatur-Untergrenze einer

Heißdampfmodifizierung gewählt. Die Prozessdauer verlängert sich dadurch auf 5 Tage. 103 °C sind für eine Heißdampftrocknung die geringste mögliche Temperatur.

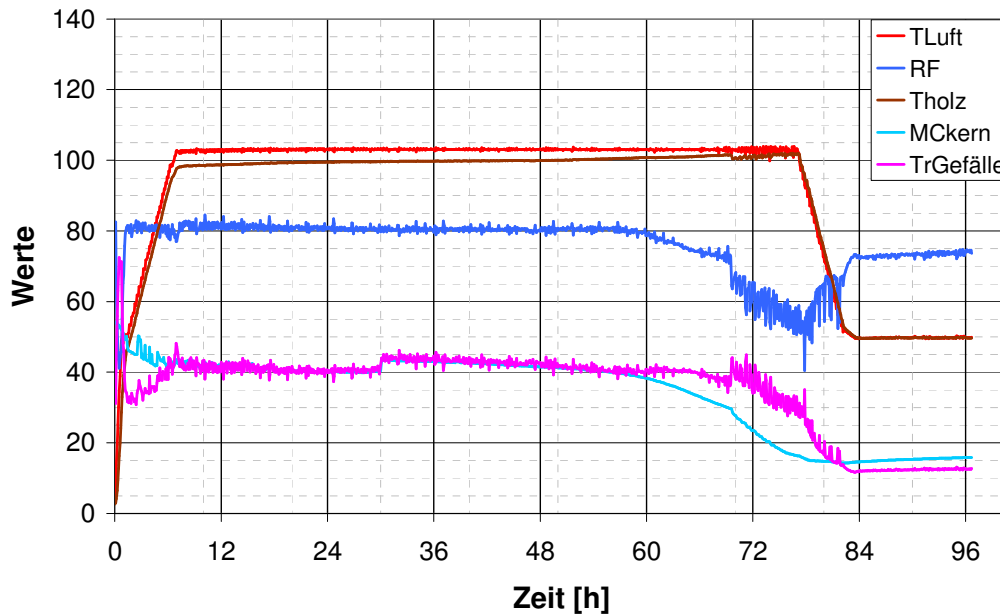


Abbildung 67: Trocknungsdiagramm von Prozess 4

### 10.6.2 Feuchtigkeitsgehalte, Lösungsaufnahme und WPG

In Tabelle 33 sind sowohl die Holzfeuchten als auch Lösungsaufnahme und WPG dargestellt. Die Holzfeuchte nach der Trocknung bei Prozess 4 ist ähnlich wie bei Prozess 3 um die 10 %. Die Lösungsaufnahme des Holzes bei Prozess 4 liegt jedoch mit 119,51 % deutlich über der Lösungsaufnahme bei Prozess 3. Auch das WPG ist mit 14,63 % höher als bei den Prozessen zuvor.

**Tabelle 33: ermittelte Feuchtigkeitsgehalte, Lösungsaufnahmen und WPG in %**

	Feuchte [%] vor der Imprägnierung	Feuchte [%] nach der Imprägnierung	Feuchte [%] nach der Härtung	Lösungsauf- nahme [%]	WPG [%]
Mittelwerte	16,63	163,30	9,99	119,52	14,63
Standard- abweichung	0,53	21,65	0,24	18,05	1,56

### 10.6.3 Rissuntersuchung

Nach dem Trocknungsprozess 4 können an verschiedenen Prüfkörpern Risse festgestellt werden, die auf die Trocknungsbedingungen zurückzuführen sind. Auch hier sind an 10 der untersuchten Prüfkörper, also an rund 1/3, wieder Innenrisse im Frühholz aufgetreten.

**Tabelle 34: Ausmaß der Risse ausgewertet nach der EDG Richtlinie**

Oberflächenrisse	Mittenrisse	Innenrisse	Hirnrisse
gering	keine	9 Prüfkörper	keine

**Tabelle 35: Auswertung der Innenrisse**

Rissarten	Anzahl der Prüfkörper mit Rissen	Mittelwert Risslänge [cm]	Standard- abweichung	Beurteilung nach EDG
Innenrisse außen	9	5,3	4,42	stark
Innenrisse innen	6	7,35	2,59	stark

### 10.6.4 Verformungen, Zellkollaps und Verschalungen

Zwei der Prüfkörper weisen nach der Trocknung starke Verformungen auf. Über den Querschnitt der Prüfkörper kann an 5 Brettern eine schwache Verformung festgestellt werden. Auch an den Prüfkörpern aus Prozess 4 kann kein Zellkollaps festgestellt werden.

**Tabelle 36: Ergebnisse der Verschalungstests: Mittenschnitt und Gabelprobe**

	Mittelwert [mm]	Standardabweichung
Mittenschnitt vor Klimatisierung	0,04	0,07
Mittenschnitt nach Klimatisierung	0,20	0,25
Gabelprobe vor Klimatisierung	0,40	0,77
Gabelprobe nach Klimatisierung	2,67	1,45

### 10.6.5 Wasserlagerung

Wie in Tabelle 37 zusehen ist treten bei der Wasserlagerung der Prüfkörper aus Prozess 4 Risse auf, jedoch weniger stark ausgeprägt als bei den Prüfkörpern der Prozesse 1 bis 3.

**Tabelle 37: Ergebnisse der Wasserlagerung**

Zeitpunkt	Anteil PK mit Rissen	Mittl. Anzahl Risse pro PK	Minimum Risslänge [mm]	Maximum Risslänge [mm]	Mittelwert Risslänge [mm]
Nach 10 Min.	0	0	0	0	0
Nach 30 Min.	0,05	1	40	40	40
Nach 60 Min.	0,10	1	25	30	27,5
Nach 12-16 St.	0,05	1,3	60	60	60
Nach Rücktrocknung	0,10	1,3	5	15	10

### 10.6.6 Bestimmung von N-Gehalt

Die Stickstoff-Bestimmung erfolgt an 10 Brettern. In Tabelle 38 sind die Ergebnisse der Stickstoffbestimmung und die berechnete Fixierung dargestellt. Unterschiede zwischen Brettinnenbereich und –außenbereich sind nicht eindeutig.

**Tabelle 38: Stickstoffgehalt [%] und Fixierung [%] unterteilt in Innen- und Außenbereiche des Brettes**

	N-Gehalt [%]		N-Gehalt [%]		Fixierung [%]	
	vor Auswaschung		nach Auswaschung			
	Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung
Innen	4,27	0,94	3,17	0,45	75,56	8,80
außen	5,05	0,64	3,75	0,47	74,44	5,18

### 10.6.7 Festigkeitseigenschaften

In Tabelle 39 sind die Festigkeitseigenschaften des modifizierten Holzes aus Prozess 3 dargestellt. Das E-Modul und die Biegefestigkeit der Melaminprüfkörper sind leicht erhöht. Die Biegearbeit der behandelten Prüfkörper ist etwas niedriger, als die der unbehandelten Prüfkörper. Eine graphische Darstellung der Festigkeiten aller Prozesse ist in Kapitel 10.8.4 aufgeführt.

**Tabelle 39: Festigkeitseigenschaften von Prüfkörpern aus Prozess 4 und unbehandelten Kontrollen**

	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]		Biegefestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]		Biegearbeit [kJ/m <sup>2</sup> ]	
	Mittelwert	Standard- abweichung	Mittelwert	Standard- abweichung	Mittelwert	Standard- abweichung
Prozess4	11834,69	1518,15	106,23	12,84	14,03	3,58
Unbe- handelt	10430,62	2928,64	95,55	17,92	17,56	4,15



### 10.7 Rückblick Prozess 1 bis Prozess 4

Nach den Prozessen 1 bis 4 werden aus den Ergebnissen Rückschlüsse für die weiter Prozessführung gezogen. In Tabelle 40 sind die wichtigsten Kenndaten der einzelnen Prozesse aufgelistet.

**Tabelle 40: Vergleich der Prozesse 1 bis 4**

	Prozess 1	Prozess 2	Prozess 3	Prozess 4
Prozessparameter	Heißdampf 110 °C	Konventionelle Holztrocknung 90 °C	Heißdampf 105 °C	Heißdampf 103 °C
WPG	2,93	11,72	12,39	14,63
Innenrisse	stark	keine/gering	mittel/stark (1/3 der Prüfkörper)	mittel/ stark (1/3 der Prüfkörper)
Verschalung	mittel	gering	gering	gering
Risse				
Wasserlagerung	mittel	mittel/stark	mittel	gering
Fixierung [%]	93,94 (innen) 89,56 (außen)	76,50 (innen) 77,28 (außen)	73,16 (innen) 75,42 (außen)	75,56 (innen) 74,44 (außen)

Es wird deutlich, dass der entscheidende Faktor die vorhandenen Innenrisse sind. Der einzige Prozess bei dem diese Innenrisse nicht entstanden, ist Prozess 2. Die Ergebnisse der anderen Untersuchungen sind in etwa vergleichbar. Die Ergebnisse der Wasserlagerung sind in den nachstehenden Abbildungen

graphisch dargestellt. In diesem Vergleich sieht man deutlich, dass nicht nur der Anteil der Prüfkörper mit Rissen (Abbildung 68), sondern auch die mittlere Anzahl der Risse pro Prüfkörper (Abbildung 69) und die mittlere Risslänge (Abbildung 70) bei Prozess 4 am geringsten sind. Die Prüfkörper aus Prozess 2, die im Vergleich zu den anderen Prozessen am sanftesten getrocknet wurde und auch die geringsten Innenrisse aufweisen, scheinen Spannung im Holz zu enthalten, die erst bei der Wasserlagerung sichtbar werden.

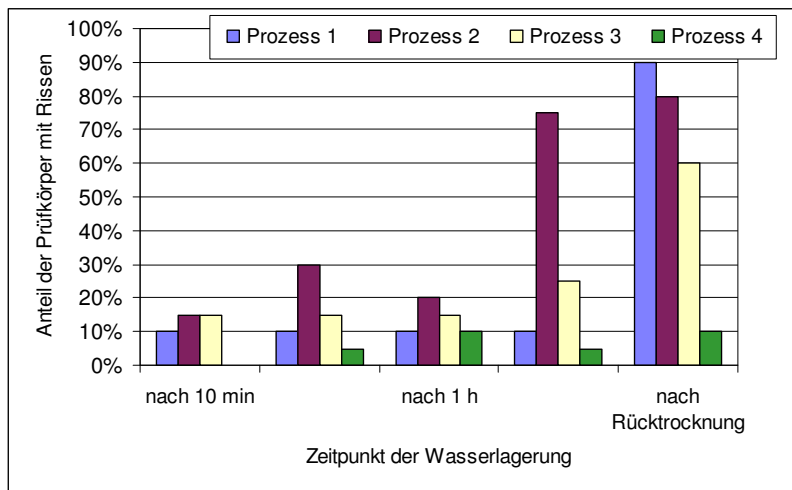


Abbildung 68: Vergleich der Wasserlagerung der Prozesse 1-4

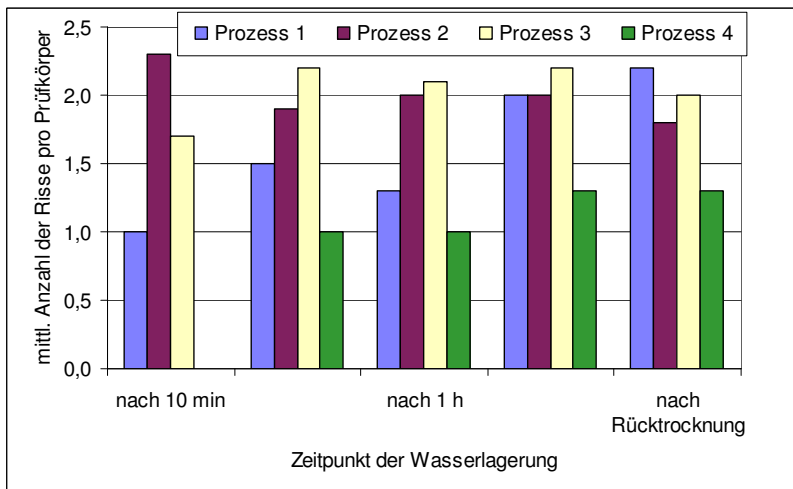
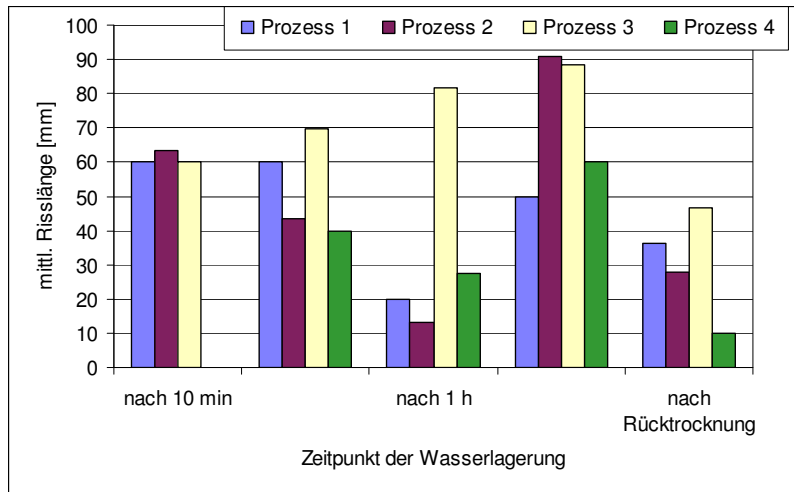


Abbildung 69: Vergleich der Wasserlagerung der Prozesse 1-4



**Abbildung 70: Vergleich der Wasserlagerung der Prozesse 1-4**

Aufgrund der hohen Anzahl an Innenrissen bei der Heißdampftrocknung, wird für die weitere Melaminbehandlung ein Trocknungsprozess nach Prozess 2 (ähnlich der konventionellen Holz Trocknung) gewählt. Die Temperatur bleibt hierbei unter 100 °C.

## 10.8 Prozess 5

Nachdem mit der konventionellen Holz Trocknung eine annähernd optimale Prozessführung gefunden wurde, wird für die Untersuchungen der mit Melamin behandelten Prüfkörper aus Prozess 5 ein anderer Schwerpunkt gelegt. Das behandelte Holz soll nun auf andere Eigenschaften hin untersucht werden. Neben der Fixierung und den untersuchten Festigkeitseigenschaften, wird die Dimensionsstabilität (ASE = Anti- Swell- Efficiency) und die Dauerhaftigkeit gegenüber holzabbauenden Pilze untersucht.

### 10.8.1 Prozessverlauf

Für die Durchführung des 5. Prozesses wird eine konventionelle Trocknung bei maximal 90 °C durchgeführt (Abbildung 71). Die Dauer des Trocknungsprozesses

beläuft sich auf ca. 8 Tage. Durch diese Prozessführung unter 100 °C können trocknungsbedingte Innenrisse im Holz verhindert werden.

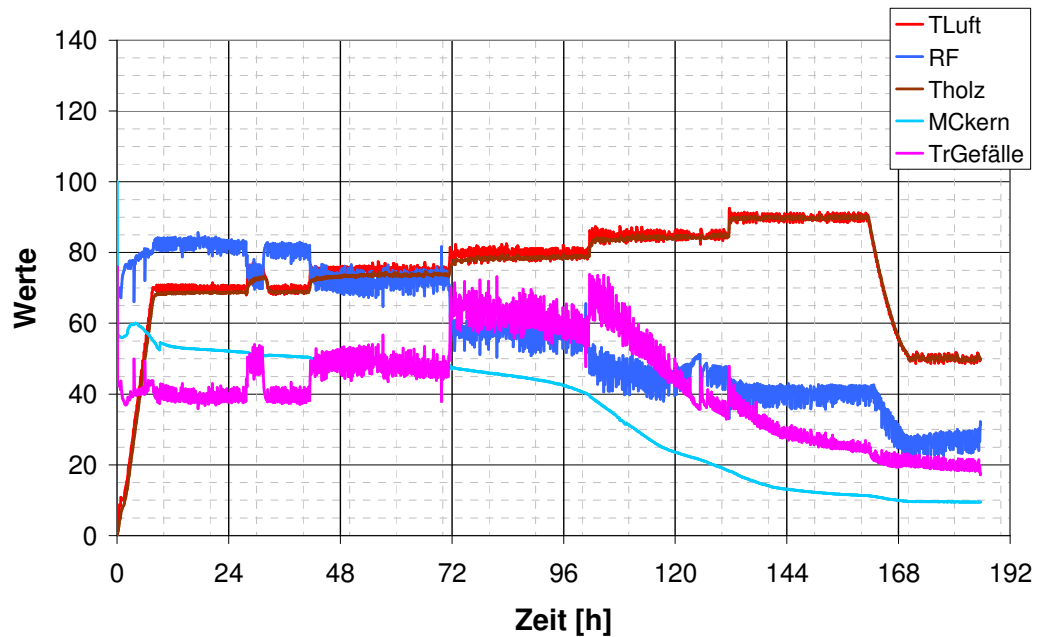


Abbildung 71: Trocknungsprozess von Prozess 5

### 10.8.2 Bestimmung von N-Gehalt

Die Stickstoff Bestimmung zeigt, dass das Melamin im Holz fixiert ist. Bedeutende Unterschiede zwischen der Fixierung im äußeren Brettbereich und im inneren Brettbereich sind nicht zu erkennen (Tabelle 41).

**Tabelle 41: Stickstoffgehalt [%] und Fixierung [%] unterteilt in Innen- und Außenbereiche des Brettes**

	N-Gehalt [%] vor Auswaschung		N-Gehalt [%] nach Auswaschung		Fixierung [%]	
	Mittelwert	Standard- abweichung	Mittelwert	Standard- abweichung	Mittelwert	Standard- abweichung
Innen	4,82	0,57	3,02	0,55	62,34	0,05
außen	5,53	0,55	3,45	0,48	62,23	0,04

### 10.8.3 Festigkeitseigenschaften

In Tabelle 42 sind die Werte des E-Moduls und der Biegefestigkeit dargestellt. Die Werte spiegeln die Ergebnisse der Festigkeiten der anderen Prozesse wieder. Das E-Modul und die Biegefestigkeit sind im Vergleich zu den unbehandelten Kontrollen leicht gestiegen.

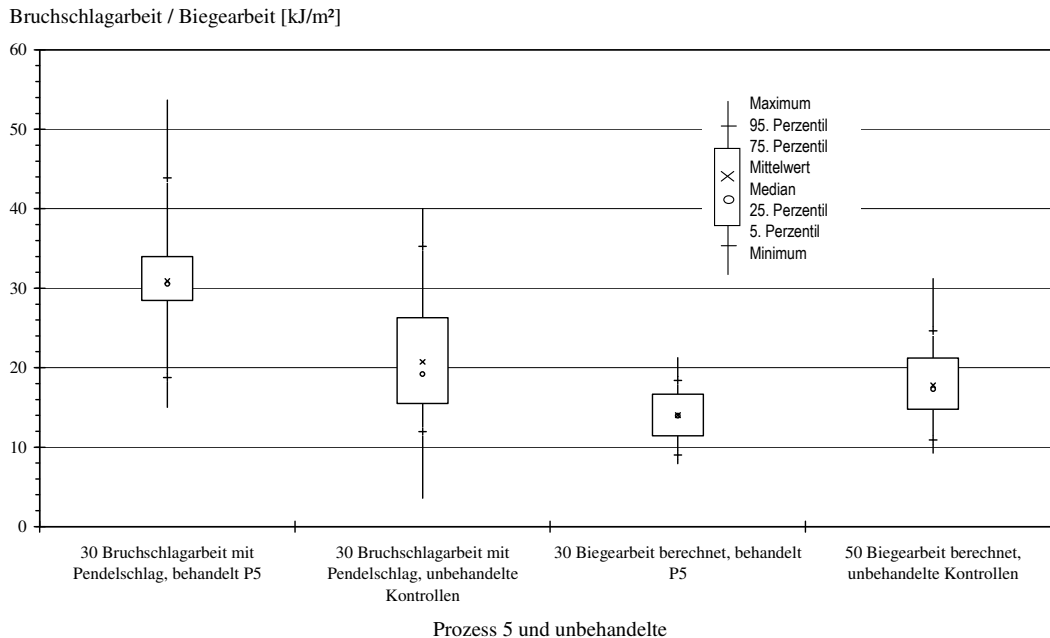
**Tabelle 42: Festigkeitseigenschaften von Prüfkörpern aus Prozess 5 und unbehandelten Kontrollen**

	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]		Biegefestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	
	Mittelwert	Standard- abweichung	Mittelwert	Standard- abweichung
Prozess5	12183,33	1518,41	114,81	15,04
Unbe- handelt	10430,62	2928,64	95,55	17,92

Neben der berechneten Biegearbeit wird mit Prüfkörpern von Prozess 5 zudem die Bruchschlagarbeit mittels Pendelschlagwerk gemessen (Tabelle 43). Die Ergebnisse zeigen bei der berechneten Biegearbeit eine leichte Abnahme der Festigkeit, bei der gemessenen Bruchschlagarbeit hingegen ist eine deutliche Zunahme der Festigkeit zu messen. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 72 graphisch dargestellt.

**Tabelle 43: Festigkeitseigenschaften berechnete Biegearbeit [kJ/m<sup>2</sup>] und gemessene Bruchschlagarbeit [kJ/m<sup>2</sup>]**

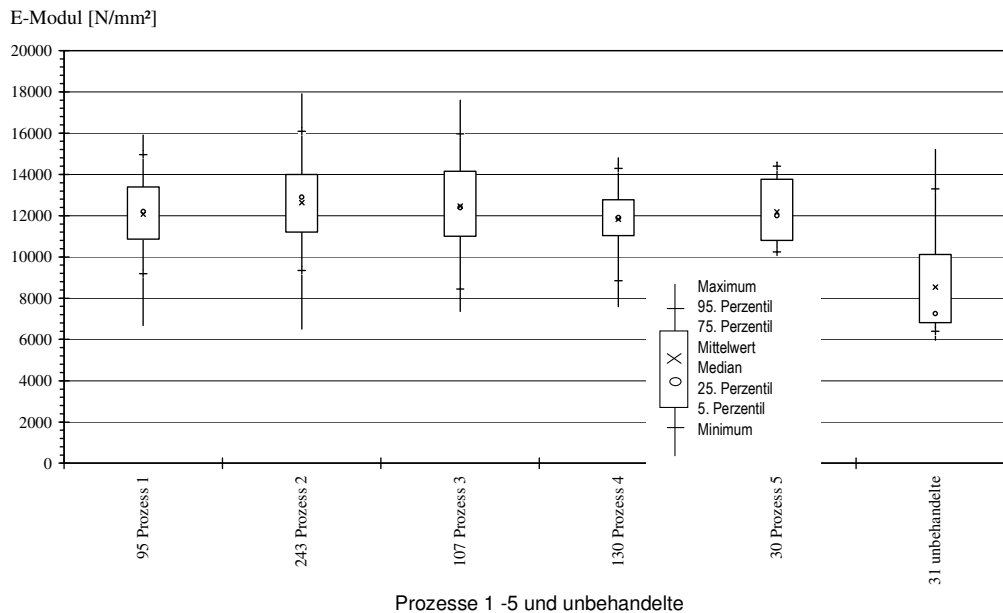
	Bruchschlagarbeit		Biegearbeit	
	[kJ/m <sup>2</sup> ]		[kJ/m <sup>2</sup> ]	
	Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung
Prozess5	30,89	7,96	14,02	3,21
Unbe-handelt	20,74	8,03	17,56	4,15



**Abbildung 72: Vergleich der gemessenen Bruchschlagarbeit [kJ/m<sup>2</sup>] und der berechneten Biegearbeit [kJ/m<sup>2</sup>] gemessen an Prüfkörpern von Prozess 5**

#### 10.8.4 Vergleich der Festigkeiten Prozess 1 bis Prozess 5

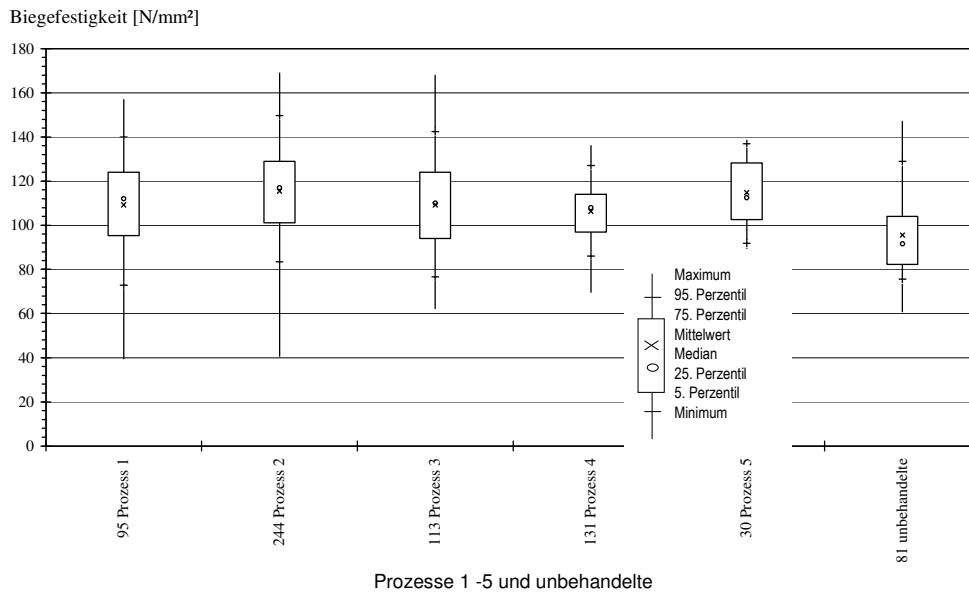
In diesem Kapitel werden die Festigkeitseigenschaften sowohl der Prozesse 1, 2, 3, 4 und 5, als auch von unbehandelten Kontrollprüfkörpern dargestellt. Um die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen besser miteinander vergleichen zu können, werden sie nebeneinander dargestellt. Die E-Modulwerte in Abbildung 73 zeigen deutlich, dass es bei allen 5 Prozessen der Melaminbehandlung zu keiner Verminderung der elastischen Eigenschaften des Holzes kommt. Betrachtet man die Mittel- und Medianwerte kann man von einer leichten Erhöhung des E-Moduls ausgehen.



**Abbildung 73: E-Modul [N/mm<sup>2</sup>] der Prüfkörper aus den Prozessen 1 bis 5 und von unbehandelten Kontrollen, dargestellt ist auch die Anzahl der untersuchten Prüfkörper**

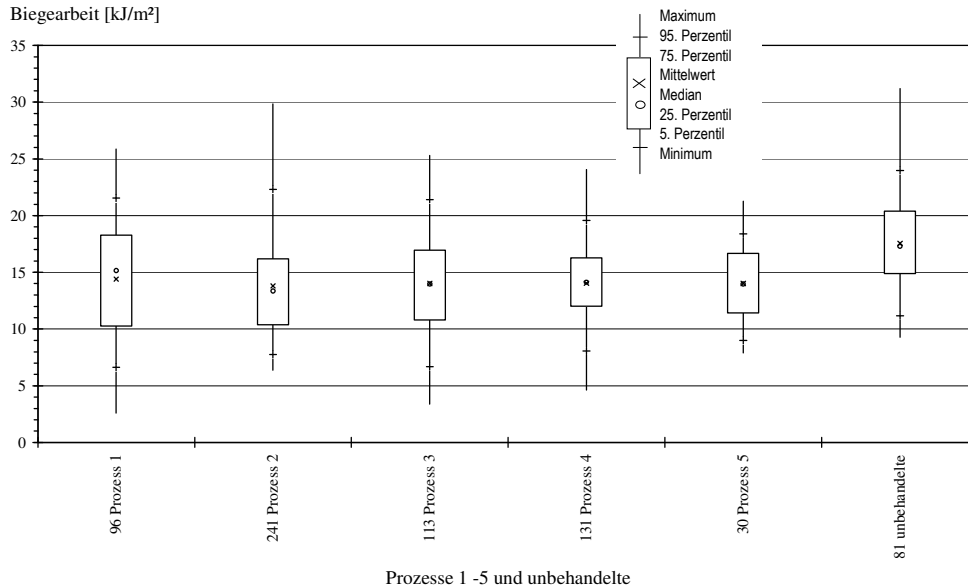
Die Biegefestigkeit des Holzes der Behandlungsprozesse 1 bis 5 zeigt ebenfalls keine Reduzierung der Festigkeiten (Abbildung 74). Auch hier ist, nach Überprüfung der Signifikanz, von einer leichten Erhöhung der Biegefestigkeit auszugehen.





**Abbildung 74: Biegefestigkeit [N/mm<sup>2</sup>] der Prüfkörper aus den Prozessen 1 bis 5 und von unbehandelten Kontrollen, dargestellt ist auch die Anzahl der untersuchten Prüfkörper**

Besonders wichtig für den späteren Einsatz des mit Melamin behandelten Holzes ist die Biegearbeit. Bei Schlagartigen Beanspruchungen, wie sie speziell im Fenster- und Türenbereich auftreten können, darf das behandelte Holz nicht zu spröde sein, um der Beanspruchung standhalten zu können. Die Biegearbeit, dargestellt in Abbildung 75, ist bei den behandelten Prüfkörpern im Vergleich zu den unbehandelten Kontrollen nur minimal reduziert.



**Abbildung 75: Biegearbeit [kJ/m<sup>2</sup>] der Prüfkörper aus den Prozessen 1 bis 5 und von unbehandelten Kontrollen, dargestellt ist auch die Anzahl der untersuchten Prüfkörper**

### 10.8.5 Dimensionsstabilität

In Abbildung 76 ist die Dimensionsstabilität (Anti-Swell-Efficiency = ASE) des behandelten Holzes dargestellt. Die Prüfkörper werden in 10 Zyklen mit Wasser imprägniert und sowohl die Masseveränderung als auch die Dimensionsänderung werden gemessen. Ein Teil der Prüfkörper wird vor dem Versuch einer Auswaschung nach EN 84 unterzogen, um ein eventuellen Auswaschen des Melamins auszuschließen. Wie deutlich in der Graphik zu sehen ist, unterscheiden sich die ASE-Werte der ausgewaschenen und der nicht ausgewaschenen Prüfkörper nicht von einander. Die ASE-Werte liegen über 20 % und weisen damit für eine 10 %ige Melaminkonzentration eine annehmbare Verbesserung der Dimensionsstabilität auf.

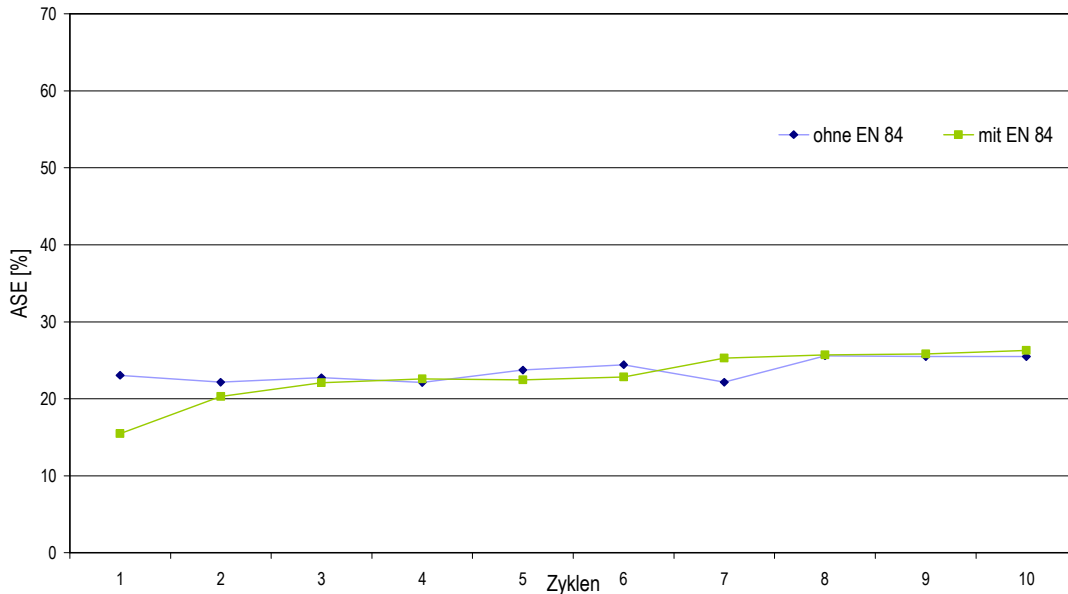


Abbildung 76: Anti-Swell-Efficiency (ASE) des behandelten Holzes aus Prozess 5, Vergleich der ASE mit Auswaschung (mit EN 84) und ohne Auswaschung (ohne EN 84)

### 10.8.6 Dauerhaftigkeit gegen holzabbauende Pilze

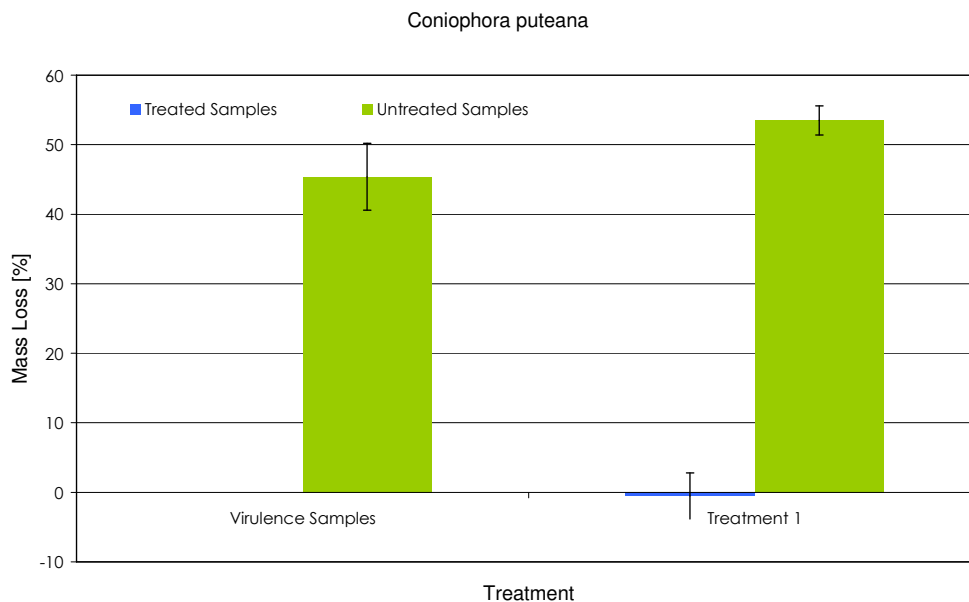
Im Folgenden wird die Dauerhaftigkeit des Melamins behandelten Holzes untersucht. Es werden 2 Pilztests angesetzt. Zum einen werden die behandelten Prüfkörper vor dem Einbau in die Prüfgefäße einer Auswaschung nach EN 84 ausgesetzt, und zum anderen werden behandelte Prüfkörper ohne Auswaschung auf ihre Dauerhaftigkeit untersucht.

Es wird ein Pilzscreening mit kleinen Prüfkörpern durchgeführt. Dies hat, aufgrund der reduzierten Prüfkörpergrößen, den Vorteil einen aussagekräftigen Masseabbau bereits nach 8 Wochen zu erreichen. Prüfpilze sind: *Coniophora puteana* (Braunfäule), *Trametes versicolor* (Weißfäule) und *Gloeophyllum trabeum* (Balkenblättling). In den nachstehenden Abbildungen sind die Ergebnisse des Pilztests ohne vorhergehende Auswaschung nach EN 84 dargestellt. Der Pilzversuch mit EN 84 ist bisher noch nicht abgeschlossen und Ergebnisse liegen noch nicht vor.



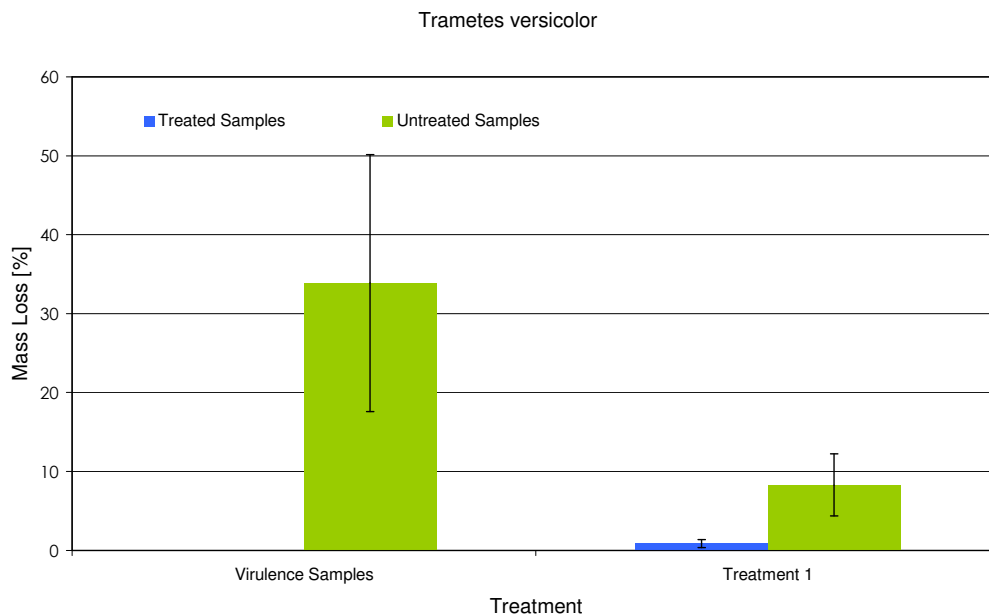
**Abbildung 77: eingebaute Prüfkörper auf Prüfpilz; jeweils 2 behandelte und 2 unbehandelte Kontrollen in einem Prüfgefäß**

Wie in Abbildung 78 zu sehen ist, zeigen die mit Melamin behandelten Prüfkörper eine deutliche erhöhte Dauerhaftigkeit gegenüber dem Prüfpilz *Coniophora puteana*. Während die Melaminprüfkörper keinen Masseverlust aufweisen, ist der Masseverlust der unbehandelten Kontrollen mit einem Wert von bis zu 50 % sehr deutlich.



**Abbildung 78: Masseverlust der behandelten Prüfkörper aus Prozess 5 und der unbehandelten Kontrollen durch *Coniophora puteana*; Versuchsdauer 8 Wochen**

Die Ergebnisse der Prüfkörper die mit *Trametes versicolor* beimpft waren zeigen lediglich eine Tendenz der Dauerhaftigkeit der Melaminprüfkörper. Nach 8 Wochen hat an den behandelten Prüfkörpern kein Pilzabbau statt gefunden. Diese Ergebnisse sind jedoch nur tendenziell zu verwerten, da auch der Masseverlust der unbehandelten Kontrollen unter 10 % liegt. Ein Masseverlust von über 20 % ist an den unbehandelten Prüfkörpern nötig, um einen Pilzversuch als Aussagekräftig werten zu können.



**Abbildung 79: Masseverlust der behandelten Prüfkörper aus Prozess 5 und der unbehandelten Kontrollen durch *Trametes versicolor*; Holzart der mitgeführten Virulenzen ist Buche, Versuchsdauer 8 Wochen**

Die Ergebnisse der Prüfkörper des dritten Prüfpilz, *Gloeophyllum trabeum*, sind nicht auswertbar. Dieser Pilztest hat nicht funktioniert, denn selbst bei den parallel mitgeführten Virulenzprüfkörpern, die zur Kontrolle der Pilzaktivität dienen, ist kein Masseverlust zu messen.

## 11 Implementierung bei Variotec

Ein Teil des Holzes der einzelnen Prozesse wurde von der Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte der Universität Göttingen untersucht. Das restliche behandelte Material wurde von der Firma Variotec GmbH & Co.KG zu einem Fenster Prototypen verarbeitet (Abbildung 80).

Bei diesem Fenster handelt es sich um ein Sandwichelement, bestehend aus 2 Schichten. Die Konstruktion gliedert sich in einen Außen- und einen Innenbereich. Für den äußeren Bereich, der später der Witterung ausgesetzt ist, wurde Melaminholz verwendet. Die Innenseite des Fensters besteht hingegen aus unbehandeltem Kiefernholz. Vorteile solcher Sandwich Konstruktionen, sind zum einen reduzierte Kosten. Das modifizierte Holz wird so kostenoptimiert eingesetzt.



**Abbildung 80: Fenster-Prototyp von Variotec, Rahmen aus Melaminmodifiziertem Kiefernholz**

## 12 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Projektabschnitt wird die Melaminmodifizierung als eine Alternative für die ursprünglich geplante Wachsbehandlung und die Holzvernetzung mit DMDHEU untersucht.

Für die Melaminmodifizierung von Holz ist eine Grundlagenforschung notwendig, um zum einen das Verfahren vom Labormaßstab zum Pilotanlagenmaßstab weiter zu entwickeln und zum anderen die Materialeigenschaften zu testen. Die Lösungsstabilität kann durch eine Einstellung des pH-Wertes auf pH 10 erreicht werden. Die Versuche zur Prozessoptimierung zeigen, dass die Aushärtung des Melamins bei einer konventionellen Holz Trocknung unter 100 °C funktioniert. Dieser Trocknungsprozess bei unter 100 °C ermöglicht für die Implementierung in einem KMU (Variotec), ein Curing des Holzes in einer konventionellen Trocknungsanlage.

Die untersuchten Materialeigenschaften zeigen deutlich, dass durch die Melaminbehandlung des Holzes die Dimensionsstabilität um über 20 % verbessert werden kann. Dieses reduzierte Quell- und Schwindverhalten des Holzes ist für die spätere Verwendung im Fensterbereich sehr wichtig. Die untersuchten Festigkeitseigenschaften zeigen keine Reduzierung im Vergleich zum unbehandelten Material. Im Gegenteil, die Elastizität und auch die Biegefestigkeit werden durch die Melaminbehandlung leicht erhöht. Die Biegearbeit, bzw. Bruchschlagarbeit, die speziell für die Anwendung mit dynamischen Belastungen wichtig ist, bleibt nach der Melaminbehandlung im Wesentlichen unverändert.

Nachdem erste Untersuchungen zur Durchführung der Melaminbehandlung durchgeführt wurden und Materialeigenschaften positive Ergebnisse zeigten, ist von einer grundsätzlichen Eignung von Melaminmodifiziertem Holz für den Bau von Holzfenstern auszugehen. Für eine erfolgreiche Implementierung in ein KMU (Variotec) sind jedoch weitere Untersuchungen im Rahmen einer Grundlagenforschung notwendig.

Der Verband der Fenster- und Fassadenhersteller (VFF) hat einen Entwurf einer Zulassung für modifizierte Hölzer im Fensterbau verfasst. Die Anforderungen dieser Zulassung (VFF Merkblatt, HO.06-4: 2007-12) werden zukünftig bindend sein, um gütegesicherte modifizierte Hölzern für den Einsatz im Fensterbau zu erlangen. Diese Anforderungen gelten für modifiziertes Holz aus einem etablierten Prozess. Sie sind somit nach der Implementierung des Behandlungsprozesses in dem KMU erneut zu erfüllen. Dennoch ist es sinnvoll bereits die weitere Grundlagenforschung entsprechend den Anforderungen der HO.06-4 durchzuführen, um bereits entsprechende Kennwerte zu erhalten. Notwendige Untersuchungen die für das weitere Vorgehen wichtig sind, sind zum Teil bereits an der Universität in Vorbereitung:

- Versuche zur Beschichtbarkeit,
- Versuche zur Verleimbarkeit,
- Emissionsmessungen,
- Messung der kapillare Wasseraufnahme
- Messung der Wasserdampfdiffusion

Aber auch der Bau weiterer Prototypen ist notwendig um den Einsatz des Melaminmodifizierten Holzes im Fensterbau näher zu untersuchen. Bis zu einer Investitionsentscheidung des KMU (Variotec) sind ebenfalls Untersuchungen durchzuführen, die speziell den Anlagenbau betreffen. Materialverträglichkeiten und die Lagerfähigkeit der Melaminlösung sind hier als Beispiel zu nennen.



## 13 Anhang

### 13.1 Beschichtungssysteme

Tabelle 44: Beschichtungssystem Primer/ sp. Polymerharz während 5 Bewitterungszyklen

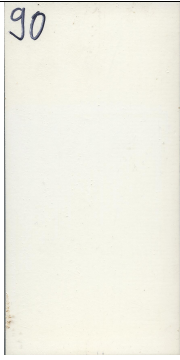
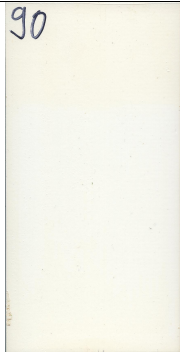
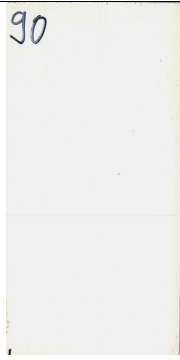



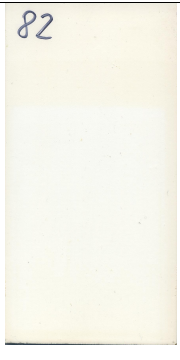

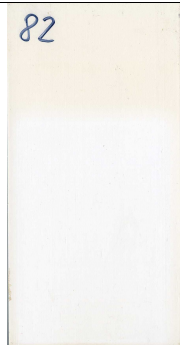
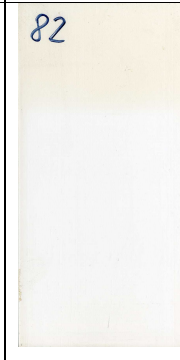
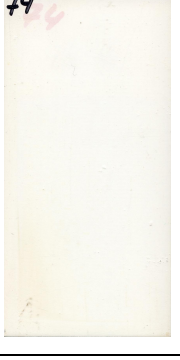




	1. Zyklus	2. Zyklus	3. Zyklus	4. Zyklus	5. Zyklus
Kontrolle					
DMDHEU					
Wachs					

Tabelle 45: Beschichtungssystem Mehrphasenpolymer während 5 Bewitterungszyklen





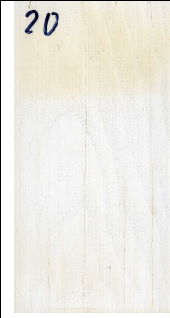
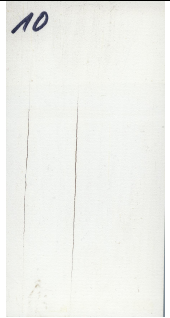









	1. Zyklus	2. Zyklus	3. Zyklus	4. Zyklus	5. Zyklus
Unbehandelte					
DMDHEU					
Wachs					

Tabelle 46: Beschichtungssystem Acrylat 1 während 5 Bewitterungszyklen

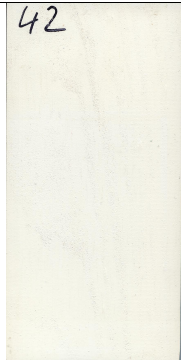
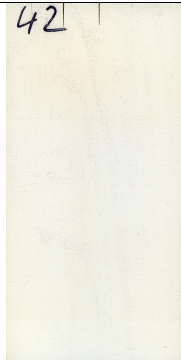


















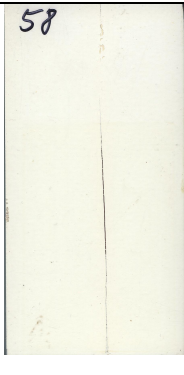
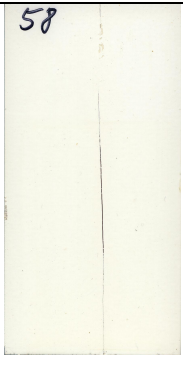

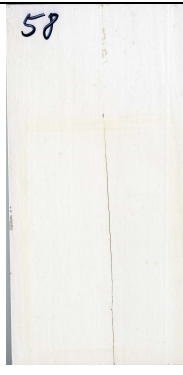
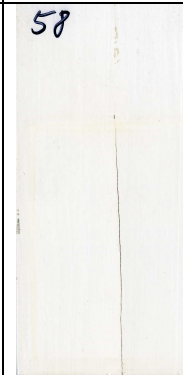

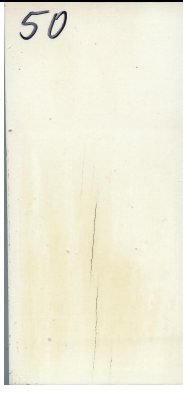



	1. Zyklus	2. Zyklus	3. Zyklus	4. Zyklus	5. Zyklus
Unbehandelte	42 	42 	42 	42 	42 
DMDHEU	34 	34 	34 	34 	34 
Wachs	25 	25 	25 	25 	25 

Tabelle 47: Beschichtungssystem Primer / Acrylat 2 während 5 Bewitterungszyklen

	1. Zyklus	2. Zyklus	3. Zyklus	4. Zyklus	5. Zyklus
Unbehandelte	65 	65 	65 	65 	65 
DMDHEU	58 	58 	58 	58 	58 
Wachs	50 	50 	50 	50 	50 

---

## 13.2 Präsentation der Firma Variotec